보안과제[ ] 일반과제[○] (제출용)

BSPN24013-008-12
NRF-2021M1A5A1075512
RS-2021-NR056060

(총괄) NRF-2021M1A5A1065407 / (세부) 2021M1A5A1075512
(위탁) NRF-2021M1A5A1075513 / 2021M1A5A1075514 / 2021M1A5A1075516 /
(1단계) (PN21013 / PN22013) / (2단계) (PN23013 / PN24013)

해양극지기초원천기술개발사업
(Brain Research Program)

(총괄) 북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발
(Circum-Arctic Environmental Changes: Monitoring, Assessment, Projection, and Adaptation Strategy Development)(CA-MAP)

(3세부과제) 북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해
(Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability)

2025. 11. 06.

한국해양과학기술원부설
극지연구소

과학기술정보통신부

제 출 문

과학기술정보통신부 장관 귀하

이 보고서를 “북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발“(총괄과제)의 (3세부) “북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해” 과제의 최종보고서(연구기간: 2021.04.27~2025.03.31)로 제출합니다.

2025년 11월 05일

주관연구기관명 : 한국해양과학기술원부설
극지연구소
주관(총괄)연구책임자 : 이방용(‘21.04~ ‘25.03)
3세부과제 연구기관명 : 극지연구소
3세부과제 연구책임자 : 남승일(‘21.04~ ‘25.03)
연 구 원 : 강승현,강정호,김다해,김정현,
“ : 배민지,손영주,안영규,이원상,
“ : 장광철,조영진,조은아,진 경,
“ : 한영철,황희진,홍상범
(이상 극지연구소; 퇴직 연구원 포함)
연 구 원 : 김도형,손승연,조주희,최경식
(이상 서울대학교)
1위탁연구기관명 : 포항공과대학교
위탁연구책임자 : 권세윤(‘21.04~ ‘25.03)
연 구 원 : 김영광,루시안,손은진,손희지,
“ : 양요한,이아영,이주현,이호인,
“ : 임승현,조문경,조예린,최윤영
(이상 포항공과대학교)
2위탁연구기관명 : 충남대학교
위탁연구책임자 : 홍성진(‘21.04~ ‘25.03)
연 구 원 : 곽지윤,박정욱,이주희,차지현
(이상 충남대학교)
3위탁연구기관명 : 인하대학교
위탁연구책임자 : 우승범(‘21.04~ ‘25.03)
연 구 원 : 김기환,김명석,김종욱,서지명,
“ : 송윤지,이혜민,임채욱,최재윤
(이상 인하대학교)

최종보고서

보안등급: 일반[√], 보안[ ]

중앙행정기관명	과학기술정보통신부	사업명	사업명	거대과학연구개발사업
전문기관명(해당 시 작성)	한국연구재단		내역사업명 (해당 시 작성)	해양극지기초원천기술개발사업
공고번호		총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		
		연구개발과제번호		2021M1A5A1065407

기술분류								
국가과학기술 표준분류	ND1103	30 %	ND1106	30 %	ND1104/1102/1199	40 %		
부처기술분류 (해당 시 작성)	G13401	40 %	G13405	20 %	G20102/20107/13599	40 %		

총괄연구개발명	국문	북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발
	영문	Circum-Arctic Environmental Changes: Monitoring, Assessment, Projection, and Adaptation Strategy Development (CA-MAP)
연구개발과제명 (3세부과제명)	국문	북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해
	영문	Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability
1위탁과제명	국문	안정동위원소 기반 스발바르 지역 수은 유입원 및 거동 연구
	영문	Isotopic study of mercury sources and transport pathways in Svalbard
2위탁과제명	국문	북극 스발바르 지역 내 인위적 유기독성물질의 분포 및 거동 특성
	영문	Distribution and fate of anthropogenic persistent toxic substances in Arctic Svalbard
3위탁과제명	국문	스발바르 연안 해역에서 해류 변동에 따른 물질 순환 기작에 관한 수치모델 연구
	영문	A modeling study on mechanisms of material circulation due to oceanic current variations in Svalbard coast

주관연구개발기관	기관명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	사업자등록번호	134-82-06870
	주소	(우)21990, 인천시 연수구 송도미래로 26	법인등록번호	131471-0018173
연구책임자	성명	남승일	직위	책임급
	연락처 직장전화	032-760-5362	휴대전화	010-6641-5082
	연락처 전자우편	sinam@kopri.re.kr	국가연구자번호	10078897

연구개발기간	전체	2021. 04. 27 - 2025. 03. 31(4년 개월)
	단계 1단계	2021. 04. 27 - 2022. 12. 31(1년 9개월)
	단계 2단계	2023. 01. 01 - 2025. 03. 31(2년 3개월)

연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
					지방자치단체		기타( )					
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계		4,460,000							4,460,000		4,460,000	
1단계	1년차	950,000							950,000		950,000	
	2년차	1,250,000							1,250,000		1,250,000	
2단계	1년차	1,500,000							1,500,000		1,500,000	
	2년차	760,000							760,000		760,000	

극지기초원천기술개발사업 최종보고서
(제출용, 세부과제용)

① 부처사업명(대)	거대과학연구개발사업		④ 보안등급(보안, 일반)	일반
② 사업명(중)	해양극지기초원천기술개발		⑤ 과제성격(기초, 응용, 개발)	기초
③ 세부사업명(소)	해양극지기초원천기술개발			
⑥ 총괄과제명	북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발			
⑦ 세부과제명	국 문	북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해		
	영 문	Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability		
⑧ 주관연구기관명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소		⑨ 사업자 등록번호	134-82-06870
⑩ 위탁과제기관명	포항공과대학교, 충남대학교, 인하대학교			
⑪ 주관연구책임자	성 명	남승일	국가연구자번호	10078897
	전 공	고해양학	직급(직위)	책임연구원
	소속부서	빙하환경연구본부	전자우편	sinam@kopri.re.kr
	전 화	032-760-5362	휴대전화	010-6641-5082

⑫ 연구개발비 현황(단위: 천원)

년 도	정부 출연금 (A)	기업체부담금			정부외출연금 (B)	합계 G=(A+B+E)	상대국 부담금 (F)
		현금 (C)	현물 (D)	소계 E=(C+D)			
1차년도	950,000					950,000	
2차년도	1,250,000					1,250,000	
3차년도	1,500,000					1,500,000	
4차년도	760,000					760,000	
합계	4,460,000			0		4,460,000	

⑬ 총연구기간	2021. 04. 27. - 2025.03.31. (48개월)							
⑭ 다년도연구기간	2023. 01. 01. - 2025.03.31. (27개월)							
⑮ 당해연도연구기간	2024. 01. 01. - 2025.03.31. (15개월)							
⑯ 참여기업 수	중소기업		중견기업		대기업		계	
⑰ 국제공동연구	국가명		상대국 연구기관수		상대국 연구개발비		상대국연구책임자수	
	노르웨이, 독일		2				2	
⑱ 실무담당자	성 명	임민호	휴대전화	010-8861-4027	전자우편	mhy8861@kopri.re.kr		

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 연구개발과제 중단, 협약 해약, 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2025년 11월 05일

주관연구책임자 : 남승일 (직인생략)

주관연구기관장 : 신형철 (직인생략)

과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀하

○ 공동연구개발기관 등 현황

공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관	노르웨이 UiT	M. Forwick	교수		Forwick. Matthieas @UIT.NO	스발바르 공동탐사	대학
	노르웨이 NGU	J. Knies	책임연구원		Jochen. Knies@ NGU.NO	스발바르 공동탐사	연구소
위탁연구개발기관	포항공과 대학교	권세윤	부교수	010-9698-1669	saeyunk@postech.ac.kr	스발바르 수은 거동 연구	대학
	충남대학교	홍성진	부교수	010-9254-9048	hongseongjin@gmail.com	유기독성 물질 거동 연구	대학
	인하대학교	우승범	교수	010-9488-4633	sbwoo@ inha.ac.kr	스발바르 물질순환 기작연구	대학
연구개발기관 외 기관							

KOPRI 극지연구소

〈 요 약 문 〉

<table>
<tr><td>연구개발 목표
(500자 내외)</td><td colspan="4">○ 스발바르 지역 현재 기후환경변화 모니터링 및 과거 기록복원을 통한,
1) 기후변화와 북극 스발바르 지역 환경변화의 연관성 규명
2) 인간 활동 간섭이 북극 스발바르 지역 환경변화에 미친 영향력 이해
○ 기후변화에 따른 스발바르 지역 오염물질 거동 파악 및 영향력 진단
○ 기후변화에 따른 스발바르 수괴 순환과 물질 거동 기작 이해</td></tr>
<tr><td>연구개발 내용
(1000자 내외)</td><td colspan="4">○ 국제공동탐사 기반 천부지층, 빙하영향 해저지형 자료 및 퇴적물 코어 획득
○ 환경복원 적용 가능한 다중 프록시 개발, 검증 및 적용
○ 홀로세 퇴적물의 다중 프록시 분석을 통한 자연적 기후변화에 따른 스발바르 환경변화 이해
○ 인류세 동안 쌓인 퇴적물 내 다중 프록시 분석을 통한 인간 활동 간섭에 따른 스발바르 환경변화 이해
○ 스발바르 지역 내 인위적 유기독성물질의 다매체 분포 및 거동 특성 규명
○ 스발바르 지역 현재 및 과거 수은 유입원 및 거동 추적
○ 스발바르 지역 해류 변동에 따른 물질 순환 기작 수치모델링 기술 개발</td></tr>
<tr><td>활용계획 및
기대효과
(500자 내외)
(응용분야 및
활용범위 포함)</td><td colspan="4">○ 스발바르 환경변화 주요 원인에 대한 과학적 자료제공을 통한 모델링 예측고도화
○ 극지환경 다매체 시료 내 다중프록시 분석 기술 확보에 따른 극지역 환경변화 연구성과 제고 및 활성화
○ 북극 연안 물질순환 기작 파악을 위한 수치모델링 기술 제공
○ 미래 북극권 오염 물질 거동 및 영향 파악 기반 구축
○ 극지유해물질 관련 데이터베이스 구축을 통한 극지 오염 저감 정책에 대한 기초자료 제공
○ 극지 수은 분석 자료 제공을 통한 UN 국제수은협약 역할 기여</td></tr>
<tr><td rowspan="2">국문핵심어
(8개)</td><td>북극 스발바르</td><td>한-노 국제공동탐사</td><td>다중 프록시</td><td>인류 영향력</td></tr>
<tr><td>환경변화</td><td>수은 동위원소</td><td>지속성유기독성물질</td><td>물질 순환</td></tr>
<tr><td rowspan="2">영문핵심어
(8개)</td><td>Arctic Svalbard</td><td>Korea-Norway joint expedition</td><td>Multi-proxies</td><td>Human influence</td></tr>
<tr><td>Environmental changes</td><td>Mercury isotopes</td><td>Persistent toxic substances</td><td>Material cycle</td></tr>
</table>

KOPRI 극지연구소

〈 연구 분야 〉

코드구분	중심분야		관련분야1		관련분야2		관련분야3		관련분야4	
	코드	비중	코드	비중	코드	비중	코드	비중	코드	비중
국가과학기술표준분류	ND1107	50 %	ND1103	20 %	ND1199	20 %	ND0603	10 %		%
국가과학기술표준분류 (적용분야)	X07	100 %		%		%		%		%
과학기술 분야분류	G13599	35 %	G13405	25 %	G13199	15 %	G20299	15 %	G50306	10 %
6T 기술분류	050413	40 %	050411	20 %	050412	20 %	020113	10 %	020114	10 %
NTRM 분류	B030308	80 %	B060601	20 %		%		%		%
원천기술 개발분야	0631	40 %	0632	30 %	0752	10 %	0639	10 %	0413	10 %

〈 보안 등급의 분류 및 결정사유 〉

보안 등급 분류 (선택)	보안	일반
	N	Y
결정 사유	연구책임자 의견	연구기관 자체 검토결과
	보안과제 해당없음	보안과제 해당없음

KOPRI 극지연구소

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발 목표 및 평가항목별 성과 ·····1
1. 연구개발 목표 ·····2
2. 평가항목별 성과 ·····2
3. 목표 미달 시 원인 분석 ·····12
4. 연구개발 목표 및 주요내용 변경사항 ·····13
5. 선정/단계/연차점검의견 ·····16

제2장. 추진내용 · 연구결과 및 추진일정 실적 ·····21
1. 추진내용 · 연구결과 ·····22
2. 목표 달성 수준 및 추진일정 실적 ·····412

제3장. 연구 개발 결과의 활용 방안 ·····435
1. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여정도 ·····436
2. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ·····443
3. 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항 ·····446

제4장. 당초 연구계획 대비 주요 변경사항 ·····447
별첨자료 (참고 문헌) ·····451
첨부1. 연구개발 목표의 달성도 증빙 ·····469
첨부2. 연구개발결과 활용계획서 ·····553
첨부3. 자체평가의견서 ·····579
첨부4. [해당 시] 연구개발성과 공개제한 요청사유서 ·····584
첨부5. [해당 시] 청년 의무채용 관련 실적 ·····584
첨부6. [해당 시] 참여기업 의견서 ·····584
첨부7. 평가의견에 대한 수정 · 보완 대비표 ·····584

KOPRI 극지연구소

제 1 장
연구개발 목표 및 평가항목별 성과

KOPRI
극지연구소

1. 연구개발 목표

최종목표	o 기후변화에 따른 북극 스발바르 과거와 현재 환경변화 및 영향 진단
세부목표	1. 스발바르 과거 및 현재 기후환경변화 이해 2. 기후변화에 따른 스발바르 오염물질 거동 파악 및 영향력 진단 3. 기후변화에 따른 스발바르 수괴 순환과 물질 거동 기작 이해
연차별목표	o 1차년도 : 탐사자료 및 시료 확보, 기초 자료 분석 및 연구 인프라 구축 o 2차년도 : 자연시료 확보, 환경 프록시 개발/검증 및 저해상도 프록시 자료 분석 o 3차년도 : 고해상도 홀로세 기후환경변화 복원을 통한 자연적 기후변화에 따른 북극 스발바르 지역 환경변화 패턴 규명 o 4차년도(최종) : 고해상도 인류세 환경변화 복원을 통한 인간 활동 간섭에 따른 스발바르 환경변화 이해

2. 평가항목별 성과

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약	달성도 (%)	관련증빙
(정성) 한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사 및 시료 획득 (3-4차례)	30	1,2,3	1차년도 (1단계)	▪ RV Helmer Hanssen 국제공동탐사, 지형/지층자료 획득, 스발바르 표층퇴적물 및 시추코어 3점 확보#코로나 미진정시, UiT 및 NGU 협업 코어 퇴적물 부시료 확보	▪ 코로나 미진정으로 노르웨이 NGU 협업 코어 퇴적물 활용 ✓ KH-17-GPC01 코어 주상도 제작 ✓ KH-17-GPC01 일부 코어 64점 부시료 확보 및 입도분석 수행	100	1. 극지연구소와 노르웨이 지질조사소 연구책임자 간의 협력연구 협약서 (증빙 1) 2. KH-17-GPC01 퇴적 코어 주상도 및 입도분석 결과 (증빙 2)
			2차년도 (1단계)	▪ RV Helmer Hanssen 한-노 국제공동탐사, 지형/지층자료 획득, 스발바르 시추코어 5점 확보	▪ 2022년 한-노 스발바르 피오르드 국제공동탐사 수행(7-8월) ✓ 힌로펜 해협 해저지형/지층자료 획득 ✓ 이스피오르드, 콩스 피오르드 및 힌로펜 해협에서 멀티코어 13점 및 중력코어 6점 획득 ▪ NGU 협업 콩스피오르드 지역 기초자료 및 퇴적코어 부시료	100	3. 탐사보고서 및 확보한 퇴적코어 자료 (증빙 3-1) 4. KPDC 등록 증빙 자료 (증빙 3-2) 5. 천부 해저지층 탄성파자료 및 퇴적코어 이미지 (증빙 4-1, 4-2)

KOPRI 극지연구소

					확보(3월) ✓ 천부 해저지층 탄성파자료 확보(NGU제공) ✓ KH-17-GPC01 부시료 760점, KH-17-GC01 부시료 130점 및 KH-14-GPC02 부시료 100점 확보		
			3차년도 (2단계)	▪ *RV* Helmer Hanssen 한-노 국제공동탐사, 지형 및 지층자료 획득, 스발바르 시추 코어 6점 확보 및 딕슨 피오르드 지형 변동 현장조사	▪ 2023년 한-노 스발바르 국제공동탐사 수행(7월) ▪ 서스피츠베르겐 서부의 10개 피오르드 대상 천부지층탄성파 자료 및 시추 코어 퇴적물 획득 ▪ 10개 피오르드 대상 CTD 34정점(해수 채취: 48개, 16정점 대상), 멀티코어 16정점(79개 퇴적물 코어 확보, 부시료: 2000개 채취) ▪ 7개 피오르드 대상 중력 코어 10점 확보 ▪ 각 피오르드 전 구간 대상 ADCP 측정(연안 해류 모델 구축용) ▪ 2023년 딕슨 피오르드 고해상도 공간자료 확보(상·하류 총 6개 지역) ▪ 딕슨피오르드 빙하천과 조수로 퇴적물 채취(총 34점)	100	6. 2023년 한-노 국제공동탐사 보고서 (증빙 5) 7. 2023년 딕슨 피오르드 현장탐사 결과 (증빙 6-1, 6-2) 8. 3차년도 탐사 및 현장조사 관련 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.42-55] 항목 참조
			4차년도 (2단계)	▪ 기확보된 중력 시추 코어 부시료 채취 (UiT/NGU 방문) ▪ 퇴적물 색상, 구조, 물성, 지화학 조성 등 중력 시추 코어의 기초 암층서 분석 수행(UiT/NGU 방문)	▪ UiT 방문 2022년-2023년 한-노 스발바르 국제공동탐사 중력시추코어 기초 암층서 분석 수행 ▪ 다산기지 방문 및 대기중 입자상 수은 및 스노우	100	9. 기확보 코어 분석 관련 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.56-59] 항목 참조

					팩 시료 확보(2024년 3월)		
(정성/정량) 기후환경 복원 프록시 개발 및 적용	20	1	1차년도 (1단계)	▪ 환경복원 적용 가능한 프록시 개발 및 분석연구 인프라 구축	▪ 햄버그북타/리틀스토르피오르드 퇴적코어(3점) 부시료의 유기질소분석(코어 901(10점), 903(19점), 905(25점) – 총 54점) 및 XRF 분석 수행 ▪ 비데피오르드 퇴적코어 부시료 입도 분포 자료(410점)의 end-member 모델링을 통한 퇴적 환경 복원 ▪ 스발바르 표층퇴적물 XRD 광물분석(61점) 수행 ▪ 스발바르 고환경 복원 연구를 위한 유기분자생체지표(HBIs, sterols) 분석 인프라 구축 ▪ 비데피오르드 코어(3점) 퇴적물 내 유기분자생체지표(HBIs, sterols) 분석을 통한 해빙 프록시 자료 확보	100	10. 2021년 국내학술대회 초록(구두) 및 국제학술대회 발표 포스터 (증빙 7-1, 7-2)) 11. 2021년 국내학술대회 초록(구두) (증빙 8) 12. 표층퇴적물 QXRD 분석 결과서 (증빙 9) 13. 2021년 국내학술대회 발표 포스터 (증빙 10)
			2차년도 (1단계)	▪ 개발된 기후 환경복원 프록시 활용 저해상도 분석(최소 3건 이상 적용) ▪ 기초 및 문헌자료 대비를 통한 개발 프록시 검증	▪ 비데피오르드 퇴적코어(6점) 부시료(346 점) 입도 분포 자료를 활용한 end-member 모델링 수행 ▪ 기후환경복원 프록시 개발 및 검증 ✓ aDNA 분석을 통한 과거 환경복원 가능성 타진(9점) ✓ 과거 수온 복원을 위한 알케논 분석 인프라 구축 ✓ 육상기원 유기물 규명 연구를 위한 리그닌 페놀 분석 인프라 구축	100	14. 2022년 국제학술대회 발표 포스터 및 Early Career Poster Award 수상 증빙 자료 (증빙 11) 15. 알케논 및 리그닌 페놀 분석 인프라 구축 (증빙 12) 16. 국내 및 국제 학술대회 발표 포스터 (증빙 13-1, 13-2) 17. 콩스피오르드 퇴적코어 유기분자생체지표(HBIs, sterols, 알케논

KOPRI 극지연구소

					▪ 콩스피오르드 KH-17-GPC01 퇴적코어 유기분자생체지표 (HBIs (60점), sterols(60점), 알케논(60점) 및 리그닌 페놀(47점)) 분석 수행 ▪ 스발바르 북부 코어퇴적물 내 XRD 광물조성분석 수행(4점의 퇴적코어 대상 부시료 334점) 및 기초 문헌자료와의 대비를 통한 프록시 검증		및 리그닌 페놀) 분석 결과 (증빙 14) 18. 2022년 국내학술대회 발표 포스터 (증빙 15)
			3차년도 (2단계)	▪ 홀로세 자연 시료 대상 검증된 기후환경 복원 프록시 고해상도 분석(최소 2건 이상 적용)	▪ 콩스피오르드 퇴적코어 KH-17-GPC01 부시료(345점) 입도 end-member 모델링 수행 및 해석 ▪ 비데피오르드 퇴적코어(1점) 희토류 농도 분석(29점) ▪ 벨준트 퇴적코어 퇴적코어(1점) XRD 광물분석(87점) 수행 및 결과 해석	100	19. 모델링, 희토류 및 광물 분석 결과 (증빙 16) 20. 벨준트 XRD 분석 결과 (증빙 17)
			4차년도 (2단계)	▪ 기후환경복원 프록시 고해상도 분석 (1건) ▪ 3차년도 결과 비교 및 스발바르 환경변화에 대한 학회 참여/발표 (1건)	▪ KH-17 연대 모델,EM 모델, Nd 동위원소, XRF 등 환경 프록시 분석 결과 및 환경 복원 ▪ Bellsund 시추 코어 및 SBP 자료 분석 및 환경 복원 ▪ 힌로펜 해협과 메가슬라이드지역 시추코어 분석 (입도, EM, XRF, X-radiography, 연대 분석을 위한 유공충 확보)	100	21. 네오디뮴 동위원소 분석 결과 (증빙 18) 22. 논문 게재(1건) (증빙 19) 23. IGC 국제학술대회 구두 발표 2건 (증빙 20-1, 20-2)
			1차년도 (1단계)	▪ 문헌조사 및 기초분석자료 기반	▪ Pristine 및 인간 활동 거점 지역	100	24. 시료 선정 및 기초분석

(정성/정량) 스발바르 환경변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 이해	20	1		pristine 환경 및 인간 활동거점 환경 영향 연구 지역 선정	선정 완료 ▪ 선정 지역 표층퇴적물에 대한 기초분석자료 획득(입도 분석(32점) 등)		최종보고서 내 [2. 연구결과 p.173-176] 항목 참조
			2차년도 (1단계)	▪ 자연시료 내 저해상도 프록시 분석을 통한 과거와 인류세 이후 현재 환경 모니터링 및 복원	▪ 햄버그북타/리틀 스토르피오르드 퇴적코어(3점) 및 천부지층 탄성파 층서대비 과거 13,000년 전 이후 빙하역사 및 퇴적환경변화 복원 ▪ 스발바르 북부 퇴적코어(4점) XRD 광물분석 자료를 활용한 스발바르 북부 빙하거동 복원	100	25. 햄버그북타 연구 논문 게재 1건 (증빙 21) 26. 국내 및 국제 학술 대회 발표 초록 및 포스터 (증빙 22-1, 22-2) 27. XRD 활용 스발바르 북부 연구 논문 투고 (증빙 23)
			3차년도 (2단계)	▪ 고해상도 다중 프록시 분석 기반 홀로세 스발바르 환경변화 정밀 복원 및 이해 (RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 2건)	▪ 철산화광물 함량 변화를 이용한 과거 빙하후퇴 속도 추적 기술개발 및 북극 빙하의 비가역적인 빠른 용융 가설 제시 ▪ 천부지층 퇴적물 기록 (탄성파 및 시추코어)을 이용한 빙하 기원 지형 형성 기작 및 시기 규명 ▪ 알케논 분석을 적용한 과거 스발바르 수온 복원 가능성 제시 ▪ 입도 end-member modelling을 적용한 비데 피오르드 과거 환경 변화 복원 ▪ 리그닌 분석을 이용한 스발바르 퇴적물 유기물 기원(source) 분류 및 상대적 기여도 분석	100	28. 논문게재(3건) (증빙 24-26) 29. 논문투고(2건) (증빙 27, 28) 30. 언론보도 (증빙 29, 30) 31. 국내·외 학회발표(4건) (증빙 31-34) 32. 리그닌 분석 최종보고서 내 [2. 연구결과 내 p.225-235] 항목 참조
			4차년도 (2단계)	▪ 인류세 자연 시료 대상 검증된 기후환경복원 프록시 고해상도 분석(최소 2건 이상 적용)	▪ 콩스피오르드 퇴적물 활용 유기물 기원 및 영향 파악 연구 (bulk parameter TOC, $^{13}C_{org}$, ^{14}C,	100	33. 탄소-질소함량, 안정 동위원소 비 및 방사성 동위원소, 유기분자생체지

KOPRI 극지연구소

				▪ 3차년도 결과와의 비교를 통한 스발바르 환경 변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 평가 (RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건)	N_{tot}, 입도, 유기 분자생체지표) ▪ 힌로펜해협, 이스피오르드, 콩스피오르드 저서성 유공충 분포 연구 ▪ 광물조성분포, REE 등 분석 기반 호른준드 복원 연구		표 분석 결과 및 국내학술발표 1건 (증빙 35-1~ 35-3) 34. 퇴적물 내 DNA 저서성 유공충 분석 결과 (증빙 36-1, 36-2) 35. 논문 게재(1건) (증빙 37)
(정성/정량) 유기·무기 오염물질 유입량 변화 추적 및 생태 영향력 평가 (위탁-1) 포항공대 (위탁-2) 충남대	20	2	1차년도 (1단계)	▪ 표층 퇴적물 내 유기독성물질 조성 분석을 통한 잠재적 오염원 제시(시료 > 30, 학회 발표 1건) ▪ 코어 퇴적물(3점 이상) 내 수은 농도 분석	▪ 스발바르에서 기 확보한 표층 퇴적물 시료 대상 유기독성 물질 조성 분석(41점) 수행 ▪ 스발바르 퇴적코어 4점 확보 및 퇴적코어 부시료(93점) 수은 농도 분석 수행 ▪ 스발바르 퇴적물 코어 시료의 수은 농도 및 안정 동위원소 분석 결과와 스발바르 지역 관련 문헌조사를 통한 SCIE 논문 게재 및 Supplementary Cover Art 선정	100	36. 2021년 Yellow Sea Ecosystem Symposium 발표 포스터 (증빙 38) 37. 수은 관련 논문 게재 1건 (증빙 39)
			2차년도 (1단계)	▪ 환경 다매체 시료 내 유기독성물질 농도 및 조성 분석을 통한 잠재적 오염원 및 오염경로 제시(시료 > 30 및 학회 발표 1건)# # 1차년도 탐사 연기로 인한 2차년도 분석 대상 코어퇴적물 미확보로(2차년도 동안 확보한 코어퇴적물은 현재 노르웨이 UiT 냉장시료 보관소에 보관 중), 3차년도	▪ 북극 스발바르 토양 시료(54점) 내 지속성 유기 독성물질의 분포 및 오염원 파악 ▪ 북극 스발바르 다산과학기지 주변 육상 잠재적 오염원 시료(물, 퇴적물 등, 33점) 내 지속성 유기 독성물질 분포 파악 ▪ 스발바르 퇴적물 코어 부시료 수은 농도(113점) 및 안정동위원소 (65점) 분석 기반 과거 수은 유입원 및 유입경로 추적 ✓ (추가 성과) 스발바르 호른준드 퇴적코어 부시료	100	38. 유기독성물질 분석 결과 (증빙 40) 39. 국내 및 국제 학술대회 발표 포스터 (증빙 41, 42) 40. 스발바르 퇴적코어 수은 농도 및 안정동위원소 분석 결과 (증빙 43-1, 43-2)

KOPRI 극지연구소

				추진 목표 우선 수행 ▪ 코어 퇴적물 내 수은 안정동위원소 분석을 통한 과거 수은 유입원 및 유입 경로 추적(90개 시료)	✓ 수은 농도(25점) 및 안정동위원소(12점) 분석수행 (추가 성과) 스발바르 기반암 부시료(8점) 확보 및 수은 농도 분석 수행		
			3차년도 (2단계)	▪ 코어 퇴적물 내 유기독성물질 조성 분석을 통한 오염역사, 잠재적 오염원의 변화, 침전 플럭스 제시(시료 > 30, RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건)# # 2차년도 한-노 국제공동탐사 동안 확보한 코어 퇴적물 대상 분석(코로나 여파로 인해 1차년도 탐사 연기가 불가피하여 기존 2차년도 연구목표 수행) ▪ 한라산 스노우팩 시료 채취(표층 20개, 대기 12개) 및 In-situ flux chamber 현장 실험 연구를 통한 대기-스노우팩 상호작용 파악 ▪ 수은 농도 및 안정동위원소 분석 기반 현대 수은 유입원 및 유입 경로 추적(RFP 충족- SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건)	▪ 콩스피오르드 시추 퇴적물 3점(총 시료: 80개) 유기독성 물질 분포 및 조성 분석 완료 ▪ 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 분석된 화합물 그룹의 모델링 분석(예: PMF) 및 진단비 분석을 통한 잠재적 오염원 추정 ▪ 스발바르와 주변 지역 환경 시료 내 유기독성 물질의 수평 분포 관련 국외학술지 (SCIE 상위 20% 이내) 1건 게재 완료 및 1건투고 ▪ 스발바르와 주변 지역 환경 시료 내 유기독성 물질의 수평 분포 관련 학술발표 1건(추계해양학회 포스터 발표) ▪ 제주도 한라산 표층 눈 (총 시료 20개), 대기 중 수은(총 시료 12개) 및 snow flux chamber 현장 실험 (총 시료 10개)을 통해 총 42개 시료 확보 ▪ 제주도 한라산 표층 눈 및 대기 시료 채취 (해발 약 970m, 1,400m, 1,700m 시료 채취) ▪ 제주도 한라산 표층 눈(총 시료 20개), 대기 중 수은(총 시료	100	41. 유기독성물질 실험결과 (증빙 44) 42. 논문게재(1건) (증빙 45) 43. 국내 학회발표(1건) (증빙 46) 44. 수은동위원소 분석결과 (증빙 47) 45. 국제 학회발표(1건) (증빙 48) 46. 한라산 눈시료 채취 관련 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.334-338] 항목 참조

					12개) 및 snow flux chamber 현장 실험(총 시료 10개) 총 42개 시료의 수은 농도 및 안정동위원소 분석 ▪ 3차년도 스노우팩 실험 설계 및 장비 테스트 결과를 활용하여 2023년도 국제 골드슈미트 학회 (Goldschmidt Conference 2023) 초청 구두발표(Invited Talk)로 선정		
			4차년도 (2단계)	▪ 북극 스발바르 피오르드 시추 퇴적물 1-2점(시료 30개 이상) 유기독성물질의 농도 및 조성 분석 ▪ 스발바르 기확보 시추 퇴적물 시료 내 유기독성물질의 오염역사, 오염원의 장기 변동 및 오염경로 추적 ▪ 스발바르와 주변 지역 내 유기독성물질의 수직 및 수평 분포 관련 학술발표 1건 ▪ 스발바르 스노우팩 (표층 시료 총 12개, 대기 시료 총10개) 시료 (총 22개 시료) 확보 및 수은 농도 · 안정동위원소 분석 ▪ In-situ flux chamber 현장 실험 연구를 통한 대기-스노우팩 상호작용 해석	▪ 이스피오르드 시추 퇴적물 3점 (총 시료: 50개) 및 힌로펜 해협 3점(총 시료: 21개) 유기독성물질 분석 완료 ▪ 이스피오르드 시추 퇴적물 내 분석된 화합물 그룹의 모델링 분석 및 진단비 분석을 통한 잠재적 오염원 분석 ▪ 토양 유기독성물질 분석 결과 Environmental Pollution 논문 게재 ▪ 표층 퇴적물 석탄 기원 유기독성 물질 분석 결과 Chemosphere 논문 게재 ▪ 표층 퇴적물 석탄 기원 유기독성 물질 분석 결과 한국환경분석학회 춘계학술대회 포스터 발표 ▪ 스노우팩 및 대기 시료 확보를 위해 24년 3월 북극 다산과학기지 방문 및 시료채취 ▪ 스발바르	100	47. 실험 결과 raw data 제출 (증빙 49) 48. 실험 결과 raw data 제출 (증빙 50) 49. 논문게재(2건) (증빙 51, 52) 50. 학술발표(1건) (증빙 53) 51. 스발바르 스노우팩 수은 안정동위원소 분석 (증빙 54)

KOPRI 극지연구소

				▪ 스발바르 퇴적물 및 스노우팩 수은 안정동위원소비 결과값 정리 및 종합 해석(RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건)	스노우팩(표층 총 31개, 대기시료 총 10개) 시료 확보 ▪ 중간층 및 기저부 스노우팩(표층 1-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-30cm 총 16개) 시료 확보 ▪ 스발바르 스노우팩 및 대기 수은 농도 및 안정동위원소 분석 ▪ 수은 농도 및 안정동위원소 분석 결과를 활용하여 북극 스발바르 스노우팩의 현대 수은 유입원과 유입 경로 추적		
(정성/정량) 유동모델(FVCOM) 구축을 통한 기후변화에 따른 조수빙하 유출 물질의 순환 기작 이해 (위탁-3) 인하대	15	3	1차년도 (1단계)	▪ 스발바르 연안 수괴 유동 관련 기본 관측자료(수위, 해류, 조석, 바람, 수온, 염분) 조사 및 수집 ▪ 수심과 해안선 등의 자료를 기반으로 피오르드의 지형적 특성을 반영한 비구조 삼각격자 구성	▪ 콩스피오르드 대상 SIOS-KC, KPDC 및 EBAS로부터 유동 및 기상 관련 기본 관측자료 수집과 분석 수행 ▪ NPI로부터 확보한 스발바르 해안선 자료와 IBACO 4.0기반 수심 자료를 토대로 콩스피오르드를 포함한 스발바르 연안의 지형적 특성이 반영된 FVCOM 비구조 삼각격자 구성 ▪ 기상 해일, 물질 수송 메커니즘 해석 및 담수 유출 영향에 관한 모델링 연구 수행 ▪ 이벤트성 기후현상 판별에 대한 측정 및 분석 방법 연구를 통한 극지 모델링 계획 수립	100	52. 2021년 기후적 해류 변동성 관련 게재 논문 (증빙 55) 53. 2021년 모델링 관련 국내학술대회 발표 초록(2건) (증빙 56, 57)
			2차년도 (1단계)	▪ 수집 자료 기반 유동모델 구축 및 검증 (1건)	▪ FVCOM 입력자료 구축 및 조석, 수온, 염분 관련 모델-자료 비교	100	54. 2022년 FVCOM 모델 결과 KPDC 등재(6건) (증빙

KOPRI 극지연구소

				▪ 조수빙하로부터의 물질 유출량과 위치에 대한 관측자료 수집 및 분석	기반 수치모델 검증 수행 ▪ NPI의 K160와 비교를 통한 해류 재현성 검토 완료 ▪ SIOS-KC 및 NPI 연구팀으로부터 콩스피오르드 해류 및 조수 빙하 물질 유출량에 대한 관측자료 확보 및 분석 수행 ▪ 조수빙하로부터의 담수유출량이 고려된 수치모델 결과 기반, 해류 패턴 결과와 입자 이동 양상 비교 연구 수행		58-63) 55. 국내 학술대회 발표 초록(2건) (증빙 64-1, 64-2)
			3차년도 (2단계)	▪ 입자 추적 모듈 개선과 모델에 필요한 입력장 구성 후 대상 스발바르 연안 해역에 적용 ▪ FVCOM 결과의 보정 및 검증을 통한 대상해역에 적합한 물질추적 기술 확립 ▪ 시공간적 해류 변동성에 대한 FVCOM 결과 검증 및 분석 ▪ 해저 표층퇴적물 자료 수집을 위한 현장 조사 수행 ▪ 조수빙하 인근 해저 표층퇴적물 분포 특성과 이동패턴 분석 (RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내)) ▪ 대상 연안 내 3차원 해수 순환 패턴 분석을 통한 물질 수송 규명	▪ 스발바르 콩스피오르드 해저 표층퇴적물 시료 채취(37점) ▪ 기존 문헌자료의 해저 표층퇴적물 입도분석 결과(25점)와 수집된 시료(37점)의 입도 분포 자료 비교 분석 ▪ FVCOM 라그랑지안 입자 추적 모델링 입력자료 개선 및 조수빙하 융빙수 유출시기에 따른 입자 이동패턴 비교 연구 수행 ▪ 입자 추적 선행연구 기반 조수빙하 기원 입자의 체류시간 분석 수행 ▪ 자연환경 및 인공적 요인에 의한 해수 유동 변화 관련 국외 학술지 1건 게재 완료 및 학술발표 1건 완료 ▪ 스발바르 융빙수의 수직적인 방류 위치 적용 관련 국외 학술지 (SCIE 상위 20% 이내)1건 게재	100	56. 콩스피오르드 표층퇴적물 시료 분석 결과 KPDC 등재(1건) (증빙 65) 57. FVCOM 라그랑지안 입자 추적 모델 분석 결과 KPDC 등재(2건) (증빙 66, 67) 58. 논문게재(3건) (증빙 68-70) 59. 콩스피오르드 표층퇴적물 시료 채취 관련 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.364-376] 항목 참조

KIOST 극지연구소

					완료 ▪ 하구 환경에서의 담수 방류가 해수 유동에 미치는 영향 관련 국외 학술지(SCIE 상위 20% 이내) 1건 게재 완료		
			4차년도 (2단계)	▪ 3차원 입자 추적을 통한 스발바르 연안 내 물질들의 체류시간 규명 ▪ 조수빙하 융빙수 유출 관련 수온 및 염분 자료 수집 및 모델 검증 수행 ▪ 스발바르 연안 해역 중심의 모델 구축과 주변 해류 패턴 파악을 주제로한 학술대회 발표 1건 ▪ 스발바르 모델 결과 기반 '조수빙하 유출 물질 순환 기작' 주제의 국외학술지 1편(상위 20% 이내)	▪ 스발바르 콩스피오르드 해역의 표층 퇴적물 시료 입도 분석 결과를 활용한 Sediment Trend Analysis (STA) 수행 ▪ FVCOM 입자 추적 모델 결과를 통해 스발바르 콩스피오르드 해역 내 입자 이동 패턴과 체류시간 분석 ▪ 융빙수 유출로 인한 해류 패턴 변화에 대한 [한국 해양학회] 학술 발표 1건 및 모델 구축 기술 관련 [한국해안해양공학회] 학술발표 1건을 수행함 ▪ Local Exposure Time 계산 기법 및 개선된 압자추적 모듈을 통한 스발바르 연안 내 물질들의 체류시간 규명	100	60. 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.386-390] 항목 참조 61. 국내 학회발표(2건) (증빙 71, 72)
합계	100						

3. 목표 미달 시 원인 분석 (해당시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 해당 사항 없음

2) 자체 보완활동

- 해당 사항 없음

3) 연구개발 과정의 성실성

4. 연구개발 목표 및 주요내용 변경사항

구분	당초 계획(2024년)	협약 변경 내용(2024년)	변경 사유 및 조치사항	협약변경 승인일
연구목표	▪ RV Helmer Hanssen 스발바르 피오르드 국제공동 탐사, 지형/지층 자료 획득, 스발바르 시추 코어 5점 확보 ▪ 인류세 자연 시료 대상 검증된 기후환경복원 프록시 고해상도 분석(최소 2건 이상 적용) ▪ 고해상도 다중 프록시 분석 기반 인류세 스발바르 환경변화 정밀 복원 및 이해 ▪ 3차년도 결과와의 비교를 통한 스발바르 환경 변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 평가 (RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 2건) (위탁-1 포항공대) ▪ 지구온난화로 인한 스노우팩 감소가 스발바르 내 대기 수은 거동에 미치는 영향 파악 및 예측 ▪ 스발바르 퇴적물 및 스노우팩 수은 안정동위원소 비	〈해당내용 변경없이 수행〉 ▪ 인류세 자연 시료 대상 검증된 기후환경복원 프록시 고해상도 분석(최소 2건 이상 적용) ▪ 고해상도 다중 프록시 분석 기반 인류세 스발바르 환경변화 정밀 복원 및 이해 〈해당내용 축소〉 ▪ RV Helmer Hanssen 피오르드 국제공동 탐사 취소에 따른 스발바르 탐사자료 확보 중단(시추 코어 5점 포함) - 기확보된 중력 시추코어 부시료 채취 및 암층서 분석을 위한 UiT/NGU 방문 대체(변경) ▪ 기후환경복원 프록시 고해상도 분석 1건 축소 ▪ 3차년도 결과 비교 및 스발바르 환경 변화에 대한 학회 참여/발표 1건축소 (위탁-1 포항공대) 〈해당내용 변경없이 수행〉 ▪ 분석연구를 통한 지점별, 시간별 및 일조량에 따라 변동되는 스발바르 스노우팩 수은 농도 및 안정동위원소 비 확보 ▪ 지구온난화로 인한	연구비 감액으로 인한 국제공동탐사 추진 중단 및 목표(분석 및 학회 참여/발표) 하향 조정(주관기관 극지연 및 위탁기관 공통)	연구비 감액으로 인한 목표 하향 조정 및 내용 축소, 일부분의 목표만 달성토록 조정

KOPRI 극지연구소

	결과 값 정리 및 종합 해석 ▪ (RFP 충족) SCI급 논문 1편(상위 20% 이내), 국제학술대회 발표 1건 (위탁-2 충남대) ▪ 생물 시료 내 유기독성물질 농도 및 조성 분석을 통한 생물축적 평가 및 농축확대 가능성 제시(시료 > 20, RFP 충족-SCI급 논문 1편 (상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건) (위탁-3 인하대) ▪ 스발바르 모델결과 기반 '조수빙하 유출 물질 순환 기작' 주제의	스노 우팩 감소가 스발바르 내 대기 수은 거동에 미치는 영향 파악 및 예측(RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건) 〈해당내용 축소〉 ▪ 스발바르 스노우팩 (표층 시료 총 12개) 및 대기(총 10개) 시료 확보(총 22개 분석, 2지점으로 한정) 및 분석량 축소 ▪ In-situ flux chamber 현장 실험연구 지점 축소 ▪ 시료 확보를 위해 '24년 초 다산 북극과학기지 방문 (위탁-2 충남대) 〈해당내용 축소〉 ▪ 북극 스발바르 이스피오르드 시추 퇴적물 1-2점 (시료 30개 이상) 유기독성물질의 농도 및 조성 분석 ▪ 스발바르 기확보 시추 퇴적물 시료 내 유기독성물질의 오염역사, 오염원의 장기 변동 및 오염경로 추적 ▪ 스발바르와 주변 지역 내 유기독성 물질의 수직 및 수평 분포 관련 학술발표 1건 (위탁-3 인하대) 〈해당내용 변경없이 수행〉	(위탁-2 충남대) ▪ 북극 서식 상위포식자 시료 확보에 어려움이 존재함에 따라 차년도 연구 계획은 기존에 확보한 스발바르 코어 퇴적물 시료를 대상으로 진행하고자 함 (위탁-3 인하대) ▪ 해저 표층퇴적물질의	

	국외학술지 1편 (상위 20% 이내) ▪ 대상 연안 내 3차원 해수 순환 패턴 분석을 통한 물질 수송 규명 ▪ 수치모델 민감도 테스트를 통한 주요외력(바람, 수온, 염분)과 해류와의 상관성 제시 ▪ 3차원 입자 추적을 통한 스발바르 연안 내 물질들의 체류시간 규명	▪ 스발바르 모델결과 기반 ‘조수빙하 유출 물질 순환 기작’ 주제의 국외학술지 1편 (상위 20% 이내) ▪ 3차원 입자 추적을 통한 스발바르 연안 내 물질들의 체류시간 규명 〈해당내용 축소/변경〉 ▪ 스발바르 연안 해역 중심의 모델 구축과 주변 해류 패턴 파악을 주제로 한 학술대회 발표 1건 ▪ 조수빙하 융빙수 유출 관련 수온 및 염분 자료 수집 및 모델 검증 수행	이동패턴에 관한 현장 조사 추가로 목표조정 ▪ 대상 연안 내 3차원 해수 순환 패턴 분석을 통한 물질 수송 규명(2단계 1차년도 목표로 변경) ▪ 스발바르 연안 해역 중심의 모델 구축과 주변 해류 패턴 파악을 주제로 한 학술대회 발표 1건 (2단계 2차년도 목표로 조정) ▪ 수치모델 민감도 테스트를 통한 주요외력 (바람, 수온, 염분)과 해류와의 상관성 제시를 “조수빙하 융빙수 유출 관련 수온 및 염분 자료 수집 및 모델 검증 수행”으로 대체	
연구비	1,500,000천원	760,000천원	정부 RnD예산 삭감으로 인한 연구비 축소	2024.03.22.
연구기간	2021. 04. 27. – 2024.12.31.	2021. 04. 27. – 2025.03.31.	본 과제에서 수행하는 기후변화에 따른 북극 스발바르 과거와 현재 환경변화 및 영향 진단 연구의 성공적인 연구활동 마무리	2024.11.20

KOPRI 극지연구소

5. 선정/단계/연차점검의견

선정평가	1. 종합의견 : • 현재 수행하고자 하는 과제와 기존에 수행한 과제와의 차별성을 구체적으로, 뚜렷하게 제시할 필요가 있음. • 기존 북극 관측 자료 및 네트워크와 현 과제의 관측에 대한 차별성을 명확하게 할 필요가 있음. • 과제제안요구서의 연구목표(최종목표)가 단계별 목표와 연계성이 약해 보임.(각 세부과제가 최종목표 및 다른 과제들과 어떤 연계성이 있는지 제시가 필요함) • 5개의 세부과제들간의 유기적인 관련성에 대한 제시와 연구결과의 활용 방안의 구체성이 미흡함. • 관측 과제(세부1,2,3)에서의 결과가 모델과제(세부5)에 어떻게 사용되는지, 그리고 북극권에 대한 연구가 중위도 지역과 어떤 관계를 갖으며, 영향을 미치는지에 대한 내용이 강화될 필요가 있어 보임. • 구축된 DB의 활용방안이 필요할 것으로 판단됨. 선진국 대비 연구수준 이후에 본연구가 차별성의 구체화가 필요함. • 확보된 현장 연구자료 및 연구성과들이 향후 4년 동안 어떻게 활용될 것인지에 대한 구체적인 제시보다 나열식 설명만 있어 아쉬움. • 감염병 우려로 인해 현장 연구의 어려움이 있을 때 이를 극복할 수 있는 방안에 대한 제시가 미흡함. • 국내외 기관들 간의 구체적인 협력 방안에 대한 제시가 미흡함. • 해외 기관들과의 협업에 대한 구체적인 플랜 및 스케줄이 제시 또는 제안되면 더 좋을 것 같음. • 기존 연구 성과와 현재 연구 개발하고자 하는 내용과의 차별성과 연계성에 대한 명확한 제시가 필요함. • 환경 및 기후인자, 생태계, 구름, 미생물 등의 측정→모델링→기후변화까지 각각의 인자가 유기적으로 구성되어야 하나 측정된 인자들의 상호 연계성이 부족해 보임. 각 세부과제별 연계방안이 구체적으로 필요함. • 세부과제간의 상관관계 및 세부과제 내의 위탁연구들과의 관련성에 대한 구체적인 제시가 필요함. • 과제목표와 내용의 경우 정량적으로 제시할 수 있는 것은 추가적으로 구체적으로 제시하는 것이 필요함. • 각 세부과제에서 수행된 결과가 다른 과제(특히 과제5)에 어떻게 사용/활용 되는지 기술할 필요가 있음.(현 제안서에서는 과제간의 연계성이 잘 나타나지 않음. • 연차별 예산이 대부분 유사하게 편성되어 있는데(1차년 제외), 현장 관측팀의 경우, 1-2-3차년의 예산을 늘려서 현장관측자료 확보에 많이 투자하고, 4-5차년에는 현장관측 일수를 줄이고 분석데이터에 집중하게 하는 등 세부과제별로 총액 내에서 연차별 예산을 유연하게 편성할 수 있도록 권고함. • 1차년의 SCI논문 게재 실적은 비현실적으로 보임. 1-3차년에는 양질의 현장 관측 자료를 얻는데 집중하고, 4-5차년에 분석을 통하여 연구성과를 창출하는 방향을 제안함. 따라서 1-2차년의 성과 목표의 SCI 논문 편수를 줄이고, 4-5차년을 늘리는 방향을 권고함. 또한 논문 편수(number) 보다는 Quality를 높이는 방향으로, 즉, Nature, Science, Nature Climate, Nature Geosciences 등의 high quality 저널을 목표로 설정하기를 권고함 • 관측 비용은 변동성이 크기 때문에 이에 대한 대응책 마련이 필요함. • 결과물로 산출되는 논문이 일반적인 내용보다는 과제목표와 직접적으로 관련이 있는 논문이면 좋을 것 같음. • 국외 연구기관과의 연계를 위해 협력과 데이터 사용에 관한 참여의향서가 반드시 필요해 보임.

	2. 수정 및 보완사항 • 기존 연구의 한계점 및 신규 과제의 차별성을 명시함 • 세부과제-3 내 로드맵, 연구내용 및 최종 목표를 가시화한 그림 제시 • 세부과제 간의 유기적인 관련성을 위하여, 본 과제 수행을 통해 획득/생산하는 시료 및 자료에 대한 공유 계획을 명시하여 반영함 • 각 과제에서 생산되는 관측 자료의 활용 계획에 대해 명시하여 반영함 • 구축된 DB 활용방안 보완함 • 현장 연구자료 계획에 대해 구체적으로 제시함 • 코로나-19로 인한 현장 탐사 어려움 발생 시, 극복방안 일부 수정 보완함 • 국외 협력 기관의 연구 수행 내용에 대해 구체적으로 제시함(국내 협력 기간 위탁과제로 수행) • 해외 기관들과의 협업 관련 구체적 플랜에 대해 추가 보완함 • 기존 및 신규 사업 간의 차별성 및 연계성에 대해 보완함 • 세부과제 간의 유기적인 관련성을 위하여, 본 과제 수행을 통해 획득/생산하는 시료 및 자료에 대한 공유 계획을 명시하여 반영함 • 세부과제 간의 유기적인 관련성을 위하여, 본 과제 수행을 통해 획득/생산하는 시료 및 자료에 대한 공유 계획을 명시하여 반영함 • 위탁과제 연구는 스발바르 환경 모니터링에 필수적인 오염물질 분석과 향후 예측에 활용될 수 있는 수치모델 구축을 위한 국내 전문가로 구성되었음 • 연구 수행 목표를 최대한 정량적으로 제시하였으며, 일부 정량 목표 조정함 • 각 과제에서 생산되는 관측 자료의 활용 계획에 대해 명시하여 반영함 • 본 세부과제는 연차별 연구목표에 따라 예산을 차별적으로 기 산정하였음. 일례로, 장기 탐사를 계획하는 3차년도의 연구시설장비비는 1-2차년도의 2배 이상임. 전체적인 과제에 대한 코멘트임을 감안하여, 추가 계획서 수정은 실시하지 않음. • 본 세부과제는 계획서 연구개발과제 평가 기준에, 1-2차년도 SCI 논문 게재 목표 없이, 3-4차년도 상위 20% 이내 SCI 논문 총 7편 산정하였음 (위탁과제포함). 전체적인 과제에 대한 코멘트임을 감안하여, 추가 계획서 수정은 실시하지 않음 • 본 세부과제는 총괄과제의 최종 목표인 “북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발” 달성을 위한 초석 연구로서 관측 및 분석 연구에 치중하여 있음. 때문에, 결과물로 산출되는 논문은 해당 목표를 위한 연결고리로서 과제목표에 직간접적으로 연관되어 있음 • 주요 국제연구협력 기관인 노르웨이 트롬소 대학과는 2017년 12월 양해각서(MoU)에 기서명함 3. (필요시)연구비 조정사항 : • 리얼 관측 자료는 모델 자료의 검증에 매우 필요하기 때문에 북극권 환경변화의 예측 모델링에는 무엇보다 현장에서의 관측 자료를 얻는 것이 중요함. 따라서 탐사선박을 활용하여 현장자료를 얻는 3세부과제의 경우, 탐사선 임차료 등에 대해 실비 지원 또는 증액이 필요해 보임. 총 연구비는 적정하지만 세부과제별 연구비 조정은 필요함. ✓ 스발바르 피오르드 현장 탐사를 위한 연구선 임차를 위한 예산은 매년 적정하게 반영하였으나, 탐사일정 연장 등 필요에 따라 세부과제와 일부 조정을 통해 현장탐사를 성공적으로 추진할 계획임(수정 불필요)
단계평가	1. 종합의견 : • 현재 수행하고자 하는 과제와 기존에 수행한 과제와의 차별성을 구체적으로, 뚜렷하게 제시할 필요가 있음. • 기존 북극 관측 자료 및 네트워크와 현 과제의 관측에 대한 차별성을 명확하게 할 필요가 있음. • 과제제안요구서의 연구목표(최종목표)가 단계별 목표와 연계성이 약해 보임.(각 세부과제가 최종목표 및 다른 과제들과 어떤 연계성이 있는지 제시가 필요함) • 5개의 세부과제들간의 유기적인 관련성에 대한 제시와 연구결과의 활용 방안의 구체성이 미흡함. • 관측 과제(세부1,2,3)에서의 결과가 모델과제(세부5)에 어떻게 사용되는지, 그리고 북

	극권에 대한 연구가 중위도 지역과 어떤 관계를 갖으며, 영향을 미치는지에 대한 내용이 강화될 필요가 있어 보임. • 구축된 DB의 활용방안이 필요할 것으로 판단됨. 선진국 대비 연구수준 이후에 본연구가 차별성의 구체화가 필요함. • 확보된 현장 연구자료 및 연구성과들이 향후 4년 동안 어떻게 활용될 것인지에 대한 구체적인 제시보다 나열식 설명만 있어 아쉬움. • 감염병 우려로 인해 현장 연구의 어려움이 있을 때 이를 극복할 수 있는 방안에 대한 제시가 미흡함. • 국내외 기관들 간의 구체적인 협력 방안에 대한 제시가 미흡함. • 해외 기관들과의 협업에 대한 구체적인 플랜 및 스케줄이 제시 또는 제안되면 더 좋을 것 같음. • 기존 연구 성과와 현재 연구 개발하고자 하는 내용과의 차별성과 연계성에 대한 명확한 제시가 필요함. • 환경 및 기후인자, 생태계, 구름, 미생물 등의 측정→모델링→기후변화까지 각각의 인자가 유기적으로 구성되어야 하나 측정된 인자들의 상호 연계성이 부족해 보임. 각 세부과제별 연계방안이 구체적으로 필요함. • 세부과제간의 상관관계 및 세부과제 내의 위탁연구들과의 관련성에 대한 구체적인 제시가 필요함. • 과제목표와 내용의 경우 정량적으로 제시할 수 있는 것은 추가적으로 구체적으로 제시하는 것이 필요함. • 각 세부과제에서 수행된 결과가 다른 과제(특히 과제5)에 어떻게 사용/활용 되는지 기술할 필요가 있음.(현 제안서에서는 과제간의 연계성이 잘 나타나지 않음. • 연차별 예산이 대부분 유사하게 편성되어 있는데(1차년 제외), 현장 관측팀의 경우, 1-2-3차년의 예산을 늘려서 현장관측자료 확보에 많이 투자하고, 4-5차년에는 현장 관측 일수를 줄이고 분석데이터에 집중하게 하는 등 세부과제별로 총액 내에서 연차별 예산을 유연하게 편성할 수 있도록 권고함. • 1차년의 SCI논문 게재 실적은 비현실적으로 보임. 1-3차년에는 양질의 현장 관측 자료를 얻는데 집중하고, 4-5차년에 분석을 통하여 연구성과를 창출하는 방향을 제안함. 따라서 1-2차년의 성과 목표의 SCI 논문 편수를 줄이고, 4-5차년을 늘리는 방향을 권고함. 또한 논문 편수(number) 보다는 Quality를 높이는 방향으로, 즉, Nature, Science, Nature Climate, Nature Geosciences 등의 high quality 저널을 목표로 설정하기를 권고함 • 관측 비용은 변동성이 크기 때문에 이에 대한 대응책 마련이 필요함. • 결과물로 산출되는 논문이 일반적인 내용보다는 과제목표와 직접적으로 관련이 있는 논문이면 좋을 것 같음. • 국외 연구기관과의 연계를 위해 협력과 데이터 사용에 관한 참여의향서가 반드시 필요해 보임. 2. 수정 및 보완사항 • 기존 연구의 한계점 및 신규 과제의 차별성을 명시함 • 세부과제-3 내 로드맵, 연구내용 및 최종 목표를 가시화한 그림 제시 • 세부과제 간의 유기적인 관련성을 위하여, 본 과제 수행을 통해 획득/생산하는 시료 및 자료에 대한 공유 계획을 명시하여 반영함 • 각 과제에서 생산되는 관측 자료의 활용 계획에 대해 명시하여 반영함 • 구축된 DB 활용방안 보완함 • 현장 연구자료 계획에 대해 구체적으로 제시함 • 코로나-19로 인한 현장 탐사 어려움 발생 시, 극복방안 일부 수정 보완함 • 국외 협력 기관의 연구 수행 내용에 대해 구체적으로 제시함(국내 협력 기간 위탁과제로 수행) • 해외 기관들과의 협업 관련 구체적 플랜에 대해 추가 보완함 • 기존 및 신규 사업 간의 차별성 및 연계성에 대해 보완함 • 세부과제 간의 유기적인 관련성을 위하여, 본 과제 수행을 통해 획득/생산하는 시료

	및 자료에 대한 공유 계획을 명시하여 반영함 • 위탁과제 연구는 스발바르 환경 모니터링에 필수적인 오염물질 분석과 향후 예측에 활용될 수 있는 수치모델 구축을 위한 국내 전문가로 구성되었음 • 연구 수행 목표를 최대한 정량적으로 제시하였으며, 일부 정량 목표 조정함 • 각 과제에서 생산되는 관측 자료의 활용 계획에 대해 명시하여 반영함 • 본 세부과제는 연차별 연구목표에 따라 예산을 차별적으로 기 산정하였음. 일례로, 장기 탐사를 계획하는 3차년도의 연구시설장비비는 1-2차년도의 2배 이상임. 전체적인 과제에 대한 코멘트임을 감안하여, 추가 계획서 수정은 실시하지 않음 • 본 세부과제는 계획서 연구개발과제 평가 기준에, 1-2차년도 SCI 논문 게재 목표 없이, 3-4차년도 상위 20% 이내 SCI 논문 총 7편 산정하였음 (위탁과제포함). 전체적인 과제에 대한 코멘트임을 감안하여, 추가 계획서 수정은 실시하지 않음 • 본 세부과제는 총괄과제의 최종 목표인 “북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발” 달성을 위한 초석 연구로서 관측 및 분석 연구에 치중하여 있음. 때문에, 결과물로 산출되는 논문은 해당 목표를 위한 연결고리로서 과제목표에 직간접적으로 연관되어 있음 • 주요 국제연구협력 기관인 노르웨이 트롬소 대학과는 2017년 12월 양해각서(MoU)에 기서명함 3. (필요시)연구비 조정사항 : • 리얼 관측 자료는 모델 자료의 검증에 매우 필요하기 때문에 북극권 환경변화의 예측 모델링에는 무엇보다 현장에서의 관측 자료를 얻는 것이 중요함. 따라서 탐사선박을 활용하여 현장자료를 얻는 3세부과제의 경우, 탐사선 임차료 등에 대해 실비 지원 또는 증액이 필요해 보임. 총 연구비는 적정하지만 세부과제별 연구비 조정은 필요함. ✓ 스발바르 피오르드 현장 탐사를 위한 연구선 임차를 위한 예산은 매년 적정하게 반영하였으나, 탐사일정 연장 등 필요에 따라 세부과제와 일부 조정을 통해 현장탐사를 성공적으로 추진할 계획임(수정 불필요)
2단계 1차년도 연차점검	1. 종합의견 : • 세부과제3은 고기후 관련 부분으로 시간 및 공간 규모가 큰 내용인데 작은 규모 현상을 잘 모의하기 위한 FVCOM 모델분야는 전체와 동떨어져 있음. FVCOM 모델분야 포함 이유에 대한 설득력 있는 설명과 해당 분야의 역할에 대한 내용이 요구됨 • 위탁과제 스발바르 연안 해류 변동에 따른 물질순환기작과 코어 퇴적물과의 상관성이 부족함. 특히 스발바르 영향과 한반도와의 연계가 필요함 2. 수정 및 보완사항 : • 중위도 지역을 포함하는 과거 북극권 모델링 수행은 세부과제-3의 과업 범위에 포함되지 있지 않기 때문에, 시나리오 모델링을 수행하여 결과를 도출하는 것은 한계가 있음. 다만, 세부과제-3에서 생산되는 자료(탐사자료, 고환경 복원 자료 및 물질순환모델링 결과)가, 중위권 지역을 포함한 기후 모델링을 수행하는 세부과제-5에서 필요한 경우 활용(PWRF 모델 검증 등)될 수 있도록 적극 공유할 예정임 • 스발바르 제도 피오르드와 주변 연안은 대서양의 따뜻한 해류와 북극권 차가운 해류 등 다양한 수괴의 영향과 함께 조수빙하 및 융빙수 등의 영향으로 퇴적환경 및 표층생태 현상이 시공간적으로 복잡하게 변화하여 고해상도의 모델링이 필수적임. 때문에, 세부과제-3에서는 최소 50 m의 비정형격자로 구성되어 고해상도 모델링이 가능한 FVCOM을 채택함. 본 과제에서 구축된 스발바르 FVCOM은, 기 구축된 북극권 모델링 관련 국외연구협력 인프라를 바탕으로, 추후 큰 규모의 모델(북극권 스케일; AO-FVCOM 등)과 외부 경계조건 측면에서 연계가 가능할 것으로 사료됨 • 본 연구의 주요 연구 목표는 스발바르 피오르드에서 획득된 퇴적물 내 다양한 프록시 분석을 통해 과거 기후변화에 따라 유입된 퇴적물의 기원, 운반경로 및 기작을 파악하고 퇴적환경 변화를 복원하는 것임. 면밀한 퇴적환경 복원을 위해서는 퇴적물을 운반하는 주요 기작인 해류 흐름 파악이 필수적인데, 이는 모델구축 기반 계절적 해류 양상 파악, 조수빙하, 유빙, 육상 빙하 등으로부터의 유출되는 융빙수의 이동 경로 추적을 통해 달성 가능함. 따라서, 위탁과제에서 수행하는 연안 해류 변동에 따른 물질순환 모델링 연구는 프록시 기반 과거 퇴적환경 복원에 있어 보다 심도깊은 해석에 기

	여함 • 한반도와의 연계 부분은 앞서 기술하였듯이, 세부과제-3의 과업 범위에 포함되어 있지 않음. 그러나 지구온난화에 의해 빠르게 일어나고 있는 스발바르 피오르드 연안의 지형변화는 최근 우리나라 해안 침식 가속화 및 퇴적작용에 의한 지형변화에 대한 예측을 위한 자료로 활용 가능함 3. (필요시)연구비 조정사항 : • 탐사선 임차비 40% 증액에 따라 탐사일정 축소 등 다른 대응 방안 마련이 필요함 • 코로나 재확산이 진정되어 2023년 스발바르 탐사를 추진함. 그러나 코로나 팬데믹 이후 1일 임차료가 약 5000만원 상승하여 2023년 탐사는 5일로 축소하여 수행함. 2024년 탐사는 현재 국가 R&D 예산 축소가 예상됨에 따라 차년도(2024)를 위한 연구선 임차를 취소한 상태로, 노르웨이 공동연구기관 방문을 통한 추가 시료 및 분석자료 획보 등 Plan B를 계획하여 사전 승인요청을 통해 해결할 예정임
2단계 2차년도 연차점검	1. 종합의견 : 2. 수정 및 보완사항 : 3. (필요시)연구비 조정사항 :

KOPRI 극지연구소

제 2 장

추진내용 · 연구결과 및 추진일정 실적

KOPRI
극지연구소

1. 추진내용 · 연구결과
가. 연구개발 내용, 방법 및 추진내용

년도	연구개발 목표	연구개발 내용 및 방법
1차년도 (1단계)	탐사, 시료 선정, 기초 자료 분석 및 연구 인프라 구축	**가) 한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사#** – 노르웨이 북극 트롬소 대학 RV Helmer Hanssen 임차 및 공동탐사 #코로나 미진정시, 노르웨이 지질조사소(NGU)가 콩스피오르드에서 획득한 코어(2019년)와 UiT 코어 퇴적물 대상 중심 연구 진행 – 해저지형 및 천부지층 탐사, 시추 코어 획득/기존자료 활용# – 스발바르 수온 및 염분도 데이터베이스화 및 자료공유* *현장관측 자료는 세부과제-5 등에 제공하여 모델링 정교화 등에 기여 – 부시료 확보† 및 XRF-core scanning, X-radiography, MSCL, 입도 등 기초 분석 자료 획득 †일부는 세부과제-4 등에 제공하여 유용 생물자원 개발 등에 기여 – 기존/신규 기초분석자료 기반 코어 및 천부퇴적층서 정립 **나) 시료 선정 및 기초 분석 자료 획득** – 스발바르 환경변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 이해 목표 달성을 위한 시료 선정 ✓ 기후 영향력 : Pristine 환경, 홀로세 이후 현재까지 시기 대변 ✓ 인류 영향력 : 정주 거점 주변 환경, 인류세 시기 대변 – 조건에 부합하는 UiT 시료 및 극지연구소 보유 시료 ✓ 선정된 보유 시료에 대한 부시료 획득 및 분석 ✓ 방사성 탄소연대 측정 및 기초분석자료(X-radiography, MSCL-Logging 분석, XRF-core scanning) 확보를 통한 층서 정립 – 조건에 부합하는 시료 극지연구소 미보유 시료, ✓ 연구 2-4차년도 추가 스발바르 탐사 계획 수립 및 수행 **다) 환경복원 프록시 개발 및 연구 인프라 구축** – 코어 및 천부퇴적지층 층서대비 기반 스발바르 환경변화 복원 가능성 검토 ✓ 기 획득한 피오르드(예, 햄버그북타 등) 자료 활용 ✓ 다중빔 음향측심기 기반 조수빙하기원 해저지형 특성 해석 ✓ 음향반사파 탐사 기반 빙하기원 지형의 천부지층구조 및 탄성파 층서단위 규명 ✓ 정립된 탄성파 층서 대비 퇴적물 코어 암층서 해석 ✓ 코어 및 천부지층 층서 대비를 통한 빙하기원 해저지형 발달시기 규명 및 퇴적환경 복원 – 퇴적물 입도별 주요 end-member 활용 스발바르 피오르드 기후환경변화 복원 가능성 검토 ✓ 2017년 획득된 비데피오르드 퇴적코어 6점 대상 연구 추진 ✓ 극지연구소 Mastersizer 3000 장비 활용 퇴적물 입도 분석 ✓ 입도 분포 곡선 기반 end-member 모델링(Matlab 기반 AnalySize 이용) ✓ 주요 입도 end-member와 퇴적물 기초 분석 자료 간의 비교를 통한 조수 빙하 거동에 따른 퇴적 과정 변화 유추 – XRD 광물 자료 기반 스발바르 퇴적물기원 복원 프록시 활용 가능성 검토 ✓ 스발바르 표층 퇴적물 내 XRD 광물 조성 분석# #독일 브레멘 대학(Dr. Vogt) 협업 ✓ 스발바르 표층퇴적물 내 광물 조성의 공간적 분포 양상과 각 지역 내 환경적 특성 간의 관련성 검토 ✓ 환경 지시 가능한 광물 선별을 통한 신규 프록시 제시

		– 퇴적물 내 유기분자생체지표 분석을 통한 스발바르 해빙분포 복원 가능성 테스트 ✓ 극지연구소 기보유하고 있는 비데, 이스, 우드 피오르드 시료 활용 **라) 표층 퇴적물 내 유기독성물질의 분포 및 조성 특성 파악** – 스발바르에서 기채취한 표층 시료 30점 활용 – 가스크로마토그래피 질량분석기 및 액체크로마토그래피 텐덤질량분석기기를 활용한 PCBs, PAHs, APs, SOs, RAs 등 다양한 유기독성물질 분석 **마) 스발바르 퇴적코어 부시료 확보 및 수은 농도 분석** – 스발바르 퇴적코어 부시료 총 90점 이상 확보 – 포항공과대학교 AAS 및 CV-CFS 장비 활용 **바) 스발바르 연안 관측자료 수집 및 FVCOM 모델 기반 구축** – 기 관측 자료 수집* *세부과제-1에서 생산 및 제공되는 기상 및 기후정보와 SIOS 구축 자료 등 활용 – 스발바르 연안 지형을 반영한 비구조 삼각격자 구성 – 조석 및 조류 모델 셋업 등
2차년도 (1단계)	자연시료 확보, 환경 프록시 개발/검증 및 저해상도 프록시 자료 분석	**가) 한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사** – 노르웨이 북극 트롬소대학 (UiT) RV Helmer Hanssen 임차 및 공동탐사 추진 – 탄성파 활용 천부지층자료 탐사, 지형자료 및 시추코어 획득 – 스발바르 수온 및 염분도 데이터베이스화 및 자료공유* *현장관측 자료는 세부과제-5 등에 제공하여 모델링 신뢰도 향상에 기여 – 퇴적코어 부시료 확보† 및 코어 스캐닝 자료 획득(X-radiography, MSCL, XRF-core scanning 등) †일부는 세부과제-4 등에 제공하여 유용 생물자원 개발 등에 기여 – 기초 분석 자료 기반 코어 및 탄성파 천부지층 층서정립 **나) 스발바르 지역 다중매체 시료 획득†** – 물, 암석, 토양, 스노우팩 등 고려 – 스노우팩 시료 ✓ 북극 노르웨이 스발바르 거점 다산과학기지 주변 modern 환경 반영 ✓ 흑야(Polar Night)동안 시료 채취 및 현장처리 ✓ 유 · 무기 오염물질 분석(유기독성물질 및 수은 등) **다) 환경 프록시 검증을 위한 저해상도 자료 획득** – 퇴적코어 연대 모델 설정 ✓ 코어 퇴적물 내 패각, 유공충 시료 활용 AMS-^{14}C 절대 연령 분석 ✓ 퇴적코어 부시료 선별을 통한 다양한 지질시간 범위의 환경 • 박스 및 멀티 코어 : Modern에서 최근 200년 • 중력 코어 : 과거 2000년에서 마지막 해빙기 – 자연시료 대상 저해상도 다중 프록시 자료 획득 ✓ 퇴적물 입도별 end-member analysis • 입도 분포 자료의 통계 분석을 통한 end-member 설정 • 시계열적 end-member 변화 기반 빙·퇴적과정 변화 양상 복원 ✓ 유기·무기 지구화학 조성 및 안정동위원소 비 자료 획득 • 탄소 및 질소 함량, 안정 및 방사성 동위원소 비, aDNA 등 분석 • 극지연구소 보유 장비 활용 : EA-IRMS, TIMS, MC-ICPMS 등 • 육상 유기물질 유입량 변화 평가, 빙하 거동 양상 추적, 생태 구조 변화 평가 등

		✓ XRD 활용 코어 퇴적물 내 광물 조성 분석 • 연구 1차년도 선별 광물 프록시 XRD 정량분석# #독일 브레멘 대학(Dr. Vogt) 협업 • 빙하 거동 양상 추적 등 스발바르 빙·해양 환경변화 해석 ✓ 유기분자생체지표 분석 • 해빙 분포패턴 변화 등 스발바르 환경변화 해석 **라) 코어 퇴적물 분석을 이용한 유기 독성물질의 오염역사, 침전 플럭스 규명** – 스발바르 피오르드 퇴적코어 상부 20–30 cm 대상 – 1차년도 분석 결과 기반 분석물질 선정 – 유기 독성물질의 과거 및 현재 기원 변화 및 침전플럭스 산출 등 **마) 수은 안정동위원소 기반 과거 수은 유입원과 유입 경로 추적** – 연구 1차년도와 동일 코어 퇴적물 시료 대상 – 포항공과대학교 MC–ICPMS 장비 활용 **바) 스발바르 연안 조석 및 해류변화 특성의 모델 재현성 검증** – 조석 모델 보정 및 검정 – 해류 및 밀도의 입력 자료 구성 – 스발바르 연안 해역의 해류변화 특성 재현
3차년도 (2단계)	고해상도 홀로세 환경변화 복원을 통한 자연적 기후변화에 따른 북극 스발바르 지역 환경변화 패턴 규명	**가) 국제공동탐사** – *RV Helmer Hanssen* 국제공동 스발바르 탐사 및 드론 활용 딕슨피오르드 지형변화 현장조사 – 탄성파 활용 천부지층 탐사 및 해저지형자료/시추 코어 획득 – 수온 및 염분도 데이터베이스화 및 자료공유* *현장관측 자료는 세부과제–5 등에 제공하여 PWRF 모델 검증 등에 기여 – UiT 거점 기반 부시료 확보† 및 코어 스캐닝 자료 획득 †일부는 세부과제–4 등에 제공하여 유용 생물자원 개발 등에 기여 – 기초 분석 자료 기반 코어 및 탄성파 층서 정립 **나) 스발바르 지역 다중매체 시료 획득†** – 물, 암석, 토양, 스노우팩 등 **다) 고해상도 환경 프록시 분석을 통한 홀로세 스발바르 환경변화 정밀 복원** – Pristine 환경 자연시료 대상 – 코어 및 탄성파 층서 정립 및 대비 ✓ 광역적 탄성파탐사(SBP) 수행을 통한 천부지층자료 확보 ✓ 기초 자료 분석 기반 퇴적물 코어 암층서 정립 • MSCL(Geoteck–MSCL, UiT/NGU): 밀도, P파속도, 대자율 등 시추 코어 물성자료 확보 • Linescan and XRF core scanning(Avaatech XRF core scanner, UiT): 퇴적물 색상, 코어 이미지 확보 및 지화학 조성 측정 • X–radiography(Geoteck Standard X–ray CT System, UiT/NGU): X–선 이미지 촬영을 통한 코어 내부구조 및 빙운쇄설물(IRD) 등의 퇴적물 조직특성 파악 • 입도(Mastersizer 3000 laser diffraction particle size analyzer, KOPRI):

KOPRI 극지연구소

		퇴적물 입자 사이즈 분석 ✓ 지층단면과 암층서 대비를 통한 정밀 층서 해석 – 코어 층서 기반 연대 모델 정교화 ✓ AMS–^{14}C 연대 추가 분석을 통한 고해상 연대모델 정립 – 검증된 환경복원 프록시 고해상도 분석 ✓ 입도 (end–member analysis), 탄소 및 질소 함량, 안정 및 방사성 동위원소 비, DNA, 광물조성, 유기분자생체지표 등 ✓ 고해상도 스발바르 환경변화 양상 추적 : 퇴적물 및 육상 유기물질 유입량 변화 평가, 해빙 면적 변화, 빙하 거동 양상 추적, 생태 구조 변화 평가 등 ☞ **홀로세 스발바르 기후환경변화 고해상도 정밀 복원** ☞ **자연적 기후변화에 따른 북극 스발바르 환경변화 패턴 규명** **라) 시추 퇴적물 분석을 이용한 유기독성물질의 오염역사, 침전 플럭스 규명(충남대)#** #2차년도 한–노 피오르드 국제공동탐사에서 확보한 코어퇴적물 대상 분석(코로나 여파로 인한 1차년도 탐사 취소 및 연기에 의해 기존 2차년도 연구목표 수행) – 스발바르 피오르드 시추 퇴적물을 대상으로 유기독성물질의 분포 및 잠재적 오염원 분석 수행 – PMF(positive matrix factorization) 모델 분석 이용 PAHs 기원의 잠재적 오염원 추정 – 개별 화합물의 진단비를 이용한 alkyl–PAHs의 잠재적 오염원 추정 **마) 현대 스노우팩 수은 안정동위원소 비 분석(포항공대)** – 스발바르 환경과 유사한 국내의 한라산 현장탐사를 통한 스노우팩(총 20개) 및 대기 중 수은(총 12개) 시료 채취 및 in–situ snow flux chamber 현장 실험(총 시료 10개) – 한라산에서 획득한 현대 스노우팩 수은 유입원 및 유입 경로 추적 등 **바) 스발바르 연안 해류 변동성 파악 및 물질 확산 모델링 기술 개발(인하대)** –연안 물질이동 패턴 분석을 위한 해저 표층퇴적물 획득을 위한 현장 조사 수행 –대상 연안 내 3차원 해수 순환 패턴 분석을 통한 물질 수송 패턴 파악 –라그랑지안 입자 추적 모델링의 입자 방류 시기를 조절하는 시간 항 추가 및 MPI 계산 병렬 시스템 적용 –융빙수 유출량에 따른 입자 이동 궤적 분석 및 구역별 입자 체류시간 도출 등
4차년도 (2단계)	고해상도 인류세 환경변화 복원을 통한 인간 활동 간섭에 따른 스발바르 환경변화 이해	**가) 한국–노르웨이 스발바르 피오르드 국제공동탐사** – 기확보된 중력 시추코어 부시료 채취(UiT/NGU 방문)를 통한 시료 확보† 및 코어 스캐닝 원소 자료 획득 (X–radiography, MSCL, XRF–core scanning 등) †일부는 세부과제–4 등에 제공하여 유용 생물자원 개발 등에 기여 – 기초 분석 자료 기반 코어 암층서정립 **나) 스발바르 지역 다중매체 시료 획득†** – 스발바르 주변 융빙수, 암석, 토양, 스노우팩 등 **다) 고해상도 환경 프록시 분석을 통한 인류세 스발바르 환경변화 정밀 복원** – 인간거주 및 간섭에 의한 환경 자연시료 대상 – 시추 퇴적물 코어 및 탄성파 층서 정립 및 코어간 층서 대비

		✓ 광역적 탄성파 탐사(SBP) 수행을 통한 천부지층 자료 확보 ✓ 기초 자료 분석 기반 퇴적물 코어 암층서 정립 • MSCL, Linescan image, XRF core scanning, X-radiography, 입도 등 – 시추 퇴적물 코어 층서 기반 연대 정밀모델 고도화 ✓ ^{210}Pb, ^{137}Cs, ^{226}Ra 등 방사성 동위원소 활용 인류세 연대 정립 – 검증된 환경복원 프록시 고해상도 분석 ✓ 입도, 탄소 및 질소 함량, 안정 및 방사성 동위원소 비, DNA, 광물조성, 유기분자생체지표 등 ✓ 고해상도 스발바르 환경변화 양상 추적 : 퇴적물 및 육상 유기물질 유입량 변화 평가, 해빙 분포 변화, 조수빙하 거동 양상 추적, 생태 구조 변화 평가 등 ☞ **인류세 스발바르 환경변화 고해상도 정밀 복원** ☞ **홀로세 복원 기록과의 비교를 통한 북극 스발바르 기후환경변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 이해** **라) 시추 퇴적물 내 유기독성물질의 오염역사, 오염원 장기 변동 및 오염경로 추적** – 유기독성물질의 오염역사 파악, 유기탄소, 탄소안정동위원소 비, 연대측정 자료와 비교 분석, 유기독성물질의 과거와 현재 기원 변화 확인 – 콩스피오르드 시추 퇴적물 시료 내 유기독성물질 분석 결과와 다중 프록시 분석 결과를 기반으로 화합물의 오염역사, 오염원의 장기 변동 및 오염 경로 추적 **마) 지구온난화로 인한 스노우팩 감소가 초래하는 스발바르 내 대기 수은 거동 파악 및 예측** – 스발바르 스노우팩, 대기 중 수은 및 현장 실험을 통한 시료 채취와 수은 농도 및 안정동위원소 분석 – 3차년도 수행한 제주도 한라산에서의 대기-스노우팩 상호작용과 스발바르 스노우팩 및 대기 수은 데이터와 비교하여 현대 수은 유입원과 유입 경로 추적 – End-member 데이터베이스 : 과거-퇴적물 vs. 현재-스노우팩 – AMDE 현상이 수은 거동에 끼치는 영향력 평가 등 **바) 콩스피오르드 해류 특성 변화로 인한 조수빙하 유출 물질의 이송 및 확산 기작 파악** – 모델 정확도 검증 및 개선 ✓ 융빙수 유출 관련 수온 및 염분 자료 수집 ✓ 수치모델 입력자료 검증 및 개선방안 검토 ✓ 모델 파라미터 테스트를 통한 모델 정확도 개선 – 물질추적 기술 연구 ✓ 기 수집된 해저 표층퇴적물 자료를 활용한 콩스피오르드 연안 해역 물질이동패턴 분석 ✓ 조수빙하 융빙수 유출 특성 분석 및 유출 위치별 입자 초기 위치 설정 및 기원에 따른 물질이동패턴 분석

Fig. 1. Overview of R&D project.

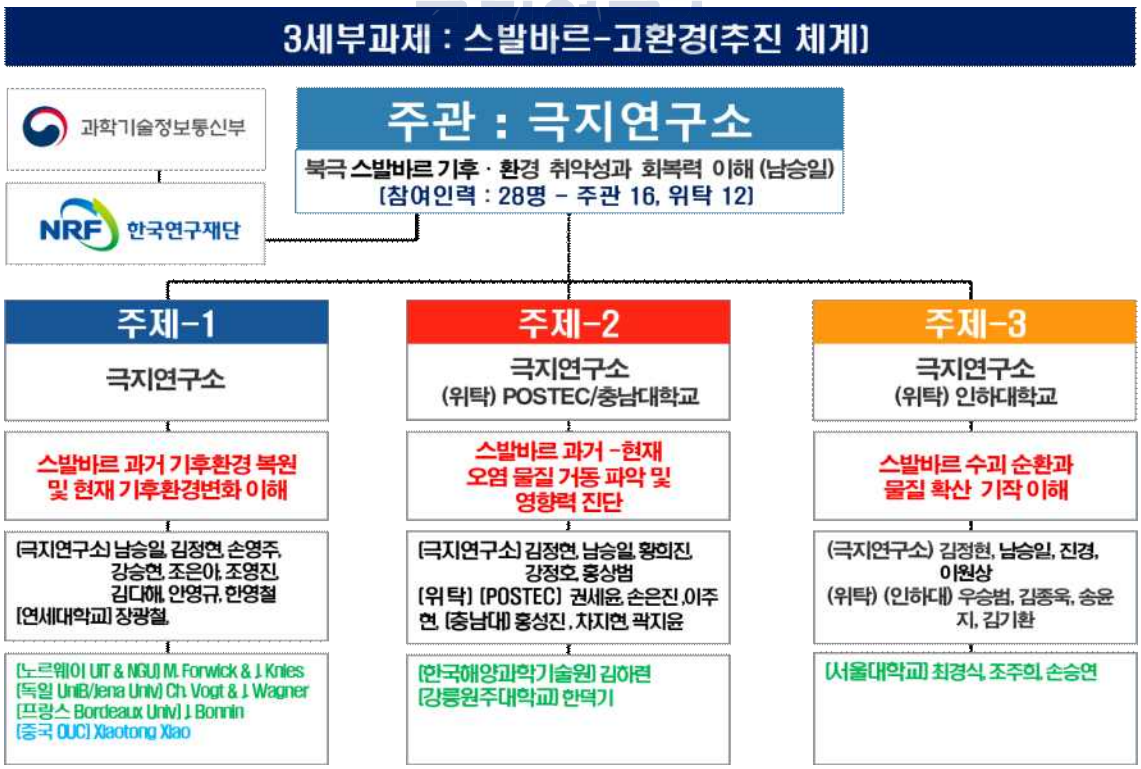


Fig. 2. R&D promotion system.

3세부과제 : 스발바르-고환경(로드맵-연구내용)

주 제	전체 (48개월)				최종 목표 달성
	1차년(1단계 1차년)	2차년(1단계 2차년)	3차년(2단계 1차년)	4차년 (2단계 2차년)	
	2021/04/27-2021/12/31	2022/01/01-2022/12/31	2023/01/01-2023/12/31	2024/01/01-2025/03/31	
공통	한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사 및 시료 획득				• 스발바르 환경변화 주요 원인에 대한 과학적 자료 제공 • 극지빙 환경변화 복원 기술 확보 • 북극 연안 물질순환 기작 파악을 위한 수치 모델링 구축 • 극지유해물질 관련 DB 구축을 통한 극지 오염저감 정책에 대한 기초자료 제공 • 극지 수문분석 자료 제공/UN 국제수문협약 역할 기여
주제-1 기후 환경	부시료 확보 및 기초자료 분석		기후환경 프록시 기반 홀로세 및 인류세 스발바르 기후환경변화 정밀 복원 및 비교		
	기후환경 프록시 개발 및 관련 인프라 확충		극지 환경변화에 대한 인류 영향력 이해		
주제-2 오염 생태	퇴적물 무기오염물질[수은 등] 분석		인류세 수은 기원 및 거동 추적		
	다매체 시료 유기독성물질 분석		유기독성물질의 거동 및 오염 역사/경로 추적		
주제-3 모델 순환	유동 관측자료 및 지형 자료 수집		물질 추적 모델링 기술 개발		
	해수 순환모델[FVCOM] 구축 및 검증		조수빙하 유출 물질의 이송 및 확산 기작 파악		

Fig. 3. Research roadmap.

3세부과제 : 연차별 성과

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	목표 실적 (달성도 %)
[주제별 정량/정성 성과] • 한-노 스발바르 피오르드국 제공동탐사 •스발바르 현재 환경 변화 모니터링 및 과거 기록 복원 •유・무기 오염물질 유입량 변화 추적 및 생태 영향력 평가 •유동모델(FVCOM) 구축을 통한 조수빙하 유출 물질의 순환 기작 이해	100	1, 2, 3	1차년도 (1단계 1차년도)	○ NGU 협업 코어 퇴적물 부시료 확보(코로나로 인한 탐사 연기로 plan-B 수행) (1000여점 확보) ○ 퇴적물 대상 입도 분포의 end-member, XRD 광물조성 등 환경복원 프록시 개발 및 분석 4건 완료 ○ 퇴적물 내 유기・무기 오염물질 분석(유기-표층 퇴적물 41건, 무기-코어 4점 분석, 학회 발표 1건 ※ SCI급 논문 4편
			2차년도 (1단계 2차년도)	○ 노르웨이, 한국, 스웨덴, 독일이 참여한 CRYOCARB 프로그램과 4개국 공동탐사수행 (GC 6점 및 MUC 시추코어 13점 등 총 19개, 부시료 990점 확보) ○ 기후환경복원 프록시 활용 저해상도 퇴적물 분석 완료 (콩스, 비데, 햄버그북타 코어 퇴적물 내 다중 프록시 분석 4건 이상 완료) ○ 유기-다매체 시료 87건, 무기-부시료 223건 분석 완료 및 학회 발표 3건) ○ 스발바르 피오르드/연안 조석 및 해류변화 특성 모사 유동모델(FVCOM) 구축(환경인자 DB 6건, 피오르드/연안 유동모델(FVCOM) 구축 완료) ※ 상위 10% 이상 국제 전문학술지(1편) 포함 SCI급 논문 4편
			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 한국-노르웨이 스발바르 국제공동 탐사 및 시료 획득 (시추코어 6점 이상 확보) ○ 딕슨피오르드 지형변화 현장조사 및 자료획득 ○ 고해상도 다중 프록시 분석 기반 홀로세 스발바르 환경변화 정밀 복원 및 이해 , 환경인자 DB 1건 (환경인 DB 1건, 상위 10% SCI급 논문 2편 및 학회 발표 2건) ○ 과거 및 현재 오염물질 유입원 및 유입경로 추적(상위 20% SCI급 논문 2편 및 학회 발표 2건) ○ FVCOM 모델 구축 관련 환경인자 DB 2건
			4차년도 (2단계 2차년도)	○ 한국-노르웨이 스발바르 국제공동 탐사 동안 기확보된 중력 시추코어 부시료 분석 및 평가 (중력시추코어 16점 분석, 부시료 채취 1400점 이상) ○ 고해상도 다중 프록시 분석 기반 인류세 스발바르 환경변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 평가, 환경인자 DB 4건 (상위 20% 연구논문 2편 포함 SCI급 논문 4편 및 학회 발표 11건) ○ 유・무기 오염물질 유입량 변화 추적 및 생태 영향력 평가, 환경인자 DB 2건 (상위 10% 연구논문 2편 포함 SCIE급 논문 3편 및 학회 발표 2건) ○ 모델 결과 기반 조수빙하 유출 물질의 순환 기작 이해 (상위 20% SCI급 논문 1편 투고 예정 및 학술 발표 2건)
			최종	○ 한국-노르웨이 스발바르 국제공동 탐사 및 시료 확보(탄성파 자료, 총 GC 16점, MUC 130점, CTD 39점, 부시료 5600점 이상) (100%) ○ 프록시 적용 현재 및 과거 환경변화 복원 연구 수행(상위 10% 연구논문 5편 포함 국제 전문학술지 총 15편, 국내외 학술발표 총 32건) (퇴적물 대상 기후환경 프록시 개발 및 분석 15건 이상 완료, 환경인자 DB 누적 5건) (100%) * '25년 1-3월, 국제 전문학술지 3편 투고 예정 ○ 유・무기 오염물질 유입량 변화 추적 및 생태 영향력 평가(상위 10% 연구논문 4편 포함 국제 전문학술지 총 6편, 국내외 학술발표 총 10건) (환경인자 DB 누적 2건) (100%) ○ 모델 결과 기반 조수빙하 유출 물질의 순환 기작 (상위 10% 연구논문 2편 포함 국제 전문학술지 총 6편 및 학술발표 8건), 환경인자 DB 누적 8건 (100 %)

Fig. 4. Annual research plans and goals.

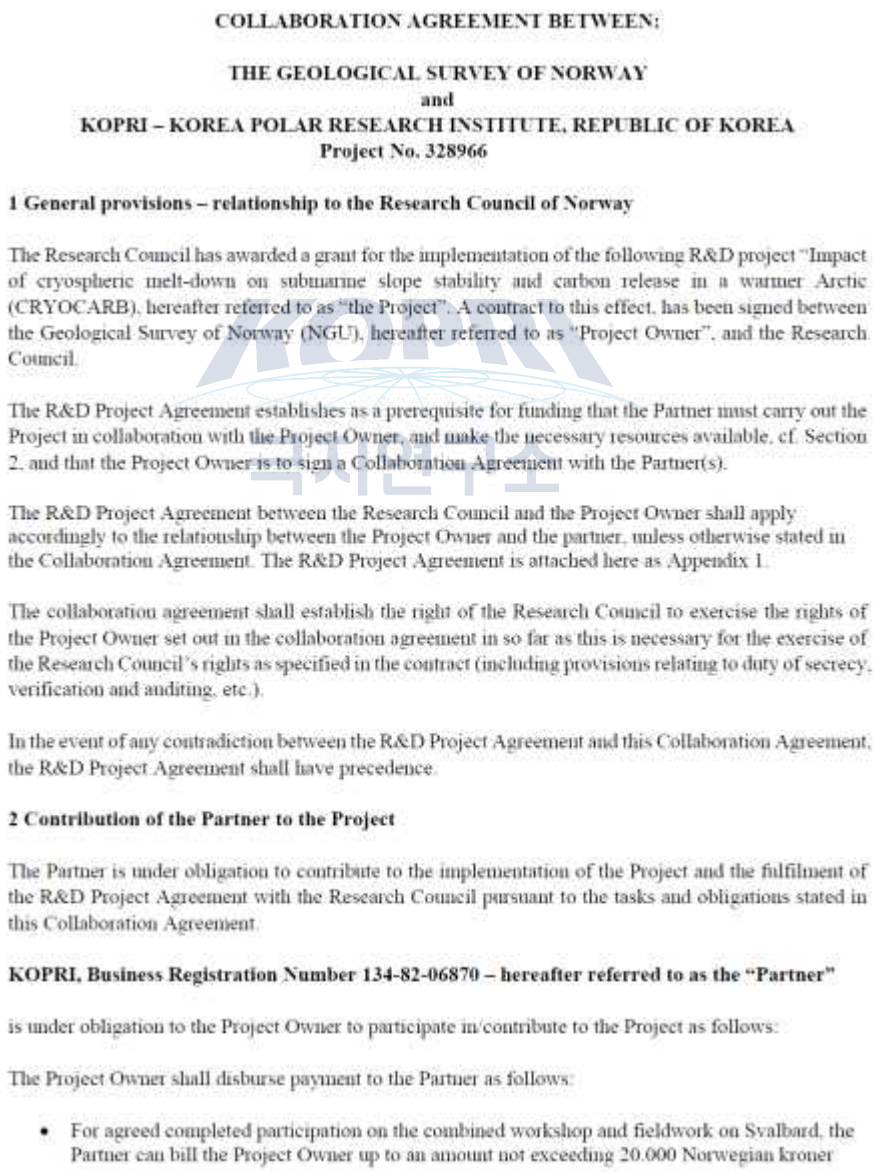
나. 연구결과

1) 한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사 및 시료 획득

1-1) 1차년도

가) 극지연구소와 노르웨이 지질조사소 연구책임자 간의 연구 협력 협약체결(Fig. 5)

- 원활한 스발바르 지역 연구 관련 공동 워크숍 참석 및 야외조사 목적
- 성공적인 2022년 한국-노르웨이 피오르드 국제공동탐사 수행 목적



COLLABORATION AGREEMENT BETWEEN:

THE GEOLOGICAL SURVEY OF NORWAY
and
KOPRI – KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE, REPUBLIC OF KOREA
Project No. 328966

1 General provisions – relationship to the Research Council of Norway

The Research Council has awarded a grant for the implementation of the following R&D project "Impact of cryospheric melt-down on submarine slope stability and carbon release in a warmer Arctic (CRYOCARB), hereafter referred to as "the Project". A contract to this effect, has been signed between the Geological Survey of Norway (NGU), hereafter referred to as "Project Owner", and the Research Council.

The R&D Project Agreement establishes as a prerequisite for funding that the Partner must carry out the Project in collaboration with the Project Owner, and make the necessary resources available, cf. Section 2, and that the Project Owner is to sign a Collaboration Agreement with the Partner(s).

The R&D Project Agreement between the Research Council and the Project Owner shall apply accordingly to the relationship between the Project Owner and the partner, unless otherwise stated in the Collaboration Agreement. The R&D Project Agreement is attached here as Appendix 1.

The collaboration agreement shall establish the right of the Research Council to exercise the rights of the Project Owner set out in the collaboration agreement in so far as this is necessary for the exercise of the Research Council's rights as specified in the contract (including provisions relating to duty of secrecy, verification and auditing, etc.).

In the event of any contradiction between the R&D Project Agreement and this Collaboration Agreement, the R&D Project Agreement shall have precedence.

2 Contribution of the Partner to the Project

The Partner is under obligation to contribute to the implementation of the Project and the fulfilment of the R&D Project Agreement with the Research Council pursuant to the tasks and obligations stated in this Collaboration Agreement.

KOPRI, Business Registration Number 134-82-06870 – hereafter referred to as the "Partner"

is under obligation to the Project Owner to participate in/contribute to the Project as follows:

The Project Owner shall disburse payment to the Partner as follows:

- For agreed completed participation on the combined workshop and fieldwork on Svalbard, the Partner can bill the Project Owner up to an amount not exceeding 20.000 Norwegian kroner

Fig. 5. Collaboration agreement between NGU and KOPRI.

나) 콩스피오르드 입구에서 확보한 15 m길이의 고해상도 퇴적물코어 KH17-GPC01 정밀 주상도 제작 및 입도분석 수행

(1) 코어 정보

- 2019년 11월 노르웨이 지질조사소(NGU)에서 쇄빙연구선 RV Kronprins Haakon에 장착된 giant piston corer를 이용하여 콩스피오르드 입구에서 시추한 1524.5 cm 길이의 KH17-GPC01 코어를 활용함(Fig. 6)
- 코어 정점은 북위 79.03도, 동경 10.76도에 위치하며 수심은 324.8 m임

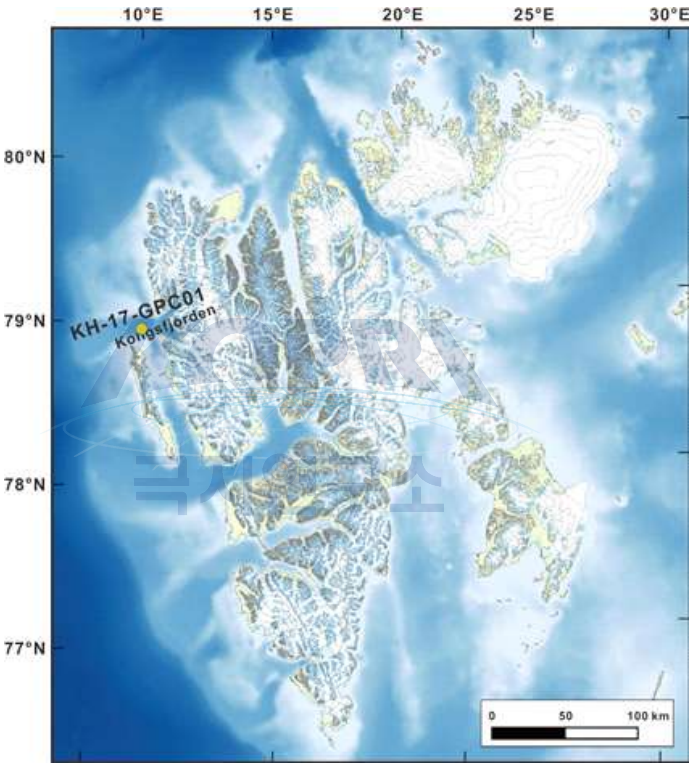


Fig. 6. Core site of sediment core KH17-GPC01, recovered from the mouth of Kongsfjorden, Svalbard, during the *RV Kronprins Haakon* Svalbard expedition in 2019.

(2) 암상단위(lithological unit) 구분

- X-radiography, 입도 분석, 유기지화학 분석 등을 활용하여 퇴적물 코어를 4개의 암상 단위로 구분(Figs. 7, 8)
- Unit1 (0-244 cm): 짙은 황갈색(dark yellowish brown) 및 짙은 회갈색(dark grayish brown)의 얼룩진 층(mottles)이 27-127 cm 구간에서 특징적으로 나타남; 전반적으로 소량(3.6-5%)의 사질(sand)을 포함한 니질(mud)로 구성되어 있으며 다른 Unit에 비하여 비교적 높은 IRD(>2mm) 함량을 보이며 50-180 cm구간에서 가장 우세하고 이 단위 최하부에서 큰 크기의(oversized) 암편이 관찰됨, 음영상으

로 확인되는 비교적 조립한(어두운) 층이 0-41 cm와 57-87 cm 구간에서 나타나며, 119 cm 아래로는 조립질 층과 세립질층이 교호하는 양상을 보임; 이 단위는 뚜렷한 일차퇴적구조는 관찰되지 않고 생교란이 특징적이며, 24 cm 아래로 웜튜브(worm tube, 관벌레에 의해 생성된 충관상구조)가 같이 나타남, 특히 75-125 cm와 182.5-200 cm 구간에서 웜튜브가 집중됨; 완전한 조개껍질을 포함하여 조개껍질 파편이 이 암상 단위 전반에 걸쳐 산재함, 복족류로 추정되는 화석은 80-180 cm 구간에서 빈번하게 관찰됨; 이 단위 하부 경계는 다소 경사짐, 경계는 매우 뚜렷하지는 않지만 암상의 변화로 구분이 가능함(비교적 세립한 하부 단위, Unit 2). TS 값은 0.3-0.9% 내외의 값을, TOC는 1.5%의 비교적 높은 값을 나타냄. $CaCO_3$는 8% 내외의 비교적 일정한 값을 보이며 XRF-core scanning 원소분석으로 얻은 Ca (ppm) 값은 비교적 일정하게 작은 값을 보임

- Unit2 (244-733 cm): 전반적으로 짙은 황갈색을 띰; 주로 니질로 구성되지만, 상부 단위(Unit 1)와 비교하여 비교적 많은 양의 사질을 포함(5.2-7.5%)하고, 소량의 빙하기원 조립질 쇄설성 퇴적물(IRD)이 산재되어 있음; 이 단위는 대체로 괴상(massive)으로 구성되지만, 웜튜브가 빈번하게 관찰되며, 여러 조립질 층들이 321-338 cm, 414-444 cm, 514-532 cm, 617-633 cm, 652-658 cm 및 712-732 cm 구간에서 나타남; 많은 조개껍질이 산재하지만, 복족류 화석은 드물게 관찰됨; 이 단위의 하부 경계는 점진적이며, 점진적인 색상의 변화로 확인됨(짙은 황갈색에서 황갈색, yellowish brown). TS와 TOC 값은 하부구간에서 상부로 가면서 점차 증가하는 패턴을 보임. 이와 반대로 $CaCO_3$는 상부로 향하면서 점차 감소하는 패턴을 보이며 Ca (ppm)도 전체적으로 낮은 값을 보이며 상부로 향하면서 비교적 완만하게 감소하는 패턴을 보임
- Unit3 (733-1177 cm): 주로 황갈색을 띰, 930-1120 cm 구간에서 올리브 갈색층과 교호함; 주로 니질로 구성되며, 사질 함량(6.4-10.0%)은 하부로 가면서 점진적으로 감소함, IRD는 다른 Unit에 비하여 낮은 값을 보이며, 920 cm 하부 구간에서 비교적 입자가 큰 IRD이 산재함; 전반적으로 성층화되어 있으며, 엽리층리로 구성된 구간이 두 구간에 걸쳐 관찰됨(770-800 cm, 880-930 cm), 엽리층리는 경계가 불분명하며 대체로 수평적으로 불연속적이고 약간 굴곡짐(undulated), 최하부 1120 cm 이하)에서는 소량의 IRD를 포함한 괴상의 세립질 층으로 구성됨; 생교란된 구간은 전반적으로 매우 적게 나타남; 조개껍질은 800-880 cm와 1080-1190 cm구간에서 나타남; 이 단위의 하부 경계는 약간 굴곡지며 암상 변화로 구분됨(조립한 하부 단위, Unit 4). TS와 TOC는 비교적 낮은 값으로 일정하고 $CaCO_3$와 Ca (ppm)는 하부로 가면서 감소하는 경향을 보임
- Unit4 (1177-1524.5 cm): 주로 황갈색으로 구성되나, 1222 cm에서 선명한 색상 변화를 보이며 짙은 올리브회색(dark olive gray과 검정색의 반점(mottles) 구간이 나타나고 1365 cm 하부에서는 감소함, 1400-1420 cm 구간에서 담적색(light red) 층이 관찰됨; 주로 니질로 구성되며, 14% 이상의 높은 사 함량이 1291 cm 구간에

서 나타남, IRD은 적게 나타나며 일부 특대형의 암편이 관찰됨; 대체로 성층화되어 있으나 상부 구간(1177–1370 cm)은 부분적으로 반문과 웜튜브가 관찰됨, 1370 cm 아래로 성층화가 더욱 분명하게 관찰됨, 엽리층리로 구성된 구간이 1370–1420 cm와 1450–1480 cm 구간에서 나타나며, 엽리층리는 Unit 3에서처럼 불분명하며, 대체로 수평연속성이 불량하고 다소 굴곡짐; 온전한 패각과 파편은 각각 1330 cm와 1488 cm에서 나타나며, 비교적 큰 복족류 패각이 1327 cm구간에서 나타남. TS와 TOC는 하부에서 상부로 가면서 증가하고 $CaCO_3$와 Ca (ppm)는 1000 cm 하부 구간에서 비교적 낮은 값을 보이며 점차 증가하는 패턴을 보임. 그러나 약 1405 cm 깊이에서 매우 높은 값이 나타나며 코어 이미지에서 관찰된 돌로마이트층으로 보이는 분홍색 층(Fig. 7)과 일치하는 것으로 보임

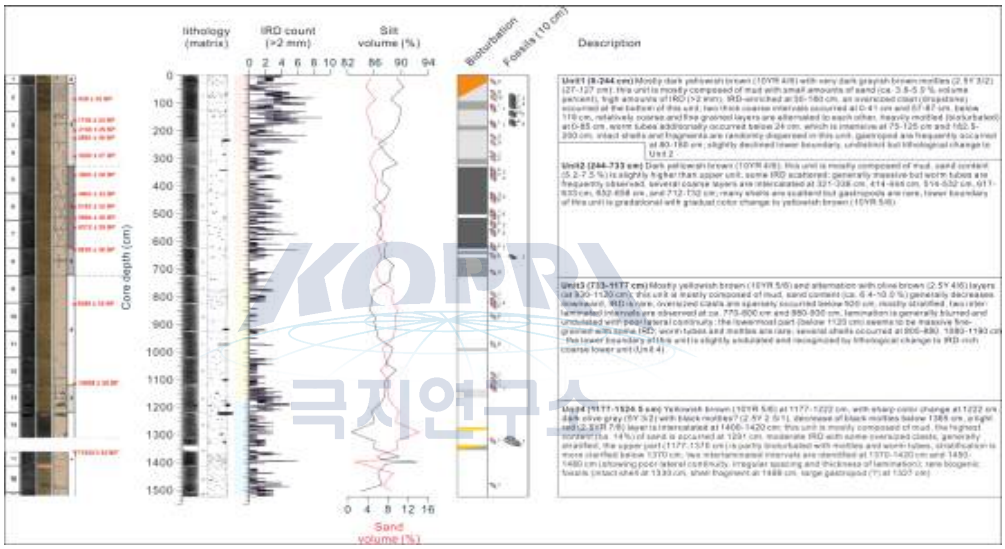


Fig. 7. Preliminary description of sediment core KH17–GPC01, including AMS ^{14}C–dated ages, recovered from the mouth of Kongsfjorden, Svalbard, during the *RV Kronprins Haakon* expedition in 2019.

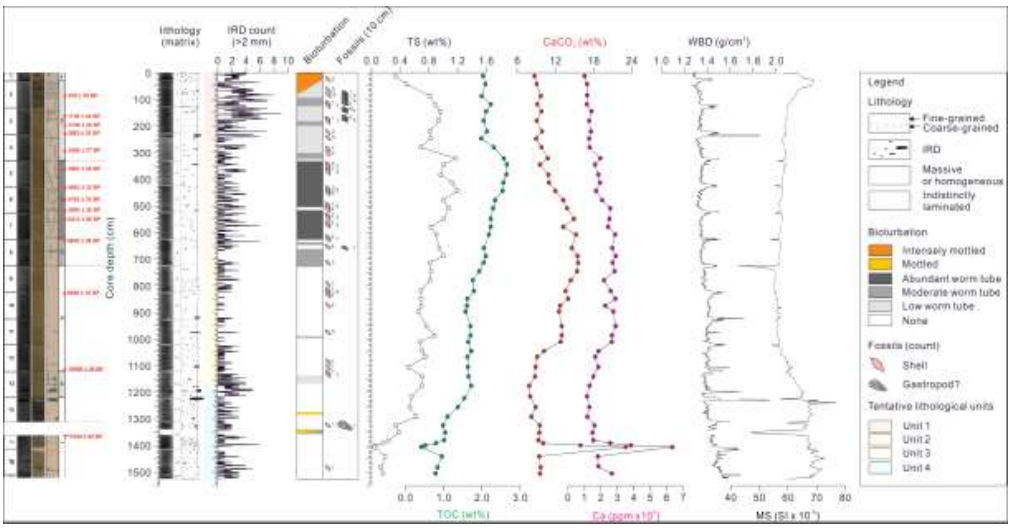


Fig. 8. Preliminary description, IRD count (>2 mm), elemental analysis (TS (wt%), TOC (wt%), and $CaCO_3$ (wt%)), wet bulk density (g/cm^3), and magnetic susceptibility of sediment core KH17-GPC 01. The core was recovered using a piston long corer from the mouth of Kongsfjorden, Svalbard, during the *RV Kronprins Haakon* expedition in 2019.

KOPRI 극지연구소

1-2) 2차년도

가) 2022년 한-노 스발바르 피오르드 국제공동탐사

(1) 탐사개요

- CRYOCARB 국제공동프로젝트(노르웨이, 한국, 독일, 스웨덴 공동 4개국 참여) 일환으로 노르웨이 트롬소 대학의 RV Helmer Hanssen을 임차하여 추진한 2022년 스발바르 스피츠베르겐(Spitsbergen) 섬 피오르드 및 스발바르 북동부에 위치하는 노르아우스트란데트(Nordaustlandet) 섬 육상 국제공동탐사 수행(2022/07/23 - 2022/08/01)(Fig. 9)
- 극지연구소에서는 이번 국제 공동탐사에 참여하여 스발바르 스피츠베르겐 섬 서부 3개 피오르드(템펠피오르드, 이스피오르드, 콩스피오르드)와 스발바르 북부 힌노펜 해협에서 천부지층 탐사, CTD (Conductivity-Temperature-Density) 측정 및 해수 시료 획득, 멀티코어를 이용한 천부 퇴적물 획득, 중력코어를 이용한 심부 퇴적물 획득을 진행함

(2) 천부지층 탐사

- 스발바르 스피츠베르겐 섬 서부 3개 피오르드와 스발바르 북부 힌로펜 해협에서 천부지층 탐사를 수행함
- 천부지층 탐사 결과를 바탕으로 스발바르 북부 힌로펜 해협의 중력코어 정점을 설정

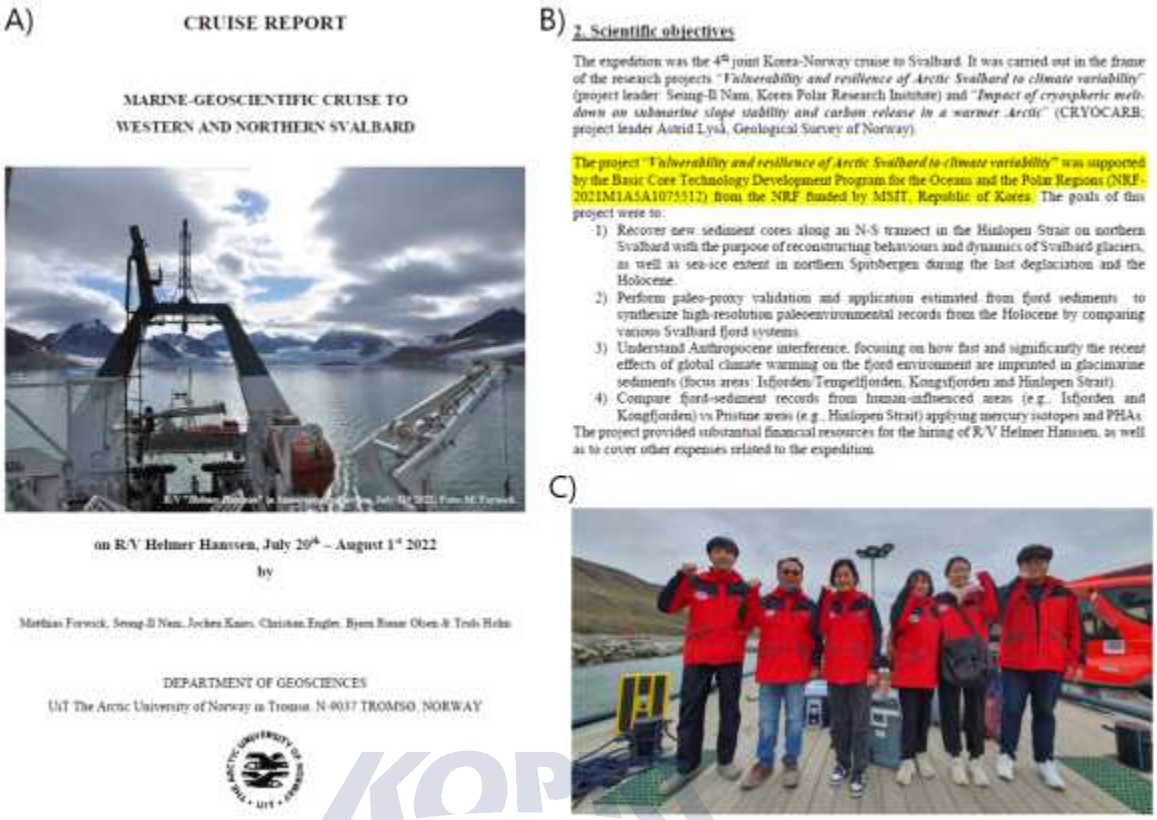


Fig. 9. (A–B) Cover and scientific objectives from cruise report for the 4th Korea–Norway international Svalbard fjord cruise in 2022. (C) Group photo of cruise participants.

KOPRI 극지연구소

(3) CTD 측정 및 해수 시료 획득

- CTD 작업을 진행하면서 템펠피오르드(n = 1), 콩스피오르드(n = 3), 힌로펜 해협(n = 1) 등 총 5개 정점에서는 수심 10 m 수층에서 해수 시료를 획득함(Table 1, Fig. 10)
- 해수 시료는 해수 내 부유 입자들을 필터링한 뒤, 입도 분석을 통해 융빙수에 의해 부유한 입자들의 분포가 어떻게 이루어지는지 파악하고, 이 입도 분포를 입도 엔드멤버 모델링 결과 산출된 융빙수에 의한 부유 입자들의 분포와 비교할 예정임

Table 1. CTD stations where data were collected during the 4th Korea-Norway international Svalbard fjord cruise in 2022.

No.	Station	Latitude(N)	Longitude(E)	Depth(m)	Sampling Site	Sampling Date	Water sample
1	HH22-1146-CTD	78° 23.85'	016° 59.00'	96	Tempelfjorden	2022.07.23	O
2	HH22-1149-CTD	78° 24.27'	015° 51.04'	195	Isfjorden(inner)	2022.07.23	-
3	HH22-1153-CTD	78° 15.64'	014° 32.82'	274	Isfjorden(middle)	2022.07.23	-
4	HH22-1155-CTD	78° 04.85'	012° 26.04'	235	Isfjorden(outer)	2022.07.23	-
5	HH22-1158-CTD	79° 02.79'	011° 08.27'	324	Kongsfjorden(outer)	2022.07.24	O
6	HH22-1160-CTD	78° 57.26'	011° 57.40'	340	Kongsfjorden(middle)	2022.07.24	O
7	HH22-1162-CTD	78° 53.78'	012° 26.25'	76	Kongsfjorden(inner)	2022.07.24	O
8	HH22-1165-CTD	80° 42.12'	016° 12.16'	480	Hinlopen Strait	2022.07.25	-
9	HH22-1175-CTD	79° 38.69'	018° 47.01'	311	Hinlopen Strait	2022.07.27	O
10	HH22-1178-CTD	79° 58.48'	017° 33.62'	326	Hinlopen Strait	2022.07.27	-
11	HH22-1184-CTD	80° 20.85'	016° 09.58'	374	Hinlopen Strait	2022.07.28	-

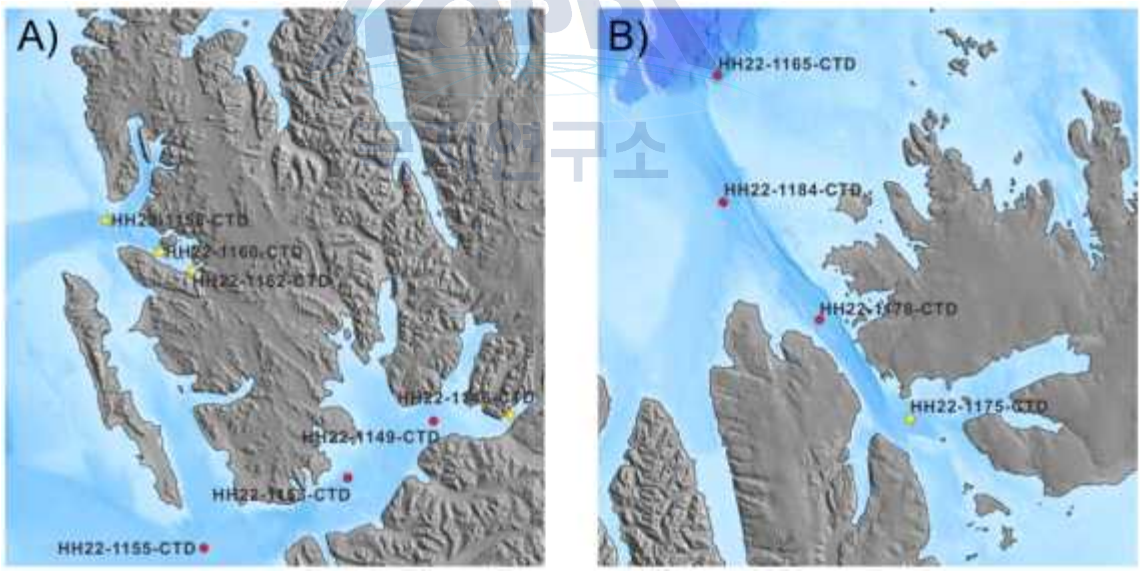


Fig. 10. CTD stations in (A) the west Spitsbergen fjords and (B) the Hinlopen Strait. Seawater samples were collected, selected sites marked with yellow circles, during the 4th Korea-Norway international Svalbard fjord cruise in 2022.

(4) 멀티코어를 이용한 천부 퇴적물 획득

- 스발바르 스피츠베르겐 섬 서부, 템펠피오르드(n = 2), 이스피오르드(n = 3), 콩스피오르드(n = 4)와 스발바르 북부, 힌로펜 해협(n = 4) 등 총 13개 정점에서 멀티

코어를 이용하여 천부 퇴적물 51점을 획득하고 1,000점 이상의 부시료를 채취함 (Table 2, Fig. 11)

- 정점 별로 2-6개의 멀티코어 획득
- 템펠피오르드와 콩스피오르드 안쪽은 함수율이 높은 소프트(soft)한 퇴적물로 인해 적은 수의 멀티코어를 획득하여 같은 정점에서 두 번의 코어링 작업 수행
- 탐사 기간 중 각 정점에서 획득한 멀티코어들을 대상으로 1 cm 간격으로 부시료 채취(단, 표층 0-2 cm 구간은 0.5 cm 간격으로 채취)
- 입도 및 유기 동위원소 등 기초 자료 분석, 수은 동위원소 등 무기지화학 분석, 유기분자생체지표 등 유기지화학 분석, aDNA 분석을 위한 부시료를 획득(코어별 11-53점, 총 345점)
- 저서 유공충 분포 동정을 위한 부시료를 획득함(코어별 21-32점, 총 268점). 저서 유공충 분포 동정을 위한 부시료는 채취 직후 로즈 벵갈(rose bengal)로 염색함. 해당 연구는 프랑스 보르도 대학교 연구팀(EPCC)과 국제공동연구 수행 예정
- 미생물 유전체 분리를 통해 환북극권 미생물 유전체 라이브러리 제작 연구에 활용될 상층부 부시료를 획득함(2-12 cm, 이스 피오르드와 힌로펜 해협에서 6점). 해당 연구는 극지연구소 김한우 박사 연구팀(세부과제-4 책임)과 협력하여 수행 예정
- 신약 개발을 위한 표층 부시료 획득(0-2 cm, 총 11점). 해당 연구는 서울대학교 약학대학 오동찬 교수 연구팀과 협력연구 수행
- 서울대학교 약학대학 오동찬 교수 연구팀과 연구 협력 수행
- 아카이브 보관용 부시료 획득(코어별 25-65 점, 총 585점)
- HH22-1161-MUC의 2개 코어(각각 4° C, -20° C 보관)와 HH22-1164-MUC의 1개 코어(4° C 보관)는 부시료를 채취하지 않고 보관함. 향후 노르웨이 Stijn De Schepper (NORCE Climate and Environment, Norwegian Research Centre and Bjerknes Centre for Climate Research, Norway) 교수팀과 국제공동연구에 활용 예정

Table 2. Sampling stations for multi-cores collected during the 4th Korea-Norway international Svalbard fjord cruise in 2022.

No.	Core	Latitude(N)	Longitude(E)	Depth(m)	Sampling Site	Sampling Date
1	HH22-1147-MUC	78° 23.81'	016° 58.64'	96	Tempelfjorden	2022.07.23
2	HH22-1148-MUC	78° 23.84'	016° 58.11'	98	Tempelfjorden	2022.07.23
3	HH22-1152-MUC	78° 24.27'	015° 51.04'	194	Isfjorden (inner)	2022.07.23
4	HH22-1154-MUC	78° 15.71'	014° 32.48'	274	Isfjorden (midle)	2022.07.23
5	HH22-1156-MUC	78° 05.00'	012° 26.21'	235	Isfjorden (outer)	2022.07.23
6	HH22-1159-MUC	79° 02.91'	011° 08.14'	323	Kongsfjorden (outer)	2022.07.24
7	HH22-1161-MUC	78° 57.26'	011° 57.40'	340	Kongsfjorden (middle)	2022.07.24
8	HH22-1163-MUC	78° 53.78'	012° 26.25'	76	Kongsfjorden (inner)	2022.07.24
9	HH22-1164-MUC	78° 53.78'	012° 26.25'	76	Kongsfjorden (inner)	2022.07.24
10	HH22-1176-MUC	79° 39.08'	018° 48.92'	311	Hinlopen Strait	2022.07.27
11	HH22-1177-MUC	79° 38.96'	018° 49.13'	317	Hinlopen Strait	2022.07.27
12	HH22-1179-MUC	79° 58.58'	017° 33.45'	328	Hinlopen Strait	2022.07.27
13	HH22-1185-MUC	80° 21.12'	016° 09.36'	378	Hinlopen Strait	2022.07.28

KOPRI 극지연구소

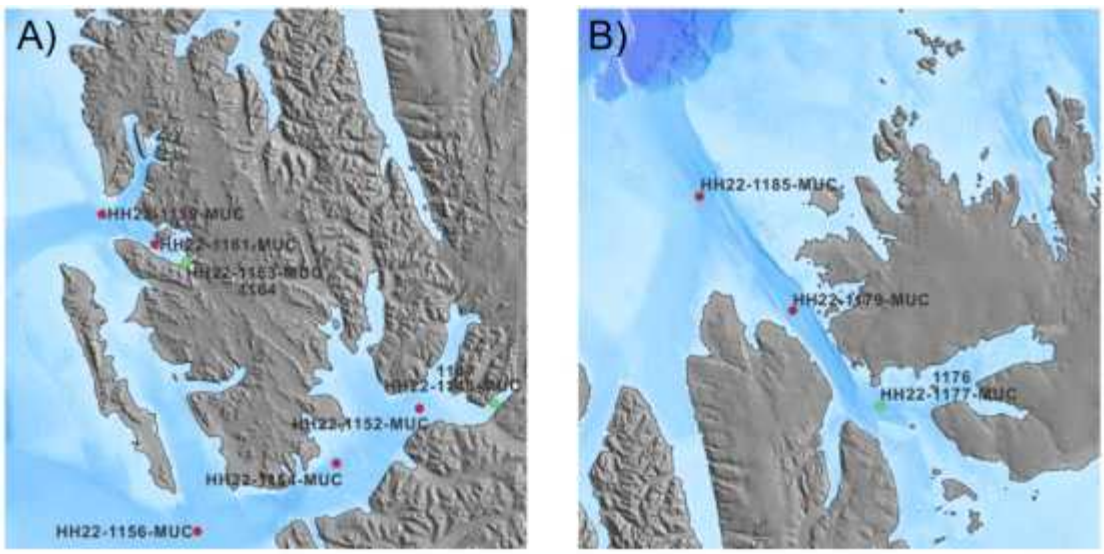


Fig. 11. Sampling stations for multi-cores in (A) the west Spitsbergen fjords, and (B) the Hinlopen strait. Duplicate cores were retrieved from several sites, marked with green circles, during the 4th Korea-Norway international Svalbard fjord cruise in 2022.

(5) 중력코어를 이용한 심부 퇴적물 획득

- 스발바르 북부, 힌로펜 해협의 총 6개 정점에서 중력코어를 이용하여 심부 퇴적물 획득(Table 3, Fig. 12)
- 정점별로 208-581 cm 길이의 중력 코어 시추
- 현재 6점의 코어는 100 cm 간격으로 잘라서 UiT 코어 저장고에 보관
- 2022년 11월 말~12월 초 NGU 방문하여 코어 절개, 물성자료 측정, 부시료 채취
- 채취된 부시료는 무기질 원소, 총 유기 및 무기탄소 함량, 탄소 및 질소 동위원소비, 입도, 납/세슘 연대, 수은 안정동위원소 비 분석 등에 활용

Table 3. Sampling stations for gravity cores collected during the 4th Korea-Norway international Svalbard fjord cruise in 2022.

No.	Core	Latitude(N)	Longitude(E)	Depth(m)	Sampling Site	Sampling Date	Recovery(cm)
1	HH22-1167-GC	80° 43.41'	016° 18.34'	478	Hinlopen Strait	2022.07.25	208 (3 sections)
2	HH22-1180-GC	79° 58.65'	017° 33.88'	331	Hinlopen Strait	2022.07.27	474 (5 section)
3	HH22-1181-GC	79° 46.48'	018° 06.44'	415	Hinlopen Strait	2022.07.27	494 (5 sections)
4	HH22-1182-GC	79° 38.77'	018° 48.97'	322	Hinlopen Strait	2022.07.27	520 (6 sections)
5	HH22-1186-GC	80° 21.04'	016° 10.05'	377	Hinlopen Strait	2022.07.28	581 (5 sections)
6	HH22-1187-GC	80° 33.10'	015° 46.97'	327	Hinlopen Strait	2022.07.28	386 (4 sections)

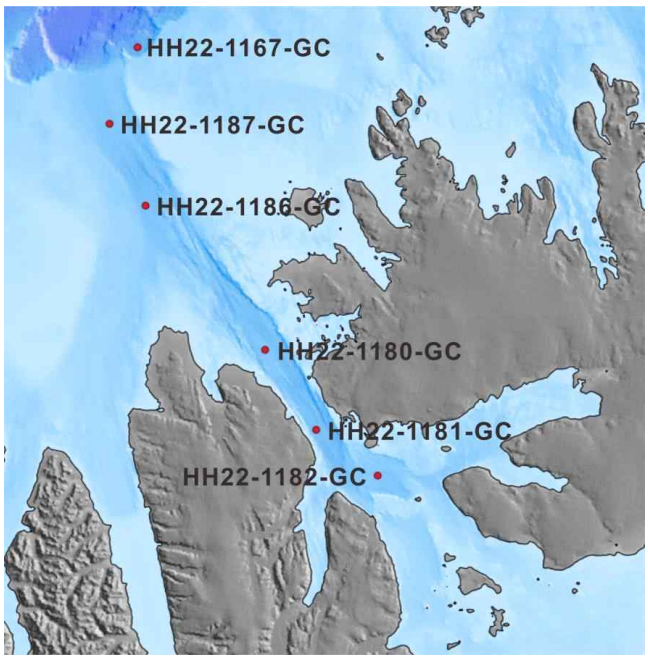


Fig. 12. Sampling stations for gravity cores collected in the Hinlopen Strait during the 4th Korea-Norway international Svalbard fjord cruise in 2022.

나) 노르웨이 지질연구소(NGU) 협업 콩스피오르드 코어퇴적물 부시료 획득

(1) 코어퇴적물 CAGE19-3-KH-17-GPC01(~15 m) 부시료 760점 획득

- NGU 주도, 콩스피오르드 내부에서 확보한 피스톤 코어 대상(Figs. 13, 14)
- 입도, 광물조성 등 기초 자료 분석용 부시료 획득(5 cm 간격, 약 350점)
- 수은 동위원소 등 무기지화학 분석용 부시료 획득(5 cm 간격, 약 350점)
- 유기분자생체지표 등 유기지화학 분석용 부시료 획득(약 60점)
- 획득 부시료 대상 함수율 측정 및 동결건조 완료

(2) 코어퇴적물 CAGE19-3-KH-17-GC01 부시료 130점 획득

- NGU 주도, 콩스피오르드 내부에서 확보한 중력 코어의 상부 2m 대상(Fig. 15)
- 피스톤 코어 CAGE-19-3-KH17-GPC01과 동일지점에서 확보한 중력 코어 퇴적물로, 피스톤 코어의 상부 소실분에 대한 보정용으로 활용
- 기초 분석, 수은 동위원소 및 유기분자생체지표 분석 용도(5cm 간격, 약 130점)
- 획득 부시료 대상 함수율 측정 및 동결건조 완료

(3) 코어퇴적물 CAGE19-3-KH14-GPC02 부시료 100점 획득

- NGU 주도, 콩스피오르드 외부에서 확보한 피스톤 코어 대상(Fig. 16)
- KH17 코어에 비해 상대적으로 긴 연대범위를 기록한 코어 퇴적물로, marine isotope stage 6 시기 퇴적된 시료 대상으로 부시료 채취(section #6 ~ 12)
- 획득 부시료 대상 함수율 측정 및 동결건조 완료
- 추후 Biological materials 내 안정 동위원소 분석을 위해 보관

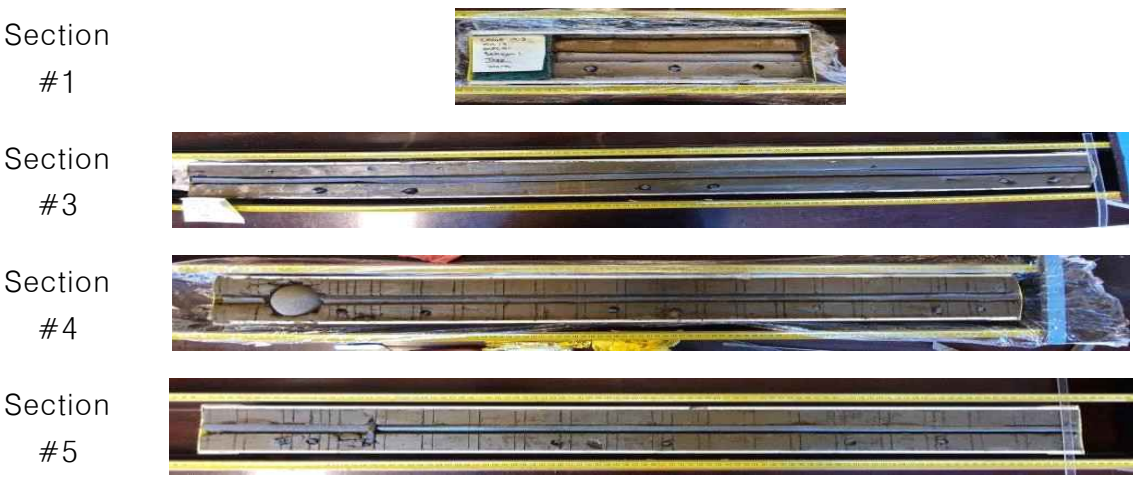


Fig. 13. Sections #1-#5 of sediment core CAGE19-3-KH-17-GPC01.

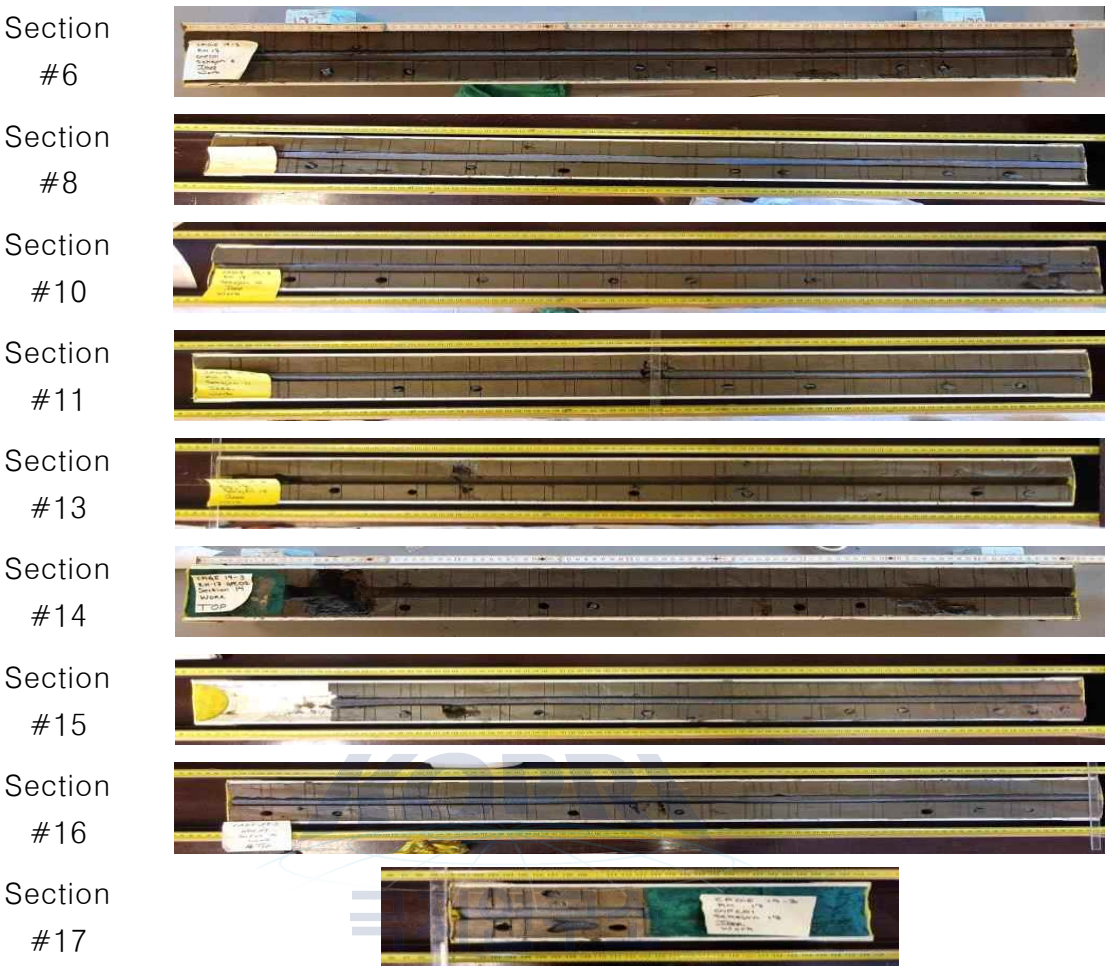


Fig. 14. Sections #6-#17 of sediment core CAGE19-3-KH-17-GPC01.

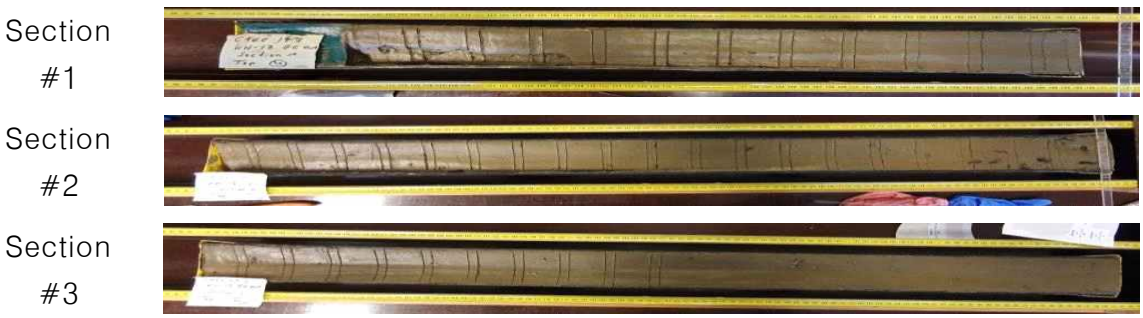


Fig. 15. Sections #1-#3 of sediment core CAGE19-3-KH-17-GC01.

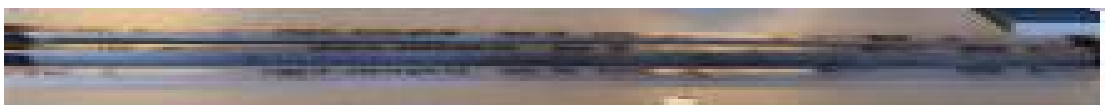


Fig. 16. Sediment core CAGE19-3-KH-14-GPC02 in U-channels.

다) 스발바르 다산과학기지 환경 다매체 시료 채취(충남대학교)

- 스발바르 다산과학기지 주변 환경 다매체 시료 채취를 위해, 2022년 7월 14일부터 18일까지 총 5일간 현장 조사 수행(Table 4, Fig. 17)
- 본 현장 조사에서는 다산과학기지 주변의 12개 정점에서 퇴적물(n=10), 물(n=10), 토양(n=8), 석탄(n=5) 시료 채취(Table 5, Figs. 18-20)
- 스발바르 지역의 퇴적물, 토양, 물 시료는 주로 빙하의 meltwater가 흐르는 지역에서 채취
- 퇴적물과 토양 시료는 삽을 이용하여 지퍼백에 채취
- 물 시료는 핸드 비커를 이용하여 4L 채수병에 채수 한 후 다산과학기지로 운반
- 물 시료(2L)는 북극다산과학기지 wetlab에서 필터링하여 입자상과 용존상으로 나눈 후 용존상 내 지속성유기독성물질은 ENVI-DISK에 포집
- 석탄 시료는 과거 탄광 활동의 흔적이 남아있는 정점에서 모종삽을 이용하여 채취
- 모든 시료는 한국에 운반 전까지 냉동 보관

Table 4. Sampling locations of environmental multimedia samples collected from the Kongsfjord region, Arctic Svalbard.

Stations	Latitude	Longitude	Stations	Latitude	Longitude
St.1	78.9615° N	11.6652° E	St.5	78.9142° N	12.0728° E
St.2	78.9323° N	11.8358° E	St.6-1	78.8924° N	12.3014° E
St.3	78.9275° N	11.9062° E	St.8	78.8722° N	12.4468° E
St.4	78.9128° N	11.9746° E	St.11	78.9918° N	12.4002° E
St.4-1	78.9175° N	11.9591° E	St.13	79.0228° N	12.1227° E
St.4-2	78.9172° N	11.9549° E	St.14	79.0044° N	12.0199° E

Table 5. Basic information on environmental multimedia samples collected from the Kongsfjord region, Arctic Svalbard.

Samples	Stations (n=12)												Total
	1	2	3	4	4-1	4-2	5	6-1	8	11	13	14	
Sediments		√	√		√	√	√	√	√	√	√	√	10
Water (dissolved)	√	√	√		√		√	√	√	√	√	√	10
Sater (particulate)	√	√	√		√		√	√	√	√	√	√	10
Soil	√	√		√				√	√	√	√	√	8
Coal			√		√	√*							5

Fig. 17. Map showing the sampling sites around the Kongsfjorden region, Arctic Svalbard, collected in 2022.

KOPRI
극지연구소

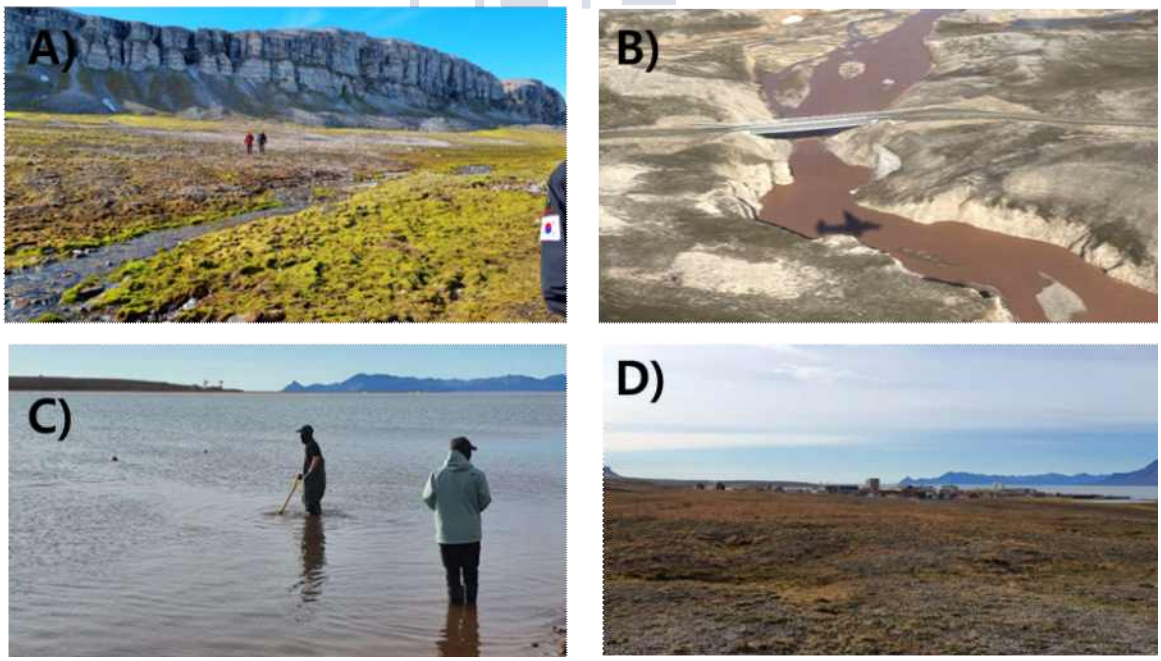


Fig. 18. View of the sampling sites conducted in 2022: (A) St.1, (B) St.2, (C) St.3, and (D) St.4 in the Kongsfjorden region, Arctic Svalbard.

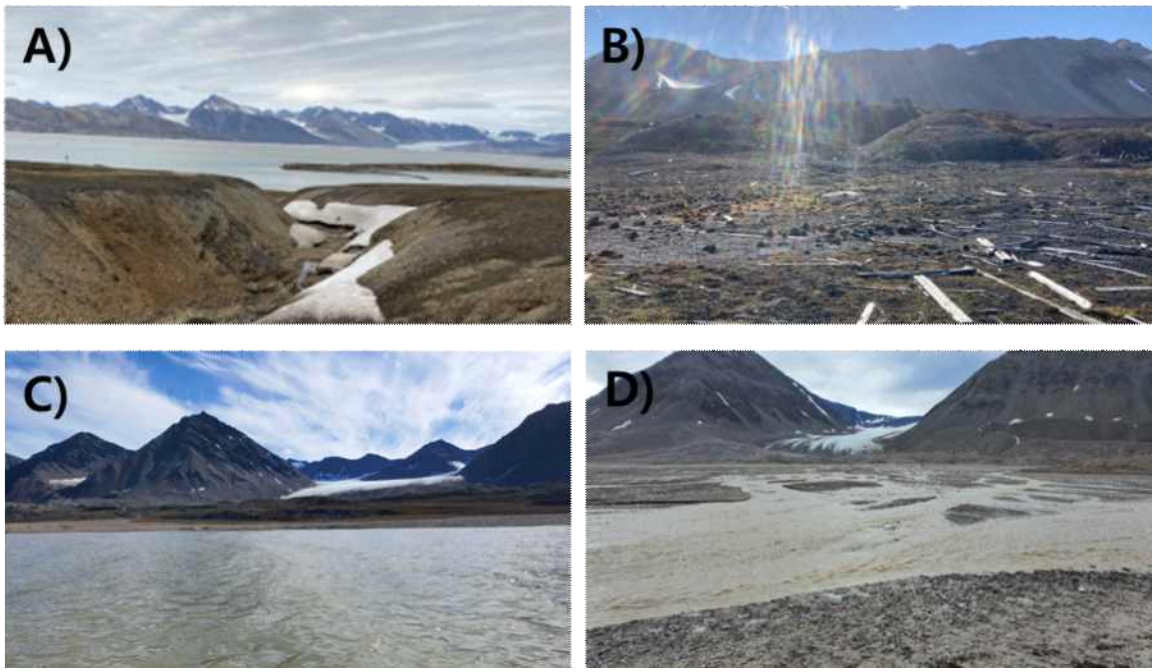


Fig. 19. View of the sampling sites conducted in 2022: (A) St.4-1, (B) St.4-2, (C) St.5, and (D) St.6-1 in the Kongsfjorden region, Arctic Svalbard.

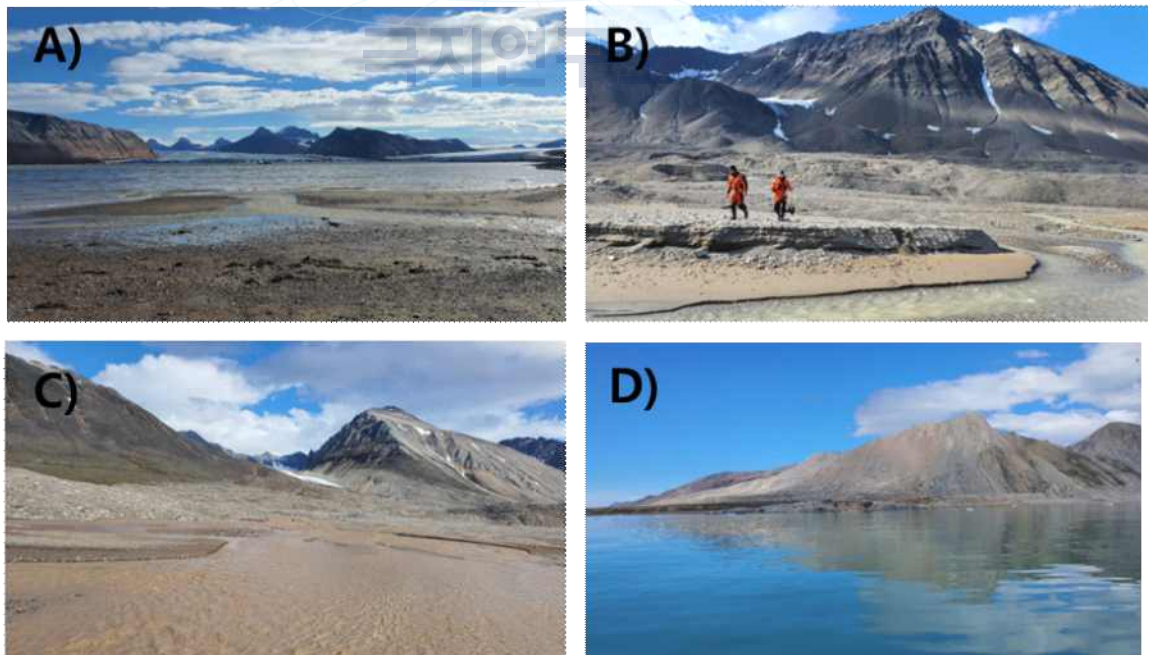


Fig. 20. View of the sampling sites conducted in 2022: (A) St.8, (B) St.11, (C) St.13, and (D) St.14 in the Kongsfjorden region, Arctic Svalbard.

1-3) 3차년도

가) 2023년 한국-노르웨이 스발바르 피오르드 국제공동탐사

(1) 탐사개요

- 제 5차 한국-노르웨이 국제공동탐사의 일환으로 노르웨이 트롬소 북극대학(UiT)의 RV Helmer Hanssen을 임차하여 추진한 2023년 스발바르 스피츠베르겐(Spitsbergen) 섬 서부 피오르드 국제공동탐사 수행(2023/07/07 - 2023/07/12) (Fig. 21)
- 극지연구소 주도로 진행된 이번 국제 공동탐사를 통해 스발바르 스피츠베르겐 섬 서부 10개 피오르드(템펠피오르드, 삭센피오르드, 빌레피오르드, 노드피오르드, 에크만피오르드, 딕슨피오르드, 콩스피오르드, 크로스피오르드, 묄레피오르드, 막달레나피오르드)에서 천부지층 탄성파 탐사, ADCP (acoustic doppler current profiler) 측정, CTD (Conductivity-Temperature-Density) 측정 및 해수 시료 획득, 멀티 및 중력코어를 이용하여 천부/심부 퇴적물 코어 획득

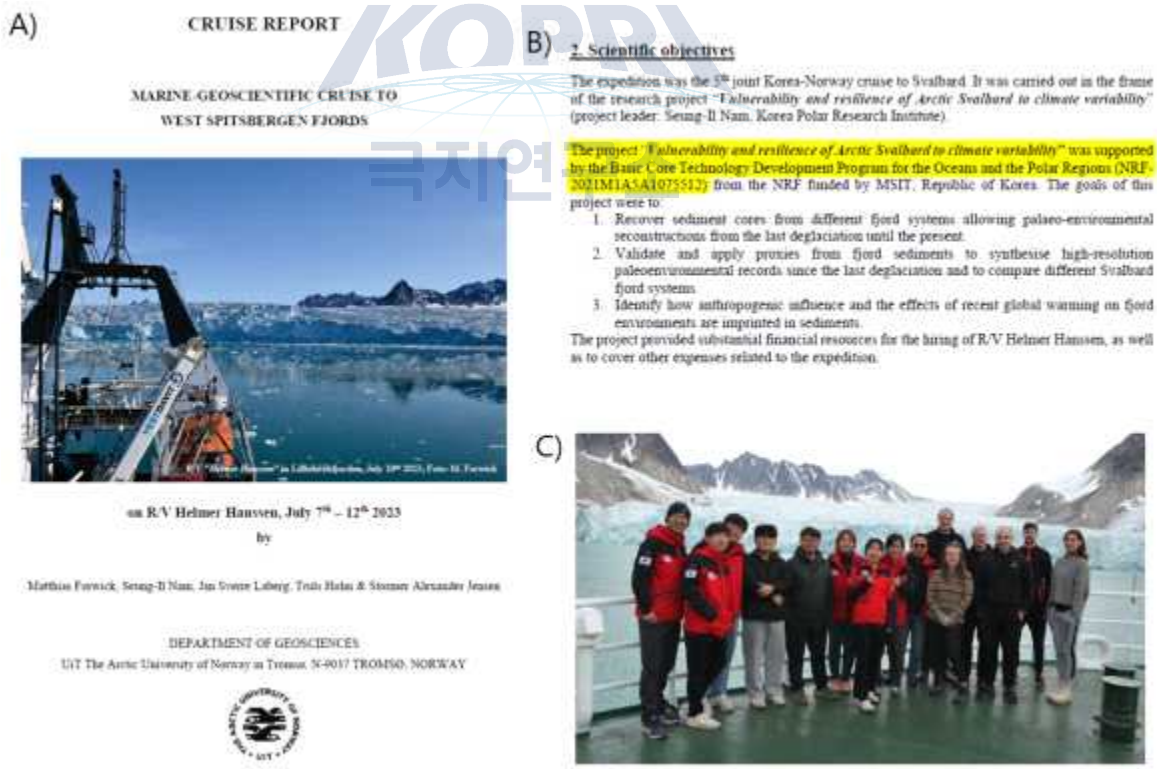


Fig. 21. (A-B) Cover and scientific objectives of cruise report for the 5th Korea-Norway international Svalbard cruise in 2023. (C) Group photo of cruise participants.

(2) 천부지층 탐사 및 ADCP 측정

- 스발바르 스피츠베르겐 섬 서부 10개 피오르드에서 SBP (sub-bottom profiler)를 이용한 천부지층 탄성파 탐사 수행
- SBP 자료는 탐사 기간 중 멀티코어, 중력코어 정점 선정에 활용
- 스발바르 스피츠베르겐 섬 서부 10개 피오르드에서 ADCP 측정 수행

(3) CTD 측정 및 해수 시료 획득

- 스발바르 스피츠베르겐 섬 서부 10개 피오르드의 총 34개 정점에서 CTD 측정을 진행하여 수온, 염분 등 기초자료 획득(Table 6, Fig. 22)
- CTD 측정은 템펠피오르드 1개 정점, 삭센피오르드 1개 정점, 빌레피오르드 1개 정점, 노드피오르드 6개 정점, 에크만피오르드 2개 정점, 딕슨피오르드 1개 정점, 콩스피오르드 17개 정점, 크로스피오르드 3개 정점, 묄레피오르드 1개 정점, 막달레나피오르드 1개 정점 등에서 수행
- CTD 작업을 진행하면서 4개 피오르드의 총 16개 정점에서 해수시료 획득(Fig. 22, Table 6)

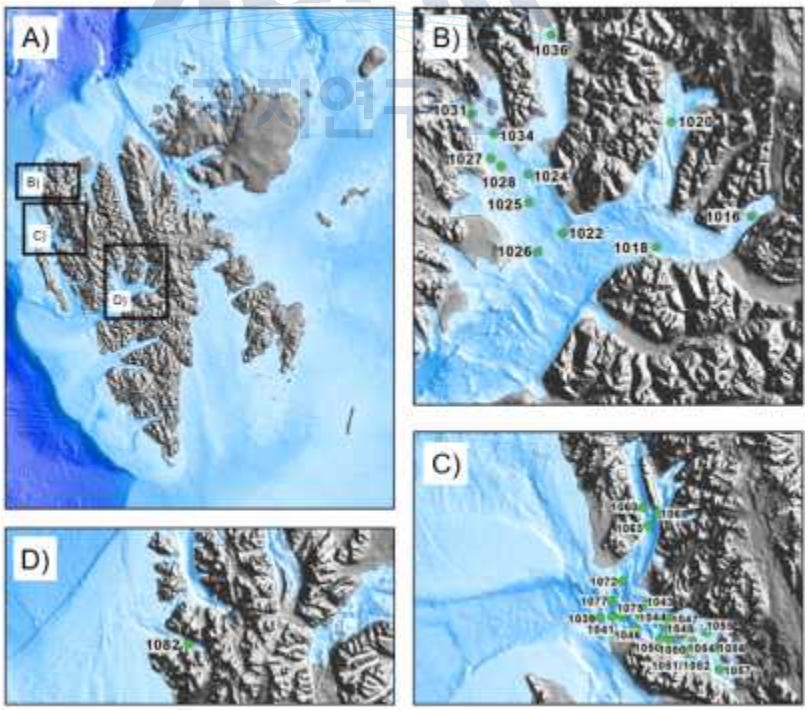


Fig. 22. (A) Map of Svalbard with conductivity-temperature-depth (CTD) stations, including (B) Dicksonfjorden, Billefjorden, Sassenfjorden, Ekmanfjorden, Nordfjorden, Tempelfjorden, (C) Krossfjorden, Möllefjorden, Kongsfjorden, and (D) Magdalenefjorden, investigated during the *RV Helmer Hanssen* cruise in 2023.

Table 6. Information on the CTD sampling stations investigated during the *RV Helmer Hanssen* cruise in 2023.

No.	Station	Latitude(N)	Longitude(E)	Water Depth(m)	Sampling Site	Sampling Date	Water sample
1	IG23-6-HH-1016-CTD	78°24.910′	017°08.830′	72	Tempelfjorden	2023.07.07	-
2	IG23-6-HH-1018-CTD	78°22.601′	016°11.558′	146	Sassenfjorden	2023.07.07	-
3	IG23-6-HH-1020-CTD	78°37.011′	016°28.237′	139	Billefjorden	2023.07.07	-
4	IG23-6-HH-1022-CTD	78°25.356′	015°17.732′	201	Nordfjorden	2023.07.07	-
5	IG23-6-HH-1024-CTD	78°32.581′	015°00.752′	150	Nordfjorden	2023.07.08	-
6	IG23-6-HH-1025-CTD	78°29.242′	014°59.794′	200	Nordfjorden	2023.07.08	-
7	IG23-6-HH-1026-CTD	78°23.414′	015°02.292′	182	Nordfjorden	2023.07.08	-
8	IG23-6-HH-1027-CTD	78°34.773′	014°39.511′	105	Nordfjorden	2023.07.08	-
9	IG23-6-HH-1028-CTD	78°33.743′	014°45.160′	115	Nordfjorden	2023.07.08	O
10	IG23-6-HH-1031-CTD	78°40.216′	014°29.996′	46	Ekmanfjorden	2023.07.08	O
11	IG23-6-HH-1034-CTD	78°37.666′	014°42.452′	52	Ekmanfjorden	2023.07.08	O
12	IG23-6-HH-1036-CTD	78°48.689′	015°22.111′	23	Dicksonfjorden	2023.07.08	-
13	IG23-6-HH-1039-CTD	79°00.420′	011°13.741	332	Kongsfjorden	2023.07.09	-
14	IG23-6-HH-1041-CTD	79°00.475′	011°21.087′	370	Kongsfjorden	2023.07.09	-
15	IG23-6-HH-1043-CTD	79°01.773′	011°42.742′	208	Kongsfjorden	2023.07.09	O
16	IG23-6-HH-1044-CTD	79°00.394′	011°38.185′	271	Kongsfjorden	2023.07.09	-
17	IG23-6-HH-1046-CTD	78°59.154′	011°34.811′	310	Kongsfjorden	2023.07.09	O
18	IG23-6-HH-1047-CTD	78°59.962′	011°56.820′	51	Kongsfjorden	2023.07.09	O
19	IG23-6-HH-1048-CTD	78°59.076′	011°54.449′	231	Kongsfjorden	2023.07.09	O
20	IG23-6-HH-1050-CTD	78°57.661′	011°50.457′	333	Kongsfjorden	2023.07.09	O
21	IG23-6-HH-1051-CTD	78°55.997′	012°06.556′	158	Kongsfjorden	2023.07.09	-
22	IG23-6-HH-1052-CTD	78°55.948′	012°06.500′	155	Kongsfjorden	2023.07.09	O
23	IG23-6-HH-1054-CTD	78°57.351′	012°10.229′	75	Kongsfjorden	2023.07.09	O
24	IG23-6-HH-1055-CTD	78°58.313′	012°19.250′	86	Kongsfjorden	2023.07.09	O
25	IG23-6-HH-1056-CTD	78°56.548′	012°23.049′	52	Kongsfjorden	2023.07.09	O
26	IG23-6-HH-1057-CTD	78°53.848′	012°26.037′	74	Kongsfjorden	2023.07.09	O
27	IG23-6-HH-1060-CTD	79°13.238′	011°42.239′	269	Krossfjorden	2023.07.10	O
28	IG23-6-HH-1063-CTD	79°11.071′	011°45.233′	369	Krossfjorden	2023.07.10	O
29	IG23-6-HH-1068-CTD	79°12.479′	011°51.466′	288	Möllerfjorden	2023.07.10	-
30	IG23-6-HH-1072-CTD	79°04.626′	011°28.087′	314	Krossfjorden	2023.07.10	O
31	IG23-6-HH-1075-CTD	79°00.474′	011°26.677′	352	Kongsfjorden	2023.07.10	-
32	IG23-6-HH-1077-CTD	79°02.288′	011°21.485′	340	Kongsfjorden	2023.07.10	-
33	IG23-6-HH-1080-CTD	78°57.568′	011°56.668′	339	Kongsfjorden	2023.07.11	-
34	IG23-6-HH-1082-CTD	79°33.754′	011°04.801′	138	Magdalene-fjorden	2023.07.11	-

KOPRI 극지연구소

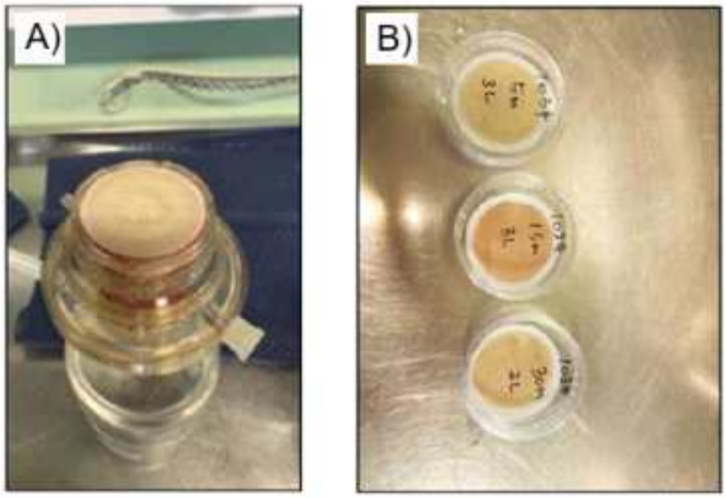


Fig. 23. (A) Seawater filtration and (B) filtered particle samples collected during the *RV Helmer Hanssen* cruise in 2023.

- 해수 시료 획득은 노드피오르드 1개 정점, 에크만피오르드 2개 정점, 콩스피오르드 10개 정점, 크로스피오르드 3개 정점에서 수행
- 획득한 해수 시료는 선내에서 해수 필터링을 진행하여 식물성 플랑크톤과 박테리아 군집 분석을 위한 부유 입자 시료를 포집하였으며 강릉원주대학교 한덕기 교수 연구팀과 연구 협력을 진행할 예정(Fig. 23)

KOPRI 극지연구소

(4) 멀티코어를 이용한 천부 퇴적물 획득

- 멀티코어를 이용하여 스발바르 스피츠베르겐 섬 서부 10개 피오르드의 총 16개 정점에서 천부 퇴적물 코어 총 79점을 확보하고 현장에서 약 2,000점의 부시료 채취 (Table 7, Figs. 24, 25)
- 천부 퇴적물 코어 획득은 템펠피오르드 1개 정점, 삭센피오르드 1개 정점, 빌레피오르드 1개 정점, 노드피오르드 1개 정점, 에크만피오르드 1개 정점, 딕슨피오르드 1개 정점, 콩스피오르드 6개 정점, 크로스피오르드 2개 정점, 묄레피오르드 1개 정점, 막달레나피오르드 1개 정점에서 수행
- 정점별로 2-9점의 천부 퇴적물 코어 획득
- 탐사 기간 중 입도, 밀도, 유기 동위원소, 유기분자생체지표, 유기독성물질. 무기지화학 분석 등 다목적 분석을 위해 각 정점에서 획득한 천부 퇴적물 코어에서 표층(0-2 cm)은 0.5 cm 간격으로 나머지는 1 cm 간격으로 부시료 채취

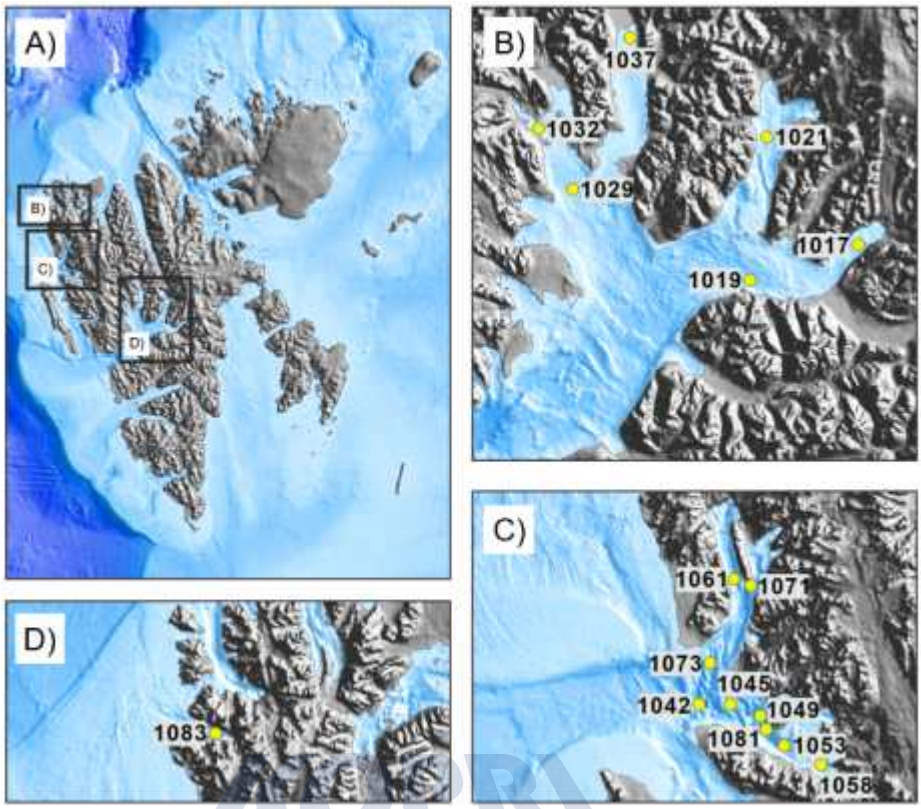


Fig. 24. (A) Map of Svalbard, including (B) Dicksonfjorden, Billefjorden, Sassenfjorden, Ekmanfjorden, Nordfjorden, Tempelfjorde, (C) Krossfjorden, Möllefjorden, Kongsfjorden, and (D) Magdalenefjordenfor, for multi-cores collected during the *RV Helmer Hanssen* cruise in 2023.

- 노르웨이 지질연구소(NGU) Knies 박사 연구팀과 국제 공동연구를 진행하기 위해 콩스피오르드 5개 정점(1042, 1045, 1053, 1058, 1081)에서 확보한 천부 퇴적물 코어 각 두 점 제공
- 콩스피오르드에서 확보한 한 점의 천부 퇴적물 코어(1053 정점)는 eDNA를 활용한 박테리아 군집 분석을 위해 부시료를 채취하여 연구 협력을 진행할 강릉원주대학교 한덕기 교수 연구팀에 제공
- 콩스피오르드 2개 정점(1042, 1058 정점)에서 확보한 천부 퇴적물 코어 각 한 점은 생지화학 특성 분석을 위해 부시료를 채취하여 연구 협력을 진행할 경북대학교 김민경 교수팀에 부시료 제공
- 신약 개발을 위해 표층 부시료(0-1 cm)를 획득하여 서울대학교 오동찬 교수 연구팀과 연구 협력을 수행하기 위해 부시료 제공

Fig. 25. Photos showing (A) multi-coring and (B) multi-core sub-sampling conducted during the 5th *RV Helmer Hanssen* Svalbard fjord cruise in 2023.

(5) 중력코어를 이용한 심부 퇴적물 획득

- 중력코어를 이용하여 스발바르 스피츠베르겐 섬 서부 7개 피오르드의 총 10개 정점에서 총 10점의 심부 퇴적물 코어(70-554 cm)를 획득함(Table 8, Figs. 26, 27)
- 심부 퇴적물 코어 획득은 노드피오르드 1개 정점, 에크만피오르드 1개 정점, 딕슨피오르드 1개 정점, 콩스피오르드 2개 정점, 크로스피오르드 3개 정점, 묄레피오르드 1개 정점, 막달레나피오르드 1개 정점에서 수행
- 각각의 퇴적물 코어는 선내에서 1 m 간격으로 구분하여 현재 UiT 냉장창고에 보관 중이며, 극지연구소에서는 UiT를 방문(2023.11.11-11.25)하여 코어 절개, 절개면 사진 촬영, XRF 지화학 분석 등을 수행하고 코어별로 약 5 cm 간격으로 부시료 채취 작업 수행
- 채취된 부시료를 활용하여 입도, 무기질 원소, 총 유기탄소 함량, 무기질소 및 유기질소 함량, 탄소 및 질소 안정동위원소비, 방사성탄소동위원소, 납/세슘 연대 등의 분석 추진

Table 7. Multi-cores collected during the 5th *RV Helmer Hanssen* Svalbard fjord cruise in 2023.

No.	Station	Latitude(N)	Longitude(E)	Water Depth(m)	Sampling Site	Sampling Date
1	IG23-6-HH-1017-MUC	78°24.955′	17°08.794′	70	Tempelfjorden	2023.07.07
2	IG23-6-HH-1019-MUC	78°22.595′	16°11.613′	146	Sassenfjorden	2023.07.07
3	IG23-6-HH-1021-MUC	78°37.039′	16°28.318′	144	Billefjorden	2023.07.07
4	IG23-6-HH-1029-MUC	78°33.688′	14°45.210′	116	Nordfjorden	2023.07.08
5	IG23-6-HH-1032-MUC	78°40.201′	14°30.004′	47	Ekmanfjorden	2023.07.08
6	IG23-6-HH-1037-MUC	79°00.450′	15°22.338′	21	Dicksonfjorden	2023.07.08
7	IG23-6-HH-1042-MUC	79°00.367′	11°21.213′	368	Kongsfjorden	2023.07.09
8	IG23-6-HH-1045-MUC	78°59.100′	11°38.320′	275	Kongsfjorden	2023.07.09
9	IG23-6-HH-1049-MUC	78°55.925′	11°54.160′	230	Kongsfjorden	2023.07.09
10	IG23-6-HH-1053-MUC	78°53.840′	12°06.528′	149	Kongsfjorden	2023.07.09
11	IG23-6-HH-1058-MUC	79°13.276′	12°25.722′	81	Kongsfjorden	2023.07.09
12	IG23-6-HH-1061-MUC	79°12.534′	11°42.220′	269	Kongsfjorden	2023.07.09
13	IG23-6-HH-1071-MUC	79°04.679′	11°51.367′	289	Krossfjorden	2023.07.10
14	IG23-6-HH-1073-MUC	78°57.686′	11°27.921′	316	Möllerfjorden	2023.07.10
15	IG23-6-HH-1081-MUC	79°33.741′	11°57.041′	331	Krossfjorden	2023.07.10
16	IG23-6-HH-1083-MUC	79°33.754′	11°05.122′	138	Kongsfjorden	2023.07.11

Table 8. Gravity cores collected during the 5th *RV Helmer Hanssen* Svalbard fjord cruise in 2023.

No.	Station	Latitude(N)	Longitude(E)	Water Depth(m)	Sampling Site	Sampling Date	Recovery (cm)
1	IG23-6-HH-1033-GC	78°40.144′	014°30.148′	50	Ekmanfjorden	2023.07.08	133 (1 section)
2	IG23-6-HH-1035-GC	78°33.714′	014°45.177′	116	Nordfjorden	2023.07.08	70 (1 section)
3	IG23-6-HH-1038-GC	78°48.692′	015°22.470′	20	Dicksonfjorden	2023.07.08	170 (2 sections)
4	IG23-6-HH-1062-GC	79°13.271′	011°42.204′	268	Krossfjorden	2023.07.10	554 (6 sections)
5	IG23-6-HH-1064-GC	79°11.113′	011°45.256′	369	Krossfjorden	2023.07.10	531 (6 sections)
6	IG23-6-HH-1070-GC	79°12.389′	011°50.902′	285	Möllerfjorden	2023.07.10	420 (5 sections)
7	IG23-6-HH-1074-GC	79°04.673′	011°27.926′	317	Krossfjorden	2023.07.10	529 (6 sections)
8	IG23-6-HH-1076-GC	79°00.490′	011°26.675′	352	Kongsfjorden	2023.07.10	515 (6 sections)
9	IG23-6-HH-1079-GC	78°56.277′	011°59.609′	300	Kongsfjorden	2023.07.11	394 (4 sections)
10	IG23-6-HH-1084-GC	79°33.724′	011°04.958′	139	Magdalene-fjorden	2023.07.11	553 (6 sections)

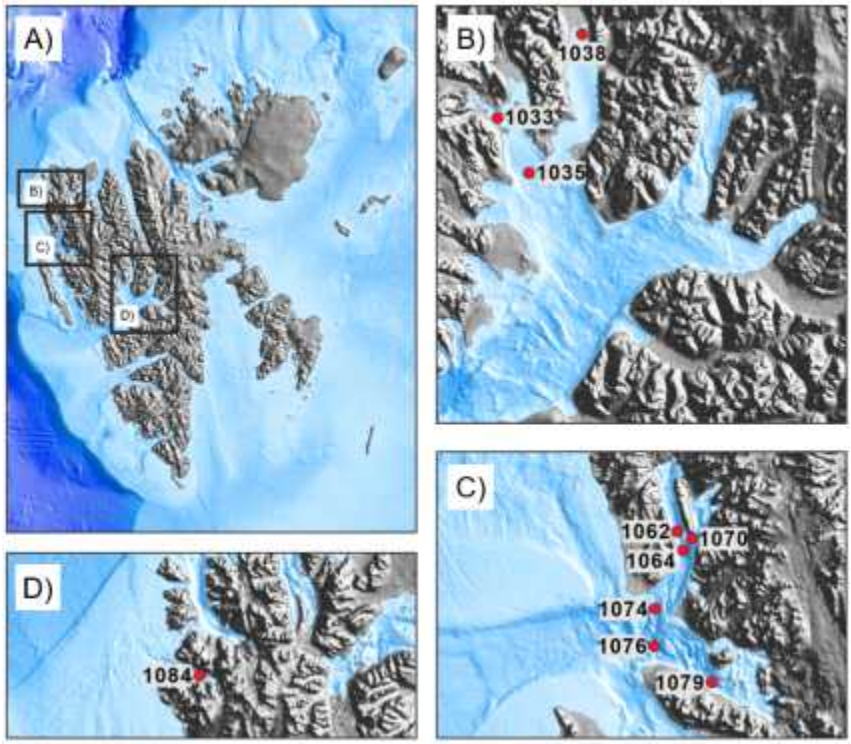


Fig. 26. (A) Map of Svalbard, including (B) Dicksonfjorden, Billefjorden, Sassenfjorden, Ekmanfjorden, Nordfjorden, Tempelfjorden, (C) Krossfjorden, Möllefjorden, Kongsfjorden, and (D) Magdalenefjorden, for gravity cores collected during the 5th *RV Helmer Hanssen* Svalbard fjord cruise in 2023.

극지연구소

Fig. 27. Gravity core sectioning onboard during the 5th *RV Helmer Hanssen* Svalbard fjord cruise in 2023.

나) 스발바르 롱이어비엔 환경 다매체 시료 채취(충남대학교)

- 2023년 7월 13일 스발바르 롱이어비엔 주변 환경 다매체 시료(예:퇴적물, 석탄, 동물플랑크톤 및 식물플랑크톤) 채취 완료(Fig. 28), 정점 간 이동은 렌터카 이용. 환경 다매체 시료에 대한 정보는 Table 9에 제시
- 롱이어비엔 공항 근처에 위치한 st.1에서는 퇴적물과 플랑크톤 시료를 채취하였으며, 자갈이 매우 많고 새우 및 해파리가 서식하는 정점, St.2에서는 석탄 시료를 채취하였으며, 항구 근처에서 석탄 운반을 위해 곳곳에 석탄을 쌓아 놓은 정점, St.3에서는 퇴적물 시료(머드)를 채취하였고 기러기들이 많이 돌아다니며, 황토색의 물살이 매우 센 정점, st.4에서는 퇴적물과 플랑크톤 시료를 채취하였고 롱이어비엔의 빙하 융빙수가 흘러나오고, 퇴적물에는 자갈이 매우 많은 정점
- 퇴적물과 석탄 시료는 야전삽과 모종삽을 이용하여 채취하였고, 동물플랑크톤(size: >200 μm)과 식물플랑크톤 시료(size: 20–200 μm)는 네트를 이용하여 채집(Fig. 29), 동물플랑크톤과 식물플랑크톤 시료는 인근 숙소에서 진공 펌프를 이용하여 필터지에 포집, 롱이어비엔에서 채취한 환경 다매체 시료는 냉동 상태를 유지한 후 한국으로 운반

Fig. 28. Map showing the sampling sites of environmental multimedia samples conducted in Longyearbyen, Arctic Svalbard, in 2023.

Table 9. Information on environmental multimedia samples collected from Longyearbyen, Arctic Svalbard, in 2023.

Sites	Latitude (N°)	Longitude (E°)	Sites (n=4)			
			Sediment	Coal residues	Zooplankton	Phytoplankton
St.1	78°14.951	15°31.003	V		V	V
St.2	78°14.619	15°32.134		V		
St.3	78°13.281	15°36.065	V			V
St.4	78°13.546	15°39.278	V			V

Fig. 29. (A)–(F) View of the environmental multimedia sampling sites conducted in Longyearbyen, Arctic Svalbard, in 2023.

다) 스발바르 연안 해저 표층 퇴적물 시료 획득 및 기초분석(인하대학교)

- 해저 표층퇴적물시료는 스발바르 콩스피오르드 해역을 대상으로 RV Tiesten을 임차하여 Van Veen grab sampler 활용 획득(2023/07/08 - 2023/0710) (Fig. 30)
- 해저 표층 퇴적물 시료 수집은 총 37개 정점에서 약 1-3.5 km 간격으로 수행 (Table 10, Fig. 31)
- 획득한 해저 표층 퇴적물 시료에 대한 기초분석으로 입도분석 수행
- 입도 분석은 유기물 및 탄산염을 제거하기 위해 과산화수소(H_2O_2)와 염산(HCl)을 사용하여 전처리 한 뒤, 인하대학교 표준 분석연구원에서 보유 중인 레이저 회절 방법을 활용한 입도분석장비(Malvern 사의 Mastersizer 2000)를 활용하여 분석
- 입도 분석 결과를 바탕으로 각 시료의 조직변수(평균입경, 분급도, 왜도)를 계산

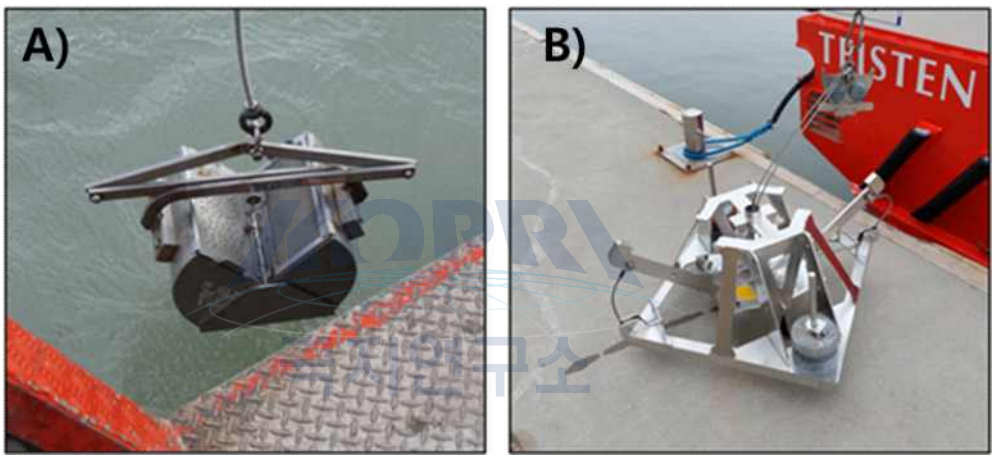


Fig. 30. (A) Van Veen grab samplers used for near-bed surface sediment collection in Kongsfjorden, Svalbard. (B) The grab shown in the right panel was primarily used for observations in waters deeper than 200 m.

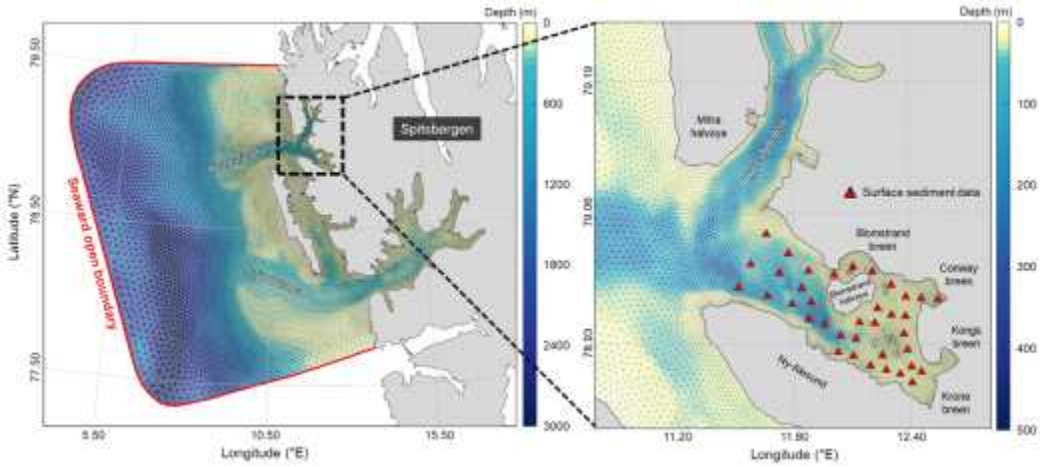


Fig. 31. Map showing surface sediment sampling sites in Kongsfjorden, Svalbard.

Table 10. Information on the sampling sites for grain size analysis.

No.	Latitude(N)	Longitude(E)	Sampling Site	Sampling depth(m)	Sampling Date
1	78° 53.51'	012° 24.48'	Kongsfjorden (inner)	76.7	2023.07.08
2	78° 54.15'	012° 27.38'	Kongsfjorden (inner)	70.0	2023.07.08
3	78° 54.04'	012° 20.78'	Kongsfjorden (inner)	47.8	2023.07.08
4	78° 54.45'	012° 24.31'	Kongsfjorden (inner)	74.5	2023.07.08
5	78° 55.47'	012° 23.16'	Kongsfjorden (inner)	43.7	2023.07.08
6	78° 56.42'	012° 22.09'	Kongsfjorden (inner)	49.1	2023.07.08
7	78° 57.46'	012° 22.56'	Kongsfjorden (inner)	57.4	2023.07.08
8	78° 58.51'	012° 27.61'	Kongsfjorden (inner)	56.0	2023.07.08
9	78° 58.46'	012° 32.83'	Kongsfjorden (inner)	140.0	2023.07.08
10	78° 58.61'	012° 22.70'	Kongsfjorden (inner)	45.8	2023.07.08
11	78° 54.28'	012° 16.48'	Kongsfjorden (inner)	47.2	2023.07.08
12	78° 54.43'	012° 11.58'	Kongsfjorden (inner)	104.0	2023.07.08
13	78° 55.14'	012° 15.36'	Kongsfjorden (inner)	113.0	2023.07.08
14	78° 57.54'	012° 18.23'	Kongsfjorden (inner)	83.8	2023.07.08
15	78° 55.13'	012° 06.34'	Kongsfjorden (inner)	141.0	2023.07.08
16	78° 56.14'	012° 07.16'	Kongsfjorden (middle)	185.6	2023.07.09
17	78° 57.05'	012° 13.08'	Kongsfjorden (middle)	26.0	2023.07.08
18	78° 57.12'	012° 08.26'	Kongsfjorden (middle)	70.7	2023.07.09
19	78° 57.94'	012° 13.92'	Kongsfjorden (middle)	75.4	2023.07.10
20	78° 59.32'	012° 18.23'	Kongsfjorden (middle)	52.0	2023.07.08
21	78° 55.35'	012° 01.61'	Kongsfjorden (middle)	124.0	2023.07.08
22	78° 56.34'	012° 02.39'	Kongsfjorden (middle)	238.7	2023.07.09
23	78° 00.13'	012° 13.38'	Kongsfjorden (middle)	18.9	2023.07.08
24	79° 00.43'	012° 06.34'	Kongsfjorden (middle)	46.6	2023.07.08
25	78° 56.99'	011° 57.57'	Kongsfjorden (middle)	287.8	2023.07.09
26	78° 57.33'	011° 52.52'	Kongsfjorden (middle)	346.3	2023.07.09
27	78° 58.33'	011° 53.34'	Kongsfjorden (middle)	294.6	2023.07.09
28	78° 59.95'	012° 00.44'	Kongsfjorden (middle)	66.5	2023.07.08
29	78° 58.22'	011° 47.39'	Kongsfjorden (outer)	268.3	2023.07.09
30	78° 59.17'	011° 50.42'	Kongsfjorden (outer)	307.4	2023.07.09
31	79° 00.20'	011° 52.50'	Kongsfjorden (outer)	169.4	2023.07.10
32	78° 58.70'	011° 39.65'	Kongsfjorden (outer)	311.9	2023.07.09
33	79° 00.06'	011° 43.39'	Kongsfjorden (outer)	265.9	2023.07.09
34	79° 01.22'	011° 46.25'	Kongsfjorden (outer)	225.6	2023.07.10
35	78° 59.21'	011° 30.70'	Kongsfjorden (outer)	313.6	2023.07.09
36	79° 00.58'	011° 34.45'	Kongsfjorden (outer)	200.2	2023.07.09
37	79° 02.38'	011° 39.26'	Kongsfjorden (outer)	122.0	2023.07.09

KOPRI 극지연구소

라) 스노우팩, 대기 중 수은 및 현장 실험을 통한 시료 채취(포항공과대학교)

- 국내 제주도 한라산에서 스노우팩 20점, 대기 중 수은 12점, In-situ snow flux chamber 현장 실험에서 10점 등 총 32점의 시료 채취
- 스노우팩은 표층 1 cm의 fresh snow와 표층 2 cm의 aged snow로 나누어 각 10점씩 20점을 채취하여 냉동 보관
- 대기 중 수은은 스노우팩 채취 지점과 동을한 정점에서 대기 중 가스상 총 수은, 대기 중 산화 수은으로 나누어 총 12점 채취(Fig. 32)
- In-situ snow flux chamber 현장 실험은 표층 약 2 cm 깊이에서 눈을 채취하여 flux chamber 안에 넣은 뒤 햇빛을 통하여 약 2-3일 동안 눈에서 재방출되는 대기 중 가스상 수은을 채취하는 방법으로 현장 실험을 통해 총 10점의 시료 채취(Fig. 33)
- In-situ snow flux chamber 현장 실험을 통해 스발바르의 일조량과 대기 중 할로겐으로 인한 대기 수은 침적 플럭스를 산정하여, 수은 안정동위원소 기반의 스노우팩 수은 물질수지를 제시하고자 함

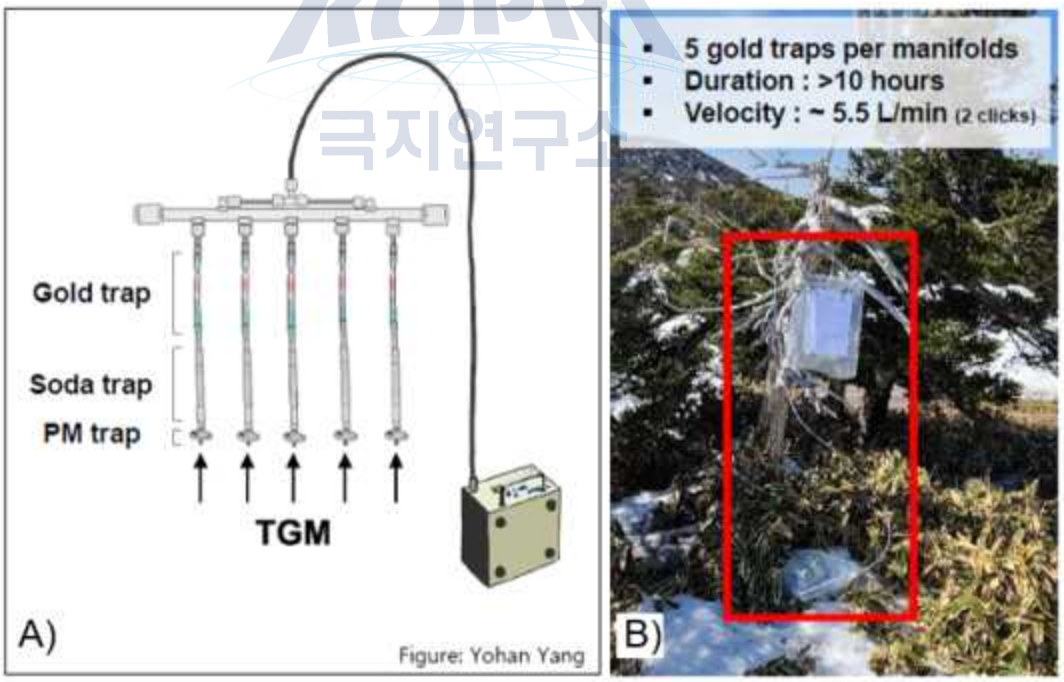


Fig. 32. (A) Total gaseous mercury sampling system and (B) on-site sampling at Mountain Halla, Jeju Island, South Korea.

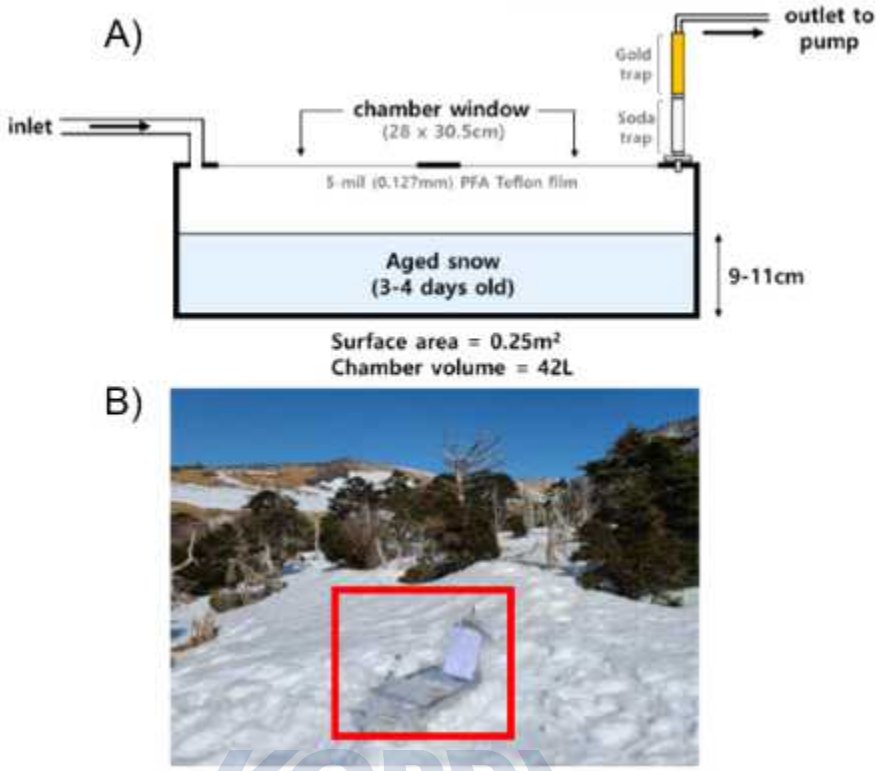


Fig. 33. (A) In-situ snow flux chamber system and (B) on-site experiment at Mount Halla, Jeju Island, South Korea.

KOPRI
극지연구소

1-4) 4차년도

가) 기확보 국제공동탐사 퇴적물 시추 코어 분석 및 부시료 채취

(1) 분석 대상 코어

- 2022년 국제공동탐사 동안 스발바르 북부 힌로펜 해협에서 기확보한 총 6점, 약 26 m의 중력시추 심부 퇴적물(Table 11, Fig. 34)
- 2023년 국제공동탐사 동안 스발바르 서부 피오르드(딕슨피오르드 1점, 크로스피오르드 3점, 묄레피오르드 1점, 콩스피오르드 2점, 막달레나피오르드 1점)에서 기확보한 총 8점, 약 37 m의 중력시추 심부 퇴적물(Table 12, Fig. 34)

Table 11. Analyzed gravity cores collected from the *RV Helmer Hanssen* cruise in 2022.

No.	Station	Latitude(N)	Longitude(E)	Water Depth(m)	Sampling Site	Sampling Date	Recovery (cm)
1	HH22-1167-GC	80°43.41′	016°18.34′	478	Hinlopen Strait	2022.07.25	208 (3 sections)
2	HH22-1180-GC	79°58.65′	017°33.88′	331	Hinlopen Strait	2022.07.27	474 (5 section)
3	HH22-1181-GC	79°46.48′	018°06.44′	415	Hinlopen Strait	2022.07.27	494 (5 sections)
4	HH22-1182-GC	79°38.77′	018°48.97′	322	Hinlopen Strait	2022.07.27	520 (6 sections)
5	HH22-1186-GC	80°21.04′	016°10.05′	377	Hinlopen Strait	2022.07.28	581 (5 sections)
6	HH22-1187-GC	80°33.10′	015°46.97′	327	Hinlopen Strait	2022.07.28	386 (4 sections)

Table 12. Analyzed gravity cores collected from the *RV Helmer Hanssen* cruise in 2023.

No.	Station	Latitude(N)	Longitude(E)	Water Depth(m)	Sampling Site	Sampling Date	Recovery (cm)
1	IG23-6-HH-1038-GC	78°48.692′	015°22.470′	20	Dicksonfjorden	2023.07.08	170 (2 sections)
2	IG23-6-HH-1062-GC	79°13.271′	011°42.204′	268	Krossfjorden	2023.07.10	554 (6 sections)
3	IG23-6-HH-1064-GC	79°11.113′	011°45.256′	369	Krossfjorden	2023.07.10	531 (6 sections)
4	IG23-6-HH-1070-GC	79°12.389′	011°50.902′	285	Möllerfjorden	2023.07.10	420 (5 sections)
5	IG23-6-HH-1074-GC	79°04.673′	011°27.926′	317	Krossfjorden	2023.07.10	529 (6 sections)
6	IG23-6-HH-1076-GC	79°00.490′	011°26.675′	352	Kongsfjorden	2023.07.10	515 (6 sections)
7	IG23-6-HH-1079-GC	78°56.277′	011°59.609′	300	Kongsfjorden	2023.07.11	394 (4 sections)
8	IG23-6-HH-1084-GC	79°33.724′	011°04.958′	139	Magdalenefjorden	2023.07.11	553 (6 sections)

KOPRI 극지연구소

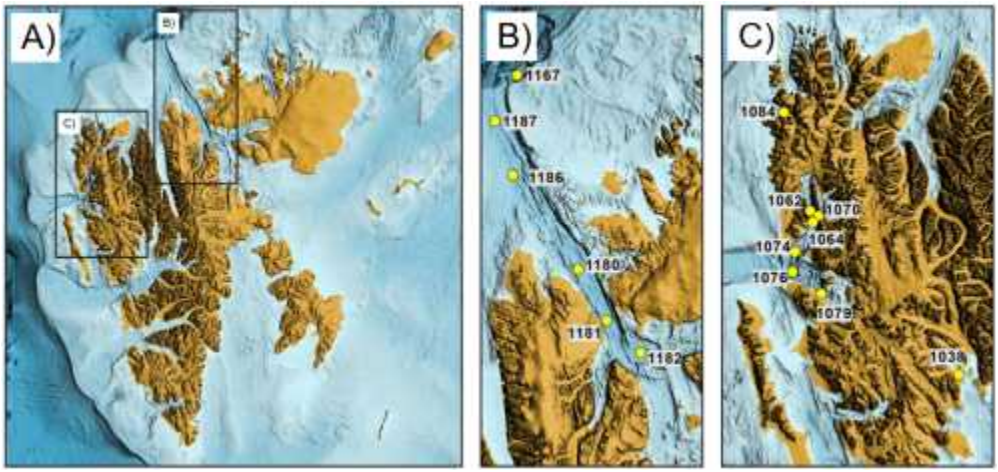


Fig. 34. (A) Map showing Svalbard and sampling sites for analyzed gravity cores collected from the 4th and 5th *RV Helmer Hanssen* cruises in (B) 2022 and (C) 2023.

(2) 분석 항목

- 2022–2023년 기확보한 총 14점의 퇴적물 코어를 대상으로 X-선 이미지 촬영(Fig. 35), 표면 이미지 사진 촬영(Fig. 36), 지화학 조성 측정(Fig. 37) 수행
- X-선 촬영을 통해 시추코어 내부구조 및 암상 특징(lithology) 확보
- 표면 이미지 사진 촬영으로 시추코어 절개면 고해상 이미지(L*, a*, b*) 및 색지수를 확보하고, 지화학 조성 측정으로 퇴적물 내 지화학 원소 구성 특징 확보
- 4차년도 기간 내에 확보한 X-선 이미지, 지화학 조성 분석
- 2023년 기확보한 총 8점의 퇴적물 코어에서 5 cm 간격으로 약 1,430점의 부시료를 획득하고(Fig. 38), 채취한 부시료는 냉동하여 약 24시간 동안 동결 건조하여 회수하였으며(Fig. 39), 채취한 부시료에 대하여 입도 분석, 광물조성 분석, 유·무기 지화학 분석이 수행될 예정

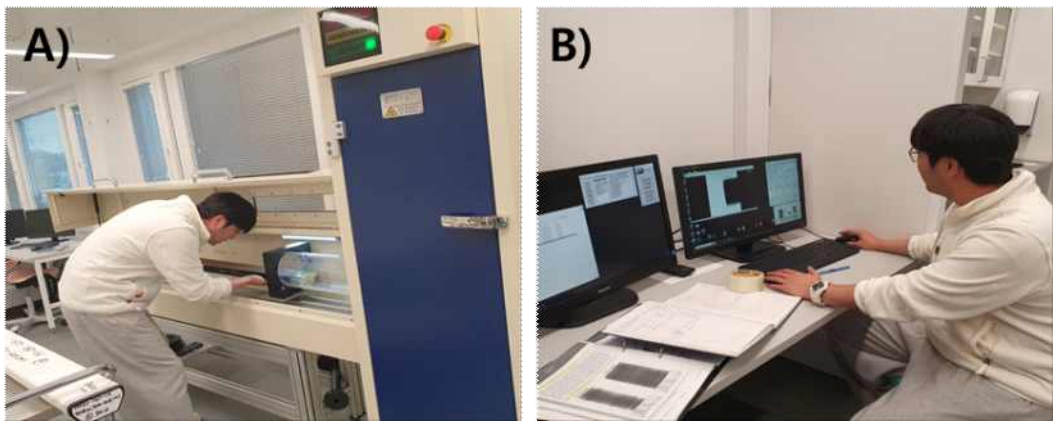


Fig. 35. (A) X-radiography measurements and (B) data processing at UiT, Norway.

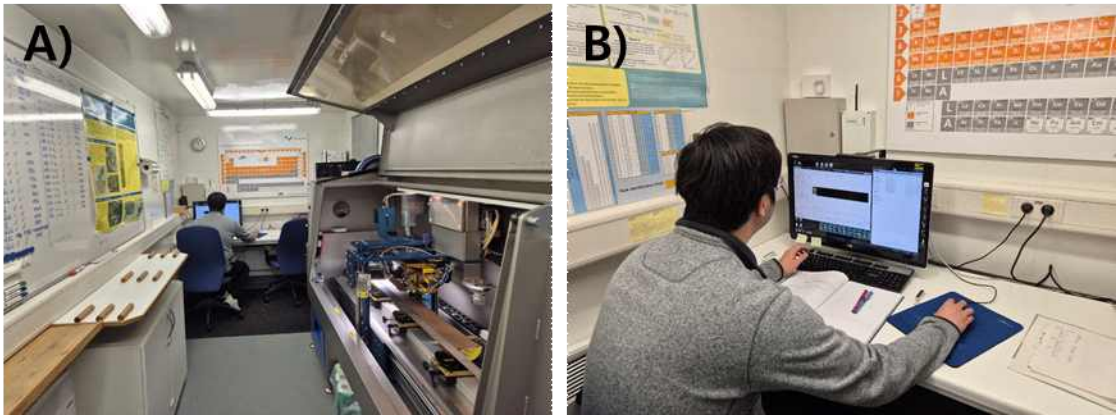


Fig. 36. (A) Line scanning of sediment cores and (B) processing of high-resolution line scanning images conducted at UiT, Norway.

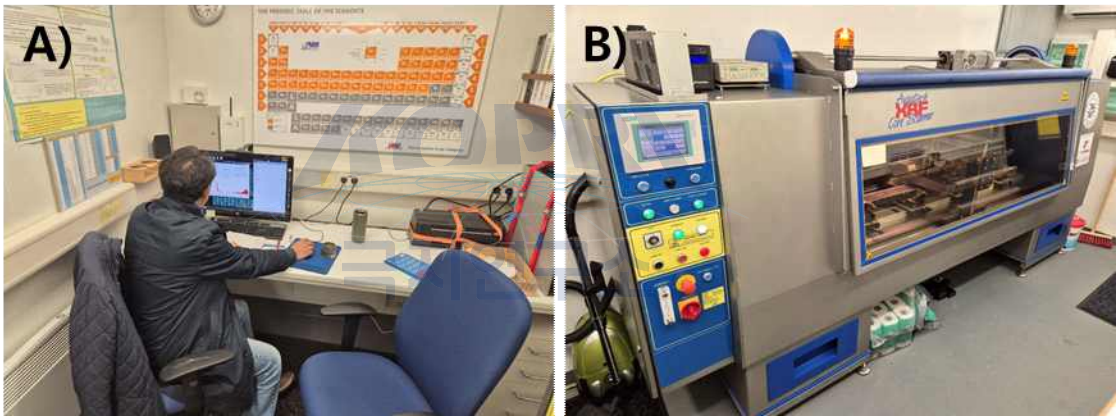


Fig. 37. (A) Data acquisition of geochemical composition with (B) an XRF core scanner conducted at UiT, Norway.

Fig. 38. Subsampling of gravity core section.

Fig. 39. Freeze-drying of subsampled sediments.

나) 스발바르 대기 중 입자상 수은 및 스노우 팩 시료 확보(포항공과대학교)

- 스발바르 표층 눈(총 시료 31개), 깊이별 눈 시료(aged snow; 총 시료 16개) 및 대기(총 시료 10개) 시료 총 57개 시료 채취 완료(2지점)
- 스노우팩은 강설이 내린 직후에 표층 스노우팩에서 획득된 fresh snow와 강설 이후 5일간 연속적으로 표층 스노우팩에서 획득된 aging snow로 나누어, fresh snow 11점, aging snow 20점을 채취하였으며 스발바르 현지에서 산(0.5% HCl)처리 후 국내로 냉장 이송
- 대기 중 수은은 스노우팩 채취 지점과 동일한 정점에서 대기 중 입자상 수은 총 10점을 채취
- 표층 스노우팩이 획득된 동일한 정점에서 깊이별 눈 시료(aged snow)를 채취함(1-5cm, 5-10cm, 10-20cm 및 20-30cm 시료 채취; 총 시료 16개)
- 스발바르에서 표층 스노우팩이 겪는 광반응의 시간별 변화(fresh snow and aging snow)를 통해 북극 AMDE (Atmospheric Mercury Depletion Events)에 겪는 대기-스노우팩의 상호작용을 분석하고자 함
- 깊이별 스발바르 스노우팩(표층 1-5cm, 5-10cm, 10-20cm 및 20-30cm)의 비교를 통해 대기-스노우팩 사이의 장기적이고 누적적인 상관관계를 파악하여 수은의 축적 및 변화 패턴 분석 추진

KOPRI 극지연구소

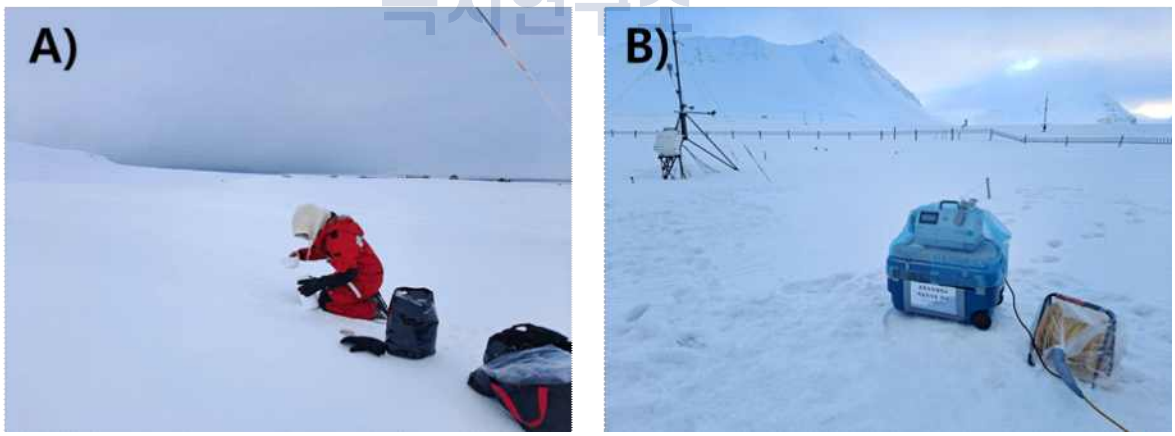


Fig 40. (A) Snowpack sampling, and (B) collection of atmospheric particulate mercury conducted in Ny-Ålesund, Svalbard in March, 2024.

2) 기후환경 복원 프록시 개발 및 적용

2-1) 1차년도

가) 코어 및 천부퇴적지층 층서대비 기반 스발바르 환경변화 복원 가능성 검토

(1) 연구 목적

- 2019년도 제3차 한-노 국제공동탐사동안 확보한 퇴적물 코어, 고해상 천부탄성파 탐사와 다중빔 음향측심 자료에 대한 분석결과를 바탕으로, 남부 스피츠베르겐의 서부 연안에 위치한 햄버그북타 피오르드와 리틀 스토르피오르덴은 영거 드라이아스동안 해양기저빙하(marine-based glacier)로 덮여 있었던 것으로 추정
- 특히, 리틀 스토르피오르덴에서 확보한 HH19-905-GC 코어는 영거 드라이아스 이후의 전반적인 스발바르의 빙하 거동과 일치하는 암상변화가 기록되어 있으며, 11,700-10,000년 사이의 다량의 IRD가 포함된 빙하기원 퇴적층의 발달은 영거 드라이아스 이후 홀로세가 시작됨에 따라 해양기저빙하/조수빙하가 빠르게 후퇴하였음 지시함. 10,000-4,000년 사이의 결층(Hiatus)의 확인은 초기 홀로세 동안 대부분의 스발바르 조수빙하가 빠르게 육상으로 후퇴되었던 점을 동일하게 반영함
- 빙하 거동에 따른 육상기원 퇴적물 유입량의 변화를 이해하기 위하여, 총유기탄소(TOC)와 유기질소(N_{org})와 지화학분석(X-ray fluorescence, XRF) 분석 및 결과를 비교함

KOPRI 극지연구소

(2) 연구 방법

(가) 연대 모델

- 기존 연구에서는 HH19-905-GC 코어의 연대분석 결과를 단순히 calendar age로 변화하여 사용하였지만, 본 연구에서는 연대분석결과를 가지고 Bacon 프로그램을 이용하여 연대 모델을 구축

(나) 유기질소 분석

- 퇴적물 내에 유기질소를 분석하기 위해서, 분말화한 벌크(bulk) 퇴적물을 KOBr-KOH 용액으로 반응시켜 퇴적물 내에 유기질소를 제거하고(Silva and Bremner, 1966), 총질소(TN)에서 무기질소(N_{inorg})를 산술적으로 뺌으로써 유기질소(N_{org})의 함량을 계산함. 총질소(TN)과 무기질소(N_{inorg})는 Thermo Delta V Isotope Ratio Mass Spectrometer 분석기를 이용하여 측정

(다) 지화학 조성(XRF)

- 퇴적물 코어에 대한 지화학 조성(elemental geochemistry)은 노르웨이 트롬소 북극대학교(UiT)의 Avaatech X-ray fluorescence (XRF) scanner를 이용하여 측정하였

으며, 본 연구에서는 철(Fe)과 칼슘(Ca)의 원소를 사용하였으며, 철 원소는 background sedimentation에 의한 잠재적인 희석영향을 제거하기 위하여 티타늄(Ti)을 이용하여 Fe/Ti 비율을 사용함. 칼슘은 쇄설성 탄산염의 변화를 구분하기 위하여 스트론튬(Sr)을 이용하여 Ca/Sr 비율을 사용함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 연대 모델

- Bacon 모델링을 통하여 도출된 연대 모델은 그림 1에서 볼 수 있는데, 연대모델에 따르면 HH19-905-GC의 최하부 연대는 약 12,090년 년으로 계산됨(Fig. 41)
- 과거 9,900-4,200년 기간은 평균 퇴적율 3.2 cm/kyr로 30 cm/kyr의 퇴적율을 보이는 타 구간에 비해 매우 낮은 편으로 결층(hiatus)으로 해석함. 이는 전반적으로 동부 스토르피오르드의 비슷한 위도에서 분석되었던 HH12-1209-GC 코어의 연대모델을 비교해 본 결과, 두 퇴적물 코어의 퇴적율은 매우 유사하며, 두 코어 모두 홀로세 전기와 중기 동안 퇴적율이 매우 낮았으나, 동부 스토르피오르덴의 코어는 낮은 퇴적율이 약 2,000년 전까지 지속됨을 확인

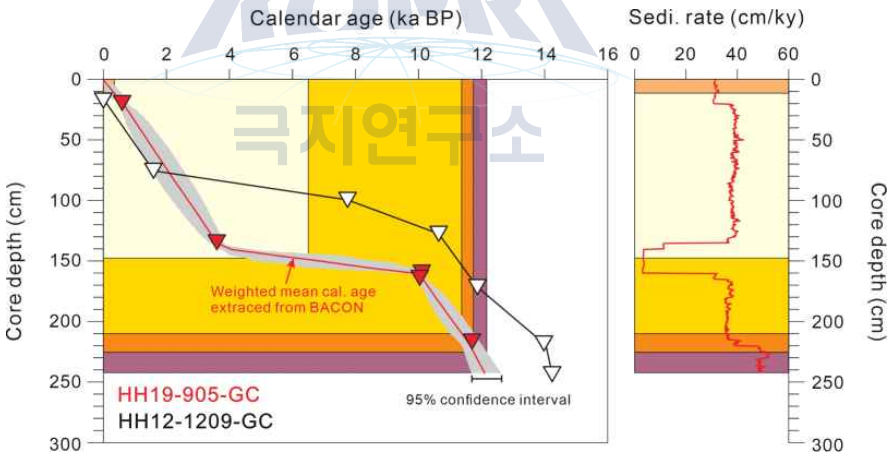


Fig. 41. Comparison of sedimentation rates between Little Storfjorden and eastern Storfjorden, with calculated sedimentation rates based on the weighted mean calendar ages extracted using the BACON model.

(나) TOC/N_{org}

- 햄버그북타 피오르드 코어의 상부 50 cm 구간에서 TOC/N_{org} 비는 28.35-56.85의 높은 값을 보였으며, 그 하부는 최대 100 넘는 매우 높은 값이 확인됨(Fig. 42)

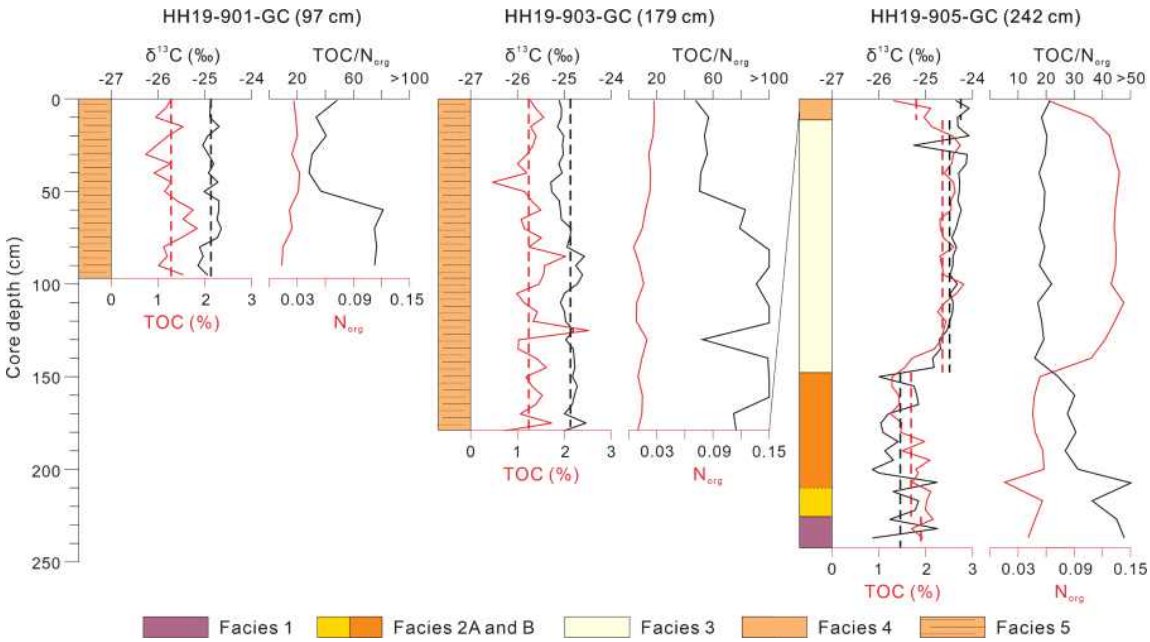


Fig. 42. Downcore distributions of TOC, organic carbon stable isotope values ($\delta^{13}C$), TOC/N_{org}, and N_{org} Dashed lines indicate average values in each parameter.

- 매우 높은 TOC/N_{org} 비는 퇴적물 내에 0.01%의 낮은 유기질소 함량이 원인으로 판단됨. 리틀 스토르피오르덴 코어에서 TOC/N_{org} 비는 퇴적상의 변화양상과 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 빙퇴적층에서는 거의 50에 달하는 TOC/N_{org} 비를 보임, 이후 TOC/N_{org} 비는 약 20으로 감소하고 일정하게 유지됨

(다) 지화학 조성(XRF)

- 햄버그북타 피오르드 코어(HH19-901/903-GCs)에서 Fe/Ti과 Ca/Sr의 변화양상은 엽리층리가 잘 발달된 구간(Facie 5)에서 서로 반대 경향을 보임. 특히, Fe/Ti 비는 세립질 입자가 우세한 구간에서 높은 값이 나타났으며, 반대로 Ca/Sr 비는 IRD를 포함한 조립질 입자가 우세한 구간에서 높은 값을 보임(Fig. 43)
- 리틀 스토르피오르덴에서 확보한 HH19-905-GC 코어의 Fe/Ti과 Ca/Sr 비는 햄버그북타 피오르드의 코어에서 보여진 입도에 따른 변화양상이 뚜렷하지 않음에도 불구하고(Fig. 43), Ca/Sr 비는 비교적 조립질 암편이 우세한 Facies 2B에서 상당히 높은 값이 나타남. Fe/Ti 비는 세립질한 Facies 2A의 하부에서는 비교적 낮으나, 상부에서는 급격이 증가함. Fe/Ti 비는 Facies 2B에서 Facies 3로 향하면서 작은 진폭을 보이지만 전체적으로 증가하는 양상을 보였으나, 코어 상부 약 50 cm 구간에서는 낮아지는 경향을 보임

(라) 퇴적환경 변화 해석

- 스발바르군도 주변해역에서 TOC/N_{org} 비는 육상기원 유기물의 영향을 파악하는 지표로 주로 사용됨. TOC/N_{org} 비가 10 이하는 해양기원 유기물이 우세하고, 10-20인 경우는 해양과 육상기원 유기물이 비교적 우세하며, 20 이상인 경우는 육상기원 유기물이 지배적임을 의미함(Knies and Martines, 2009)
- 햄버그북타 피오르드에서 계산된 TOC/N_{org} 비는 전체적으로 28 이상으로 육상기원 유기물이 우세하며, 이는 스발바르 연안지역에서 분석된 표층 퇴적물의 TOC/N_{org} 비와 일치함
- 리틀 스토르피오르드 코어의 최하부 빙퇴적층에서 분석된 높은 TOC/N_{org} 비는 육상기원 유기물이 주로 퇴적된 것을 지시함. 점진적인 TOC/N_{org} 비의 감소는 후기 홀로세로 향하면서 상대적인 육상기원 유입의 영향이 감소되고 리틀 스토르피오르덴을 포함한 햄버그북타의 빙하가 후퇴됨에 따라 점차 해양기원 유기물 공급이 증가하는 것으로 해석됨. Facies 2와 Facies 3사이에서 관찰된 결층은 전기-중기 홀로세 동안 조수빙하/해양기저 빙하의 영향은 거의 없었던 것으로 해석됨. 생교란활동이 지배적인 Facies 3의 TOC/N_{org} 비가 18-20이 점을 고려하면, 후기 홀로세에도 리틀 스토르피오르덴에는 빙하활동에 의해 육상기원 유기물 유입이 우세하였음을 지시함
- 햄버그북타 피오르드에서 Fe/Ti와 Ca/Sr은 입도에 따른 변화양상이 잘 반영되는 것으로 보임. 특히, IRD를 포함한 조립질 입자가 우세한 구간에서 Ca/Sr의 비가 증가하는 것은 햄버그북타 기원의 조립질 육상기원 유입을 반영하는 것으로 해석되며, 리틀 스토르피오르덴에서 빙퇴적층(Facies 1)과 IRD층(Facies 2B)에서 비교적 높은 Ca/Sr 비는 햄버그북타 기원의 육상기원 퇴적물의 공급이 이루어진 것으로 해석되는 반면, 남부 스피츠베르겐이 전반적으로 동일한 지질로 구성된 것을 고려하였을 때, Ca/Sr 비가 햄버그북타 피오르드만을 지시하는 지표가 될 수 있는 지를 확인하기 위해서는 주변의 다른 지역에서 동일한 분석들이 수행되어 비교해 볼 필요가 있다고 사료됨

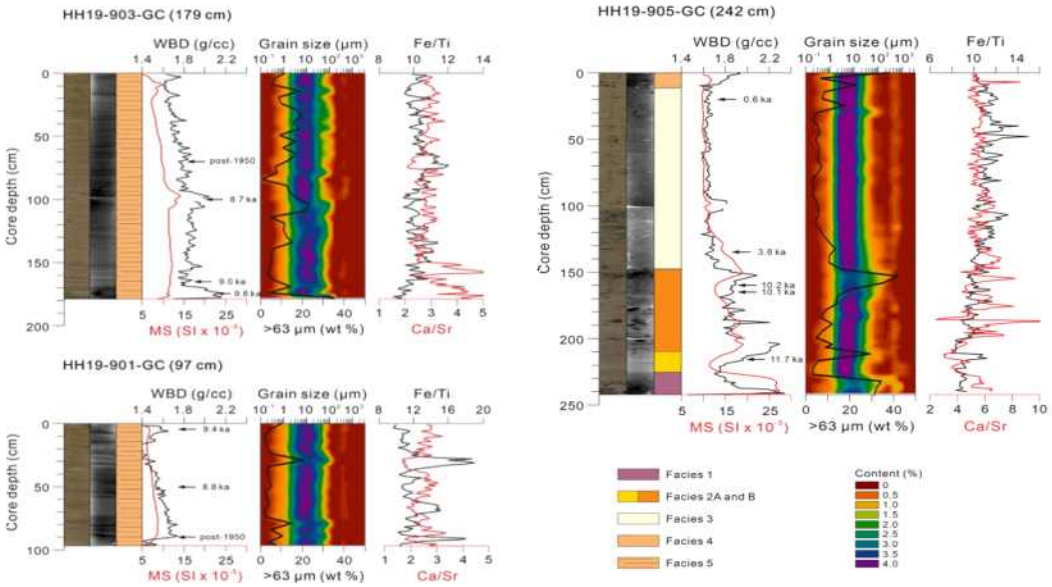


Fig. 43. Downcore variation in linescan images, X-radiographs, lithofacies (Facies 5), physical properties (WBD and MS), calendar ages of AMS ^{14}C dates, and grain size including the content of particles larger than 63 μm, and elemental geochemistry of HH19-901-GC, HH19-903-GC, and HH19-905-GC (Joe et al., 2022).

KOPRI 극지연구소

나) 입도 분포 end-member 모델링을 이용한 퇴적환경 복원 가능성 검토

(1) 연구 목적

(가) 연구 배경

- 입도 분포 곡선에서 나타나는 곡선의 형태, 모드 값, 왜도 등 다양한 입도 특징은 퇴적 과정을 반영함(Folk and Ward, 1957; Ashley, 1978; Vandenberghe, 2013)
- 입도 분포의 end-member (EM) 모델링은 입도 분포 곡선에서 입도 특징을 이용하여 각각의 EM을 구분하여 퇴적 과정을 유추하는 방법으로(Weltje, 1997; van Hateren et al., 2018), 극지 피오르드는 조수 빙하의 거동, 해빙의 분포, 해류의 유입 영향 등으로 다양한 퇴적 과정이 나타나지만, 입도 분포 EM 모델링을 활용한 연구가 부족함
- 스발바르 피오르드 해양 퇴적물 코어의 입도 자료를 바탕으로 입도 분포의 EM 적용을 통한 퇴적상을 비교하여 북극 피오르드 퇴적 환경 변화를 보다 명확하게 구별하고자 함

(나) 연구 지역 및 해양퇴적물 코어

- 스발바르 비데피오르드는 북극해와 맞닿은 스발바르 북부에 위치하여 마지막 최대 빙하기 이후 후퇴한 조수 빙하의 거동, 계절별로 북극해와 피오르드 안쪽에서 형성된 해빙의 분포, 북대서양에서 서쪽 해안을 따라 유입되는 따뜻하고 염분도가 높은 서 스피츠베르겐 해류(WSC)의 영향을 받는 지역임(Fig. 44A)

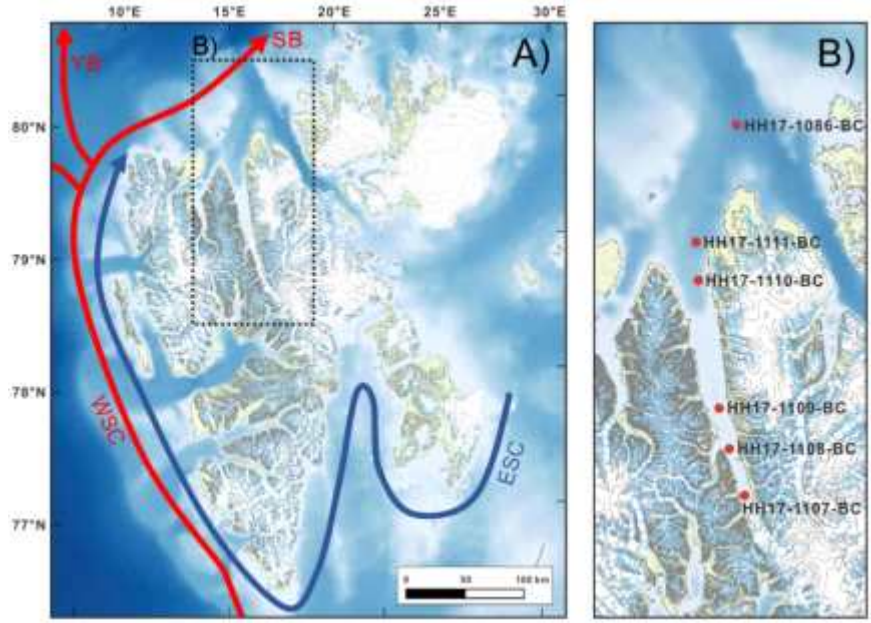


Fig. 44. (A) Map of the Svalbard archipelago and surrounding currents (WSC: West Spitsbergen current, YB: Yermak branch, SB: Svalbard branch, ESC: East Spitsbergen current). (B) Map of Wijdefjorden and gravity core sites (red filled circles) (Ahn et al., 2024).

KOPRI 극지연구소

- 본 연구에서는 2017년 제 2차 한국-노르웨이 국제 공동 탐사 동안 대륙붕단(HH17-1085-GC), 피오르드 바깥쪽(HH17-1091-GC, HH17-1094-GC), 피오르드 안쪽(HH17-1100-GC, HH17-1103-GC, HH17-1106-GC)에서 획득한 6점의 해양 퇴적물 중력 코어를 활용함(Fig. 44B)

(2) 연구 방법

- 퇴적상 분류를 위해 트롬소 북극대학(UiT)에서 Avaatech corer scanner를 이용하여 color image 획득 및 MSCL-XCT x-ray image macine으로 X-radiograph을 획득하고, GEOTEK Multi-Sensor Core Logger를 이용하여 퇴적물의 습윤밀도(wet bulk density)와 대자율(magnetic susceptibility)를 측정함
- 입도 분포의 EM 모델링에 활용된 입도는 극지연구소의 레이저 회절 입도 분석기(Mastersizer 3000, Malvern)을 이용한 분석 수행
- 방사성 탄소 연대는 독일 알프레드 베게너 극지·해양 연구소(Alfred-Wegener Institute for Polar and Marine Research)와 미국 베타 연구소(Beta Analytic Laboratory)에서 조개껍질(mollusk shell fragment)이나 산출되는 저서성 유공충(mixed benthic foraminifera)를 이용하여 획득함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 퇴적상

- Jang et al. (2021)에서 비데피오르드 대륙붕단의 해양 퇴적물 코어(HH17-1085-GC)에서 분류한 4개의 퇴적상을 바탕으로 비데피오르드 6점의 해양 퇴적물을 대상으로 보다 상세하게 6개의 퇴적상으로 분류함
- HH17-1091-GC와 HH17-1094-GC의 최하단부에는 1mm 이상의 조립한 빙하기원 쇄설성 퇴적물이 다량 포함하고 습윤밀도와 대자율이 높은 massive diamicton (Dmm)층이 위치함(Fig. 45)
- 대륙붕단(HH17-1085-GC)과 피오르드 바깥쪽(HH17-1091-GC, HH17-1094-GC)에서 시추된 퇴적물 코어에서는 최하단부와 Dmm층 위로 엽리 층리가 잘 발달된 laminated mud (Lm)층이 나타나며 그 위로 엽리 층리 간격이 넓어지고 엽리 층리가 희미해지는 weakly laminated mud (WLm)층이 나타남. 그 위로는 순서대로 균질한 암상의 massive mud (Mm)층과 생교란되고 조립한 쇄설성 암편이 포함된 bioturbated sandy mud(Bsm)층이 나타남(Fig. 45)
- 피오르드 안쪽(HH17-1100-GC, HH-1103-GC, HH-1106-GC)에서 획득한 퇴적물 코어 HH17-1100-GC에서는 Dmm층 위로 Lm층이 나타나지만 대부분 WLm층이 우세하게 나타남(Fig. 45)

KOPRI 극지연구소

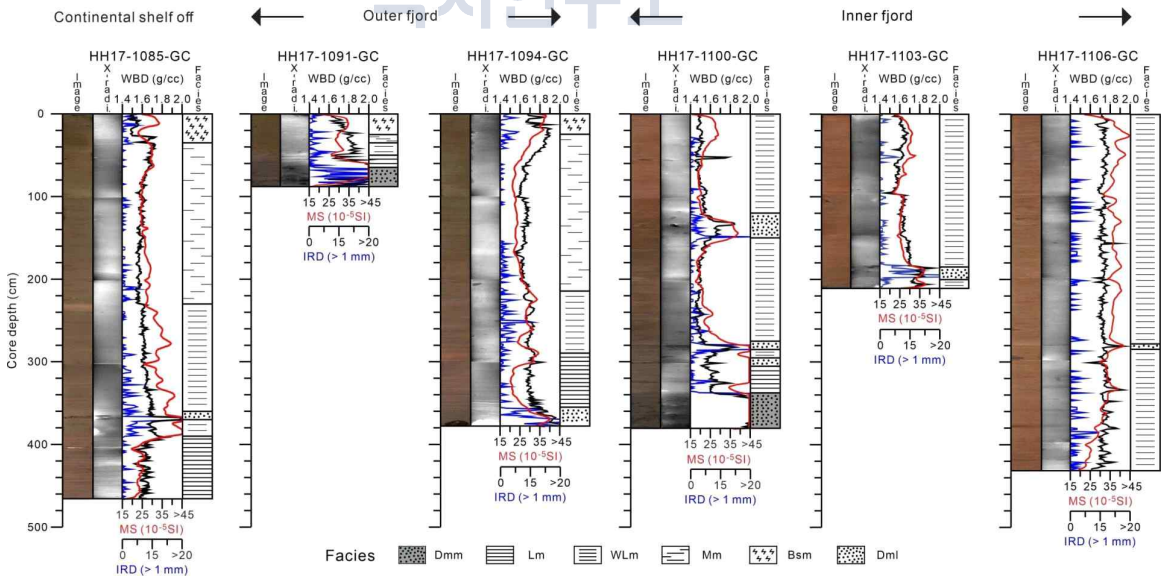


Fig. 45. Line scanning image, X-radiograph, wet bulk density (WBD), magnetic susceptibility (MS), Ice rafted debris (>1 mm, IRD), and facies of HH17 gravity cores recovered from Wijdefjorden, Northern Svalbard (Jang et al., 2021; Ahn et al., 2024)

- 엽리층리가 나타나는 다이아믹튼(Diamicton with lamina, Dml)층은 엽리 층리가 발달된 퇴적상들 사이에서 나타나며 1 mm 이상의 조립한 암편을 많이 포함하지만 밀도와 대자율이 Dmm층에 비해 상대적으로 낮음(Fig. 45)

(나) 방사성 탄소연대 및 연대 모델

- HH17-1091-GC는 탄소연대를 측정할 탄산염 시료를 획득하지 못하여 연대측정을 하지 못함
- 기존 연구에서는 탄소연대 **calibration**에 **Marine13 data set**과 **ΔR = 105± 24** (Mangerud et al., 2006)를 적용하였으나, 본 연구에서는 탄소연대 calibration에 **Marine20 data set**과 **ΔR = - 61± 37 (Pieńkowski, 2021)**을 적용함
- Bacon v.2.2 프로그램(Blaauw and Christen, 2011)을 이용하여 기존 연대와 이번 연대의 연대 모델을 비교하였더니 코어별로 최대 약 500년의 차이를 보임(Fig. 46)

(다) 퇴적물 입도 end-member 모델링

- 입도 분포의 다양한 EM 모델링 방법(van Hateren et al., 2018) 중 Matlab 기반의 AnalySize (Paterson and Heslop, 2015)를 이용함
- AnalySize는 4개의 parametric 알고리즘(Lognormal, Weibull, Gen. Weibull, and SGG)과 non-parametric 알고리즘을 제공하는데 본 연구에서는 피오르드에서 일어나는 다양한 퇴적 과정 변화를 이해하기 위해 non-parametric 방식을 적용함
- EM의 수는 EM 수(Q)와 결정 계수(R^2) 그래프에서 결정 계수가 0.7 이상으로 충분히 높으면서 변곡점에 해당하는 지점으로 결정함(Prins et al., 2002) (Fig. 47)

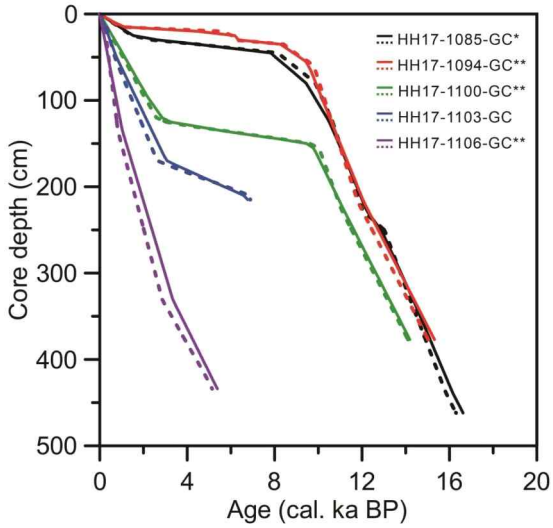


Fig. 46. Core depth-age models of HH17 gravity cores using Bacon v.2.2. The solid lines were calibrated with the Marine 20 data set and ΔR = - 61± 37. The dotted lines were calibrated with the Marine 13 data set and Δ R = 105±24 (Jang et al., 2021, 2023).

- 각 퇴적물 코어마다 3-6개(HH17-1085-GC: 6, HH17-1091-GC: 5, HH17-1094-GC: 6, HH17-1100-GC :5, HH17-1103-GC:3, HH17-1106-GC: 3)의 EM이 추출됨
- 총 28개의 EM을 입도 분포 곡선에서 나타나는 입도 특징을 기반으로 5개의 EM으로 그룹화한 결과 단일모드 혹은 이중모드의 EM1, EM2, EM3는 EM1 (4.3- 8.2 μm), EM2 (11.9- 25.8 μm), EM3 (33.2- 55.3 μm)로 갈수록 주요 모드가 조립한 특징이 나타나고, 다중모드의 EM4, EM5는 넓은 입도 범위(1- 1000 μm)에서 고른 입도 비율을 보이는 EM5와 특정화 되지 않는 분포 곡선을 갖는 EM4로 특징됨(Fig. 48)
- EM1과 EM2는 각각 3 개와 2 개의 sub-EM을 갖는데 a에서 b, c로 갈수록 주요 모드가 조립해짐(Fig. 48)
- 기존 연구와 비교하였을 때, EM1은 조수 빙하의 융빙수에 의해 재부유된 입자가 침전된 것으로 해석되며(Møller et al., 2006), EM3은 주로 해빙의 영향을 받아 퇴적된 것으로 추정됨(Møller et al., 2006). EM4는 유빙이 운반한 입자가 주로 퇴적된 것(Jonkers et al., 2012)으로 해석됨(Fig. 48)

(라) 퇴적상-입도 end-member 비교

- 퇴적상 분포와 주요 입도 EM의 분포 비교를 통해 EM1의 분포는 엽리 층리가 발달된 Lm, WLm의 분포와 일치하고, EM2의 분포는 균질한 암상의 Mm의 분포와 대응됨. EM3의 분포는 대륙붕단과 바깥쪽 피오르드에서 Bsm이 퇴적된 시기와 일치하며, EM4와 EM5의 분포는 각각 Dml, Dmm의 분포와 일치함(Fig. 49)

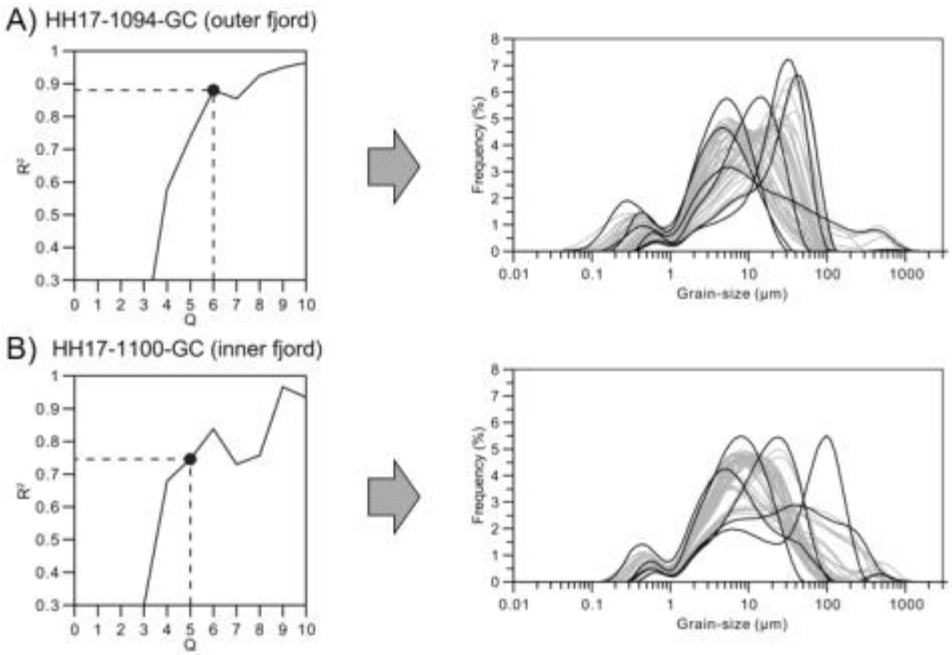


Fig. 47. Determining the number of end-members and comparing grain size distributions at all depths (grey lines) and the end-members (black lines) in (A) HH17-1094-GC and (B) HH17-1100-GC.

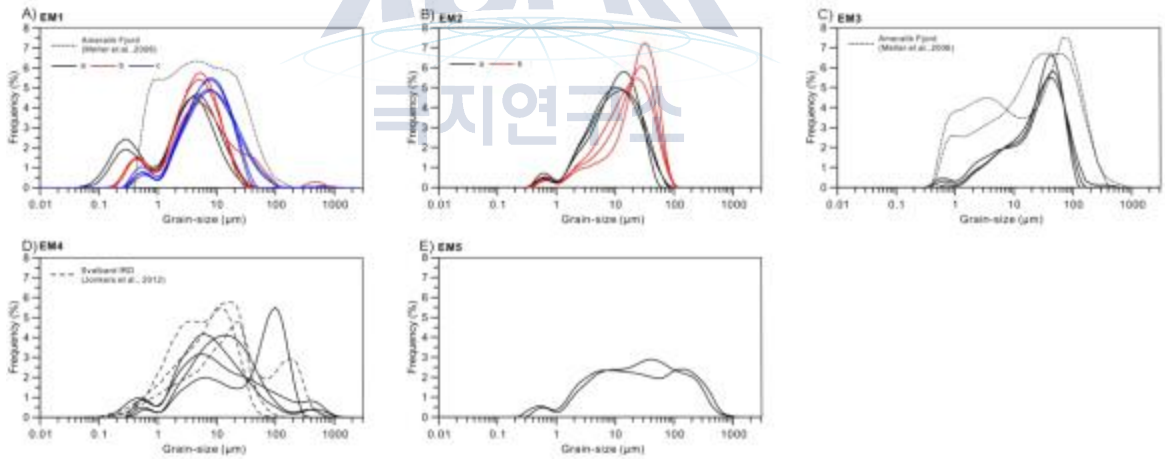


Fig. 48. Grouping of end-members from all HH17 gravity cores.

- 엽리 층리는 주로 조수 빙하에서 유출되는 융빙수에 의해 재부유된 입자가 입자 크기에 따라 침전되어 퇴적될 때 형성되므로 EM1은 기존 연구 결과와 같이 융빙수의 영향을 받은 것으로 생각됨
- 균질한 암상의 EM2는 피오르드로 유입되는 지속적인 해류에 의한 분급작용으로 퇴적된 것으로 보이며 EM3는 생교란과 조립한 입자의 특징, 기존 연구 결과를 고려하면, 주로 해빙이 분포하는 환경에서 퇴적된 것으로 추정됨
- 조립한 암편을 다량 포함하는 EM4와 EM5에서 EM4는 주로 유빙에 의해 운반된 입자

가 퇴적되었고, EM5는 조수 빙하 기저에서 퇴적된 것으로 해석됨

- 피오르드 바깥쪽 퇴적물 코어(HH17-1085-GC, HH17-1094-GC)에서 마지막 해빙기인 약 16,000년 전에서 약 11,000년 전까지 엽리 층리는 희미해지는 반면 EM1의 sub-EM들은 조립해짐(Fig. 49)
- 마지막 해빙기 때, 바깥쪽 피오르드의 퇴적상의 분포는 융빙수의 방출 양상이 주기적인 양상에서 지속적인 양상으로 변화한 것으로 추정되며, 바깥쪽 피오르드의 EM1 sub-EM의 분포는 융빙수의 강도가 강해진 결과로서 기후 변화에 의한 퇴적상 변화로 해석됨(Fig. 49)
- EM2의 sub-EM은 약 11,000년 전부터 10,000년 사이에 대륙붕단(HH-1085-GC)에서 조립하고 바깥쪽 피오르드(HH17-1094-GC)에서 세립한데 이는 해류의 세기와 연관된 것으로 추정됨(Fig. 49)
- EM2/EM1 비는 비데피오르드에서 퇴적 과정에 해류의 영향(EM2)과 융빙수의 영향(EM1)의 상대적인 세기를 보여주는데 특히 피오르드 바깥쪽 퇴적물 코어(HH17-1085-GC, HH17-1094-GC)의 EM2/EM1 비는 해류의 세기를 나타내는 프록시인 sortable silt (McCave et al., 1995)와 경향성이 유사하고 기후변화를 대변하는 그린란드 빙하코어의 산소동위원소의 비(NGRIP community members, 2004)와도 경향성이 유사하여 마지막 해빙기 이후 기후 변화에 의해 북극해로 유입되는 서 스피츠베르겐 해류의 세기 변동과 관련성이 있는 것으로 추정되어 이에 대한 연구가 필요함(Fig. 50)

KOPRI 극지연구소

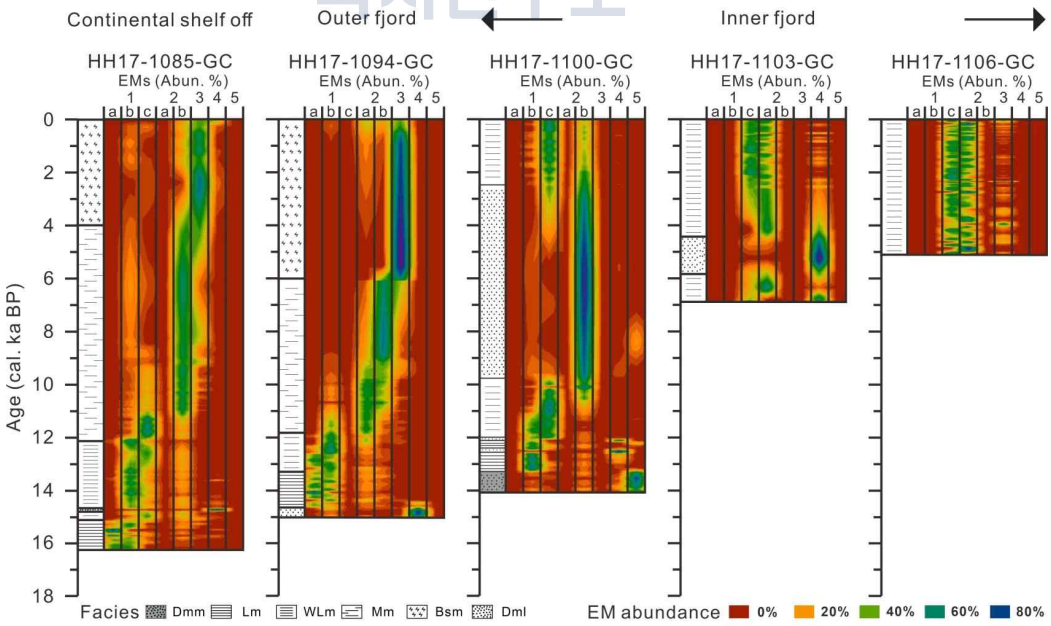


Fig. 49. Downcore distribution of relative abundances of end-member in comparison to facies (Ahn et al., 2024).

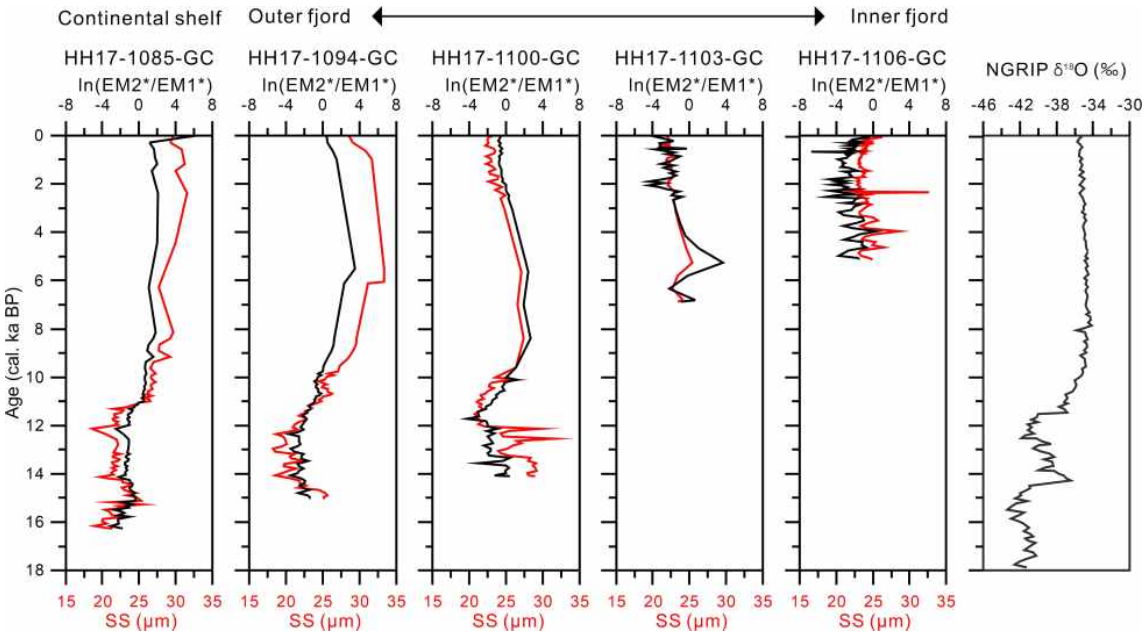


Fig. 50. ln(EM2*/EM1*), sortable silt (SS) from HH17 gravity cores, and the oxygen isotope ratio estimated from the Greenland NGRIP ice core during the last deglaciation (NGRIP community members, 2004). EM1* is the sum of EM1a, EM1b, and EM1c. EM2* is the sum of EM2a and EM2b (Ahn et al., 2024).

KOPRI 극지연구소

다) XRD 광물 자료 기반 스발바르 퇴적물 기원 복원 프록시 활용 가능성 검토

(1) 연구 목적

- 퇴적물 내 광물 조성은 일반적으로 퇴적물이 주변의 육상에 분포하는 어떤 암석으로부터 유래되었는지에 대해 1차적으로 결정되기에, 퇴적물의 기원지를 추적하는 전통적인 지시자로 활용되어 왔음
- 실제, Jang et al. (2021)은 스발바르 북부 대륙붕 지역에서 획득한 코어퇴적물(HH17-1085-GC) 내 XRD 광물 분석 자료(돌로마이트와 해록석)을 활용하여 과거 해빙기 및 홀로세 시기 빙하의 전진 및 후퇴 양상에 따른 퇴적물 기원지 변화를 유추하며, 원생대에서부터 현생까지 다양한 연령 및 종류의 지괴로 둘러싸인 스발바르 피오르드 퇴적물의 기원지를 유추하는 데 광물조성의 역할을 조명한 바 있음
- 다만, 퇴적물 내 광물 조성은 퇴적물 기원지뿐 아니라, 풍화 양상(weathering regime; congruent vs. incongruent weathering), 분급 작용(mineralogical sorting), 퇴적 이후 속성 작용(diagenesis) 등 2차적인 요소에 의해서도 좌우될 수 있음

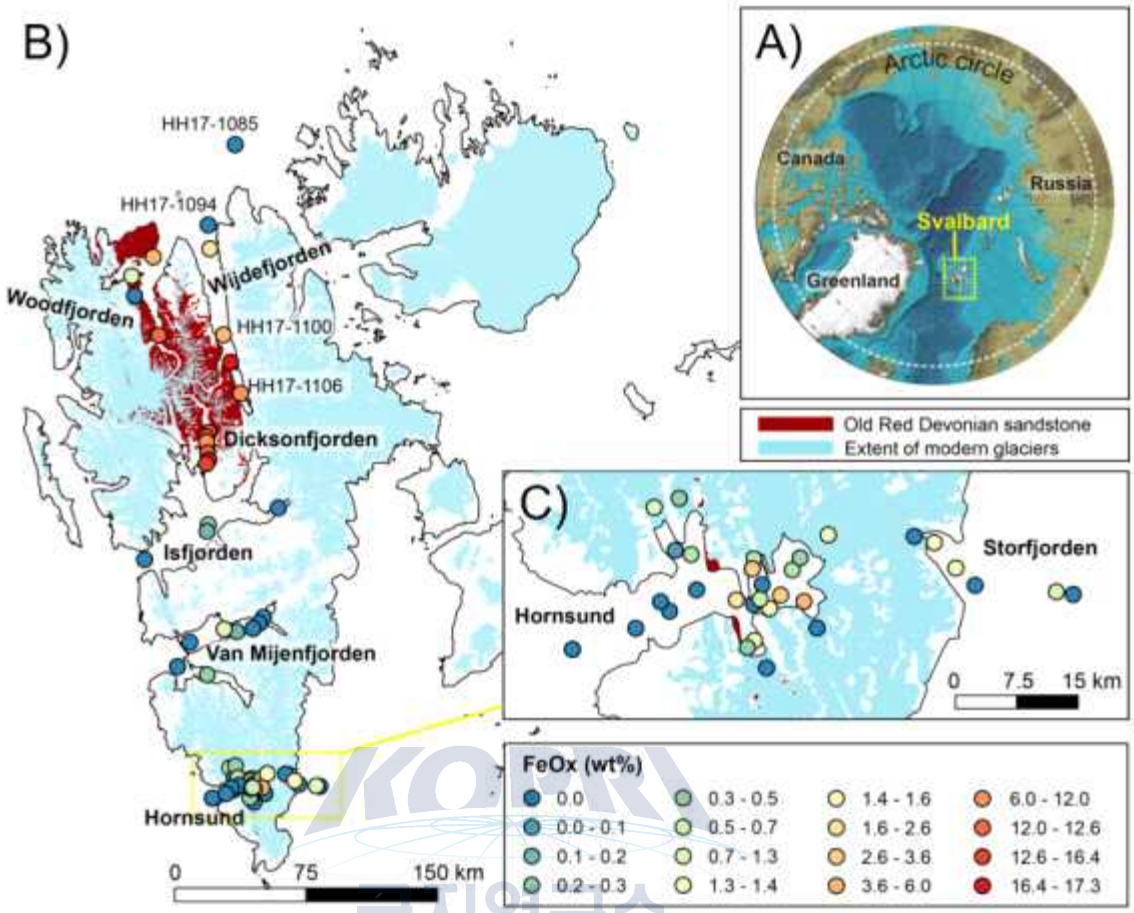


Fig. 51. Map of (A) the Arctic Ocean, (B) Svalbard, and (C) Hornsund. The spatial distribution of Fe-(oxyhydr)oxide minerals (FeOx; weight percentage) is shown by colored circles (source: Jang et al., 2023).

- 이러한 2차적인 요소는 환경적인 요인으로, 특정 광물 조성이 퇴적물 기원지 이외의 환경적 요소에 의해 결정된다면, 해당 광물이 특정 환경을 대변하는 지시자로서 활용 가능성이 있음을 의미함

(2) 연구 방법

- 본 연구에서는 한-노 국제피오르드 공동탐사 동안 확보한 스발바르 전역의 표층퇴적물을 대상으로 주요 광물 및 부수 광물 등 다양한 광물 분석을 통해(Fig. 51), 퇴적물 기원지와 비선형관계를 보이는 광물 종을 관찰하고, 기원지 이외에 해당 광물 함량을 결정하는 환경적 요인을 고찰하여 특정 환경을 대변하는 신규 지시자로서의 광물 활용 가능성을 제안하고자 함

(3) 연구 결과

(가) 철산화광물 함량의 지역적 차이

- 스발바르 전역, 비데피오르드(n = 6), 우드피오르드(n = 4), 이스피오르드(n = 3), 템펠피오르드(n = 1), 딕슨피오르드(n = 7), 반미엔피오르드(n = 6), 반커일렌피오르드(n = 1), 호르준드(n = 25), 벨준드(n = 2), 햄버그북타(n = 6) 등에서 분석된 XRD 광물 분석 결과 중 석영, 사장석, 정장석, 백운모, 방해석, 돌로마이트, 해록석, 철산화광물 등 주요 및 부수 광물 조성을 Table 13에 표기함
- 대부분의 주요 및 부수 광물 조성의 경우, 전통적인 퇴적물 기원지 지시자로 활용되는 쇄설성 네오디뮴 동위원소 비 분석 결과 값(Jang et al. 2020)과 커플링을 보이며, 스발바르 피오르드 표층 퇴적물 내 광물 조성이 어떤 암석으로부터 유래되었는지를 가리키는 지시자로 활용될 수 있을 것으로 판단됨
- 철산화광물의 경우 철이 풍부한 데본기 사암층으로부터 배수되는 비데피오르드 지역에서 최대 17.3 wt.%의 함량을 보이고 마찬가지로 동일한 지괴로부터 퇴적물이 공급되는 우드피오르드 및 딕슨피오르드 지역에서 높은 함량을 보이는 등 퇴적물 기원지의 영향에 의해 1차적으로 그 함량이 변화되는 것이 관찰됨
- 그러나, 비데피오르드 표층 퇴적물 내 쇄설성 네오디뮴 동위원소로 대변되는 기원지 변화에 비해, 철산화광물 함량은 보다 급진적인 양상을 보임. 즉, 비데피오르드 내부(남쪽)에서 외부(북쪽)를 따라 획득한 표층퇴적물의 기원지는 크게 변화하지 않았음에도, 철산화광물의 함량은 퇴적물의 공급지인 빙하로부터 멀어질수록 급격하게 감소되는 양상을 보임
- 이러한 양상은 호르준드 퇴적물에서도 관찰되는데, 철산화광물은 보통 빙하에 가까울수록 그 함량이 더 높게 나타나는 경향성을 보임

극지연구소

Table 13. QXRD results from Svalbard surface sediments.

Location	Coordinate (°N, °E)	Sample	Quartz (%)	Plagioclase (%)	K-feldspar (%)	Muscovite (%)	Calcite (%)	Dolomite (%)	Glauconite (%)	Fe-oxide (%)
Wijde-fjorden	80.27, 16.21	HH17-1086	30.96	16.85	3.89	0	1.14	3.77	0	0
	79.00, 16.22	HH17-1107	19.66	7.1	5.76	14.99	1.72	3.68	0	7.19
	79.16, 15.96	HH17-1108	15.79	7.17	0.54	14.62	2.15	0.59	2.9	17.32
	79.30, 15.78	HH17-1109	20.91	12.1	1.26	9.35	1.82	0.43	0	6.05
	79.74, 15.42	HH17-1110	31.08	13.52	8.25	0	0	0.81	0	2.56
	79.87, 15.38	HH17-1111	31.79	22.32	5.84	5.06	2.41	3.48	0	0
Wood-fjorden	79.65, 13.75	HH12-964	15.73	8.9	2.47	3.44	1.38	3.08	0	4.51
	79.64, 13.21	HH12-966	20.05	11.8	4.11	13.67	1.22	1.62	0	0.99
	79.47, 13.26	HH12-967	18.03	9.16	3.32	1.66	5.24	2.35	3.37	0
	79.35, 13.96	HH12-969	18.24	6.63	0.61	15.79	8.13	2.7	2.97	12.27
Isfjorden	78.35, 15.29	HH16-1205	27.95	4.59	1	13.57	0	3.05	4.42	0.2
	78.33, 15.33	HH19-847	18.11	7.87	2.7	15.32	0	4.47	0	0.22
	78.15, 13.74	HH19-850	21.6	8.7	2.13	17.59	1.77	7.62	0	0
Tempel-fjorden	78.41, 17.12	HH16-1176	20.17	2.99	0.7	0	12.26	20.69	0	0
Dickson-fjorden	78.80, 15.36	HH16-1182	21.01	8.74	0.89	12.95	7.45	0.97	0	11.98
	78.76, 15.30	HH16-1185	20.02	11	1.38	17.02	6.98	1.51	0	7.26
	78.70, 15.32	HH16-1187	17.07	8.28	0.87	9.67	5.65	6.12	1.87	12.55
	78.67, 15.36	HH16-1190	12.93	5.5	0.67	3.04	4.64	7.61	7.58	17.21
	78.65, 15.29	HH16-1193	14.73	5.84	0.91	18.9	5.76	8.63	1.28	14.99
	78.79, 15.30	HH16-1196	16.16	7.98	1.73	17.7	10.74	1	0	16.41
	78.81, 15.36	HH16-1199	17.04	5.85	1.44	4.08	6.1	3.82	0	1.74
van Mijen-fjorden	77.83, 16.35	HH16-1209	27.97	9.17	3.67	15.35	0	0.54	0	0
	77.80, 15.69	HH16-1214	23.48	6.2	0.99	20.72	0	0.43	7.35	1.05
	77.86, 16.66	HH19-855	22.97	4.86	4.58	5.71	0	0	0	0
	77.83, 16.55	HH19-858	19.25	9.71	4.66	3.59	0	0.36	8.41	0
	77.79, 16.01	HH19-863	24.77	12	2.43	15.89	0	1.42	0	0.2
	77.73, 14.87	HH19-868	27.66	10	2.58	16.84	0	1.02	0	0
van Keulen-fjorden	77.57, 15.29	HH19-872	17.8	8.91	3.47	0	1.16	2.69	0	0.22

KOPRI 극지연구소

Location	Coordinate (°N, °E)	Sample	Quartz (%)	Plagioclase (%)	K-feldspar (%)	Muscovite (%)	Calcite (%)	Dolomite (%)	Glauconite (%)	Fe-oxide (%)
Hornsund	77.09, 15.80	HH15-1464	26.37	7.75	1.14	15.28	9.41	5.08	0	1.28
	77.04, 15.90	HH15-1466	19.26	6.78	1.32	12.79	8.15	2.53	5.19	0.15
	77.10, 15.92	HH15-1468	33.15	6.39	0.75	0	5.6	3.16	0	0.22
	77.04, 15.97	HH15-1469	19.85	5.26	0.88	17.93	7.66	1.7	0	0.47
	76.99, 16.19	HH15-1472	20.23	7.88	0.44	6.06	1.64	0.46	7.55	1.73
	77.03, 16.28	HH15-1474	25.35	7.07	0.44	0	0	0.33	0	0.48
	77.02, 16.27	HH15-1475	22.44	6.86	0.52	0	0.24	0.3	0	3.62
	77.00, 16.32	HH15-1476	19.95	6.83	2.27	0	0.9	0.52	0	0
	76.99, 16.41	HH15-1478	19.99	7.4	0.42	1.15	0.98	0.32	0	2.75
	77.02, 16.47	HH15-1479	25.81	11.29	0.61	0	0	0.22	0	0.39
	77.03, 16.51	HH15-1480	21.37	11.92	0.44	0	0.21	0.2	2.66	0.29
	77.06, 16.65	HH15-1482	29.42	12.72	0.42	0	0	0.09	0	1.39
	76.96, 16.58	HH15-1484	35.38	10.41	0.41	0	0	0	2.76	0
	76.99, 16.52	HH15-1485	23.24	13.04	0.42	0	0.16	0.16	0	4.5
	76.98, 16.35	HH15-1486	23.98	4.11	0.37	0	0.85	0.32	0	1.49
	76.91, 16.33	HH15-1488	23.06	2.51	0.29	13.2	11.75	2.11	4.62	0
	76.94, 16.27	HH15-1489	18.86	3.59	0.38	10.02	7.4	0.81	0	1.4
	76.98, 15.86	HH16-1223	21.27	10.91	1.1	0	2.21	0.89	0	0
	77.00, 16.00	HH16-1227	20.91	8.7	1.68	12.3	5.74	1.11	2.68	0
	76.98, 16.27	HH16-1230	19.37	5.9	1.23	8.6	2.44	0.42	0	0
	76.94, 15.39	HH19-885	26.43	8.71	1.38	2.71	2.09	2.88	0	0.64
	76.99, 15.82	HH19-888	23.55	9.42	1.59	16.46	5.94	3.56	0	0
	76.99, 16.31	HH19-891	18.88	4.97	3.07	3.67	2.92	3.75	0	0.57
	76.94, 15.39	HH19-884	29.05	8.32	1.25	6.82	3.25	3.12	0	0
	76.96, 15.7	HH19-878	31.04	7.78	1.84	25.13	4.71	3.28	0	0
Bellsund	77.61, 14.58	HH19-876	23.17	6.33	1.13	12.52	0.69	10.99	0	0
	77.61, 14.58	HH19-877	21.68	7.57	1.79	24.09	0.5	6.85	0	0
Hamberg-bukta	77.05, 17.16	HH19-895	22.46	17.23	3.03	0	0	0	0	1.39
	77.00, 17.35	HH19-898	25.37	16.58	1.69	6.12	0	0.57	0	0
	76.98, 17.83	HH19-900	26.75	13.93	3.16	3.03	0	2.79	0	0
	77.05, 17.07	HH19-901	25.96	19.36	1.21	1.38	0	0	5.83	0
	77.02, 17.26	HH19-903	28.91	19.1	1.2	1.5	0	0	0	1.57
	76.99, 17.75	HH19-905	24.42	12.53	1.27	4.84	0	0.47	0	0.99

KOPRI 극지연구소

(나) 철산화광물의 빙하후퇴 양상 검증 프록시로 적용 가능성

- 비데피오르드 및 호르준드에서 분석된 표층퇴적물 내 철산화광물은 각각 내륙 방향, 즉 퇴적물의 공급원에 가까울수록 그 함량이 높게 나타나는 것으로 관측되었음. 즉, 빙하로부터의 거리가 스발바르 표층 퇴적물 내 철산화광물의 공간적인 분포를 결정하는 데 중요한 요소로 작동한 것으로 여겨짐
- 이러한 관찰 결과는 극지 환경에서의 생지화학적 풍화과정이 막대한 량의 철을 공급하지만(Hawkings et al., 2014; Hawkings et al., 2020; Raiswell et al. 2016, 이때 배출되는 다양한 형태(particulate, colloidal, dissolved)의 철이 담수와 해수가 섞이는 하구 지역에서 대부분 응집(flocculation) 및 침전(precipitation) 되며 퇴적되기 때문에 발생한 결과로 보임(Bhatia et al., 2013; Boyle et al., 1977; Hopwood et al., 2016)
- 즉, 기원지로부터 대량의 철이 공급되더라도, 철의 높은 흡착성(adsorption)으로 인해 공급원인 빙하 및 융빙수의 배수지로부터 멀어지는 경우, 철산화광물의 함량이 줄어드는 것으로 해석됨
- 이는, 퇴적물의 기원지에 따른 변수를 통제할 수 있는 조건일 때, 철산화광물의 함량이 공급원으로부터의 거리를 가리키는 지시자로 활용될 수 있음을 의미함. 일반적인 환경에서 퇴적물 배수지의 위치는 변화하지 않지만, 극지와 같이 기후변화에 따라 빙하의 확장 및 후퇴가 반복되는 환경에서는 배수지가 빙하 전면부(glacier front)의 위치에 결정되므로, 철산화광물의 함량은 간접적으로 빙하 전면부의 위치를 추정할 수 있는 지시자로 활용될 가능성이 다분함
- 해당 가설, 즉 빙하 분포 범위의 추적자로서 철산화광물의 역할을 입증하기 위해서는 표층퇴적물 뿐만 아닌, 고(古)빙하 환경이 이미 복원된 지역에서 확보한 코어 퇴적물에서의 XRD-광물조성 분석이 수행될 필요가 있음
- 본 과제의 2차년도(2022.01.01 ~ 2022.12.31)에서는 북부 스발바르 대륙붕에서부터 비데피오르드 내부까지의 횡단면을 따라 확보한 코어 퇴적물들에서의 철산화광물 함량 분석을 통하여, 과거 해빙기 이후 북부 스발바르 지역에 분포하였던 거대빙상인 스발바르-바렌츠해 빙상(Svalbard-Barents Sea Ice Sheet)의 분포 변화를 복원하고자 하며, 나아가 정밀 연대 모델 정립을 통하여 시간에 따른 빙하 전진/후퇴 속도를 계산하고자 함

라) 스발바르 피오르드 표층퇴적물을 활용한 유기물 특성 연구

(1) 연구 목적

- 스발바르 군도는 전체 면적의 약 57%가 빙하로 덮여 있으며 빙하작용에 의해 형성된 서로 다른 다양한 크기와 형태의 피오르드로 구성되어 있음
- 조수빙하 활동으로 빙하 퇴적물 및 융빙수와 함께 다량의 육상 기원 유기물이 피오르드로 유입되는 반면, 노르딕해(Nordic Sea) 및 북극해와 인접한 피오르드 바깥쪽의 퇴적층에는 비교적 따뜻하고 염분도가 높은 서스피츠베르겐 수괴의 영향으로 해양 기원의 유기물 공급이 증가함
- 표층 퇴적 유기물에 미치는 영향이 서로 다른 각 피오르드의 특징을 이해하고 유기물의 특성과 기원을 이해하는 것은 스발바르 피오르드 환경을 이해하는 데 매우 중요함

(2) 연구 방법

- 본 연구에서는 스발바르 군도 총 7개의 피오르드(비데 피오르드, 딕슨피오르드, 이스피오르드, 반미엔피오르드, 호른준드, 햄버그북타, 및 콩스피오르드)에서 이미 확보된 표층 퇴적물(n=56)을 분석하여 유기물의 특성을 파악하고 각 피오르드에서 기존에 발표된 표층 퇴적물 데이터(n=179)를 종합하여(Fig. 52) 본 연구에서 수행된 결과와 비교하고자 함
- 스발바르 피오르드에서 획득된 표층 퇴적물의 유기물 특성을 조사하기 위해 유기물 함량(총 유기탄소, 총 질소, 유기질소 함량, 총 질소/총 유기탄소 비, 및 유기질소/총 유기탄소 비)을 분석함(Table 14)

KOPRI 금지연구소

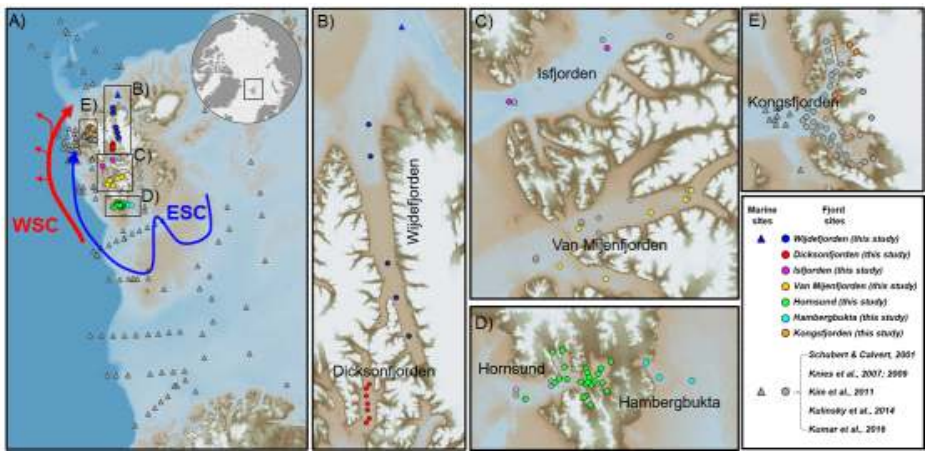


Fig. 52. (A) General map of sampling locations of surface sediment samples in Svalbard fjords, including (B) Wijdefjorden, Dicksonfjorden, (C) Isfjorden, Van Mijenfjorden, (D) Hornsund, Hambergbukta, and (E) Kongsfjorden.

- 퇴적물의 총 유기탄소 및 탄소 안정동위원소비는 10 % HCl를 이용하여 퇴적물의 무기탄소를 제거한 후 분석했으며, 질소 함량은 KOBr/KOH 처리를 통해 무기질소와 유기질소를 분리한 후(Silva and Bremner, 1966) Elemental Analyzer – Isotope ratio Mass Spectrometer (EA-IRMS)를 이용하여 분석함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 퇴적 유기물 조성

- 피오르드 표층 퇴적물의 총 유기탄소 함량(TOC, wt. %), 총 질소(N_{tot}, wt. %) 및 유기질소(N_{org}, wt. %) 함량, 그리고 탄소안정동위원소비($\delta^{13}C_{org}$) 값을 나타냄 (Table 14)
- 피오르드 표층 퇴적물의 총 유기탄소 함량은 0.04 ~ 2.74 wt. % 로 넓은 범위를 나타냈으며 총 질소 함량은 0.03 ~ 0.26 wt. %, 유기질소 함량은 0.01 ~ 0.20 wt.%의 범위를 나타냄
- 피오르드 표층 퇴적물의 총 질소 함량 대비 총 유기질소의 함량이 평균 44%로 기존 문헌(Winkelmann and Knies, 2005)에 보고된 결과와 유사한 값을 나타냄
- 이스피오르드 표층 퇴적물의 총 유기탄소 함량이 가장 높은 값을 보였으며 콩스피오르드 표층 퇴적물이 가장 낮은 총 유기탄소 및 총 질소 함량 값을 나타냄(Fig. 53)
- 총질소/총유기탄소 및 유기질소/총유기탄소 함량 비는 딕슨 피오르드에서 가장 높은 값을 보였으며, 반 미엔 피오르드에서 두 값 모두 가장 낮은 결과를 나타냄

극지연구소

Table 14. Averages and standard deviations of bulk parameters of surface sediment samples collected from different Svalbard fjords.

Fjord name	No. of samples	TOC (wt. %)	N_{tot} (wt. %)	N_{org} (wt. %)	N_{tot}/TOC ratio	N_{org}/TOC ratio	$\delta^{13}C_{org}$ (‰ VPDB)
Wijdefjorden	6	1.03±0.57	0.15±0.06	0.08±0.06	0.16±0.03	0.08±0.01	−22.77±0.37
Dicksonfjorden	7	0.39±0.25	0.08±0.04	0.06±0.01	0.26±0.12	0.11±0.01	−24.45±0.52
Isfjorden	2	2.61±0.15	0.21±0.01	0.14±0.03	0.08±0.01	0.05±0.01	−24.09±0.54
van Mijenfjorden	6	1.85±0.41	0.13±0.02	0.06±0.03	0.07±0.02	0.03±0.02	−25.32±0.57
Hornsund	24	1.54±0.51	0.13±0.04	0.05±0.05	0.09±0.03	0.03±0.02	−25.44±0.70
Hambergbukta	3	1.98±0.69	0.22±0.06	0.15±0.06	0.11±0.03	0.08±0.03	−24.29±0.48
Kongsfjorden	8	0.22±0.13	0.03±0.02	–	0.09±0.01	–	−20.14±0.96

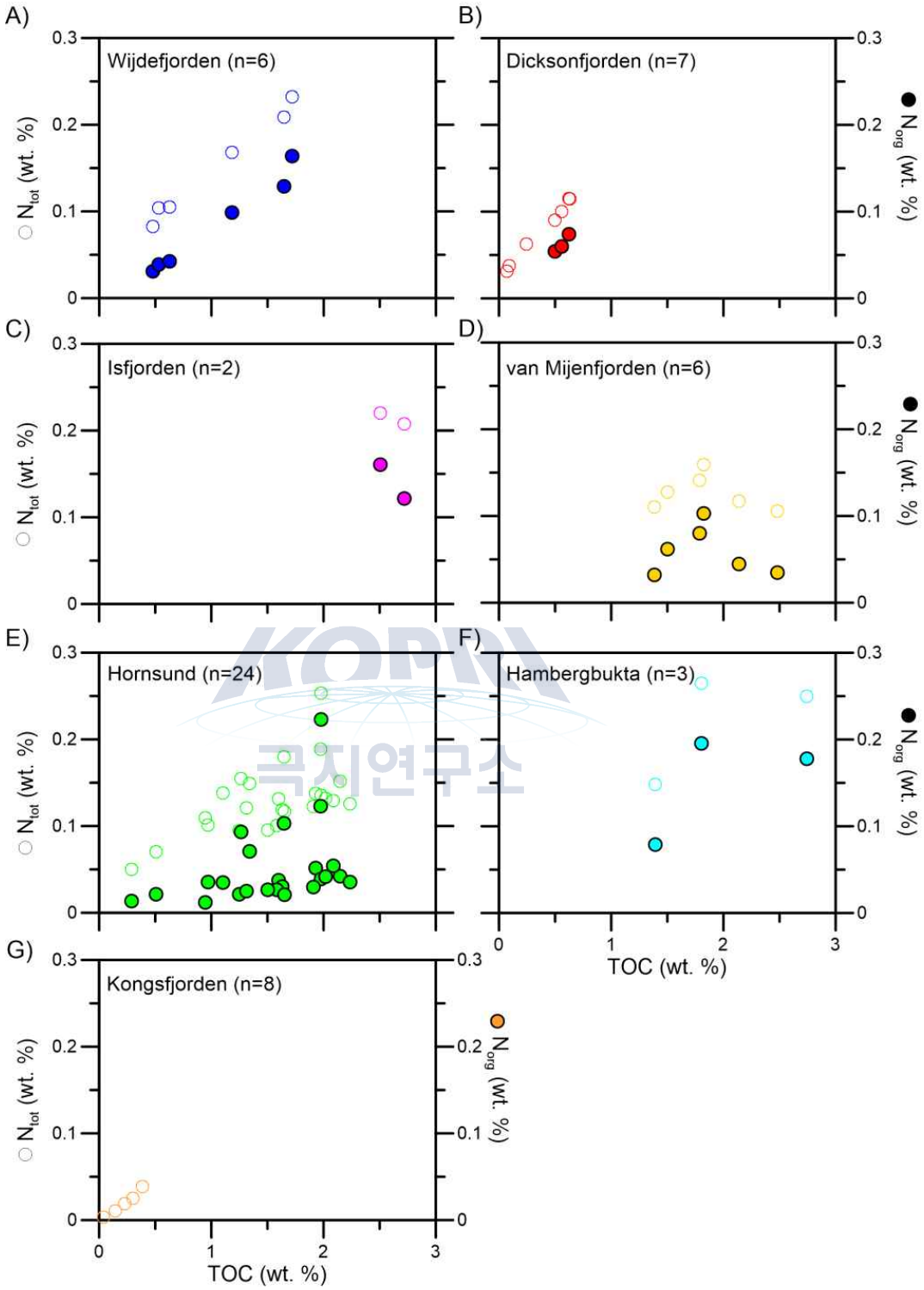


Fig. 53. Scatter plots of TOC (wt. %) vs. N_{org} and N_{tot} for (A) Wijdefjorden, (B) Dicksonfjorden, (C) Isfjorden, (D) Van Mijenfjorden, (E) Hornsund, (F) Hambergbukta, and (G) Kongsfjorden.

KOPRI 극지연구소

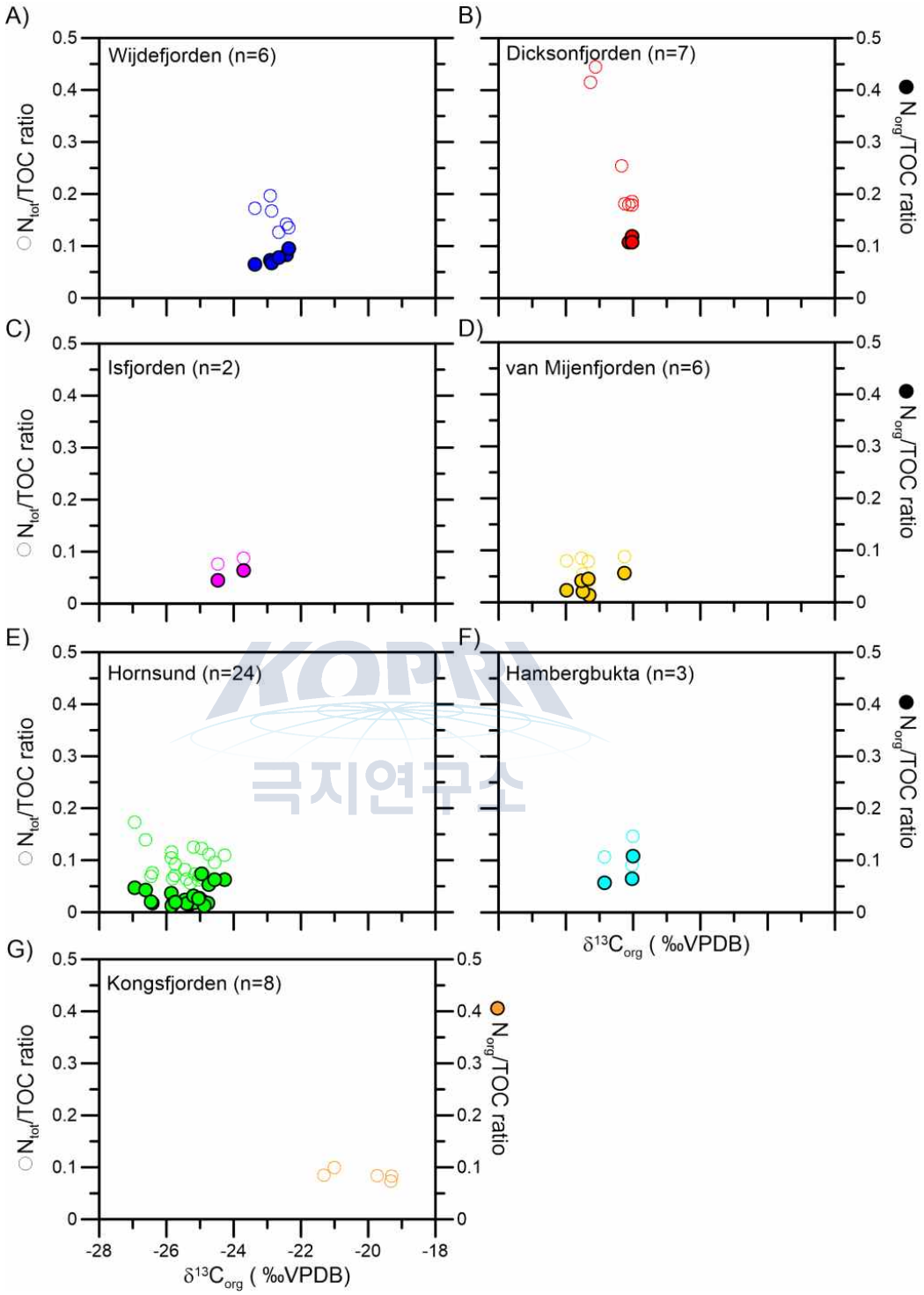


Fig. 54. Scatter plots of $\delta^{13}C_{org}$ vs. N_{org}/TOC ratio and N_{tot}/TOC ratio for (A) Wijdefjorden, (B) Dicksonfjorden, (C) Isfjorden, (D) Van Mijenfjorden, (E) Hornsund, (F) Hambergbukta, and (G) Kongsfjorden.

KOPRI 극지연구소

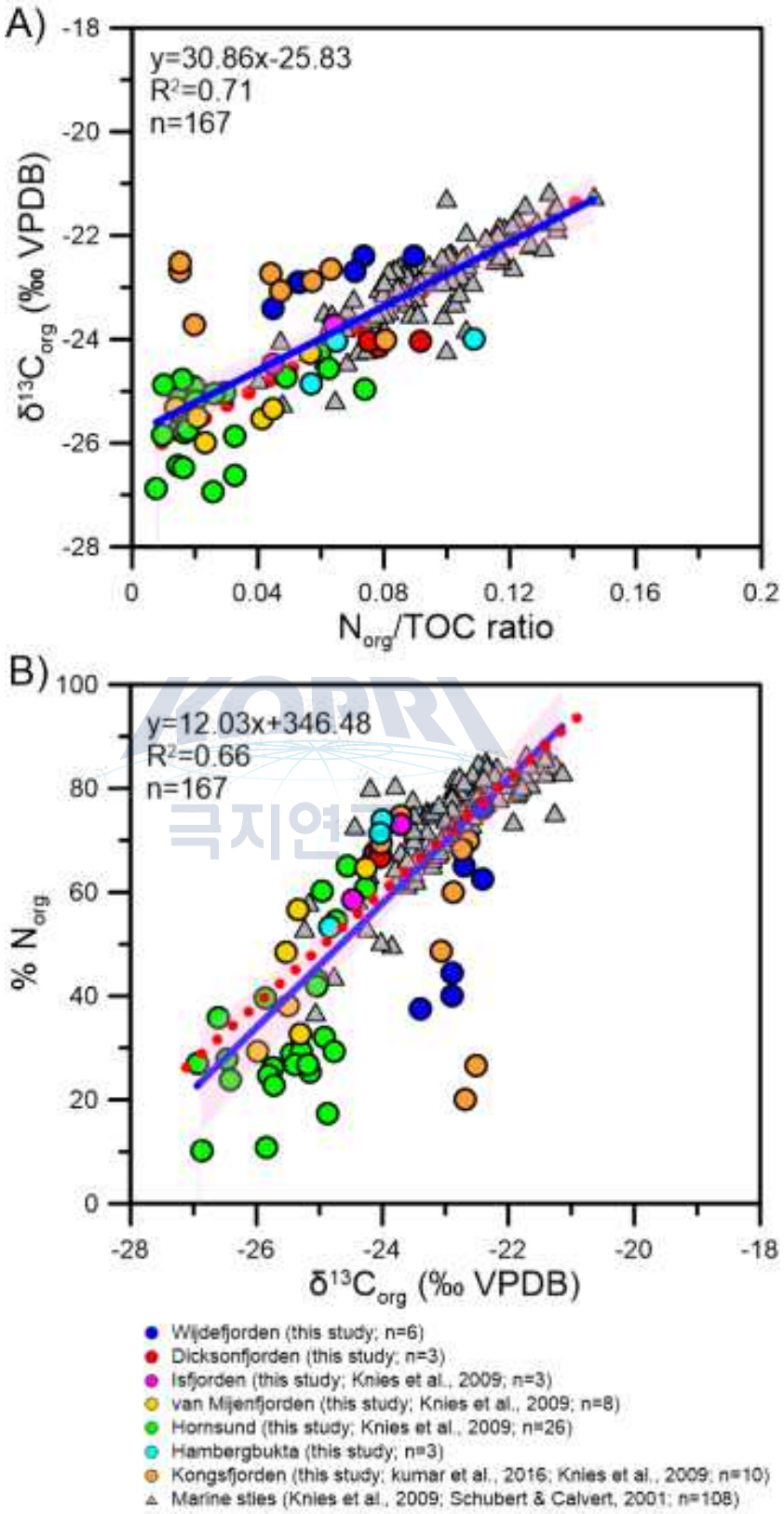


Fig. 55. Scatter plots of (A) $\delta^{13}C_{org}$ vs. N_{org}/TOC ratio and (B) $\delta^{13}C_{org}$ vs. $\%N_{org}$ ratio for 7 different fjords, Svalbard.

- 탄소안정동위원소비 분석 결과, 콩스피오르드에서 평균 -20.14±0.96‰로 가장 무거운 값을 나타냈으며 호른준드에서 -25.44±0.70‰ 로 가장 가벼운 동위원소 값을 보임(Fig. 54)

(나) 퇴적 유기물 기원

- 기존에 발표된 주로 스발바르 주변 해역의 표층 퇴적물을 활용한 유기물 데이터와 본 연구에서 획득한 각 피오르드의 유기물 분석 데이터를 종합하여 육상 end-member (-25.8‰)와 해양 end-member (-20.5‰) 를 각각 구하여 비교한 결과, 기존 육상 기원 유기물의 end-member 값(-26.1‰)보다 다소 무거워진 반면, 해양 기원 유기물의 end-member 값(-20.1‰)은 가벼워진 결과를 나타냄
- 기존 문헌을 참고하여 스발바르 주변 해역에서 육상기원 유기물의 영향과 해양기원 유기물의 영향을 알아보기 위해 탄소 안정동위원소비 및 유기질소/총 유기탄소 비와 총 질소 중 유기질소가 차지하는 비율을 사용하여 본 연구에서 분석한 피오르드 표층 퇴적물의 결과와 함께 비교함(Fig. 55)
- 그러나 각 피오르드마다 상당히 다른 범위의 탄소 안정동위원소비 및 유기질소/총유기탄소 비의 값을 보이는 만큼 기존 스발바르 주변 해역의 표층 퇴적물을 대상으로 한 연구와는 달리 각 피오르드에 따른 개별 end-member 가 필요하며 이를 위한 추가적인 연구가 필요함

KOPRI 극지연구소

마) 스발바르 피오르드 코어퇴적물 내 유기분자생체지표 분석 및 해빙 프록시 데이터 확보

(1) 연구 목적

- 과거 해빙변화 기록 복원을 위해 HBIs (Highly Branched Isoprenoids) 중 이중결합이 하나인 IP_{25}를 사용하였으며 이는 해빙 밑부분에 서식하는 규조류 중 특정 종들이 생산해 내는 유기물질로 알려져 있음(Belt et al. 2007; Mueller et al., 2011)
- IP_{25}는 주로 해빙주변(marginal sea ice zone)에서 봄철 해빙이 있는 지역에서 생산됨. 하지만 이 프록시는 결빙되지 않은 지역(ice-free area)과 연중 결빙(permanent sea ice)된 지역을 구분할 수 없다는 문제점이 제기되어 왔으며 이를 보완하기 위해 결빙되지 않은 지역에서 생산된 식물플랑크톤 유기분자생체지표를 함께 사용한 PIP_{25} 라는 인덱스를 사용하고자 함
- 본 연구에서는 식물플랑크톤 지시자로, Triene Z와 Sterols 중 Brassicasterol, 및 Dinosterol을 분석하였으며 이 결과를 바탕으로 계산한 PIP_{25}를 사용하여 과거 해빙 기록을 복원함

(2) 연구 방법

- 모든 피오르드 코어 퇴적물 시료의 유기분자생체지표(HBIs, Sterols)는 Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS; 가스크로마토그래피 질량분석기)를 이용하여 분석하였음(Fig. 56)
- 코어 퇴적물 시료의 유기분자생체지표 결과는 Bacon을 활용한 연대모델을 바탕으로 나타냈으며 최근 업데이트된 Marine20 (Pieńkowski et al., 2021)을 통해 보정된 신규 △R로 설정한 새로운 연대 모델을 기반으로 함

3) 연구 결과 및 토의

(가) 스발바르 피오르드 코어 퇴적물의 HBIs

- 비데피오르드 퇴적물 코어 시료의 HBIs 농도 분석 결과, IP_{25}는 0.06 ~ 2.08 ㎍/g TOC, Diene은 0.48 ~ 9.54 ㎍/g TOC, Triene Z는 0.05 ~ 16.59 ㎍/g TOC, 그리고 Triene E는 0.04 ~ 19.73 ㎍/g TOC로 나타남(Fig. 57A). 우드피오르드 퇴적물 코어 시료의 HBIs 농도 분석 결과, IP_{25}는 0.11 ~ 2.87 ㎍/g TOC, Diene은 0.30 ~ 15.00 ㎍/g TOC, Triene Z는 0.04 ~ 6.91 ㎍/g TOC, 그리고 Triene E는 0.02 ~ 9.92 ㎍/g TOC로 나타남(Fig. 57B). 이스피오르드 퇴적물 코어 시료의 HBIs 농도 분석 결과, IP_{25}는 0.14 ~ 0.74 ㎍/g TOC, Diene은 0.66 ~ 4.53 ㎍/g TOC, Triene Z는 0.19 ~ 1.48 ㎍/g TOC, 그리고 Triene E는 0.12 ~ 1.17 ㎍/g TOC로 나타남(Fig. 57C)

KOPRI 극지연구소

Fig. 56. GC-MS analytical instrument used in this study.

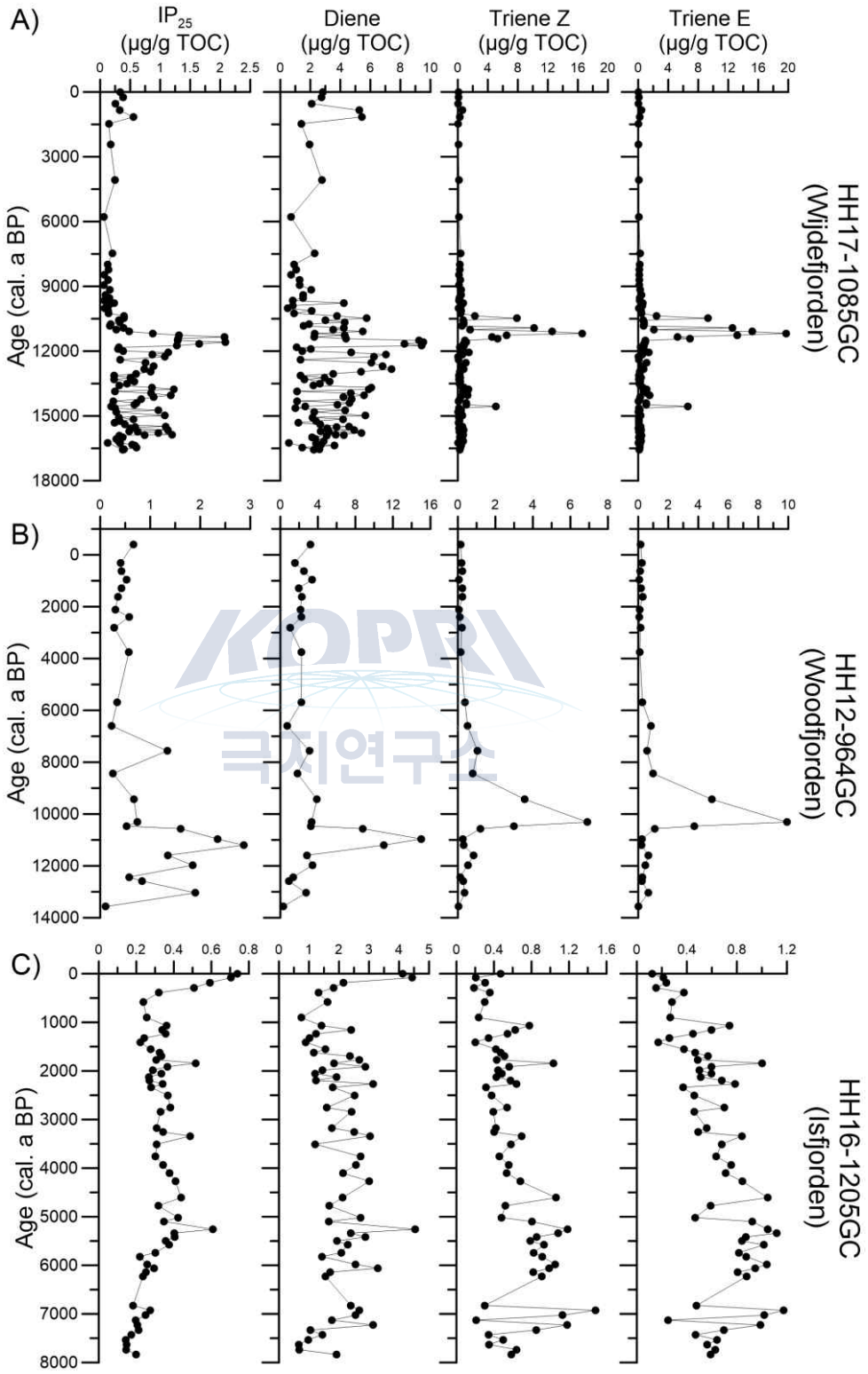


Fig. 57. HBI (IP_{25}, diene, triene Z, and triene E) concentrations in sediment cores collected from (A) Wijdefjorden, (B) Woodfjorden, and (C) Isfjorden.

(나) 스발바르 피오르드 코어 퇴적물의 Sterols

- 비데피오르드 코어 퇴적물 시료의 Sterols 농도 분석 결과, Brassicasterol는 4.85 ~ 113.57 ㎍/g TOC, Dinosterol은 0.57 ~ 16.98 ㎍/g TOC, 로 나타남(Fig. 58A). 우드피오르드 코어 퇴적물 시료의 Sterols 농도 분석 결과, Brassicasterol는 5.21 ~ 140.57 ㎍/g TOC, Dinosterol은 0.69 ~ 8.79 ㎍/g TOC 로 나타남(Fig. 58B). 이스피오르드 코어 퇴적물 시료의 Sterols 농도 분석 결과, Brassicasterol는 11.82 ~ 131.99 ㎍/g TOC, Dinosterol은 0.06 ~ 0.39 ㎍/g TOC로 나타남(Fig. 58C)
- 비데피오르드 코어 퇴적물의 식물플랑크톤 지시자인 Triene Z, Brassicasterol, 및 Dinosterol을 사용했을 때의 보정계수 c 값은 각각 0.47, 0.01, 및 0.13 으로 나타났으며 우드피오르드 코어 퇴적물의 c 값은 각각 1.01, 0.02, 및 0.37으로 나타났으며, 이스피오르드 코어 퇴적물의 c 값은 각각 0.54, 0.01, 및 1.79 로 나타남

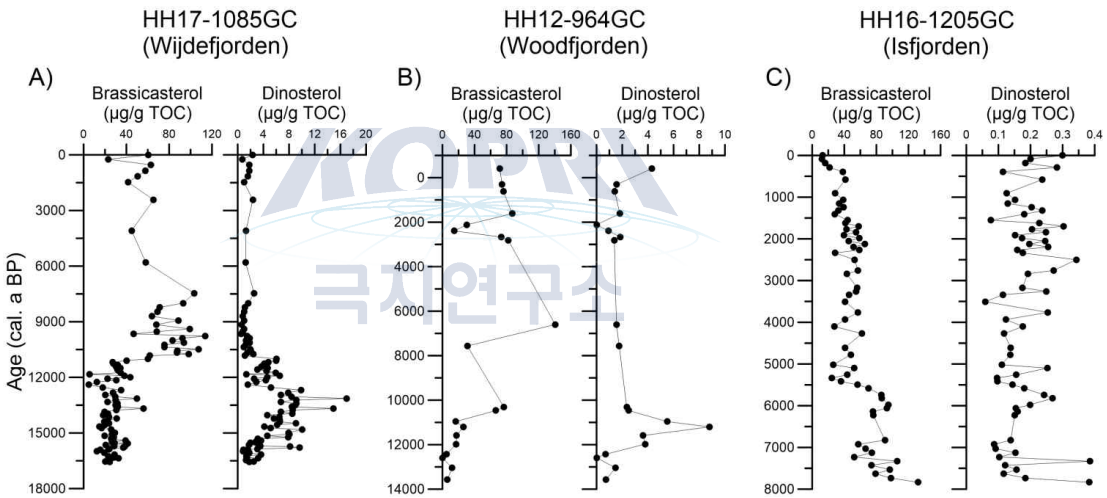


Fig. 58. Sterol (brassicasterol and dinosterol) concentrations in sediment cores collected from (A) Wijdefjorden, (B) Woodfjorden, and (C) Isfjorden.

(다) 스발바르 피오르드 코어 퇴적물의 PIP_{25}

- 스발바르 피오르드 세 코어 퇴적물 시료의 HBIs, Sterols 분석 결과를 바탕으로 PIP_{25} 인덱스를 계산함. 각 코어의 평균 IP_{25} 농도값과 triene Z, brassicasterol, 그리고 dinosterol의 평균 농도 값을 이용하여 보정계수 c 값을 구하고 아래 식을 이용하여 서로 다른 식물플랑크톤 지시자를 사용하여 서로 다른 해빙프록시 $P_{III}IP_{25}$, P_BIP_{25}, 그리고 P_DIP_{25}를 각각 계산하여 세 피오르드의 해빙 기록을 복원함(Fig. 59)

$$PIP_{25} = \frac{IP_{25}}{IP_{25} + (\text{phytoplankton biomarker} \times c)}$$

$$c = \frac{\text{mean } IP_{25} \text{ concentration}}{\text{mean phytoplankton biomarker concentration}}$$

- 서로 다른 세 곳의 피오르드 코어 퇴적물 시료의 IP_{25}, 식물플랑크톤 지시자(triene Z, brassicasterol, 및 dinosterol)의 농도 및 각각의 보정계수 c 값을 이용하여 서로 다른 해빙 프록시인 $P_{III}IP_{25}$, P_BIP_{25}, 그리고 P_DIP_{25}를 나타냄(Fig. 59)
- 세 곳의 피오르드(비데, 우드, 및 이스 피오르드) 퇴적물 코어의 유기분자생체지표 분석을 수행하여 북극해 특정 규조류가 생성하는 IP_{25}와 식물플랑크톤 지시자를 활용한 PIP_{25}농도로 과거 해빙분포 변화 기록을 복원함
- 세 피오르드의 $P_{III}IP_{25}$, $P_BIP_{25,}$ 및 P_DIP_{25} 결과는 피오르드마다 전체적인 경향성은 유사하게 나타났지만 특정 시기에 해빙 변화 양상이 서로 다르게 나오는 구간도 확인됨
- 스발바르 북부 비데피오르드 퇴적물 코어의 PIP_{25} 결과, Younger Dryas 시기(12,000 ~ 13,000 cal. BP)에 급격하게 해빙이 증가하는 경향이 세 가지 인덱스 결과에서 모두 비슷하게 나타났으며 11,700 cal. a BP (Younger Dryas–Holocene transition) 시기에 급격한 해빙이 감소하는 경향은 $P_{III}IP_{25}$, P_BIP_{25} 두 인덱스 결과에서 비슷한 양상을 보임. 이후 세 가지 인덱스 모두 현재까지 전반적으로 해빙이 증가하는 경향성을 보임
- 스발바르 북부에 위치한 우드피오르드 또한 비데피오르드에서 나타난 Younger Dryas 한랭기 이후 홀로세 전기에 기록된 과거 해빙이 급격하게 감소한 기록을 확인 할 수 있었음. 하지만 $P_BIP_{25,}$ 및 P_DIP_{25} 결과에서는 뚜렷하게 나타나지는 않지만 $P_{III}IP_{25}$ 결과로 보아 약 7,000 ~ 3,000 cal. BP (Middle to early Holocene) 시기는 계절빙(seasonal sea ice)이 점진적으로 증가하는 경향을 나타냄. 이는 기존 보고된 문헌 결과의 유빙(ice rafting) 발달과 일치함(Joo et al., 2019)
- 스발바르 북부 비데와 우드피오르드와는 다르게 이스피오르드는 중 · 후기 홀로세(~8,000 cal. BP)의 고해상도 기록을 보임. 전체적인 경향은 비데 및 우드피오르드와 마찬가지로 중기 홀로세 이후 지속적으로 계절빙이 증가하는 것으로 보임. 다만, $P_BIP_{25,}$ 및 P_DIP_{25} 결과에서는 약 6,000 cal. BP 전 · 후로 급격한 계절빙의 증가를 보임
- 스발바르 세 피오르드의 PIP_{25} 인덱스 결과를 분석 및 비교한 결과, 각 피오르드 마다 적용되는 식물플랑크톤 지시자의 종류에 따라 서로 상이한 결과를 보였지만, 전반적으로 P_BIP_{25} 결과가 기존 문헌(Joo et al., 2019)에서 보고된 스발바르 환경 변화를 잘 반영하는 것으로 사료됨.
- 보다 정확한 자료 해석은 차년도 연구수행 기간 동안 필요시 추가 분석이 필요함

KOPRI 극지연구소

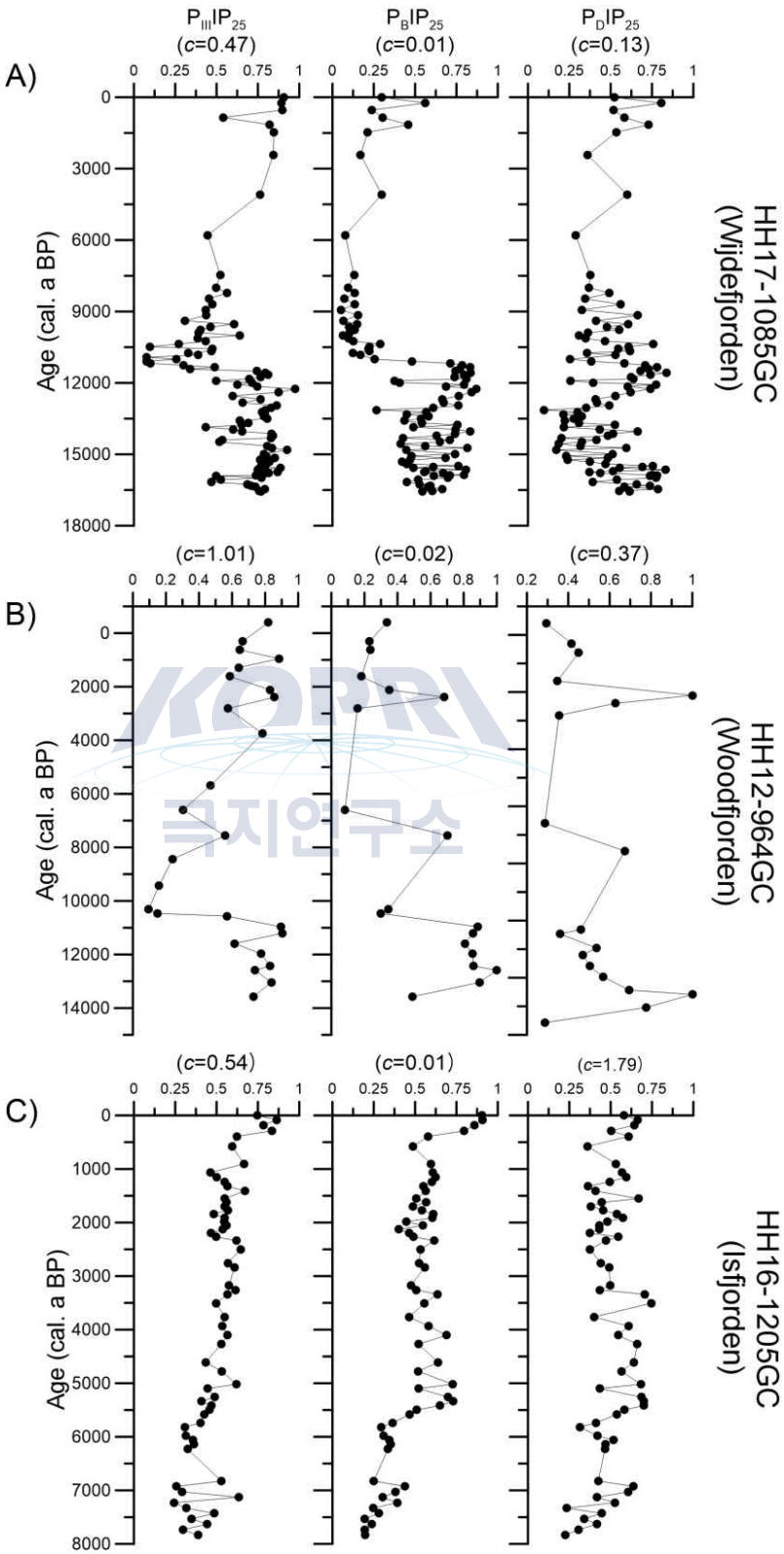


Fig. 59. $P_{III}IP_{25}$, P_BIP_{25}, and P_DIP_{25} in sediment cores collected from (A) Wijdefjorden, (B) Woodfjorden, and (C) Isfjorden.

2-2) 2차년도

가) 퇴적물 코어 및 천부퇴적지층 층서대비 기반 스발바르 피오르드 환경변화 복원

(1) 연구 목적

- 이전 연구를 통해, 스발바르 남동부 리틀 스토르피오르드와 그 지류인 햄버그북타 피오르드의 퇴적물 코어를 대상으로 연대 모델 구축과 퇴적상, 지화학원소(XRF) 및 유기질소 분석 등 다중프록시 분석을 통해 전반적인 퇴적환경을 해석함
- 본 연구는 리틀 스토르피오르드와 햄버그북타 지역(Fig. 60)에서 대한 해저 지형, 고해상도 천부지층 탄성파 층서 및 기 분석된 퇴적물 코어에 대한 다중프록시(proxy) 결과를 비교하여 지난 약 13천년에 걸친 빙하역사를 복원하고 햄버그북타 소빙기의 빙하작용을 검증함

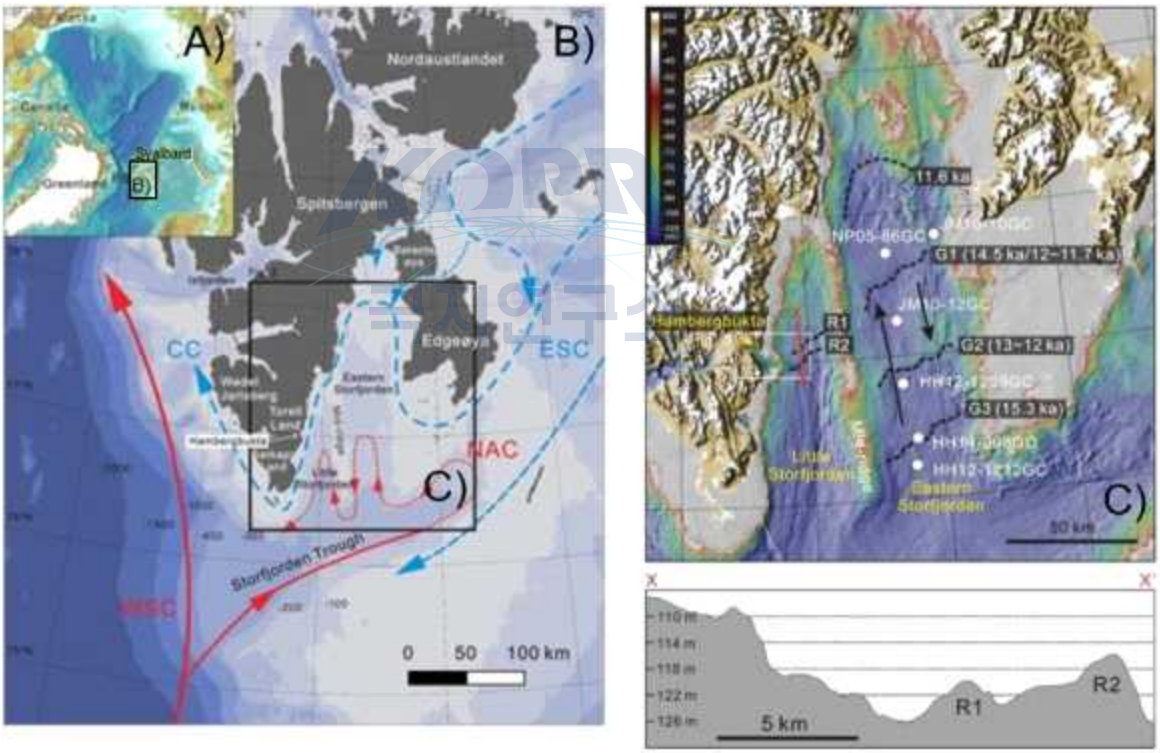


Fig. 60. Physiographic map of (A) the Arctic, (B) Svalbard, and (C) a zoom-in of southern Svalbard, including Storfjorden and Hambergbukta.

(2) 연구 방법

- 스발바르 피오르드에서, 과거 해양기저빙하/조수빙하의 거동은 특징적인 빙하기원 지형(glaciogenic submarine landforms)을 형성함(Batchelor and Dowdeswell, 2015). 따라서, 피오르드 해저에서 다중빔 음향측심법(multibeam echosounding,

MBES)과 고해상도 천부지층 탄성파탐사(high-resolution CHIRP subbottom profiling, SBP)는 과거 빙하 거동 및 역학(dynamics)을 이해하는데 필수적인 정보를 제공함

- MBES 탐사는 RV Helmer Hanssen에 탑재된 EM 302 multi-beam echo sounder를 이용하여 수행. MBES 자료는 Caris HIPS and SIPS 11.0 프로그램을 처리한 뒤에, Generic Mapping Tools (GMT) 프로그램을 이용하여 5 m-grid의 해상도로 가시화함
- SBP 탐사는 RV Helmer Hanssen에 탑재된 EdgeTech 3300-HM sub-bottom profiler를 이용. 탐사 시, 2-12 kHz의 주파수대역을 적용하였으며, SBP 자료상의 수심은 수주(water column)의 속도를 1500 m/s로 간주하여 계산함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 빙하기원 해저지형 분석

- 햄버그북타의 빙하기원 지형에 대한 분석 및 해석은 Noormets et al. (2021) 연구에서 선행됨. 본 연구에서는 주로 햄버그북타의 피오르드 입구(fjord mouth) 주변에 발달된 지형과 햄버그북타의 외해 지역(리틀 스토르피오르드)에 초점을 두었음
- 탐사지역은 조수빙하의 서지(surge)/후퇴로 형성된 종퇴석(terminal moraines)을 기준으로 크게 세 구간으로 분류됨. 1) 햄버그북타 내부분지: 1961-1970년 빙하서지에 의해 형성된 종퇴석(T1)을 기준으로 내륙지역(Figs. 61B, C). 2) 햄버그북타 외부분지: 피오르드 입구에 발달된 종퇴석 복합체(terminal moraine complex, TMC)에서 T1까지의 분지지역(Fig. 61D). 3) 리틀 스토르피오르드: TMC의 외해지역(Fig. 61E)
- 특히, 본 연구는 리틀 스토르피오르드의 해저면에서 햄버그북타 입구에 발달된 TMC보다 오래된 북동-남서 방향으로 신장된 해령(R1, R2)을 발견함(Figs. 61A, E)

(나) 고해상도 천부지층 탄성파층서 분석

- 햄버그북타에서 리틀 스토르피오르드의 지층내부는 다양한 음향학적 특징으로 구성됨. 이러한 특징을 바탕으로 Noormets et al. (2021)은 빙퇴적층(subglacial till)을 지시하는 F-1부터 빙해양 퇴적층을 지시하는 F-4까지 총 4개의 탄성파상을 정의함. 본 연구에서는 이전 연구에서 발견된 빙퇴적층보다 과거의 빙퇴적층뿐만 아니라 반복적인 탄성파상의 분포를 확인함으로써, 기존의 탄성파상의 정의를 적용하되 시순을 고려하여 총 세 군(A, B, C)으로 천부지층 탄성파층서를 정의함(Fig. 62)
- 본 연구에서는 기존 연구에서 “F-1” 으로 정의되었던 TMC를 B군의 F-1 탄성파상(F-1B)으로 재정립하였으며, 리틀 스토르피오르드에서 TMC(F-1B)보다 오래된 빙퇴적층(F-1C)부터 빙 · 해양 퇴적층(F-4C)을 새롭게 정의함

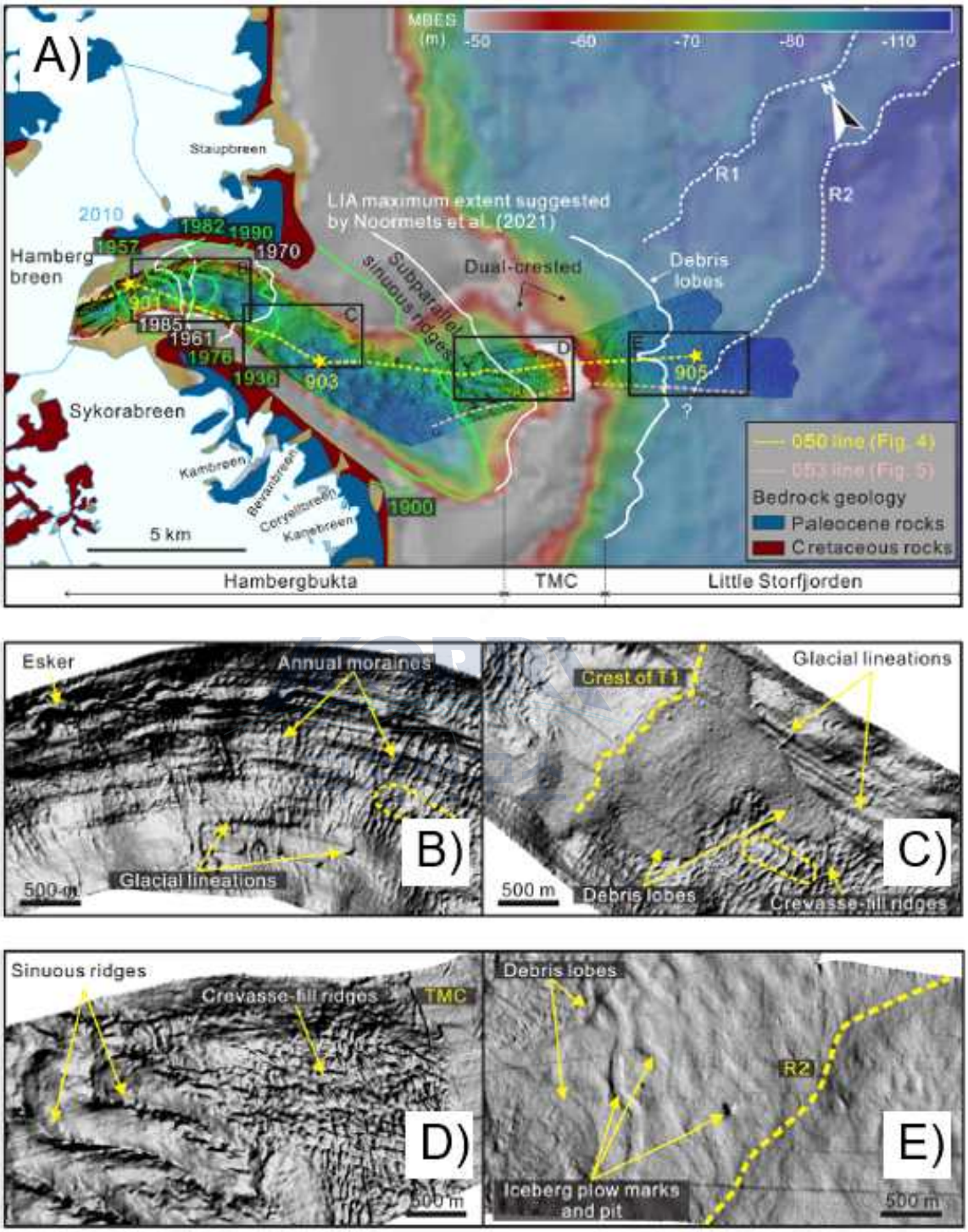


Fig. 61. (A) Swath-bathymetry of Hambergbukta and its downslope area (Little Storfjorden), (B) inner Basin, (C) terminal moraine (T1), (D) outer basin showing the terminal moraine complex (TMC), and (E) Little Storfjorden.

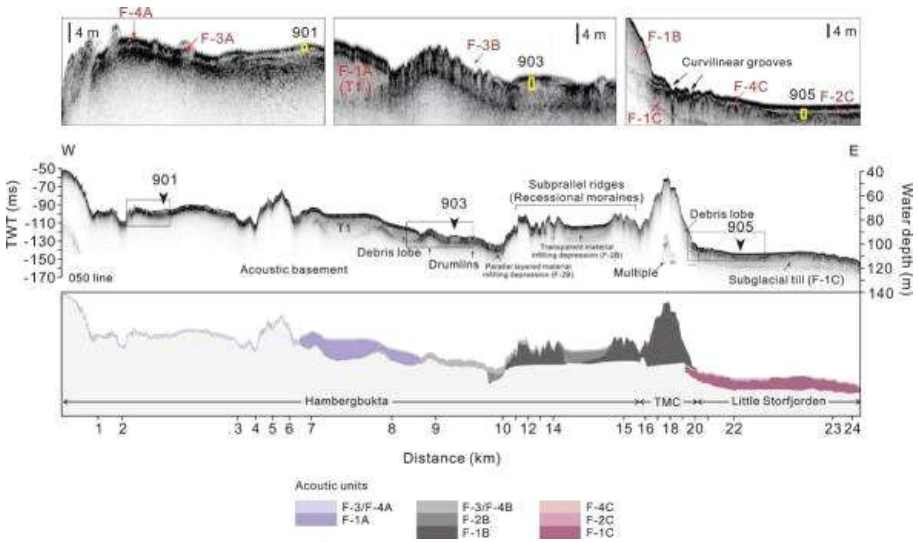


Fig. 62. Acoustic units (F-1 to F-4) categorized into groups A, B, and C in chronological order.

(다) 영거드리아스 이후 리틀 스토르피오르드의 빙하역사 복원

- 빙하기원 지형, 고해상도 천부지층 탄성파층서, 암상 및 유기 지화학 조성의 변화에 근거하여 리틀 스토르피오르드에서 지난 13천년에 걸친 빙하역사를 복원함(Fig. 63)
- 영거드리아스(13-12 ka)동안 리틀 스토르피오르드의 해양기저빙하는 북위 77도 부근까지 남향하여 확장되어 있었으며, 이러한 해양기저빙하가 북동-남서 방향으로 신장된 R2를 발달시킴(Fig. 63A)
- 영거드리아스 이후, 리틀 스토르피오르드는 두 단계의 빙하후퇴 양상을 보임. 1) 영거드리아스-홀로세 전이(12-11.6 ka) 동안 매우 느리게 빙하가 후퇴하는 반면(Fig. 63B), 2)초기 홀로세(11.6-10.1 ka) 동안의 매우 빠르게 빙하가 후퇴함(Fig. 63C)
- 초-중기 홀로세 동안(10.1-3.7 ka), 리틀 스토르피오르드는 빙하가 없는 해양환경하에서 강한 해저류(bottom current)의 영향을 받음(Fig. 63C)
- 후기 홀로세 동안, 리틀 스토르피오르드는 주로 계절빙의 영향을 받았으며, 간헐적으로 지류 피오르드의 조수빙하가 영향을 미침(Fig. 63D)

(라) 햄버그북타 소빙하기(Little Ice Age)에 대한 재해석

- 햄버그북타 피오르드 입구에서 가장 두드러진 빙하기원 지형인 종퇴석 복합체(TMC)의 발달은 Noormets et al. (2021)에 의해 최근 Lateglacial 혹은 홀로세에 발생되었을 것으로 추정된 조수빙하의 서지에 의해 형성된 것으로 해석된 바 있음. 그러나 이러한 해석을 뒷받침하는 어떠한 지질학적 기록은 보고되지 않음
- 여러 스발바르 피오르드에서 빙운쇄설물의 퇴적양상은 조수빙하의 거동을 해석하는데 빈번하게 활용됨(Rasmussen et al., 2014; Flink et al., 2017; Bartels et al.,

2018). 따라서, 본 연구에서 제시/분석된 리틀 스토르피오르드의 암상 변화, 특히 빙운쇄설물의 퇴적양상은 TMC 형성에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있음

- 주요 빙운쇄설층의 발달은 초기 홀로세(11.6–10.1 ka), Medieval Warm Period (MWP; 0.9–0.7 ka) 및 과거 700년 전 이후로 관찰됨. 초기 홀로세의 빙운쇄설층은 R2를 발달시킨 영거드리아스 빙하거동과 관련됨으로 TMC 형성과는 무관함. MWP시기에 퇴적된 빙운쇄설층은 조수빙하의 서지보다는 기존에 존재하던 조수빙하의 급격한 후퇴로 해석됨으로 TMC 형성과 무관함. 최종적으로 지난 700년 전 이후로 퇴적된 빙운쇄설층이 TMC의 형성과 관련되며 시기적으로 소빙하기와 일치함
- 이러한 퇴적기록와 해석에 근거하여, 본 연구에서 TMC의 분포가 소빙하기의 최대 빙하 범위를 지시하는 것으로 재해석됨(Fig. 63D)

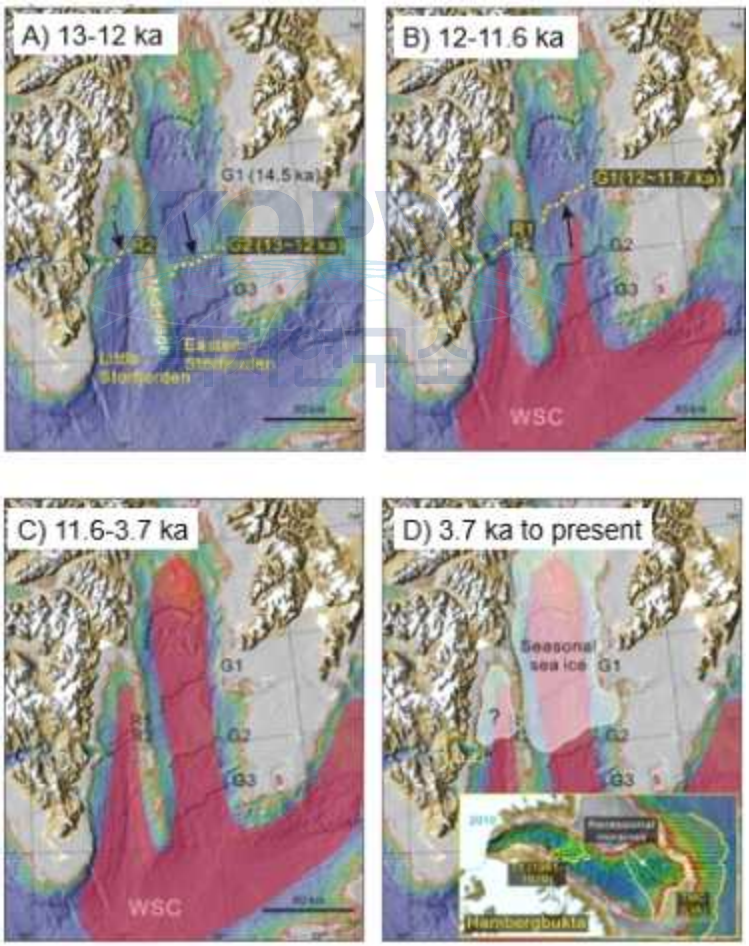


Fig. 63. Reconstruction of glacial history in Little Storfjorden and Hambergbukta since Younger Dryas: (A) 13–12 ka, (B) 12–11.6 ka, (C) 11.6–3.7 ka), and (D) after 3.7 ka. The lower panel in Fig. 63D shows re–interpretation for glaciogenic submarine landforms near the Hambergbukta fjord mouth.

나) 입도 end-member 모델링 기반 콩스피오르드 퇴적환경 변화 해석

(1) 연구 목적

- 노르웨이 지질조사소(NGU)와 협업의 일환으로 콩스피오르드(Fig. 64)에서 획득된 퇴적물 코어(KH17-GPC01; 79° 1′ 35.400″ ° N, 10° 45′ 20.880° E, 325 m 수심)를 이용하여 콩스피오르드 퇴적 환경 변화를 연구함
- 콩스피오르드는 스발바르 서북부에 위치하여 스발바르 서쪽 해안을 따라 북쪽으로 흐르는 따뜻한 북대서양 해류의 영향을 받아 기후 변화에 민감하게 반응함
- 본 연구에서는 기존 연구에서 구분된 암상 단위(lithological unit; Fig. 65)와 이번 연구에서 수행한 입도 분포의 엔드 멤버를 활용하여 기후 변화에 따른 콩스피오르드 지난 13,000년 간의 퇴적 환경 변화를 예비 복원함

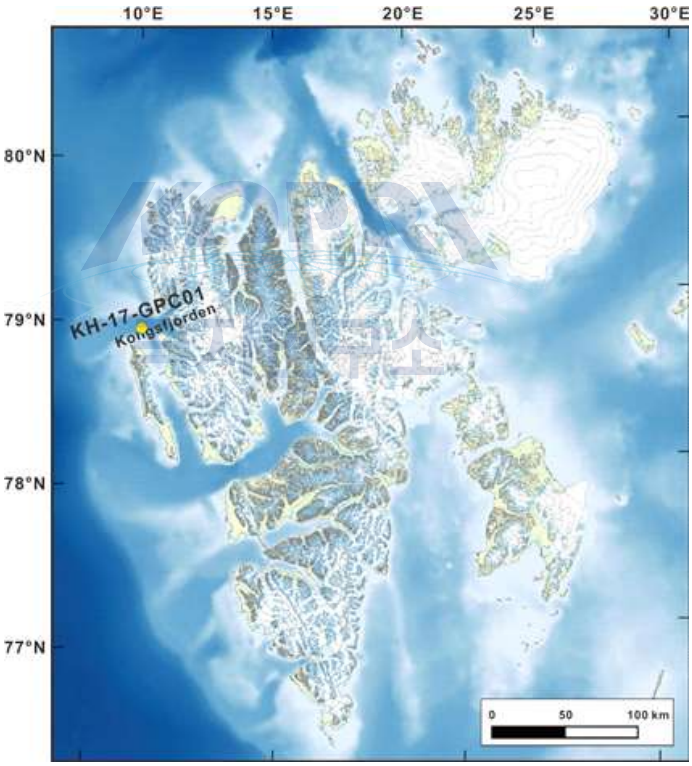


Fig. 64. Map of Svalbard with the core site of KH17-GPC01.

(2) 연구 방법

(가) 입도 분석

- 퇴적물 코어 KH17-GPC01에서 5 cm 간격으로 채취하여 동결건조한 부시료들을 일정량(120-130 mg) 소분하여 유기물 제거를 위해 35% 과산화수소로 전처리함
- 극지연구소에서 레이저 회절 방식의 Mastersizer 3000을 이용 입도 분석을 진행함

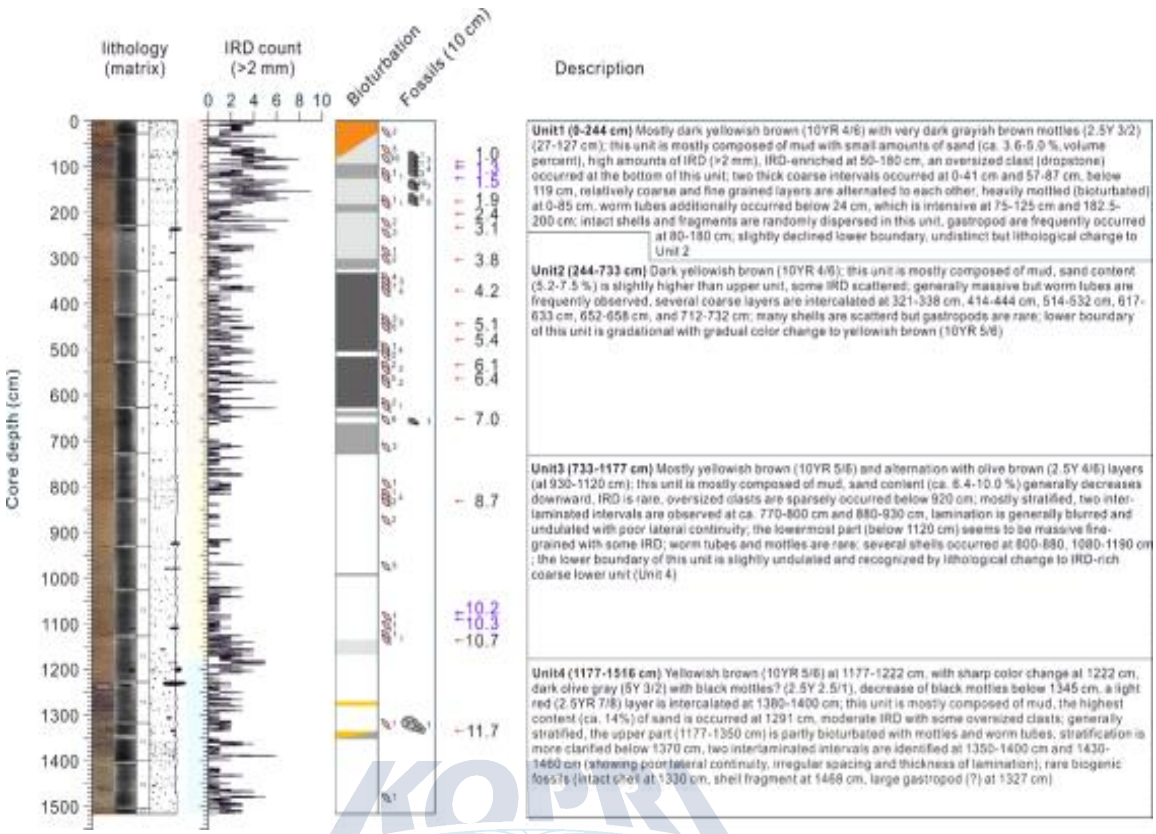


Fig. 65. Lithological characteristics (line scanning image, X-radiograph, content of coarse grains, distribution of fossils) of sediment core KH17-GPC01.

KOPRI 극지연구소

(나) 입도 end-member 모델링

- 입도 결과를 바탕으로 매틀랩 기반의 Analysize (Paterson and Heslop, 2015)를 이용하여 입도 분포의 엔드 멤버를 추출함
- 적절한 엔드 멤버 수를 결정하기 위해 결정 계수와 엔드 멤버 수 그래프에서 결정 계수가 0.6보다 높은(Holz et al., 2007) 3개의 엔드 멤버 수를 후보로 설정함
- 3개의 후보 중에서 특정 입도 모드나 입도 범위를 배제하지 않는 최소한의 엔드 멤버 수로 입도 분포의 엔드 멤버를 추출(Van Hateren et al., 2018)

(다) 방사성 탄소(^{14}C) 연대 측정

- 조개 껍질을 이용하여 영국 벨파스트 퀸스대학교와 미국 조지아 대학교에서 탄소 연대를 측정함
- Regional reservoir age $\triangle R = -61 \pm 37$ yr (Pieńkowski et al., 2022)을 적용하여 Calib Rev 8.1.0 프로그램(Heaton et al., 2020)의 Marine 20 data set을 이용하여 보정함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 입도 end-member 설정

- KH17-GPC01 코어에서 입도 분포의 엔드 멤버는 4개가 추출되었고 3개의 엔드멤버로 그룹화 됨(Fig. 66)
- EM1: 아주 세립한 입자(0.01- 1 μm)를 함유하고 있으며 주요 모드가 상대적으로 세립한 4- 11 μm에서 나타남
- EM1은 빙하가 인접한 환경에서 융빙수에 의해 재부유된 입자가 퇴적되어 나타나는 비데피오르드의 엔드 멤버(EM1)와 유사함
- EM2: 조립한 입자(100- 1000 μm)가 상대적으로 많이 분포하고 다중 모드가 나타나지만 주요 모드가 뚜렷함
- EM2는 빙하 활동이 활발한 시기에 빙하에서 떨어져 나온 빙산에 영향을 받은 비데피오르드의 엔드 멤버(EM4)와 비슷한 입도 특징을 가짐
- EM3: 10- 100 μm의 입자가 주로 분포하며 주요 모드가 상대적으로 조립한 입도(30 μm)에서 나타남
- EM3는 빙하가 멀리 후퇴한 환경에서 해빙의 영향으로 조립한 입도가 나타나는 비데피오르드의 엔드 멤버(EM3)와 동일한 입도 양상을 보임

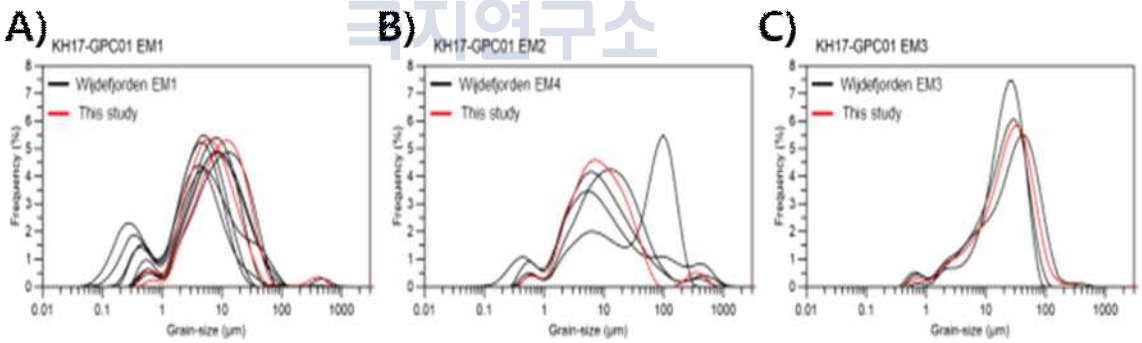


Fig. 66. Grain size end-members from KH17-GPC01 and comparison with grain size end-members from Wijdefjorden: (A) EM1, (B) EM2, and (C) EM3.

(나) 지난 13,000년 동안의 퇴적환경 복원

- 암상 단위와 기초 분석 자료를 바탕으로 입도 분포의 엔드 멤버를 활용함(Fig. 67)
- 홀로세(11,700년 전-현재) 이전부터 EM1의 비율이 우세한 것으로 보아 콩스피오르드는 홀로세가 시작되기 전부터 빙하가 후퇴하면서 융빙수의 영향을 받은 것으로 나타나며, 이 시기에 빙하가 후퇴하면서 빙산이 떨어져 나와 EM2가 간헐적으로 나타나는 것으로 보임

- 홀로세 시작과 함께 북대서양의 따뜻한 해류가 강하게 유입(Forwick and Vorren, 2009; Farnsworth et al., 2020)되어 빙하 후퇴가 활발해지면서 많은 빙산이 떨어져 나오게 되고 EM2가 우세함
- 콩스피오르드는 약 10,000 년 전에 EM3가 지배적인 것으로 보아 스발바르의 다른 지역과 마찬가지로 빙하가 상당 부분 후퇴하였고 기온이 점차적으로 하강함에 따라 피오르드 안쪽에서부터 겨울철 해빙이 발달한 것으로 사료됨
- 콩스피오르드는 약 7,000 년 전부터 다시 융빙수의 영향을 받은 것으로 여겨짐

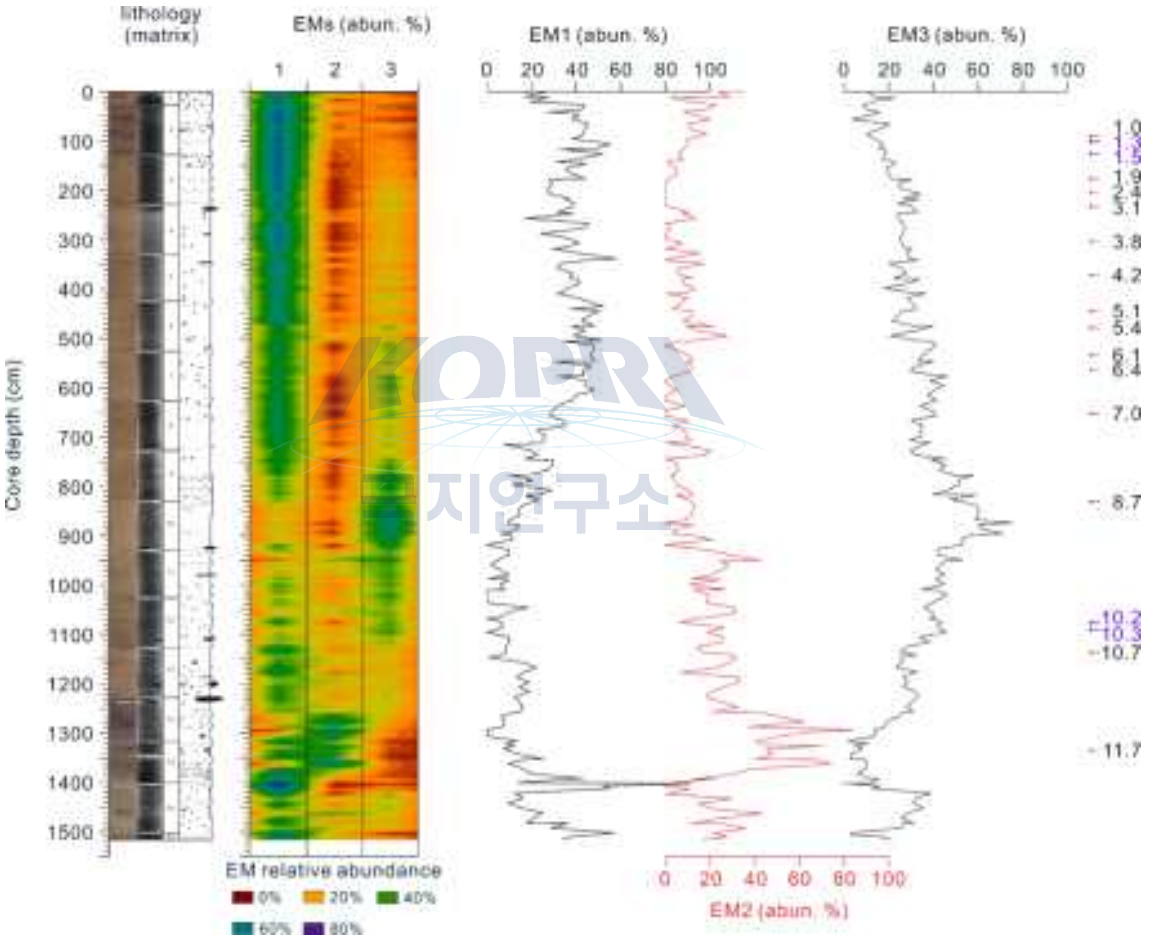


Fig. 67. Contour images of relative abundances of grain size end-members and variations of each end member in sediment core KH17-GPC01.

다) XRD 광물 자료 활용 북부 스발바르 빙하 후퇴 양상 복원

(1) 연구 목적

- 스발바르 표층퇴적물에서 분석된 철산화광물 함량 분포는, 일차적으로 기원암에 의해 결정되지만, 동일한 기원암을 공유하는 경우 퇴적물 유입원, 즉 빙하로부터의 거리에 의해 영향을 받는 것이 관찰됨. 철산화광물은 빙하 인근 지역일수록 그 함량이 높게 관찰되지만, 빙하로부터 멀어질수록 함량이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있음(보고서 내 'XRD 광물 자료 활용 빙하 후퇴 양상 복원 가능성 검토' 항목 참조). 이는 담수와 해수가 섞이며 염분이 급격히 변화하는 빙하 인근 지역에서 입자 친화적인 철이 빠르게 침전되며 나타난 결과로 해석됨(Bhatia et al., 2013; Boyle et al., 1977; Hopwood et al., 2016)
- 즉, 철산화광물은 고환경학적인 관점에서 퇴적물 기원지 변화가 통제될 때, 퇴적지역으로부터 빙하의 상대적인 위치를 가늠하는 지시자로서의 잠재성을 가짐. 과거 스발바르 대륙붕까지 확장한 거대빙상인 스발바르-바렌츠해 빙상(Svalbard-Barents Sea Ice Sheet)의 경우 해양 영역에서 전진과 후퇴를 반복하며, 퇴적 지역과 빙하 간의 거리 변동이 발생하였기 때문에, 빙하 거동 지시자로서 철산화광물의 활용성을 검증하기에 적합함
- 본 연구에서는 스발바르 북부 대륙붕 지역에서부터 비데피오르드까지 이르는 종단면에서 확보한 총 4개의 코어퇴적물에 대하여 철산화광물 함량 분석을 수행하였음. 해당 결과를 통해 거대빙상 거동 추적자로서의 철산화광물의 역할을 검증하고, 해빙기 북부 스발바르에서 발생한 스발바르-바렌츠해 빙상의 후퇴 양상 변화를 평가하고자 함

(2) 연구 방법

- 2017년 수행된 한국-노르웨이 국제공동 스발바르 탐사 동안, 스발바르 북부 대륙붕으로부터 비데피오르드 내부까지 약 150 km에 이르는 종단면에서 획득한 4개 코어퇴적물을 대상으로 함
- 이는 코어 HH17-1085-GC (이후 1085; 80.27° N, 16.21° E, 322 m 수심; 대륙붕), HH17-1094-GC (이후 1094; 79.74° N, 15.42° E, 148 m 수심; 피오르드 입구), HH17-1100-GC (이후 1100; 79.30° N, 15.78° E, 112 m 수심; 피오르드 중앙), 그리고 HH17-1106-GC (이후 1106; 79.00° N, 16.21° E, 160 m 수심; 피오르드 내부)를 포함함(Fig. 68)
- 퇴적물 내 철산화광물 분석은 독일 브레멘 대학 Vogt 박사와의 협업을 통해 수행됨. X-ray 회절분석법을 통해 획득한 정보에, QUAX full pattern method을 통해 정량화하였음. 분석 표준편차는 10% 미만 수준임
- 1085코어의 연대모델은 기 출판된 Jang et al. (2021)의 결과를 활용한 반면,

1094, 1100, 1106 코어는 BETA Analytic Laboratory (Miami, USA)와 the Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research (Bremerhaven, Germany)에서 분석된 방사성탄소연대 분석 결과를 토대로 설정함. 그 과정에서 모든 탄소 연대는 marine reservoir offset △R = 105 ± 24 yr (Mangerud et al., 2006)과 함께 Calib Rev 7.0.4 프로그램(Stuiver and Reimer, 1993)의 Marine13 dataset를 활용하여 보정함. 보정된 연대는 Bayesian age–depth model (BACON, v.2.2)을 통해 최종 연대모델에 활용됨. 결과는 Fig. 69 참조

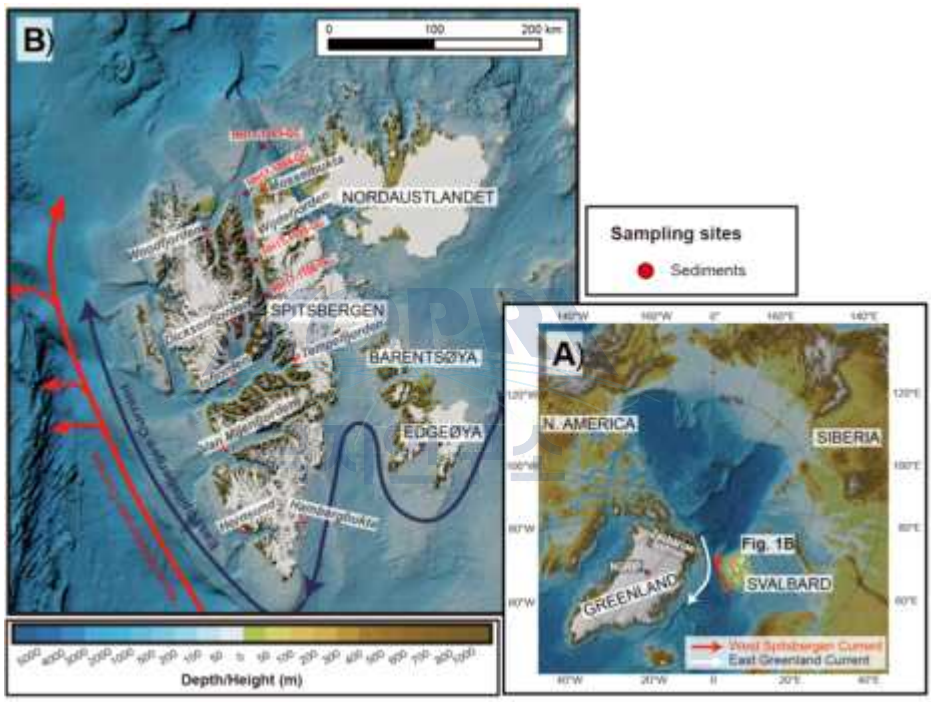


Fig. 68. Overview map of (A) the Arctic Ocean and (B) Svalbard, with sampling locations of sediment cores analyzed in this study marked with red filled circles in B. Seafloor morphology was constructed based on the IBCAO 4.0 bathymetric grid (Jakobsson et al., 2020).

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 철산화광물을 활용한 융빙수 유출 추적

- 스발바르 북부 대륙붕에서 획득한 1085 코어를 대상으로, 철산화광물을 활용한 과거 빙하 후퇴 양상 복원 가능성에 대해 평가함. 1085 코어는 마지막 빙하기 동안 스발바르 전 지역을 뒤덮었던 스발바르–바렌츠 거대빙상이 후퇴하며(Hughes et al., 2016) 쌓인 퇴적 기록을 보유하며, 연대 모델 기준 약 16,300년의 기록에 해당

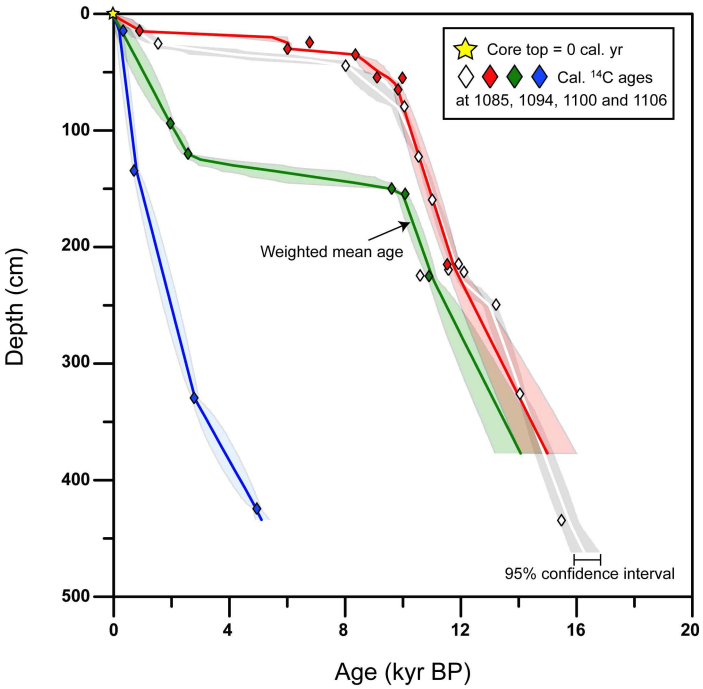


Fig. 69. Age models for cores HH17-1094-GC, HH17-1100-GC and HH17-1106-GC, compared with that of HH17-1085-GC. Calibrated ^{14}C ages were used to determine the age-depth relationship based on Bayesian statistics in BACON (v.2.2) (Blaauw and Christen, 2011).

KOPRI 극지연구소

- 1085코어의 철산화광물 함량은 시간에 따른 변동성을 보이는데, 16,300-12,300년 전에는 그 함량이 최대 12.4%에 이르며 높게 유지되다가, 이후 급격히 감소하며 1.4% 미만의 값을 보임(Fig. 70). 12,300년 전 이후 관찰되는 철산화광물 함량 감소는 엽리 구조(laminiation)의 소멸과 함께 나타남
- 빙하퇴적물에서 엽리 구조가 빙하 전면부로부터 유출되는 meltwater plume으로부터 방출된 부유성 퇴적물이 침전되며 나타는 것으로 볼 때(Ó Cofaigh and Dowdeswell, 2001), 12,300년 전 이후 관찰되는 철산화광물의 감소는 코어 1085가 위치한 북부 스발바르 대륙붕 지역이 ice-proximal에서 ice-distal 환경으로 변화된 결과로 해석될 수 있음(Jang et al., 2021)
- 12,300년 전 전후로 관찰되는 철산화광물 함량 변화는, 쇄설성 퇴적물에서 분석된 네오디뮴 동위원소 비의 변화가 해당 시기를 전후로 큰 차이를 보이지 않는다는 점을 볼 때, 퇴적물 기원지 변화로 해석되지 않음. 마찬가지로, 약 15,000년 전 초기 해빙기 동안 철산화광물 함량이 크게 변화하는 것과는 달리, 쇄설성 퇴적물 내 네오디뮴 동위원소 비가 상대적으로 일정하다는 점을 볼 때(Fig. 70), 1085 코어 퇴적물 내 철산화광물이 퇴적물 기원지 변화에 따른 결과가 아님을 짐작할 수 있음

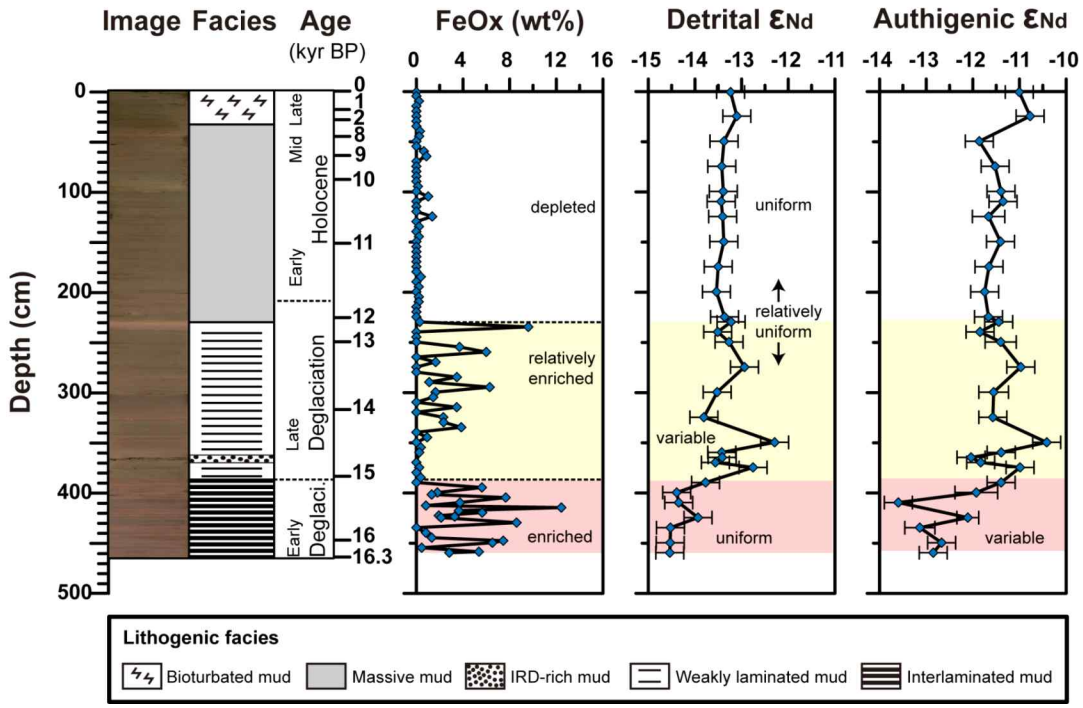


Fig. 70. Temporal variation in the contents of Fe-oxyhydroxides (FeOx) in core HH17-1085-GC on the continental shelf off northern Svalbard. The data are compared with lithological facies and detrital and authigenic neodymium isotopes (Jang et al., 2021). The enrichments in FeOx occur in interlaminated (reddish area) and weakly laminated (yellowish area) muds, while the depletion occurs in massive and bioturbated mud. The general absence and subsequent reoccurrence of FeOx between 15.1 and 14.3 ka possibly indicate that the glacier front retreated far from but came closer to the core site again, reflecting episodes of glacier re-advances as predicted by decoupling of neodymium isotopes between authigenic and detrital fractions (Jang et al., 2021).

- 따라서, 12,300년 전 이후로 관찰되는 철산화광물 함량 감소는 빙하 전면부의 후퇴로 인해, 철산화광물의 퇴적이 대륙붕 지역이 아닌 피오르드 내부에서 집중적으로 이루어지며 발생한 결과로 볼 수 있음. 실제, 북부 스발바르 퇴적물 내 퇴적학 및 지화학적 증거들은 해당 시기 스발바르-바렌츠 해 거대빙상이 대륙붕 지역에서부터 피오르드 내부로 후퇴하였음을 가리키며(Allaart et al., 2020; Jang et al., 2021), 본 연구 결과를 지지함

(나) 후빙기 이후 스발바르 북부 빙하 후퇴 양상 복원

- 스발바르 북부 대륙붕 지역, 비데피오르드 입구, 중앙 및 내부 등 총 4개 코어퇴적물에서 분석된 철산화광물을 활용하여 스발바르 북부 빙하 후퇴 양상을 복원하고자 함

- 모든 코어 퇴적물에서 시간에 따른 철산화광물 함량 변화가 관찰됨(Fig. 71). 각 코어별로 철산화광물 함량은 각각 15,500년 전(코어 1085), 13,200년 전(코어 1094), 11,700년 전(코어 1100)에 최댓값을 보이며 시간 초월적인 특성을 보였는데, 이는 후빙기 동안 스발바르-바렌츠 해 거대빙상이 대륙붕 지역에서부터 피오르드 내부로 후퇴하며 나타난 결과로 해석됨(Farnsworth et al., 2020; Hughes et al., 2016)
- 홀로세 초중기 동안 모든 코어에서 철산화광물의 함량이 거의 0에 가깝다가, 1100 및 1106 코어에서 홀로세 후기 시점에 그 함량이 다시 증가하는 것을 볼 수 있음. 홀로세 초중기 동안 전반적인 후퇴와 함께 상대적으로 제한되었던 빙하활동이 (Farnsworth et al., 2020), 홀로세 후기 다시 활발해지며 발생한 것으로 사료됨 (Farnsworth et al., 2020; Jang et al., 2020)
- 각 코어에서 시간 초월적으로 관찰되는 철산화광물 감소 시기를 다음의 식에 적용하여, 후빙기 북부 스발바르에 존재했던 거대빙상의 후퇴 속도를 계산함

$$Glacier\ retreat\ rate\ \left({}^{m}/_{yr}\right) = \frac{d_{eff} - \left(d_{eff} - d_{B-A}\right)}{T_B - T_A}$$

- 해당 식에서 deff와 dB-A는 각각 철 도달 거리(effective distance for iron delivery)와 시료 정점 A와 B사이의 거리를, TA와 TB는 시료 정점 A와 B에서 철산화광물이 사라지는 시점을 나타냄. 코어 1085와 같이 함께 비교할 대상 코어가 없는 경우, 계산식은 아래와 같이 변경될 수 있음

$$Glacier\ retreat\ rate\ \left({}^{m}/_{yr}\right) \leq \frac{d_{eff}}{T_f - T_i}$$

- 위 식의 Ti와 Tf는 각각 단일 코어 내에서 철산화광물이 나타나고 사라진 시점을 나타냄. 1085 코어 퇴적물의 하부 연대(16,300년 전)의 경우 해당 지역에서 거대빙상이 후퇴하였던 시기와 거의 일치하므로(Hughes et al., 2016), 16,300년 전에서 12,300년 전 사이의 빙하 후퇴 속도에 대한 측정값은 순전히 deff에 의해 결정될 수 있음. 본 연구에서는 deff값을 약 70 km로 설정하였는데, 이는 해당 값을 적용했을 때 복원되는 거대빙상의 시간별 위치가 기존의 DATED-1 (Hughes et al., 2016) 그리고 SVALHOLA (Farnsworth et al., 2020) 복원 값과 꽤나 일치하기 때문임(Fig. 71)
- 계산 결과에 따르면, 16,300년 전부터 10,400년까지의 기간 동안 스발바르 북부 대륙붕 지역에서부터 비데피오르드 내부까지 평균 31 m/yr 정도의 속도로 빙하 후퇴가 있었음을 알 수 있음. 다만, 빙하 후퇴는 균일하게 이루어지지 않았는데, 특히 약 10,800년 전 이후, 즉 홀로세 초기부터 빙하 후퇴 속도가 약 41 m/yr에서 116 m/yr로 3배 가량 증가했던 것으로 평가됨(Figs. 72, 73)

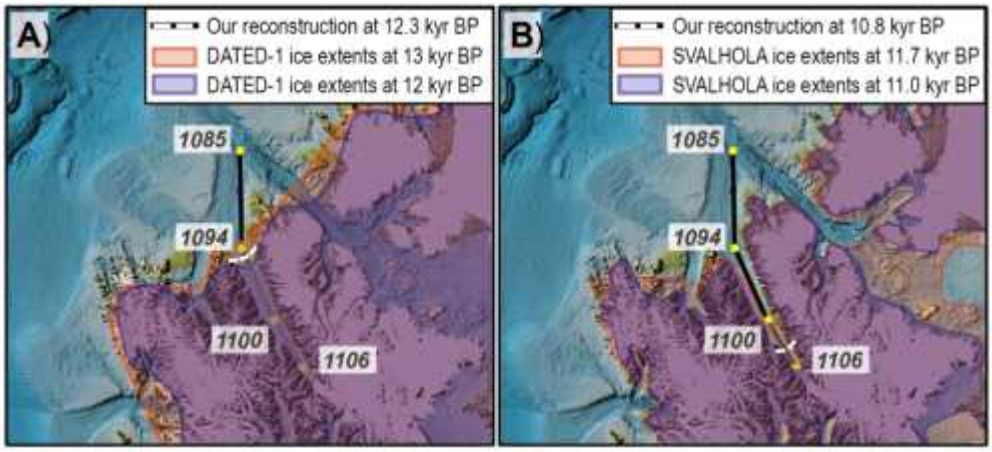


Fig. 71. Tentative ice extents at 12.3 and 10.8 kyr BP recorded by the spatio-temporal variability of FeOx in cores HH17-1085-GC, HH17-1094-GC, HH17-1100-GC and HH17-1106-GC. (A) The estimated ice extent at 12.3 kyr BP is well-matched with the previous reconstruction of the most-incredible DATED-1 timeslices at ~13 and 12 kyr BP (Hughes et al., 2016). (B) The ice reconstruction at 10.8 kyr BP shows slightly more expanded coverage than the recent reconstructions at 11.7 and 11.0 kyr BP based on the SVALHOLA database (Farnsworth et al., 2020) but much larger extent than the most-incredible DATED-1 timeslices at 11 kyr BP, which showed complete deglaciation in inner Wijdefjorden (Hughes et al., 2016). Note that the ice at 10.4 kyr BP is suggested to have retreated landward, which is consistent with the previous reconstructions.

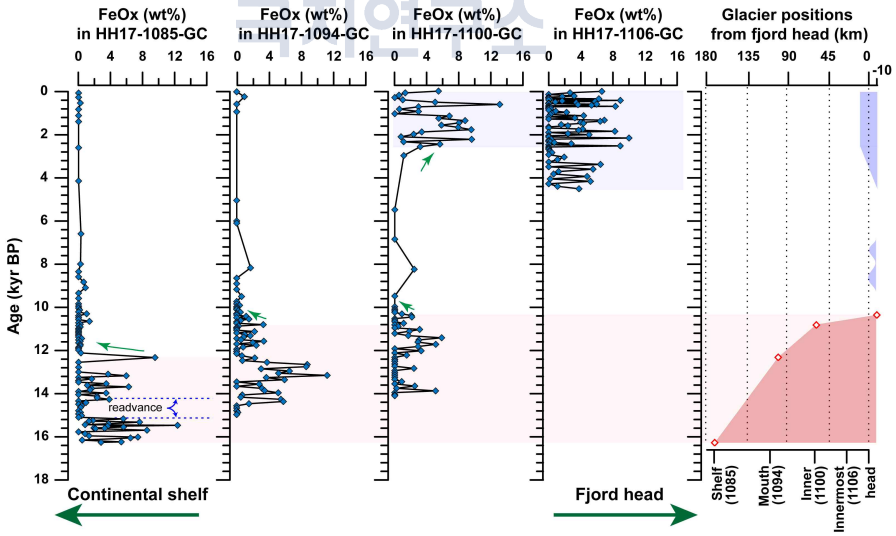


Fig. 72. Glacier positions reconstructed by temporal and spatial variability of FeOx in core sediments collected along a latitudinal transect on northern Svalbard. The transition from abundant to near-absent FeOx deposition in each core indicates a significant drop in glacially derived iron related to the retreat of glacier fronts. The dotted horizontal blue lines in the left panel indicate the periods when glacier re-advance occurred (Jang et al., 2021). Note that glacier positions during the postglacial period are subject to some uncertainty that relates to the effective distance for iron delivery and deposition in fjord sediments (see text for details).

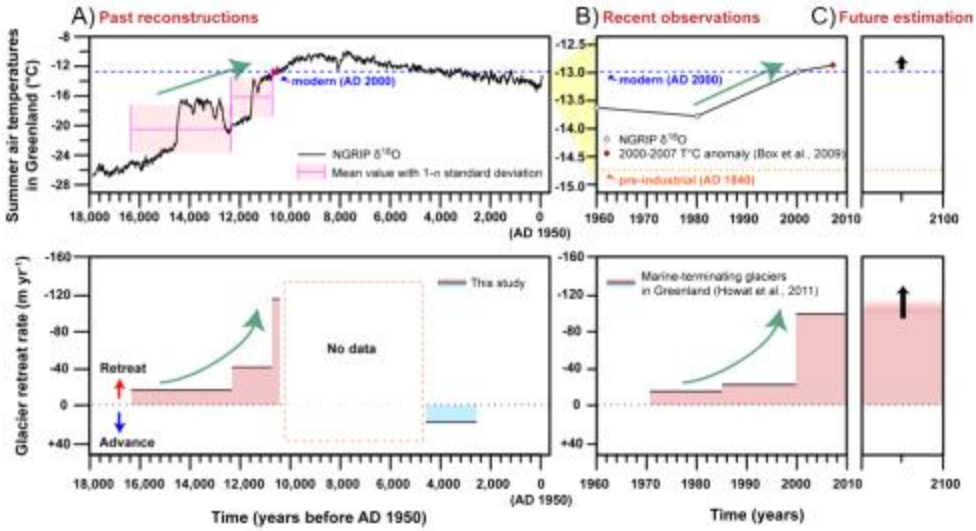


Fig. 73. Comparison of the Arctic glacier advance/retreat rates with the evolution of Greenland summer air temperatures. The overall increasing trend of the glacier retreat rate generally mimics the summer air temperature (Box et al., 2009; Buizert et al., 2018). Both (A) past reconstructions and (B) recent observations show that glacier melting rapidly increases beyond a threshold summer temperature value of approximately +1.8° C above pre-industrial value, suggesting (C) accelerated glacier retreat in the future (Pattyn et al., 2018).

KOPRI 극지연구소

(다) 지구온난화에 대한 빙하의 비선형적 거동 및 티핑포인트 가설

- 극지방에서의 빙하 후퇴 속도 가속화는, 일반적으로 수심이 깊어지며 calving 작용이 활발해졌거나(Briner et al., 2009) 주변 해수(Holland et al., 2008) 혹은 대기의 온도가 높아지는 것(Rasmussen and Thomsen, 2021)으로 해석될 수 있음. 해당 시기 예상된 빙하 위치의 수심은 감소하는 추세를 보인 반면, 복원된 전 지구의 대기 및 해양 온도는 증가하는 추세인 것을 고려했을 때, 후자에 따른 빙하 후퇴 가속화가 발생했을 것으로 사료됨
- 비데피오르드 코어퇴적물 내 GDGT로 복원된 표층 수온의 온도 역시 플라이스토세 후기에서 홀로세 초기로 들어서면서 전반적으로 증가하는 추세를 보였으며(Allaart et al., 2020), 우드피오르드 내 알케논 분석을 통한 표층 수온 복원 결과 역시 유사한 결과를 보이며 이를 지지함(Bartels et al., 2017). 마찬가지로, 그린랜드 빙하의 산소 동위원소를 바탕으로 복원된 북극 대기 온도 역시 해당 시기 점진적으로 증가하는 추세를 보이며(Buizert et al., 2018), 지역적인 해수 및 대기 온도 상승이 스발바르 북부 빙하 후퇴의 가속화를 유발하였을 것이라는 해석에 신빙성을 더함
- 하지만, 빙하 후퇴 속도의 가파른 상승과는 달리, 해수 및 대기 온도의 상승은 점진적이었던 것으로 보이며, 빙하 용융과 온도 상승 간의 비선형적인 관계성을 제안함. 실제, 오늘날 그린랜드의 경우 완만한 온도 상승세에서도, 1985년부터 2000년까지

는 연간 22m의 빙하 후퇴를 보였던 반면, 최근 2000년부터 2010년 기간 동안에는 연간 103 m의 빙하 후퇴를 보이며 급격한 빙하 후퇴 가속화를 보이며 해당 가설을 지지함

- NGRIP 빙하 코어 기준, 급격한 빙하 후퇴 가속이 일어난 10,800년 전의 여름철 대기 온도는 최근 빙하 후퇴 가속화가 일어난 AD 2000년 여름철 대기 온도와 정확히 일치함(Buizert et al., 2018) (Fig. 83). 이는 특정 온도 이상에서 급격한 빙하 용융이 일어난다는 기존 가설에 부합하며(Pattyn et al., 2018), 지구 온난화에 대한 빙하 용융의 비선형적인 거동에 대한 강력한 고환경적인 증거로 작용함

2-3) 3차년도

가) 햄버그북타 종퇴석 복합체의 형성 규명

(1) 연구 목적

- 햄버그북타 피오르드 분지 및 외해 지역(리틀 스토르피오르드)을 포함하는 천부지층 탄성파 자료와 약 13,000년 동안 퇴적된 중력코어 퇴적물 기록을 통해 종퇴석 복합체(Terminal Moraine Complex, TMC)의 형성 시기가 후기 홀로세(특히, 소빙하기, Little Ice Age)로 제한된다는 것으로 재해석되었으나(Joe et al., 2022), 후기 홀로세 TMC 형성설에 관하여, TMC 외측 사면부에 발달된 다양한 규모의 암설류(debris flow deposits)와 유빙(floating ice) 침식/변형 흔적 등 복잡한 지형적 특징에 대한 추가적인 해석의 필요성이 제시됨(Noormets and Kirchner, 2023)
- 본 연구에서는 TMC가 홀로세 후기 동안 형성되었음을 입증하기 위하여, TMC 주변부를 대상으로 해저지형, 천부지층 탄성파의 음향 특성 및 층서를 정밀 분석하고 암설류 및 유빙 침식/변형 흔적에 대한 해석을 제시하고자 함

(2) 연구 방법

(가) 해저지형 기반 암설류 및 유빙 침식 흔적 조사

- Noormets and Kirchner (2023)에서 제시한 다중 암설류 구분(DFL-1, -2, -3)
- TMC 내측 피오르드 분지 및 TMC 외측 사면부에 형성된 유빙 침식 흔적 조사

(나) 천부지층 탄성파 음향 특성 및 층서 규명

- TMC 외측 사면부에 발달된 여러 암설류와 유빙 침식 흔적에 대한 탄성파상(acoustic facies) 정의
- 해저지형에서 관측된 여러 암설류의 탄성파 층서를 비교하여 반복된 빙하 전진에 따른 다중 암설류 형성의 가능성 여부 파악

(3) 연구 결과 및 토의

(가) TMC 주변 해저지형

- 암설류 퇴적체(DFL-2, DFL-3)는 TMC 외측 사면에는 다양한 암설류가 엽(lobe) 형태로 중첩됨. 형태학적 측면에서, 일부 암설류는 기존에 형성된 암설류의 상부에서 새롭게 붕괴하면서 타 암설류를 부분적으로 피복하는 듯한 특징을 보임(Fig. 74)
- Noormets and Kirchner (2023)에서 제시한 암설류 구분을 적용하여, HH19 탐사 동안 획득한 해저지형 자료를 대상으로 암설류를 동일하게 구분: 1) DFL-1(최하부 암설류), 2) DFL-2(중부 암설류), 3) DFL-3(최상부 암설류). 탐사 영역의 제한으로 인하여, DFL-1 암설류를 제외한 DFL-2와 DFL-3가 확인됨(Fig. 74)
- 유빙 침식 흔적으로써, 다양한 규모의 암설류가 발달된 TMC 외측 사면부에는 불규칙적인 곡선 형태, 부분적으로 평평해진 해저면 등 유빙의 접촉에 의한 침식 및 변형 지형이 수심 약 70 m 해저까지 관찰됨(Figs. 74, 75). 그 외 TMC의 마루(crest)를 포함하여 TMC 내측 피오르드 분지의 수심 100 m 깊이 해저에서도 유빙에 의한 침식 흔적(주로 불규칙적인 곡선 형태)이 발견됨

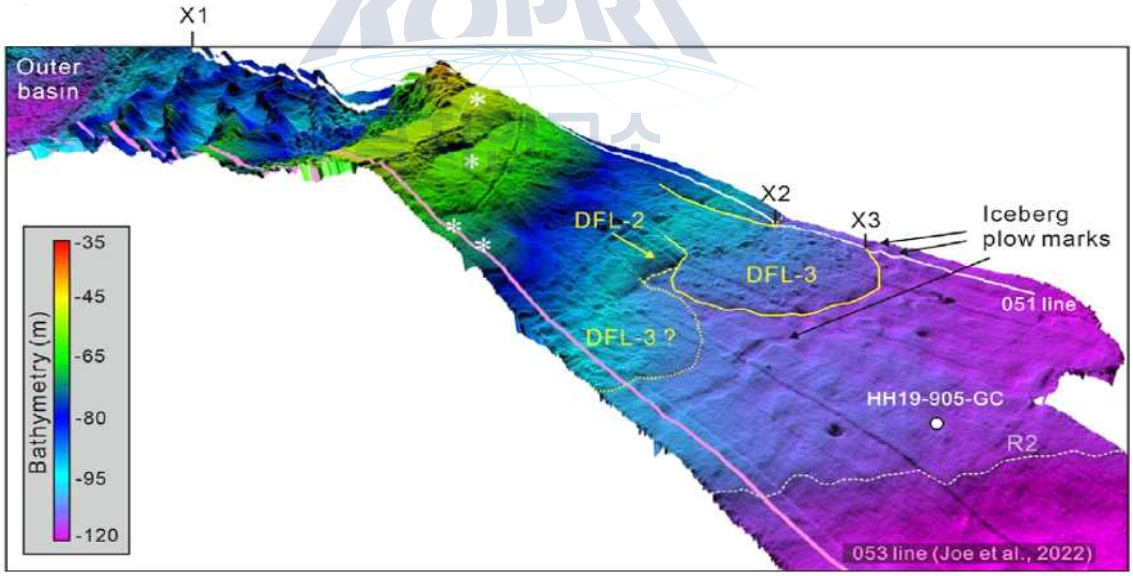


Fig. 74. Multibeam bathymetry from TMC and its proximal and distal flanks. A white line indicates the newly added SBP track line (051). For the subseafloor acoustic record of the 051 line, see Fig. 3. Asterisks (*) mark the flattened areas of the crest and distal flank of TMC.

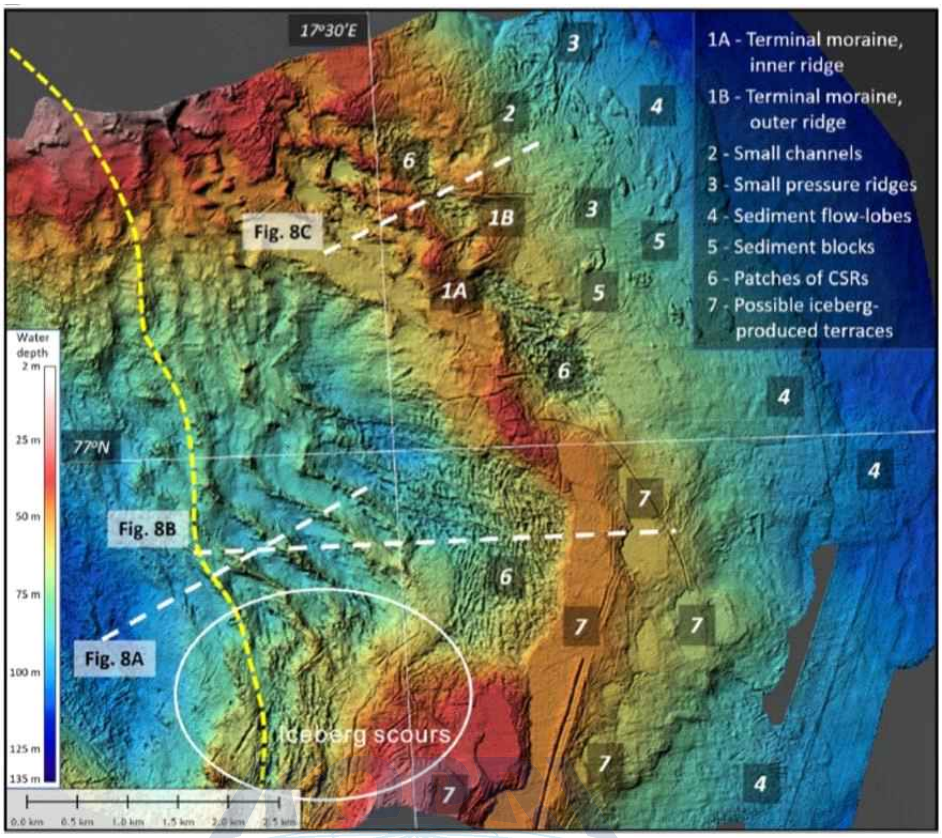


Fig. 75. Multibeam bathymetry of TMC and its flanks in Figure 7 of Noormets et al. (2021). A white circle shows iceberg scours, indicating the presence of large icebergs originating from the Hambergbreen retreating since AD 1900 (Lefauconnier and Hagen, 1991).

(나) TMC 외측 사면부의 탄성파상 및 탄성파 층서

- 천부지층탄성파 측선 051 line에서 두 암설류 DFL-2와 DFL-3는 F-1 유형의 탄성파상으로 확인됨. 해저지형도에서 DFL-2가 DFL-3를 부분적으로 피복하는 듯한 특징을 보이기 때문에(Fig. 74), 두 암설류가 서로 다른 시기에 형성되었을 것으로 추측할 수 있으나, 두 암설류의 탄성파 자료 상에서 층서적 상하관계가 구분되지 않음(Fig. 76). 특히, 두 암설류의 하부 경계를 지시하는 반사면이 온전히 관찰되는 것은 두 암설류가 비교적 빠른 시간 차를 두고 형성되었음을 의미함
- 빙하 전진과 후퇴는 괴상의 빙퇴적층과 빙운쇄설물(ice-rafted debris)을 포함한 빙·해양 퇴적층을 형성함. 즉, 빙하의 전진과 후퇴가 반복되면, 두 퇴적층이 반복적으로 교호하게 되며, 서로 다른 시기의 빙퇴적층은 빙·해양 퇴적층에 의해 음향학적으로 구분될 수 있음
- TMC 외측 사면에 발달된 여러 암설류가 서로 다른 시기의 빙하 전진으로 만들어졌다고 가정한다면, 각 암설류는 빙·해양 퇴적층(주로 성층화된 특징)의 교호로 음향학적으로 구분되어야 하는데, TMC 외측 사면에서 DFL-2와 DFL-3를 층서적으로

구분할 수 있는 내부 반사파가 없다는 것(Fig. 76)은 두 암설류가 비교적 가까운 시기(즉, 단일 빙하 전진과 후퇴 과정) 동안 형성되었음을 지지함

- 또한, 유빙의 접촉으로 인해 평평해진 지형의 음향학적 특징은 암설류 및 빙퇴적층을 지시하는 F-1 유형으로 구성되며(Fig. 76), 유빙 침식 흔적이 발달된 지역에서 특별히 빙·해양 퇴적층을 지시하는 F-4 유형의 피복층은 확인되지 않음

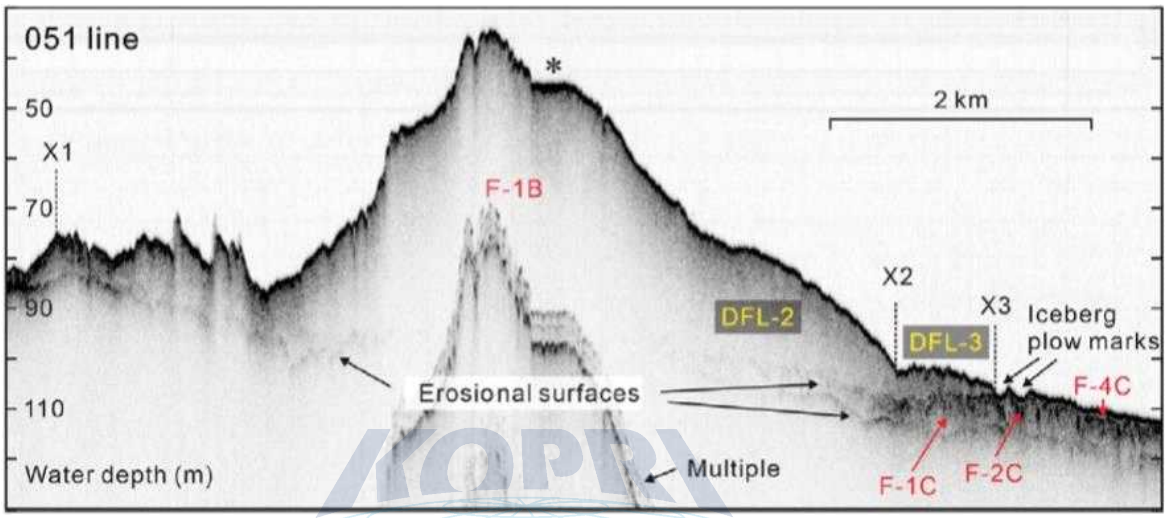


Fig. 76. High-resolution subbottom profiling data showing subseafloor acoustic characteristics of the 051 SBP track line. For its location, see Fig. 74. Asterisks (*) mark the flattened areas of the crest and distal flank of TMC.

(다) TMC 지형의 형성 기작

- 다양한 규모의 여러 암설류는 수차례 반복된 빙하의 전진과 후퇴에 의해 발생될 수 있으나, 본 연구의 천부지층탄성파 자료는 단일 빙하 전진과 후퇴만으로도 여러 암설류가 형성될 수 있음을 보여줌(Plassen et al., 2004)
- Noormets and Kirchner (2023)은 다양한 규모의 암설류 외에도 TMC 외측 사면부에서 수심 약 70 m 해저까지 부분적으로 평평하게 발달된 지형적 특징이 햄버그북타가 아닌 외부 기원의 유빙에 의한 흔적이라 제안함. 외부 기원의 유빙을 고려할 경우, 유빙의 기원은 홀로세 이전에 존재하였던 스토르피오르드 빙하/빙붕으로 설명될 수 있음. 이러한 이유에서, Noormets and Kirchner (2023)은 TMC 외측 사면의 유빙 침식 흔적이 홀로세 이전에 발달되었고, TMC는 그 이전부터 형성되었어야만 했다고 주장
- 이러한 유빙 침식 흔적이 홀로세 이전에 형성되었다면, 유빙 침식 지역의 상부에서 홀로세 동안 퇴적되었을 F-4 유형의 빙·해양 퇴적층이 침식 흔적을 피복하는 특징

이 관찰될 것으로 기대되나, 그러한 피복층은 전혀 존재하지 않음. 즉, 이러한 유빙의 접촉 및 침식은 홀로세 이내에 비교적 최근에 형성된 것이라 볼 수 있음

- 더 나아가, TMC 외측 사면의 유빙 침식 흔적은 TMC 내측 햄버그북타 조수 빙하에서 기원한 유빙의 영향으로도 형성될 수 있음. 소빙하기 이후 빙하가 후퇴하는 과정에서, 햄버그북타의 조수 빙하는 적어도 AD1900까지 수심 100 m 보다 깊은 해저까지 채워져 있었으며, 이는 소빙하기 이후로 두께 100 m 내외의 유빙이 형성되었음을 지시함. 특히, 이는 TMC 내측 사면부의 수심 100 m 까지 관찰되는 유빙 침식 흔적에 의해 지지됨(Fig. 2). TMC의 마루의 내측에서 햄버그북타에서 운반된 유빙의 접촉에 의해 변형되어 보이는 지형들을 고려할 때, AD1900 이후 햄버그북타 기원의 거대 유빙이 소빙하기에 형성된 TMC를 통과하면서 전복(overturned)되는 과정에서 “Kettle holes”과 같은 유빙에 의한 지형 침식/변형(Ottesen et al., 2017)이 TMC 외측 사면에 형성될 수 있음(Fig. 77)

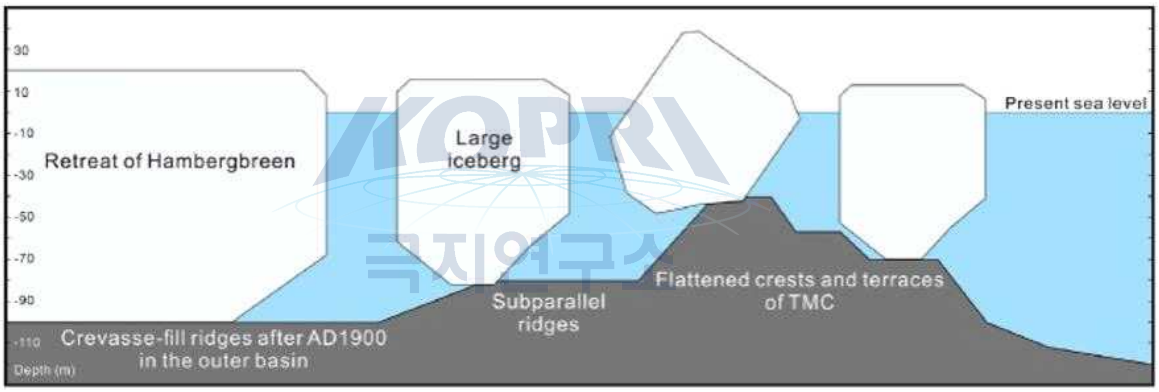


Fig. 77. Schematic model for the potential formation of the flattened crest and terrace areas on the distal flank of TMC, based on the regional distribution of iceberg plow marks observed in Fig. 75.

나) 벨준트 피오르드 퇴적환경 해석 및 퇴적물 기원지 프록시 개발

(1) 연구 목적

- 북극 스발바르 피오르드의 해양퇴적물은 과거 기후/환경 및 빙하의 거동에 대한 변화 양상을 잘 보존하기 때문에, 고환경 복원연구에 매우 적합함. 해양퇴적물의 입도를 포함한 조직특성, 퇴적구조 및 퇴적물의 광물 조성은 과거 피오르드의 환경 변화를 반영하며, 피오르드 환경에서 획득된 천부지층 퇴적물 기록을 이용한 퇴적상(lithofacies) 분석 및 연대 모델 구축은 과거 빙하 거동과 관련된 빙·해양 퇴적환경의 시공간적 변화를 이해하는 데 필수적인 정보를 제공함
- 특히, 퇴적물 시료 내에 광물 조성은 스발바르 피오르드 주변에 분포하는 다양한 기

반암에서 기인한 퇴적물 공급을 반영하므로 퇴적환경 변화와 관련한 지역적인 퇴적물 유입의 영향을 평가할 수 있음. 따라서, 스발바르 지역의 기반암 분포를 토대로 한 지역적 대표 광물의 변화 양상은 과거 환경 변화에 따른 퇴적물 기원지를 대변하는 지시자로 활용될 수 있음

- 본 연구에서는 한-노 국제 피오르드 공동탐사(2019) 동안 남서부 스피츠베르겐 섬 벨준트 피오르드에서 확보한 천부지층탄성파 자료와 중력시추코어 1점을 활용하여 (Figs. 78A, B), 연구 지역의 빙·해양 퇴적환경을 복원하고 지역적 퇴적물 기원지를 대변하는 지시자를 제안하고자 함

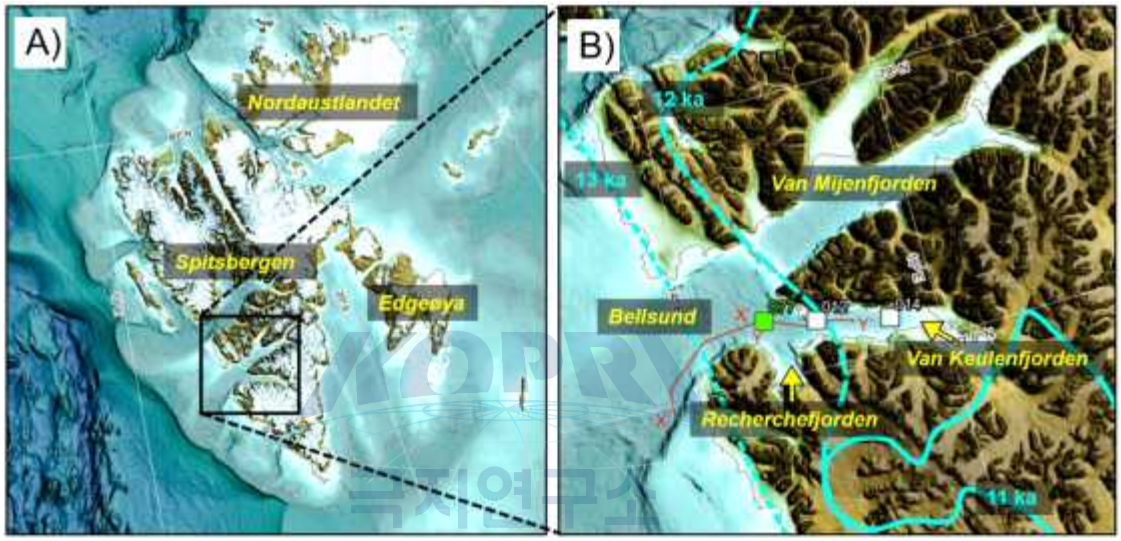


Fig. 78. Physiographic maps of the (A) Arctic Svalbard and (B) Bellsund. Bellsund borders Van Mijenfjorden (northeastern), Van Keulenfjorden (southeastern), and Rechercherfjorden (southern). Light blue lines (dotted to solid) indicate outlines of the past Svalbard glacier (Hughes et al., 2016). In a panel B, a red line shows the SBP track line. For the track line, the subseafloor acoustic record is presented in Fig. 90.

(2) 연구 방법

(가) 남부 스피츠베르겐 섬의 기반암 조성 조사

- Dallmann (2015)에서 제시된 남부 스피츠베르겐 섬의 기반암 분포 조사
- 각 기반암의 지질 특성 기반 유사 지질 구역 구분

(나) 벨준트-반커일렌 피오르드 천부지층 음향 특성 및 탄성파 층서 비교

- Kempf et al. (2013)에서 보고된 반커일렌 지역의 음향 특성 및 층서 조사
- 벨준트 지역의 천부지층탄성파 자료의 음향 특성 분석 및 층서 구분

(다) 중력시추코어 암층서 분석

- 퇴적상: 퇴적물 색상, 입도, 퇴적구조 등을 토대로 퇴적상 정의(퇴적상 분석을 위해 활용된 자료는 노르웨이 트롬소 북극 대학교의 Avaatech XRF 코어 스캐너, GEOTEK Multi-Sensor-Core-Logger (MSCL) 및 MSCL-XCT X-ray imaging machine과 극지연구소의 레이저 회절 입도분석기(Malven Mastersizer 3000) 및 습식체질로 분석됨)
- 연대 모델: 방사성 탄소 연대는 퇴적물 시료 내 생물기원 탄산염을 이용한 독일 알프레드 베게너 연구소에 분석의뢰. 분석 결과를 활용 BACON 프로그램으로 시추코어 심도-연대 관계(depth-age relationship) 설정
- 광물 조성: 동결건조한 중력코어 퇴적물 시료를 분말화하여 독일 브레멘 대학교(Uni Bremen)에서 XRD 분석 수행(Christoph Vogt 박사와 협업)

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 남부 스피츠베르겐 섬의 기반암 조성

- 스피츠베르겐 섬은 초기 에오세(5,200-4,500만년 전) 동안 라브라도 해, 북대서양 및 유라시아 분지의 해저 확장과 관련된 조산대(fold belt)와 층상대(thrust belt)가 북서-남동 방향으로 조성됨(Dallmann, 2015). 남부 스피츠베르겐의 주요 지구조 특징으로는 북서-남동 방향으로 분포하는 서 스피츠베르겐 조산대(West Spitsbergen Fold Belt, WSFB)가 있으며(Figs. 79A, B), “thick-skinned thrust zone”과 “thin-skinned zone”으로써 서부와 동부로 구분됨
- 벨준트 피오르드는 크게 세 지류 피오르드 반미엔(Van Mijenfjorden), 반커일렌(Van Keulenfjorden), 르셰르셰(Recherchefjorden) 피오르드와 맞닿아 있는 지형 분포를 보임(Fig. 79B). 벨준트와 르셰르셰 피오르드는 WSFB의 서부에 위치하는 반면, 반미엔과 반커일렌 피오르드는 WSFB의 동부를 포함한 중앙 제3기 분지(Central Tertiary Basin, CTB)에 위치함(Fig. 79A)
- 남부 스피츠베르겐 섬은 WSFB와 유사한 방향으로 다양한 연령대의 기반암이 분포함(그림 79A). 벨준트와 르셰르셰 피오르드의 주변 지괴(landmass)는 신원생대(Neoproterozoic) 층과 오르도비스기 및 캄브리아기(Ordovician & Cambrian) 층이 주를 이루며, 제4기(Quaternary), 하부 쥬라기(lowermost Jurassic), 트라이아스기(Triassic) 및 데본기(Devonian) 층이 부분적으로 분포함. 반면, 반미엔과 반커일렌 피오르드는 신제3기(Neogene)와 고제3기(Paleogene) 층이 주를 이루며, 이러한 제3기(Tertiary) 층 주변에는 백악기(Cretaceous) 및 상부 쥬라기 층이 분포함
- WSFB 서부와 동부의 경계를 기준으로 기반암의 암석학적 특징이 비교적 뚜렷하게 구분됨(Fig. 80B). 서부 지역은 다양한 탄산염 암석(carbonate rock)이 주를 이루며, 천매암(phyllite), 규암(quartzite) 및 사암(sandstone)이 부분적으로 분포함. 화성기원의 암석은 변성화산암(metavolcanic rock)으로써 호른준트와 벨준트 사이에 위치한 Wedel Jalsberg Land 지역 남부에 매우 국소적으로 관찰됨

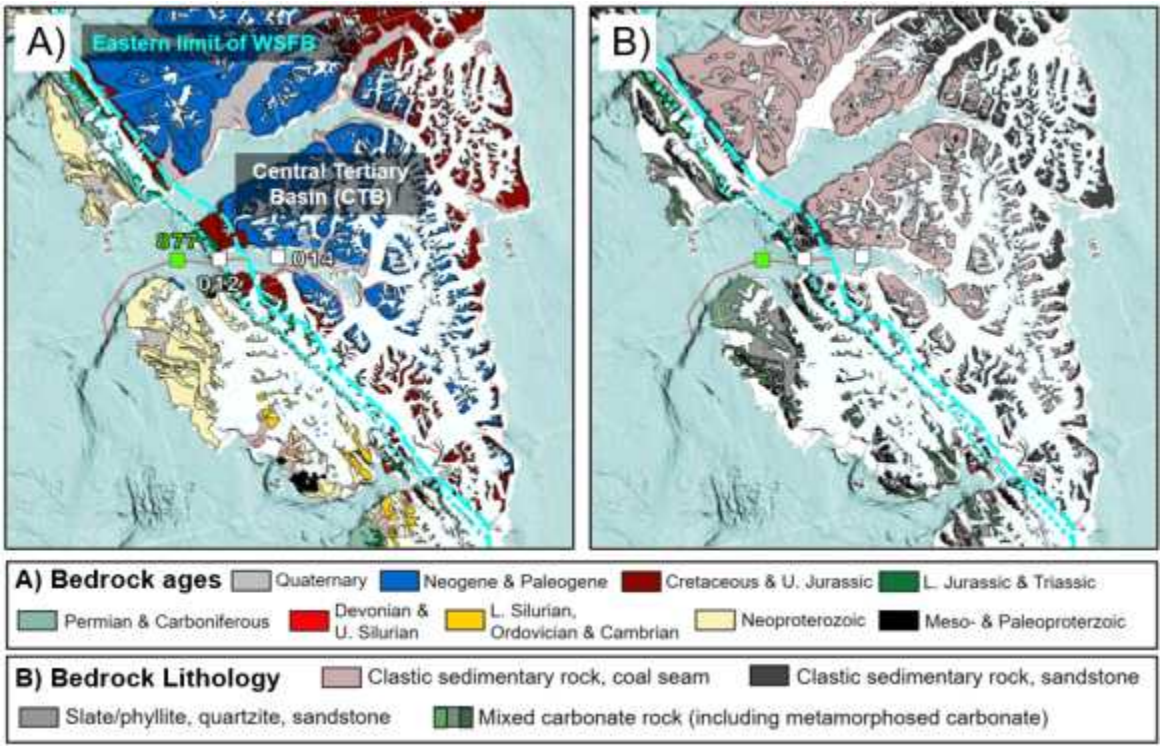


Fig. 79. Bedrock distribution categorized by (A) age and (B) lithology. Dashed and dotted blue lines mark the eastern limit of the West Spitsbergen Fold Belt (WSFB) and a boundary between western and eastern zones of WSFB, respectively.

극지연구소

- 동부 지역은 주로 규산염 광물이 풍부한 쇄설성 퇴적암이 주를 이룸. 특히, 신제3기와 고제3기 층으로 구성된 CTB 지역은 주로 탄층(coal seams)을 일부 포함하는 쇄설성 퇴적암(clastic sedimentary rocks)을 특징으로 하며(Fig. 79B), 그 주변 백악기 및 상부 쥬라기 층에 해당하는 기반암은 사암을 일부 포함한 쇄설성 퇴적암으로 구성됨

(나) 벨준트-반커일렌 피오르드의 천부지층 탄성파 층서

- 반커일렌 피오르드 지역의 천부지층 음향 기록은 Kempf et al. (2013)에 의해 총 6개의 층단위(VK0-5)로 정의됨: 1) VK0는 최하단에 위치하는 층단위로 엽(lobe)의 형태로 분포하며 선명하고 연속적인 상부 경계를 보이는 반투명한(semi-transparent) 내부반사파로 구성됨, 2) VK1은 VK0를 피복하는 층단위로 매몰된 해령(ridges)으로 관찰되며 불연속적인 상부 경계를 가진 반투명한 내부반사파를 특징으로 함, 3) VK2는 VK1로 정의된 여러 해령 간에 저지대(depressions)를 채우는 퇴적체이며 두꺼운 성층화를 특징으로 함, 4) VK3는 VK2를 피복하는 층단위로 투명한 내부반사파에서 미약하게 성층화되는 특징을 보이며, 층후는 매몰된 해령(VK1)의 마루(crest) 쪽에서 비교적 얇고 해령 간 저지대 쪽에서 두꺼워짐, 4)

VK4와 5는 최상부 층단위로 VK3의 상부 경계와 준 평행(sub-parallel)하게 분포함. 두 층단위 모두 수평 연속성이 좋은 성층화를 특징으로 하며, 층후는 서부(즉, 외해 방향)로 갈수록 점진적으로 얇아짐(Fig. 80)

- 반커일렌 피오르드에서 획득된 시추코어 JM07-012(Fig. 80B) 퇴적기록과 비교를 통하여, Kempf et al. (2013)에서 각 탄성파 층단위를 다음과 같이 해석함: 1) VK0: 초기 홀로세 혹은 그 이전에 형성된 빙퇴적층(subglacial diamicton), 2) VK1-2: 11,800~11,300년 동안 형성된 빙하성 퇴적층(proglacial sediment), 3) VK3: 초기 홀로세 빙·해양 퇴적층, 4) VK4: 중-후기 홀로세 빙·해양 퇴적층, 5) VK5: 과거 약 3,000년 전 이후로 퇴적된 빙·해양 퇴적층
- 벨준트 피오르드의 전부지층 음향 기록에서, 비교적 수평 연속성이 좋은 강한 반사면을 토대로 기존에 정립된 반커일렌 탄성파 층단위 VK1-5와 상응하는 5개의 층단위(BS1-5)가 구분됨(Fig. 80): 1) BS1은 반투명하거나 불연속적인 내부반사파를 특징으로 하며, 비교적 굴곡이 심한 상부 경계를 보임, 2) BS2는 BS1을 피복하는 층단위로 수평 연속성이 좋고 강한 반사파가 서로 준 평행하게 성층을 이룸. 또한 벨준트와 반커일렌 피오르드의 경계에 위치한 해령의 외측 사면에서 음향학적으로 투명한 엽 형태의 암설류 퇴적체가 BS2 내에 발달되어 있으며, BS1 층단위 일부를 침식하는 것으로 관찰됨, 3) BS3는 비교적 미약하게 성층화되며, 층후는 BS2의 지형 기복을 따라 마루에서 얇아지고 저지대에서 두꺼워지는 특징을 보임, 4) BS4와 5는 최상부 층단위로써 투명한 내부반사파로 구성되며, 층후는 외해 방향으로 가면서 점진적으로 얇아짐

KOPRI 극지연구소

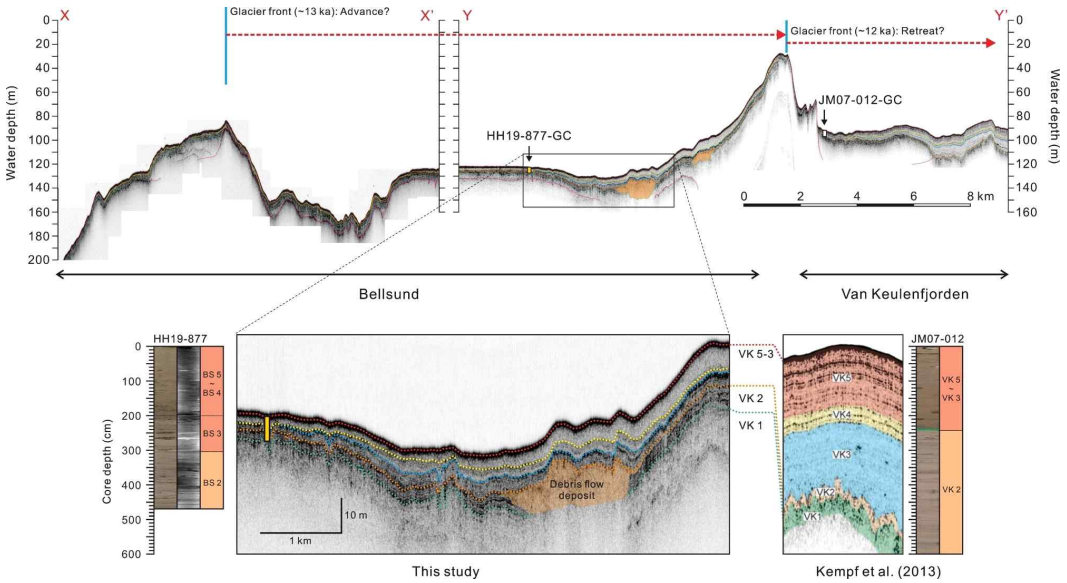


Fig. 80. Subseafloor acoustic records from Bellsund to Van Keulenfjorden. The lower panel presents a comparison of the acoustic units defined in the two fjords. For the location of the acoustic records, see Fig. 78B.

(다) 입도 분포

- 벨준트 피오르드에서 획득된 중력코어 HH19-877-GC는 주로 황록색(olive)과 담갈색(pale brown) 퇴적물로 구성되며, 퇴적물의 색상 변화와 관련하여 입도의 차이를 보임(Fig. 81)
- 황록색을 띠는 상부 퇴적층(0-200 cm)은 대체로 20% 이내의 점토, 70-80%의 실트가 주를 이루며, 사질 함량은 비교적 낮으나(약 5% 이내) 상부층의 최하부(약 150-200 cm)에서 약 10 %까지 증가함. 습식체질로 별도로 측정한 자갈(>2 mm)의 함량은 대체로 10% 미만으로 비교적 낮음
- 담갈색을 띠는 하부 퇴적층은 상부 퇴적층에 비하여 높은 점토 함량(25-50%, 최대 81%)을 보이는 세립질 퇴적물로 구성됨. 특히, 하부 퇴적층에서는 자갈의 함량이 반복적으로 크게 증가하며(>40%), 이는 빙산에 의해 운반되어 퇴적된 쇄설물(Iceberg-rafted debris, IRD)의 특징을 지시함

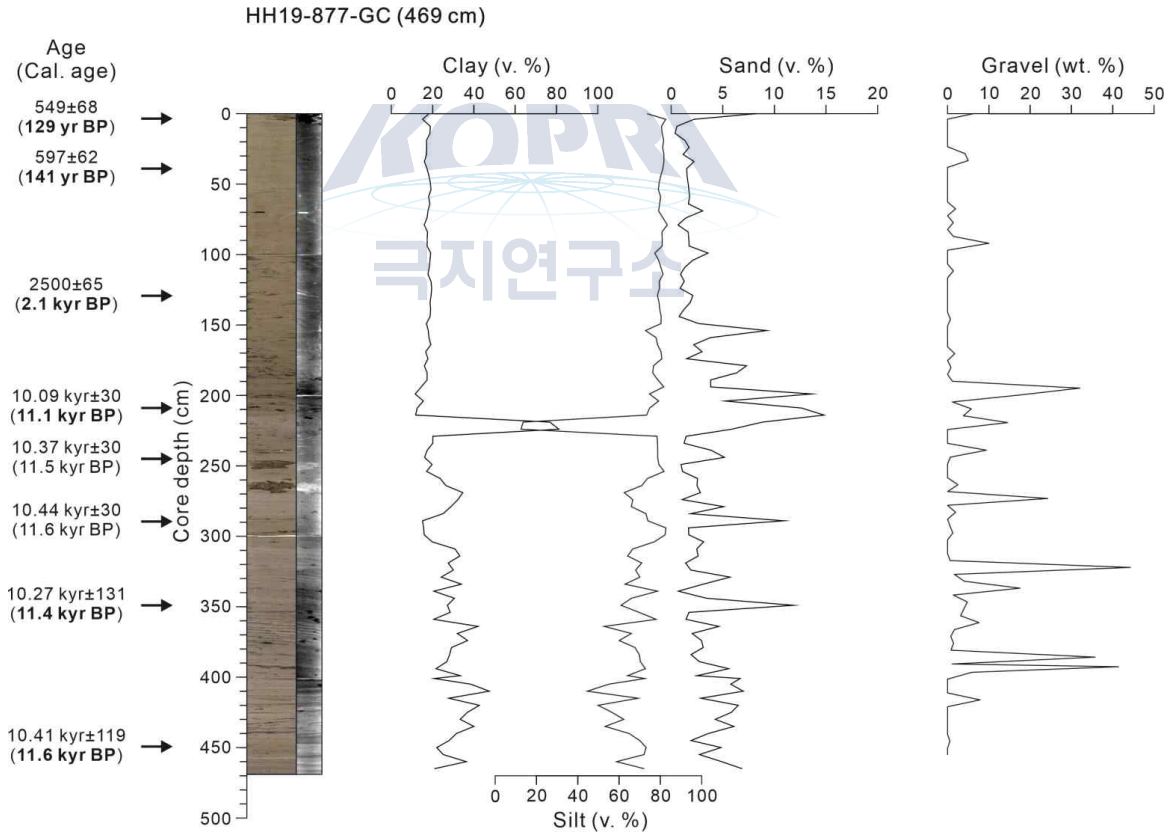


Fig. 81. Sedimentary records of sediment core HH19-877-GC, including AMS ^{14}C ages, linescan image, X-radiograph, and grain size composition. The contents of clay, silt, and sand were measured using a Malvern Mastersizer 3000, expressed as a volume percent (v. %). Gravel content was measured by wet sieving using other bulk sediment samples, and is therefore expressed as weight percent (w. %).

(라) 퇴적상

- 퇴적물의 색상, 입도, 퇴적 구조를 기반으로, 코어 HH19-877-GC에서 총 5개의 퇴적상이 정의됨(Fig. 82)
- Facies 1: 코어 최하단(400-469 cm)에 분포하는 퇴적상으로써, 검은 얼룩(mottles)을 보이는 담갈색의 IRD를 포함한 사질 니질로 구성됨. 일차 퇴적구조로는 희미한 층리(layer) 혹은 엽리 층리(lamination)를 특징으로 하며, 각 층리는 서로 준 평행하게 발달 됨
- Facies 2: Facies 1의 상부(377-400 cm)에 위치하며, 검은 얼룩이 거의 없는 담갈색의 IRD를 포함한 사질 니질로 구성됨. 뚜렷한 일차 퇴적구조 없이 괴상(massive)으로 관찰되며 하부에 놓인 Facies 1를 부분적으로 침식하는 특징을 보임
- Facies 3: Facies 2의 상부(309-377 cm)에 위치하며, 검은 얼룩 혹은 층과 담갈색 층으로 성층화되며 IRD를 포함한 사질 니질로 구성됨. 일차 퇴적구조로써 Facies 1과 비교하여 뚜렷한 엽리 층리를 보이며, 각 층리는 서로 준 평행하나 약간 경사지며, 상부로 가면서 층리가 희미해짐. 하부에 놓인 Facies 2와 연속적인 상변화를 보임
- Facies 4: 하부 퇴적층 일부를 포함한 대부분의 상부 퇴적층을 구성(7~309 cm). 215-309 cm 구간은 황록색과 담갈색 층이 반복되며, 그 위로는 주로 황록색을 띰. 황록색 구간은 하부에서 비교적 검은 얼룩이 많이 관찰되며 상부로 가면서 감소함. IRD를 일부 포함한 생교란(bioturbated) 니질로 구성됨. 약 190-215 cm 구간에서 역질 사(gravelly sand) 층이 관찰됨. 하부 퇴적상 Facies 3와 점이적인 상변화를 보임
- Facies 5: 최상부 퇴적상으로써(0-7 cm), IRD를 포함한 황록색의 사질 니질로 구성됨. 뚜렷한 일차 퇴적구조는 없으며 미약하게 생교란 된 특징을 보임. 하부 퇴적상 Facies 4와 뚜렷한 경계가 구분됨

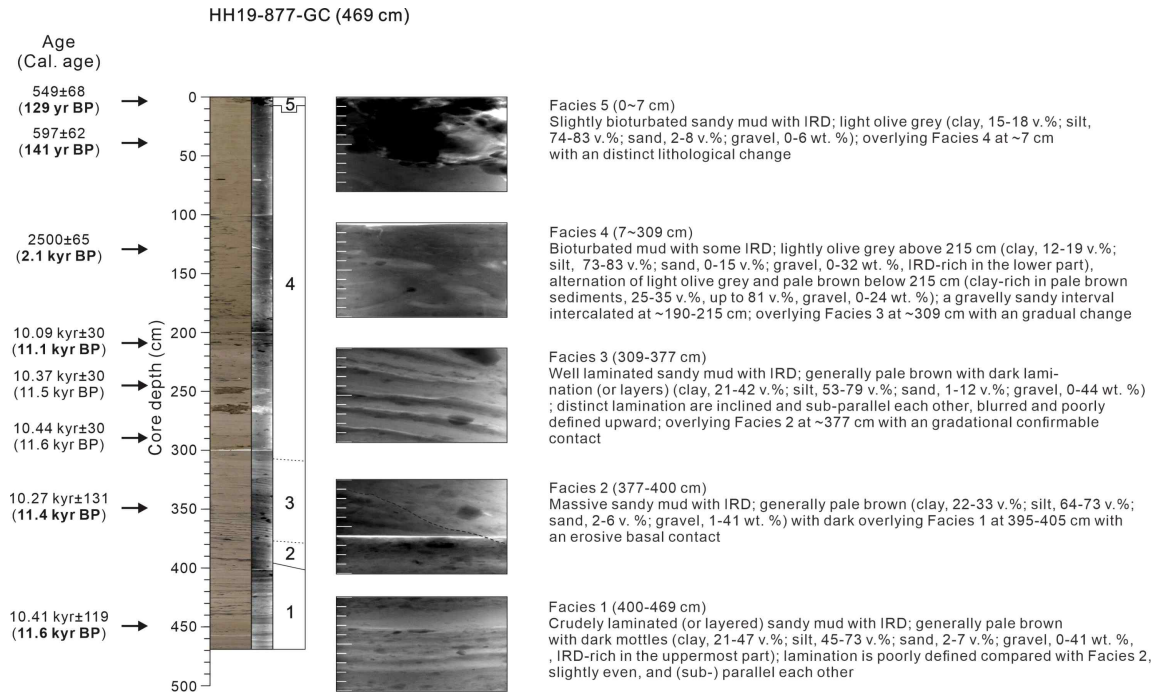


Fig. 82. Lithofacies defined in sediment core HH19-877-GC.

(마) 연대 모델 및 퇴적률

- 총 8점의 생물기원 탄산염(주로 조개껍질 파편) 시료를 대상으로 수행된 연대 분석 결과는 HH19-877-GC 코어가 과거 약 12,000년 이내에 퇴적된 기록임을 나타냄 (Fig. 82). 각 연대 결과는 전반적으로 코어 하부로 가면서 오래된 연령을 보이는 선형의 코어 심도-연대 관계를 보임(Fig. 83)
- 현재까지 분석된 연대 결과를 기반으로 정의된 코어 심도-연대 관계는 앞서 구분된 암층서 및 퇴적상의 분포와 일관하여 특징적인 퇴적률의 변화를 보임. 융빙수 퇴적상(Facies 1)과 저탁류의 상변화(Facies 2-4)를 보이는 황록색의 하부 퇴적층(약 200 cm 이하)은 약 11,000년 이전에 퇴적된 기록으로써 150-200 cm/kyr의 높은 퇴적률을 특징으로 함. 담갈색 상부 퇴적층 내 하부 구간(130-200 cm)은 초·중기 홀로세를 아우르는 과거 11,000-3,000년의 기록으로써 급격하게 퇴적률이 낮아짐 (12 cm/kyr 미만). 담갈색 퇴적층의 상부(0-130 cm) 구간은 후기 홀로세를 반영함. 후기 홀로세의 퇴적률은 50 cm/kyr 이상으로 증가하며, 최상부 구간에서 급격히 퇴적률이 더 높아짐(약 150 cm/kyr)
- 초·중기 홀로세에서 나타나는 급격한 퇴적률의 감소는 본 연구 지역뿐 아니라 스피츠베르겐 남서부 리틀 스토르피오르덴(Joe et al., 2022)과 더불어 북부 스피츠베르겐의 대륙붕 환경(Jang et al., 2021)에서도 동일하게 나타나며, 벨준트 동부에 위치한 반커일렌 피오르드와 유사함(Fig. 43) (Kempf et al., 2013). 다만, 코어 기록 최상부에서 관찰된 급격한 퇴적률 상승(약 150 cm/kyr)은 주변 반미엔 피오르드 내부에서 획득된 시추 코어(JM07-014, Kempf et al., 2013)의 기록(약 50 cm/kyr

이하)과 비교해도 너무 높은 결과로써 연대 모델에 대한 설정을 검토할 필요가 있음

- 그 외, 11,000년 이전의 기록에서는 부분적으로 연대의 역전이 확인됨. IRD가 많이 산출된 구간임을 고려하여, 이러한 역전은 실제 퇴적 시기를 반영하는 것이 아닌 과거 벨준트 지역의 인근 빙하가 후퇴하는 과정에서 형성된 빙산에 의해 비교적 오래된 조개껍질 파편이 재동되어 퇴적된 것으로 판단되며, 이를 보완하기 위해 총 6구간에 저서성 유공충을 확보하여 분석의뢰를 진행 중임. 추가적인 연대분석 결과를 활용하여, 1) 연대분석 결과의 역전 구간, 2) 초·중기 홀로세의 낮은 퇴적률 구간, 3) 후기 홀로세 내 퇴적률이 급격히 증가한 구간을 보완하고 현재 연대 모델 및 코어 깊이-연대 관계를 개선할 예정임

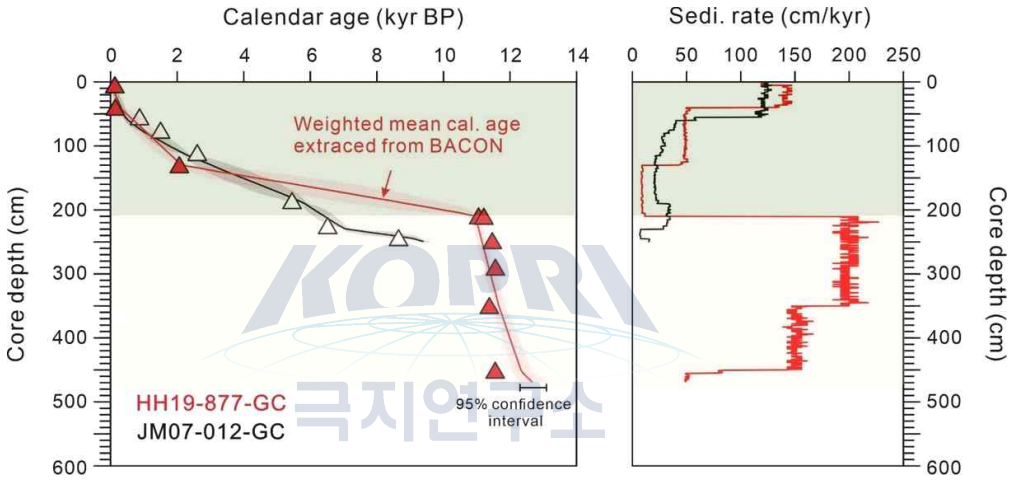


Fig. 83. Depth-age relationships and sedimentation rates of core HH19-877-GC (Bellsund) and JM07-012-GC (Van Keulenfjorden, Kempf et al., 2013).

(바) 광물 조성

- 벨준트 중력코어 HH19-877-GC의 퇴적물의 주요 광물은 석영(quartz), 사장석(plagioclase) 및 백운석(dolomite)로 구성됨. 석영의 평균 함량은 약 26%로 약 18-39%의 범위를 보임. 사장석은 약 9%의 평균 함량을 보이며, 4-14%의 범위로 변화함. 백운석의 함량은 12% 이내로 변화하며, 6.5%의 평균 함량을 보임(Fig. 84)
- 석영의 함량은 황록색의 상부 퇴적층의 사질 입자의 함량과 유사하게 거동하나, 담갈색의 하부 구간에서 석영과 사질 입자의 함량의 뚜렷한 상관관계를 보이지 않음
- 백운석의 함량은 황록색의 상부 퇴적층 내에서 상부로 가면서 점진적으로 증가하는 양상을 보임. 담갈색의 하부 퇴적층에서는 백운석 함량의 증감현상이 반복되며, 일부 황록색을 띠는 구간에서 백운석의 함량이 증가함. 특히, 백운석의 함량 변화는 퇴적물의 실트의 함량과 유사하게 거동하는 것으로 보임

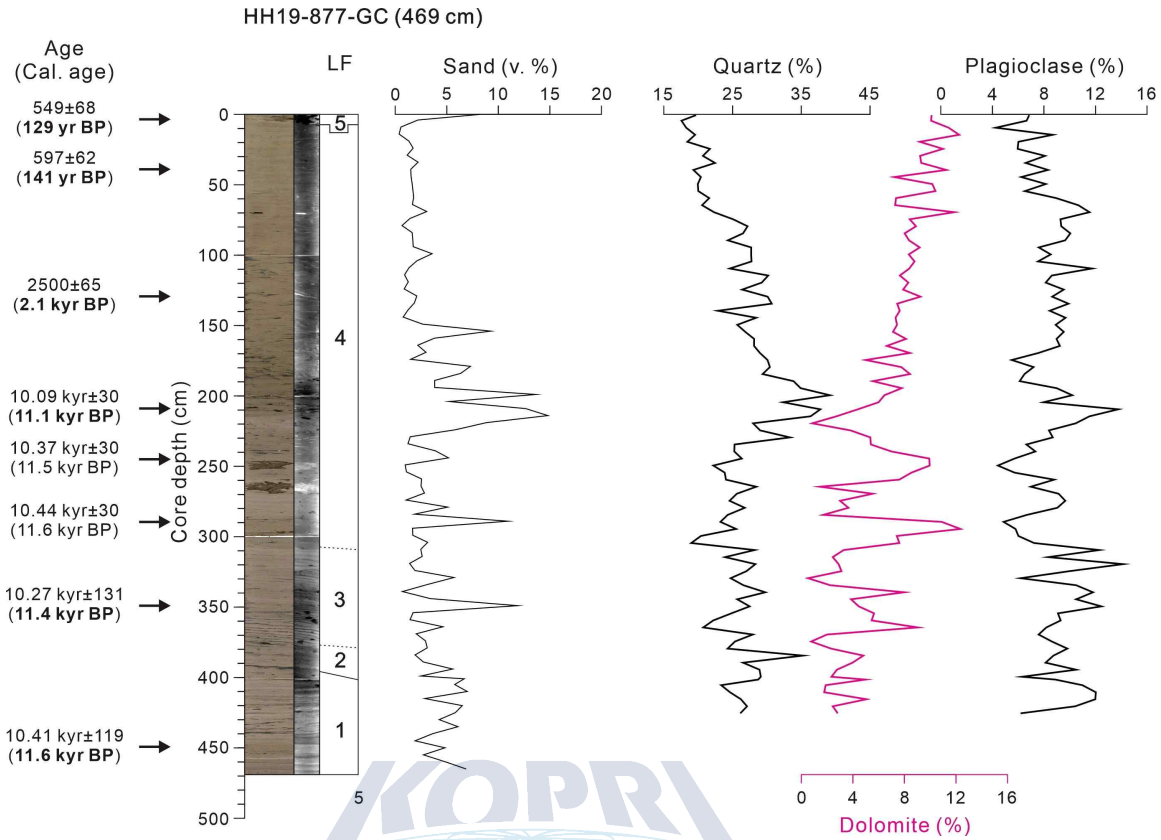


Fig. 84. Downcore variations in the contents of quartz, dolomite, and plagioclase.

KOPRI
극지연구소

- 사장석의 함량은 퇴적물 입도와 명확한 관계를 보이지 않음. 다만, 전반적인 변화 양상은 백운석의 함량 변화와 반대로 나타나는 것으로 확인됨

(사) 퇴적물 기원지 프록시로써의 광물 조성

- 연대 모델에 따른 퇴적상의 변화는 약 12,000년 전 이후로의 퇴적환경의 변화를 반영함. 시추코어 최하단 융빙수의 퇴적을 지시하는 Facies 1의 분포는 과거 13,000년 전 이후 11,000년까지 후퇴했던 해양기저빙하(marine-based glacier)의 거동과 일치함. 음향학적으로 강하게 성층화되고 부분적으로 암설류 퇴적체가 분포하는 천부지층탄성파 층단위 BS2는 코어 퇴적물 기록에서 저탁류 퇴적상(Facies 2-4)으로 관찰되었으며, 이는 과거 12,000년 전 이후 11,000년 동안의 반커일렌과 반미엔 피오르드 지역이 겪었던 빠른 빙하후퇴가 벨준트 지역으로 다량의 퇴적물을 공급하고, 그에 따라 벨준트 동부 경계에 분포한 해령의 서쪽 사면부가 부분적으로 붕괴되었던 것으로 해석됨. 과거 만년에서 약 3,000년 동안 사질 입자의 증가를 동반한 급격한 퇴적률 감소는 초·중기 홀로세 동안 급격히 감소된 빙하 환경 조건에 퇴적물 공급의 감소와 당시에 강화된 북대서양 해수 유입에 따른 저층류(bottom current)의 세립질 퇴적물 winnowing 현상을 반영하는 것으로 해석됨. 이후 후기 홀로세 동안

Facies 4와 5의 퇴적은 반원양성 퇴적환경과 일부 피오르드 안쪽에 존재하는 조수 빙하의 영향을 나타냄

- 광물 분석 결과로 제시한 백운석과 사장석 함량의 변화는 주변 기반암의 특징을 반영하는 것으로 보임. 백운석은 WSFB의 서부에 주로 분포하는 다양한 탄산염 암석의 지괴에 기인하며, 주로 벨준트 남부에 위치한 르셰르셰 피오르드를 통해 공급되는 것으로 해석됨. 사장석은 화성암이 많이 분포하는 지역 주변에서 높게 나타나지만, 연구지역의 기반암 분포는 화성암으로부터 유래한 사장석은 매우 제한적이라 판단됨. 그 외 사장석은 쇄설성 퇴적암의 풍화로부터 형성될 있음. 반미엔과 반커일렌 피오르드 주변 지괴는 전반적으로 중앙 제3기 분지(CTB)를 차지하는 쇄설성 퇴적암으로 구성되며, 반복적인 빙하의 확장과 후퇴는 주변 지괴의 풍화작용을 야기함 (Jang et al., 2023). 따라서, 사장석의 함량은 WSFB 동부에 위치한 반커일렌과 반미엔 피오르드를 대표할 수 있는 광물로 정의할 수 있음

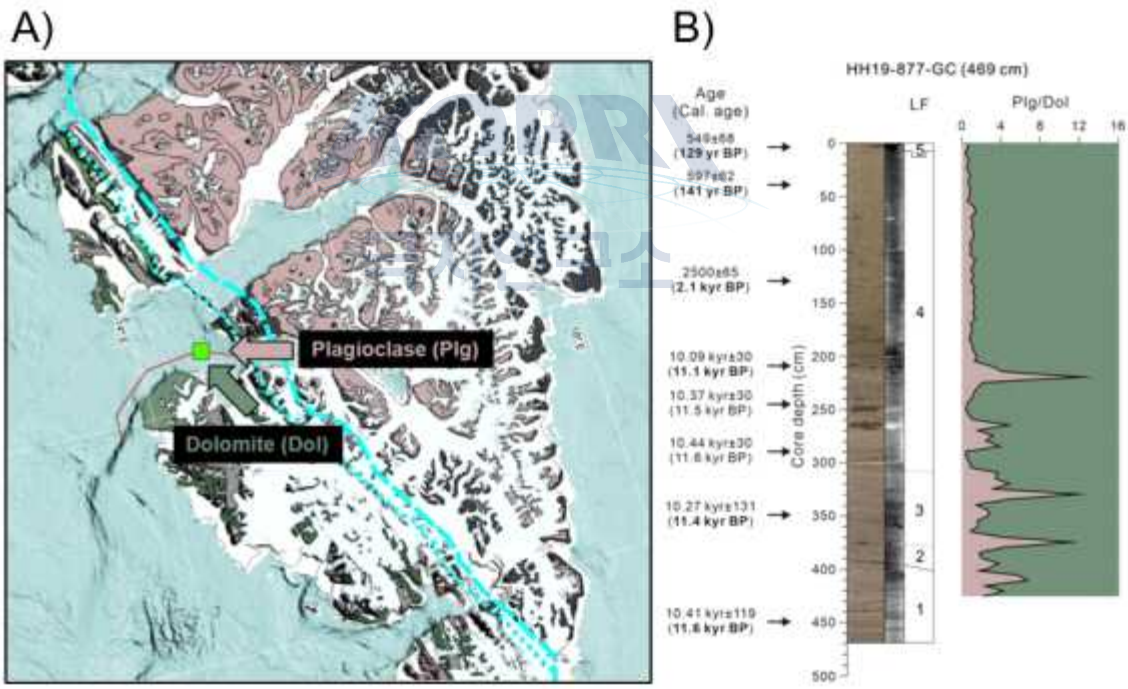


Fig. 85. (A) Tentative provenance of the plagioclase (Plg) and dolomite (Dol) in the Bellsund sediments, and (B) downcore variation in the Plg/Dol ratio of sediment core HH19-877-GC.

- 따라서, 시추코어 HH19-877-GC의 백운석에 대한 사장석의 변화는 벨준트 지역 동부의 반커일렌 피오르드 기원의 퇴적물 유입과 남부의 르셰르셰 피오르드기원의 퇴적물 유입의 시기 변화에 따른 상대적 영향력을 반영하는 것으로 해석됨(Fig. 85). 다만, Plg/Dog 비가 실제 반커일렌 피오르드(동부 지역)와 르셰르셰 피오르드

(남부 지역)의 지괴를 대표할 수 있는 평가하기 위해선, 각 피오르드 내에 표층퇴적물에 대한 광물 분석 결과를 검토해 볼 필요가 있음. 이를 위하여, 다년간 한-노 국제공동탐사로부터 획득한 여러 피오르드 표층퇴적물에 대한 광물조성을 비교하여 사장석과 백운석이 두 피오르드를 대표할 수 있는지 검증해 보고자 함

다) 비데피오르드 빙하 역사 및 퇴적환경 정밀 복원

(1) 연구 목적

- 서스피츠베르겐해류(West Spitsbergen Current, WSC)로 스발바르 서쪽 대륙사면을 따라 유입되는 북대서양 해수(Atlantic Water, AW)는 북극해로 열, 염분을 공급하는 역할을 함. WSC의 세기는 AW를 극지방으로 전달하는 대서양 자오면 순환(Atlantic Meridional Overturning Circulation)의 세기에 의해 조절됨(Luoto et al., 2018). 스발바르 스피츠베르겐 섬 북부에 위치한 비데피오르드의 대륙붕은 북대서양 해수가 흐르는 주요 경로로 이 대륙붕의 퇴적물에는 북대서양 해수에 의한 고(古)해류 활동이 기록되어 있음(Chauhan et al., 2016)
- 입도 엔드멤버 모델링(Grain-size end-member modelling)은 입도 분포 곡선에서 대표적인 엔드멤버 곡선을 추출하여 각각의 퇴적 과정의 영향력을 정성, 정량적으로 평가하는 통계적인 방법(Weltje, 1997; Van Hateren et al., 2018)으로 피오르드의 복잡한 퇴적환경을 이해하는데 도움이 됨. 스발바르 북부 비데피오르드에서 획득한 5점의 퇴적물 코어에 입도 엔드멤버 모델링을 적용하여 암상학적 특징으로 분류한 퇴적상(lithofacies)과 비교한 결과 각각의 엔드멤버가 빙하 활동 및 해류의 영향력을 반영한다는 것을 알 수 있었음
- 본 연구에서는 입도 엔드멤버 모델링을 활용하여 대서양 자오면 순환(Atlantic Meridional Overturning Circulation)으로 대표되는 전지구적인 환경 변화와 빙하 활동으로 대표되는 지역적 환경 변화가 퇴적물에 어떻게 기록되는지 알아보고자 함

(2) 연구 방법

(가) 퇴적물 코어

- 지난 2017년 제 2차 한국-노르웨이 국제공동탐사 기간 중 스발바르 스피츠베르겐 섬 북부 비데피오르드 대륙붕과 피오르드에서 시추한 5점의 중력 퇴적물 코어(Table 15, Fig. 86)를 연구에 활용함

Table 15. Detailed information on gravity cores used.

No.	Core	Latitude(N)	Longitude(E)	Water Depth(m)	Area	Recovery (cm)
1	HH17-1085-GC	80°16.465′	016°12.648′	322	Continental shelf	465
2	HH17-1094-GC	79°44.650′	015°25.319′	148	Outer fjord	378
3	HH17-1100-GC	79°18.265′	015°46.755′	112	Middle fjord	380
4	HH17-1103-GC	79°09.827′	015°57.703′	143	Inner fjord	215
5	HH17-1106-GC	79°00.197′	016°12.704′	160	Inner fjord	434

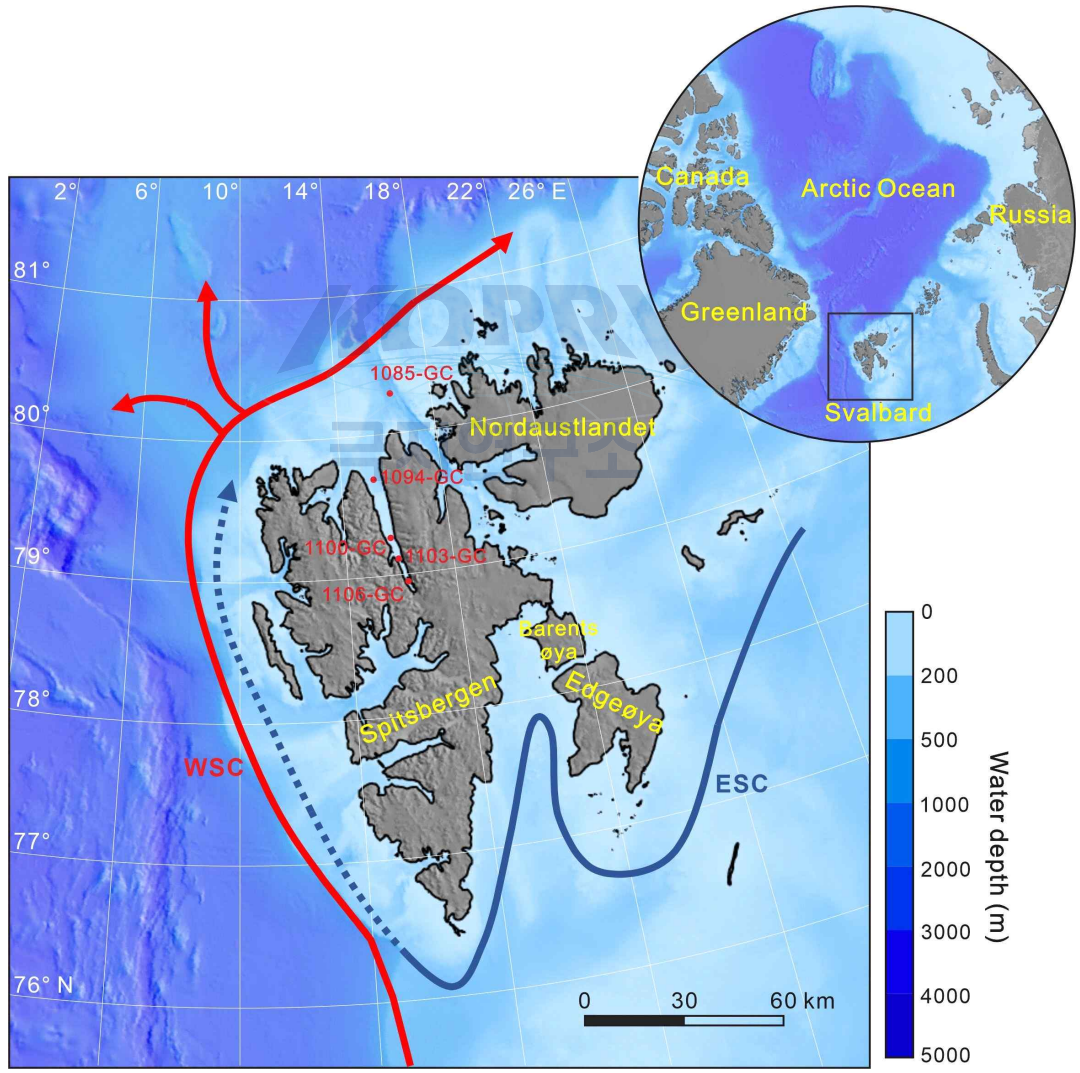


Fig. 86. Map of the Arctic (circle) and the Svalbard archipelago (rectangle). The warm (WSC: West Spitsbergen Current) and cold (ESC: East Spitsbergen Current) currents are represented by red and blue arrows, respectively. The gravity core sites are marked with red circles.

- 각 퇴적물 코어는 대륙붕에서 1점(HH17-1085-GC; 1085-GC), 피오르드 바깥쪽에서 1점(HH17-1094-GC; 1094-GC), 피오르드 중간에서 1점(HH17-1100-GC; 1100-GC), 피오르드 안쪽에서 2점(HH17-1103-GC; 1103-GC, HH17-1106-GC; 1106-GC) 획득함

(나) 퇴적상 분류

- 비데피오르드 대륙붕에 수행된 Jang et al (2021)에서 1085-GC를 활용하여 제시한 퇴적상 분류를 바탕으로 비데피오르드에서 획득한 5점의 퇴적물 코어의 퇴적상을 분류함
- 퇴적상 분류에는 노르웨이 트롬소 대학(UiT)에서 분석한 이미지, X-선 사진, 물성자료(습윤 밀도, 대자율)와 X-선 사진에서 1 mm 이상의 입자를 직접 counting한 빙하 쇄설물 분포 등을 활용함

(다) 연대 모델 구축

- 1103-GC를 제외한 퇴적물 코어들은 Jang et al. (2021, 2023)에 제시된 조개껍질과 유공충의 방사성탄소연대측정 결과를 활용하였고 1103-GC의 방사성탄소연대는 조개껍질과 유공충을 활용하여 Beta Analytic Laboratory (Miami, USA)에서 새롭게 측정함
- 각 퇴적물 코어의 방사성탄소연대결과는 Calib Rev. 8.1.0 프로그램(Heaton et al., 2020)의 Marine20 data set으로 delta R은 -61 ± 37 yrs (Pieńkowski et al., 2022)를 적용하여 보정함. 보정된 연대 결과를 바탕으로 BACON age-depth modelling 프로그램(Blaauw and Christen, 2011)을 이용하여 연대 모델을 구축함

(라) 입도 엔드멤버 모델링

- 비데피오르드에서 획득한 5점의 퇴적물 코어는 약 5 cm 간격으로 부시료를 채취한 뒤 극지연구소에서 레이저회절방식의 입도 분석기 Mastersizer 3000으로 입도 분석을 진행하였으며, 입도 분석으로 획득한 입도 분포 곡선을 활용하여 AnalySize 프로그램(Paterson and Heslop, 2015)으로 엔드 멤버 모델링을 수행함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 퇴적상 분류

- 엽리층리가 발달한 퇴적상: Jang et al. (2021)에서는 엽리층리가 발달한 퇴적상을 엽리층리의 선명도 및 간격을 바탕으로 엽리층리가 잘 발달한 laminated mud (Lm)와 상대적으로 덜 발달한 Weakly laminated mud (WLm)으로 분류함(Table 16). 엽리층리가 발달한 퇴적상은 빙하 전면부에서 유출되는 융빙수에 의해 부유한 입자들이 밀도차에 의해 퇴적되면서 형성될 수 있음(Ó Cofaigh and Dowdeswell, 2001)

- 구조적 특징이 없는 퇴적상: Jang et al. (2021)에서는 구조적 특징이 없는 퇴적상을 생교란 정도에 따라 massive mud (Mm)와 bioturbated sandy mud (Bsm)으로 분류함 (Table 16). 구조적 특징이 없는 퇴적상은 빙하가 후퇴하여 빙하 활동의 영향력이 줄어든 환경에서 퇴적될 수 있음
- 빙하 쇄설물의 영향을 받은 퇴적상: Jang et al. (2021)에서는 조립한 입자가 집중된 하나의 층(layer)을 구분하였지만 퇴적상으로는 분류하지는 않음. 본 연구에서는 다른 퇴적물 코어들에서도 조립한 입자가 집중된 부분이 나타나 두 개의 퇴적상을 추가적으로 분류함. 하나는 엽리층리가 발달한 퇴적상 사이에서 조립한 빙하 쇄설물이 밀집된 Diamicton with laminae (DmL)이고 다른 하나는 구조적 특징이 없고 조립한 빙하 쇄설물이 밀집된 Massive Diamicton (Dmm)임(Table 16, Fig. 87). 빙하 쇄설물은 빙하 전면부에서 떨어져 나온 빙산(DmL)이나 빙하 기저면에서 빙하의 움직임에 의해 퇴적(Dmm)될 수 있음
- 퇴적물 코어별 퇴적상 분포: 비데피오르드 대륙붕을 포함한 피오르드 바깥쪽의 퇴적물 코어(1085-GC, 1094-GC)에서는 순차적으로 Lm, WLm, Mm, Bsm이 퇴적되며 피오르드 중간과 안쪽의 퇴적물 코어(1100-GC, 1103-GC, 1106-GC)에서는 WLm이 주를 이룸(Fig. 87). DmL은 각 퇴적물 코어에서 엽리층리가 발달한 퇴적상의 중간에서 나타나고 Dmm은 1100-GC의 가장 아래쪽에서만 보여짐

KOPRI 극지연구소

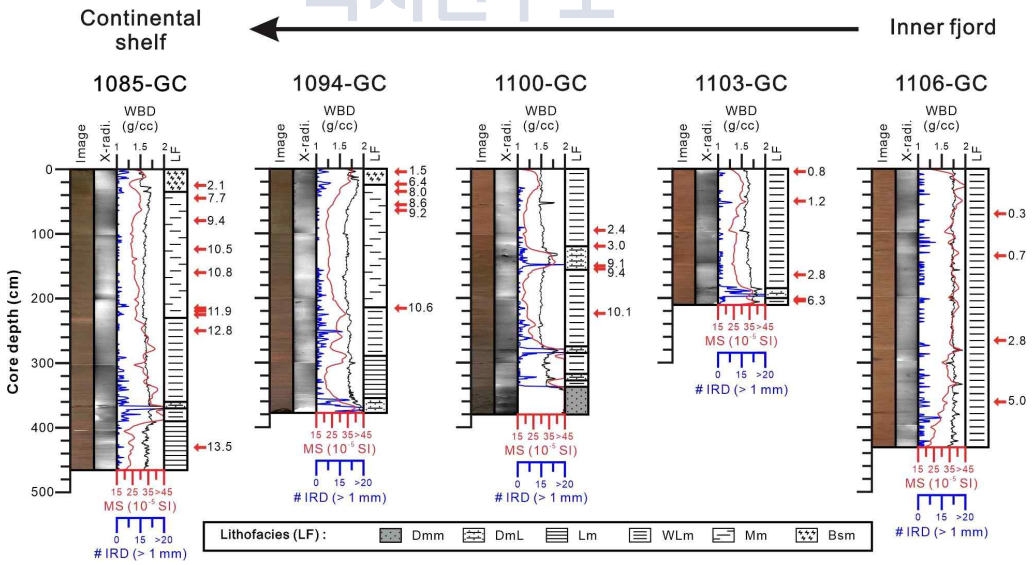
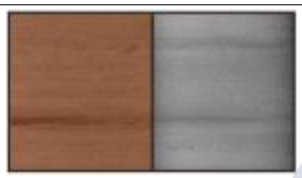


Fig. 87. Line scanning image, X-radiograph, wet bulk density (WBD), magnetic susceptibility (MS), number of ice-rafted debris (IRD; > 1 mm), and lithofacies (LF) for cores 1085-GC, 1094-GC, 1100-GC, 1103-GC, and 1106-GC. Red arrows indicate the uncalibrated AMS ^{14}C ages in ka.

Table 16. Lithofacies and their interpretation.

Facies	Image & X-ray	Description	Interpretation
Massive diamicton (Dmm)		Very dark gray; matrix-grain-supported sandy mud, IRD (> 1 mm)-rich; very poorly sorted; absence of primary structure; sharp and flat upper boundaries	Grounded ice deposit (subglacial environment)
Diamicton with laminae (DmL)		Mostly dark grayish brown (1085-GC), light reddish gray (1100, 1103-GCs), Alteration between dark reddish gray and dark grayish brown (1094-GC); matrix-supported sandy mud, IRD-rich; very poorly sorted; partly laminated; sharp and flat facies boundaries	Iceberg-rafted debris deposit (glacier-proximal environment)
Laminated mud (Lm)*		Alteration between dark reddish gray and dark grayish brown (1085, 1094-GCs), and between dark reddish gray and very dark gray (1091, 1100, 1103-GCs); silt-rich and clay-rich muds without IRD; very poorly sorted; distinct and well laminated with good lateral continuity, lamination subparallel to slightly wavy; relatively sharp facies boundaries	Meltwater plume deposit (glacier-proximal environment)
Weakly laminated mud (WLm)*		Mostly dark grayish brown (1085, 1094-GCs), dark reddish brown (1091-GC), light reddish gray (1103, 1106-GCs); relatively silt-rich, IRD rare; poorly sorted; lamination blurred and more poorly defined upward in the core; relatively sharp lower boundaries and gradual upper boundaries	Meltwater plume deposit (glacier-proximal environment)
Massive mud (Mm)*		Dark grayish brown (1085, 1094-GCs); dark reddish brown (1091-GC); upward coarsening, IRD rare; poorly sorted; no primary structure, homogenous; generally gradational facies boundaries	Hemipelagic deposit affected by current (glacier-distal environment)
Bioturbated sandy mud (Bsm)		Dark grayish brown; sandy mud with some IRD; poorly sorted; intensely bioturbated; sharp lower boundary (1085-GC) or gradual lower boundaries (1091, 1094-GCs)	Hemipelagic deposit affected by sea-ice (glacier-distal environment)

(나) 연대 모델

- 탄소 연대 결과를 바탕으로 구축된 연대 모델에서 비데피오르드 대륙붕의 1085-GC는 약 17,000년의 퇴적물 기록을 보여줌(Fig. 88A)
- 비데피오르드에서 획득한 퇴적물 코어들은 안쪽으로 갈수록 더 짧은 연대 기록을 나타내는데 1094-GC는 약 15,000년(Fig. 88B), 1100-GC는 약 약 14,000년(Fig. 88C), 1103-GC는 약 7,000년(Fig. 88D), 1106-GC는 약 5,000년(Fig. 88E)의 퇴적물 기록을 보여줌
- 퇴적률의 경우 1106-GC는 평균 112.2 cm/kyr로 높게 나타나는데 비해 나머지 코어들은 평균 47.8-56.8 cm/kyr로 상대적으로 낮게 나타나는데 1106-GC를 제외한 퇴적물 코어들에서 약 10,000년 전에서 2,000년 전까지 퇴적률이 다른 기간에 비해 아주 낮은 영향으로 보임(Fig. 88)

(다) 입도 end-member 그룹(EM1-3)의 특징

- 각 퇴적물 코어에서 2-6개 씩 총 22개로 추출된 입도 엔드멤버(Fig. 89)는 입도 모드 및 분포 곡선의 형태 등 입도 특징에 따라 3개의 엔드멤버 그룹(EM1-EM3)으로 그룹화함(Fig. 90)
- EM1은 0.05-100 um에 주로 분포하며 이중 모드를 특징으로 함(Fig. 90A). EM1은 엔드멤버 그룹 중 가장 세립한 주요모드(4-15 um)를 나타내고 0.1-1 um의 아주 세립한 입자를 많이 포함함. 세립한 주요 모드와 아주 세립한 입자를 많이 포함한다는 점을 고려할 때, EM1의 분포 곡선은 엽리층리가 발달한 퇴적상(Lm, WLm)의 입도 분포 곡선과 유사함(Figs. 90A, 91)

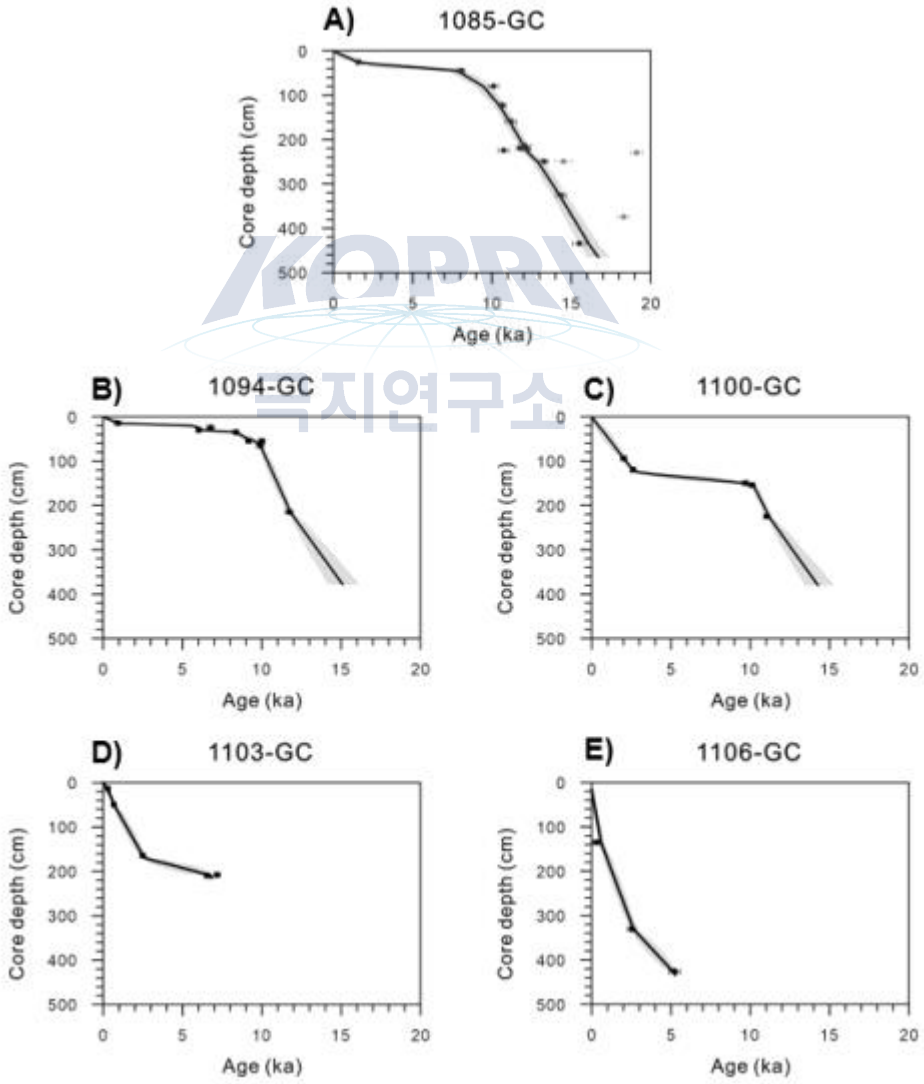


Fig. 88. Age-depth models of sediment cores for (A) 1085-GC, (B) 1094-GC, (C) 1100-GC, (D) 1103-GC, and (E) 1106-GC.

- EM2는 0.4–150 um에 주로 분포하며 EM1과 마찬가지로 이중모드를 특징으로 하지만 EM1보다 20 um 이상의 조립한 입자를 많이 포함함(Fig. 90B). EM2의 주요 모드는 EM1보다 조립한 26–55 um에서 형성됨. 20 um 이상의 조립한 입자를 많이 포함한다는 점을 고려할 때, EM2의 분포 곡선은 구조적 특징이 없는 퇴적상(Mm, Bsm)의 입도 분포와 유사함(Figs. 90B, 91)
- EM3는 0.1–1000 um에 주로 분포하는데 다른 엔드멤버 그룹과 달리 다중 모드를 특징으로 하고 입도 분포가 불규칙함(Fig. 100C). EM3는100–1000 um의 아주 조립한 입자를 많이 포함하는 것으로 보아 분포 곡선이 빙하 쇄설물의 영향을 받은 퇴적상(DmL, Dmm)의 입도 분포 곡선과 유사함(Figs. 90C, 91)

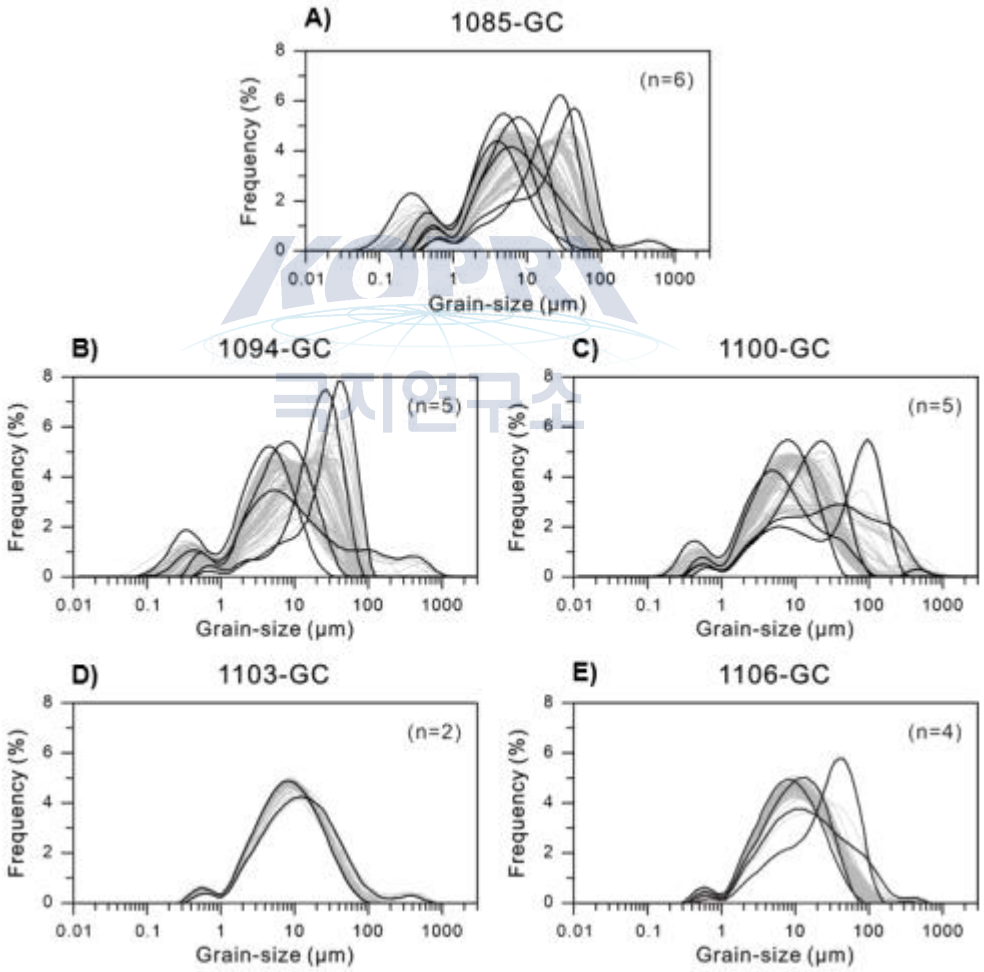


Fig. 89. Grain size end–member distribution curves (black lines) for sediment cores (A) 1085–GC, (B) 1094–GC, (C) 1100–GC, (D) 1103–GC, and (E) 1106–GC. Grey lines are the grain–size distribution curves of each sampling depth for the cores.

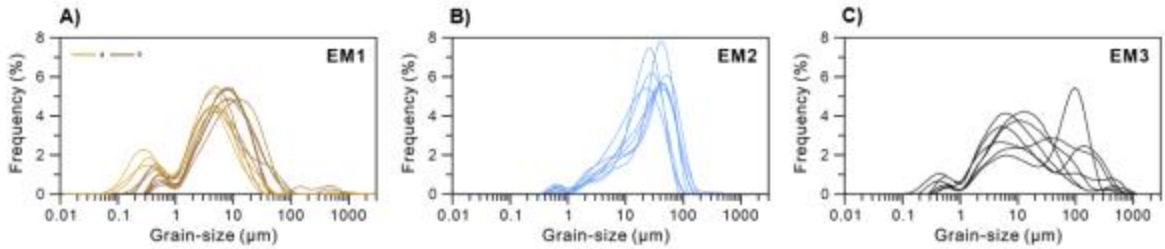


Fig. 90. Grain size end-member groups for (A) EM1, (B) EM2, and (C) EM3.

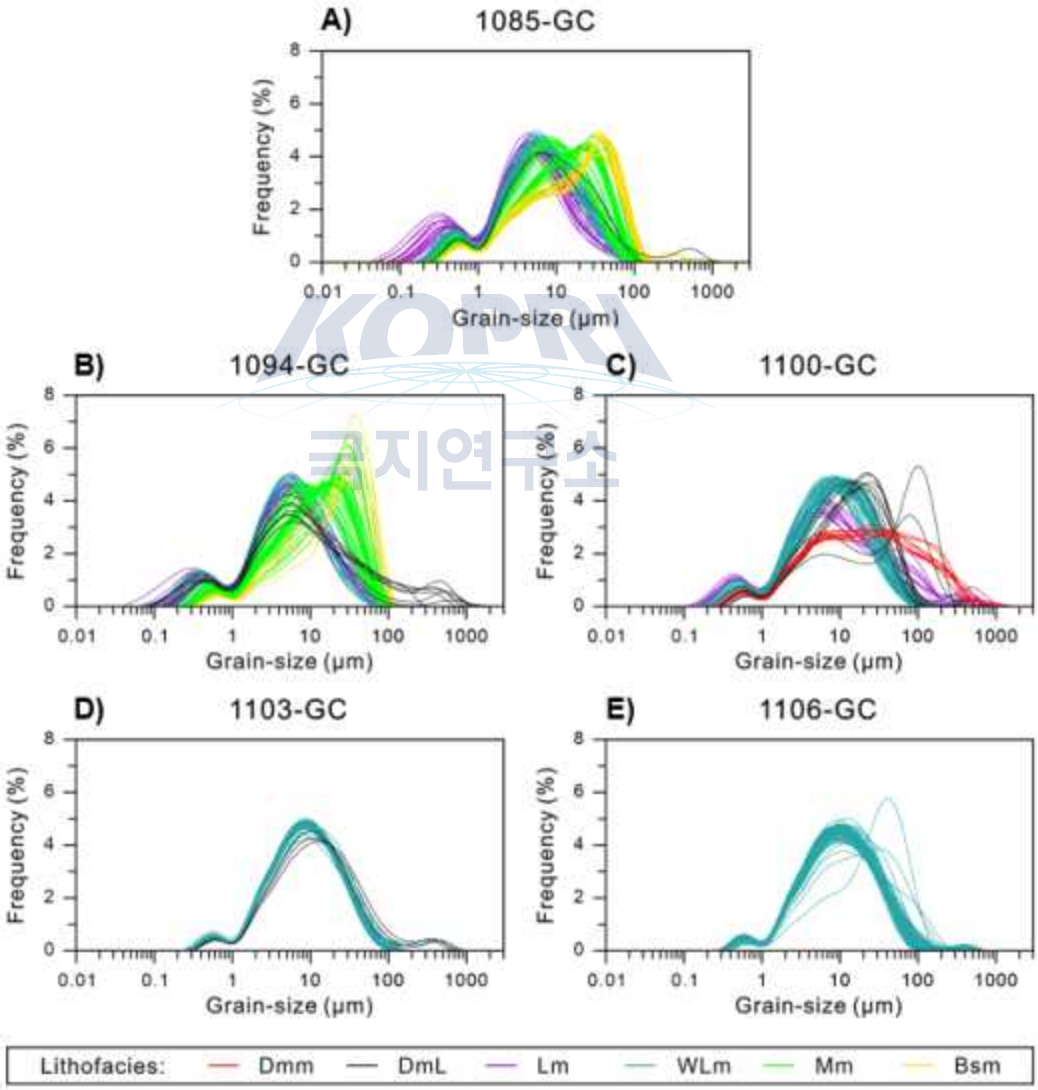


Fig. 91. Grain size distribution curves of each lithofacies for sediment cores (A) 1085-GC, (B) 1094-GC, (C) 1100-GC, (D) 1103-GC, and (E) 1106-GC.

(라) 퇴적물 코어별 입도 end-member 그룹(EM1-3) 분포

- EM1의 비율은 Lm, WLm 퇴적상에서 평균 80%로 높게 나타나는 것(Fig. 92)으로 보아 EM1은 빙하 전면부에서 유출된 융빙수가 부유시킨 입자가 퇴적된 것으로 여겨짐. 부유된 세립한 입자들은 응집한 뒤 침전되어 퇴적될 수 있음(Elverhøi et al., 1983; Chauhan et al., 2016; Bartels et al., 2017)
- EM2의 비율은 Mm, Bsm 퇴적상에서 평균 64%로 지배적(Fig. 92)이므로 EM2는 빙하 활동의 영향이 줄어든 환경의 퇴적으로 볼 수 있음. EM2의 주요 입도 범위(20-100 um)가 입도를 이용하여 해류의 상대적인 세기를 평가하는 sortable silt (SS) (McCave et al., 1995)의 입도 범위(10-63 um)와 유사한 것으로 보아 EM2는 상대적으로 해류의 영향이 강한 환경에서 퇴적된 것으로 보임. 비데피오르드에서 획득한 퇴적물 코어들의 SS 평균과 EM2의 비율은 상당히 유사한 특징을 보이는데 EM3 또한 10-63 um의 입자를 다량 포함하므로 EM3의 비율이 높은 곳에서는 SS의 평균이 EM2의 비율보다 높게 나타나는 왜곡 현상이 발생함(Fig. 93)
- EM3의 비율은 DmL, Dmm 퇴적상에서 평균 75%로 높게 나타나므로 빙산이나 빙하 기저면에서 빙하 쇄설성 입자가 퇴적된 것으로 보임(Fig. 92). 스발바르 피오르드에서 빙하 쇄설성 입자는 넓은 입도 범위에서 불규칙한 입도 특징을 갖는 것으로 제시된 바 있음(Jonkers et al., 2012)
- 비데피오르드 대륙붕 퇴적물 코어(1085-GC)와 비데피오르드의 바깥 퇴적물 코어(1094-GC)에서는 약 11,000년 전까지 빙하 융빙수의 영향을 많이 받는 퇴적환경에서 엔드멤버 그룹 중 EM1의 비율이 가장 높게 나타남(Fig. 92). 두 퇴적물 코어에서 약 11,000년 전 이후로는 빙하가 피오르드 안쪽으로 후퇴하면서 해류의 영향을 많이 받으며 EM2의 비율이 지배적임

- 비데피오르드의 중간에서 획득한 퇴적물 코어(1100-GC)는 약 12,000년 전까지 엔드멤버 그룹 중 EM3의 비율이 지배적인데 약 13,500년 전까지는 Dmm 퇴적상이 나타나는 것으로 보아 빙하 기저면에서 빙하 쇄설성 입자가 퇴적된 것으로 보이고 이후 약 12,000년 전까지는 DmL 퇴적상이 나타나는 것으로 보아 빙산에 의해 빙하 쇄설성 입자가 퇴적된 것으로 여겨짐(Fig. 92). 같은 퇴적물 코어에서 약 10,000년 전까지는 EM1의 비율이 높게 나타나고 약 3,000년 전까지는 EM2의 비율이 지배적이지만 이후로는 EM1의 비율이 다시 가장 높게 나타남
- 비데피오르드 안쪽의 두 퇴적물 코어(1103-GC, 1106-GC)에서는 약 7,000년 전 이후로 전체적으로 EM1의 비율이 높게 나타나는 것(Fig. 93)으로 보아 지속적으로 빙하 융빙수의 영향을 받은 것으로 여겨짐
- 1106-GC를 제외한 다른 퇴적물 코어에서 약 10,000년 전에서 2,000년 전까지 퇴적률이 낮게 나타나는 것은 퇴적물의 주요 공급원인 빙하의 영향이 줄어들고 해류의 영향으로 퇴적물 고르기(winnowing)가 이루어졌기 때문으로 보임

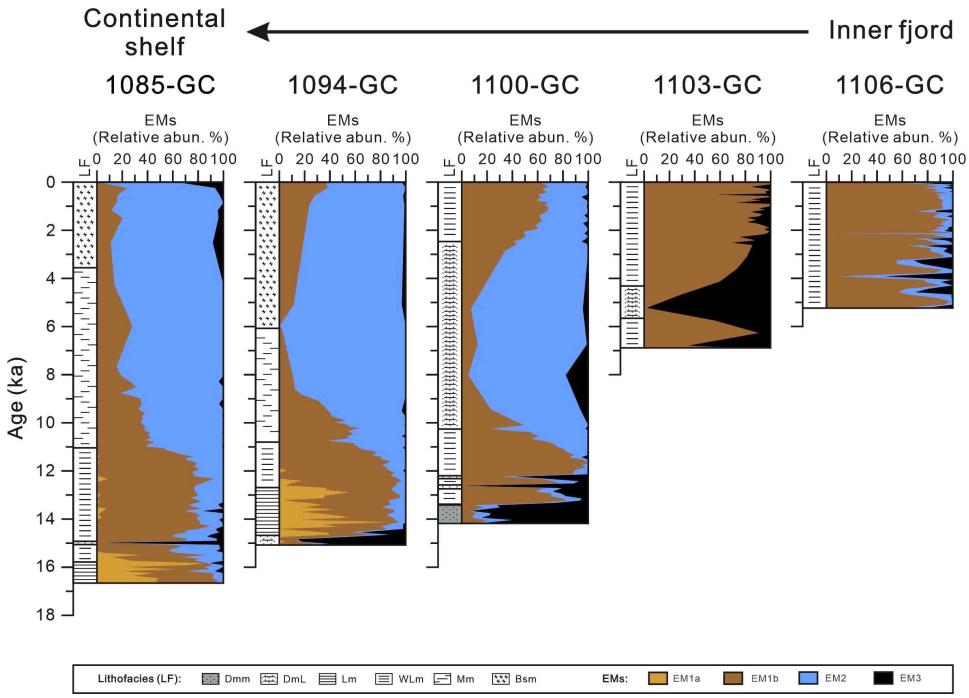


Fig. 92. Variation in relative abundances of grain size end-member groups (EM1-EM3) compared with lithofacies for sediment cores 1085-GC, 1094-GC, 1100-GC, 1103-GC, and 1106-GC against age.

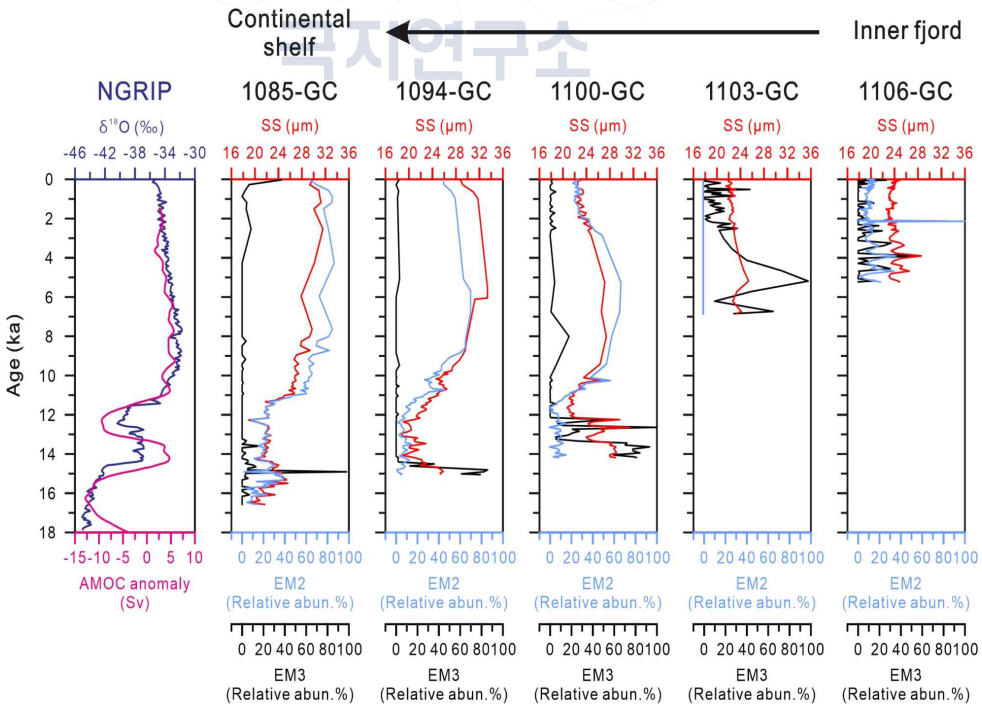


Fig. 93. Variations in EM2, EM3, and sortable silt (SS) for sediment cores 1085-GC, 1094-GC, 1100-GC, 1103-GC, and 1106-GC compared with Greenland NGRIP $\delta^{18}O$ (NGRIP community members, 2004) and the Atlantic Meridional Overturning Circulation anomaly (Ritz et al., 2013).

(마) 환경변화 해석

- 연대 모델의 불완전성은 존재하지만, 비데피오르드 대륙붕에서 획득한 1085-GC에서 약 16,000년 동안의 EM2 비율 변화는 Ritz et al. (2013)이 모델링한 대서양 자오면 순환 변화와 양상이 상당히 유사함(Fig. 93). 다만, 약 15,000년 전에서 13,000년 전의 기간에 모델링된 대서양 자오면 순환은 세기가 증가하지만 1085-GC에서 EM2의 비율은 증가하지 않고 일정한 차이를 보임(Fig. 93). Ślubowska et al. (2005)의 유공충 동정 연구에서 이 시기에 따뜻한 해수 유입의 증가를 지시하는 *Cassidulina neoteretis*와 강한 해류를 지시하는 *Cibicides lobatulus*가 증가하였다는 보고에 따르면, 이 기간에 따뜻한 대서양 해수의 유입이 강했을 것으로 여겨짐
- 대서양 해수가 강하게 유입되어도 EM2의 비율이 증가하지 않는 것은 다른 퇴적 과정의 영향을 받았던 것으로 볼 수 있음. 1085-GC에서 약 15,000년 전에서 13,000년 전의 기간은 빙하 전면부에서 유출되는 혼탁한 융빙수의 영향을 나타내는 EM1의 비율이 60% 이상으로 가장 두드러짐(Fig. 92). 즉, 이 시기에는 해류의 유입보다 융빙수의 유출이 퇴적 과정에 더 큰 영향을 미쳤을 것으로 생각됨
- 비데피오르드의 바깥과 중간에서 획득한 1094-GC와 1100-GC의 EM2 비율 변화도 1085-GC의 EM2 비율 변화와 유사한 경향성을 보임(Fig. 93). 유사한 EM2 비율 변화는 대서양 해류의 유입이 피오르드 중간까지 영향을 미친다는 것을 나타낼 수 있음. 피오르드 바깥과 중간에서도 약 15,000년 전에서 13,000년 전에 EM2의 비율 변화가 뚜렷하지 않은데 1094-GC는 EM1의 비율이 80% 이상으로 높게 나타나는 융빙수의 영향이 지배적인 퇴적환경이고 1100-GC는 EM3의 비율이 70% 이상으로 높게 나타나는 빙하 기저 퇴적환경이기 때문으로 여겨짐(Fig. 92)
- 비데피오르드 안쪽의 1103-GC에서는 EM2의 비율이 0%로 일정함(Fig. 93). 피오르드 안쪽은 대서양 해수 유입이 이루어지지 않아 빙하 활동에 의한 퇴적환경이 조성된 것으로 보임. 비데피오르드 안쪽의 1106-GC는 1103-GC와 달리 EM2의 비율이 약 20-40% 사이에서 변화(Fig. 93)하는데 이는 피오르드 안쪽에서 바깥쪽으로 흐르는 해류의 영향으로 볼 수 있음. 피오르드 안쪽에서는 빙하에서 유출되는 융빙수에 의해 해류가 발달할 수 있고(Meslard et al., 2018, Torsvik et al., 2019), 더 나아가 해빙 형성 등으로 밀도가 높아진 겨울철 해수가 대류하면서 해류가 발생할 수 있음(Cottier et al., 2007, 2010; Rasmussen and Thomsen, 2014, 2015)
- 비데피오르드 중간에서 대륙붕까지의 퇴적물은 대서양 해류 유입의 영향을 받으며 대서양 자오면 순환의 세기 변화 같은 전지구적인 환경 변화를 잘 반영한다고 볼 수 있음. 하지만, 빙하 활동 등에 의한 지배적인 지역적 환경 변화를 고려하지 않는다면 전지구적인 환경 변화를 이해하는데 어려움을 겪을 수 있음. 입도 엔드멤버 모델링은 정량적인 방법으로 퇴적 환경 요소들의 영향력을 나타내는데 도움을 줄 수 있을 것으로 여겨짐

라) 콩스피오르드 퇴적환경 복원

(1) 연구 목적

- 스발바르 피오르드에서는 빙하의 전진과 후퇴로 인한 침식으로 대륙붕 지역에 해곡(trough) 지형이 발달함(Vaneste et al., 2011)
- 스발바르 대륙붕 지역에 발달한 해곡 지형으로 해수가 유입되면 수심 경사면을 따라 지형류(topographically steered current)가 형성됨(Nilsen et al., 2016; Menze et al., 2020)
- 스발바르 스피츠베르겐 섬 서쪽 해안에 위치한 콩스피오르드 해곡(Figs. 94, 95)에서는 대서양 해수(Atlantic Water)가 유입되어 지형류를 형성함(Fig. 95A)
- 본 연구에서는 콩스피오르드 해곡에서 획득한 퇴적물 코어를 활용하여 지형류의 영향으로 퇴적률이 어떻게 변화하는지 알아보고자 함

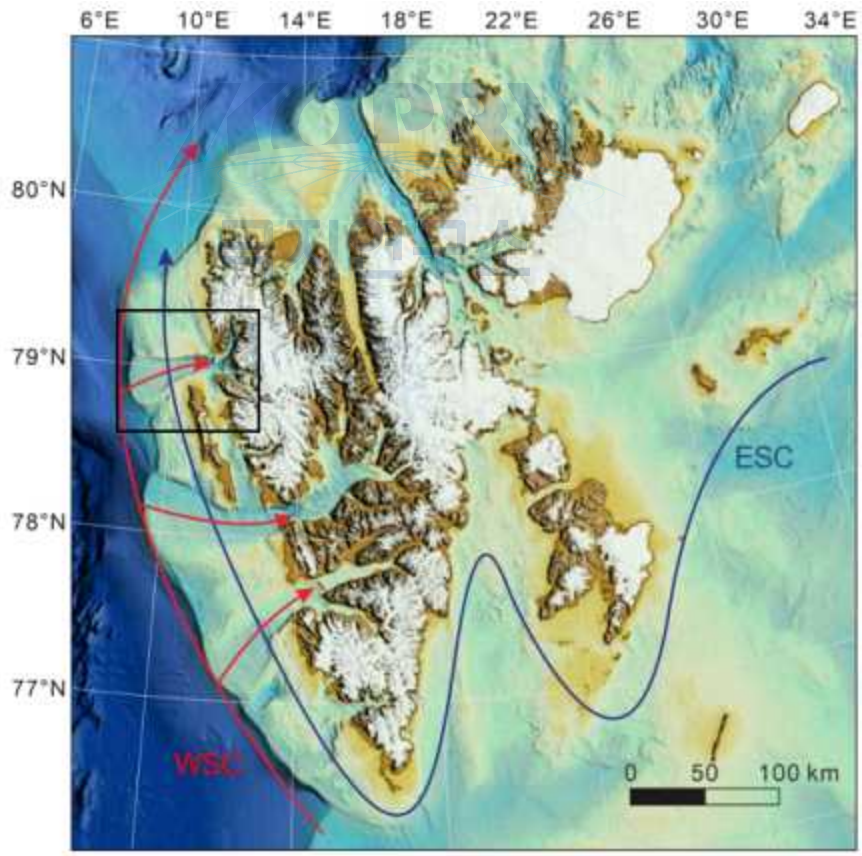


Fig. 94. Overview map of te Svalbard archipelago. Black rectangle indicates the study area. The warm (WSC: West Spitsbergen Current) and cold (ESC: East Spitsbergen Current) currents are represented by red and blue arrows, respectively.

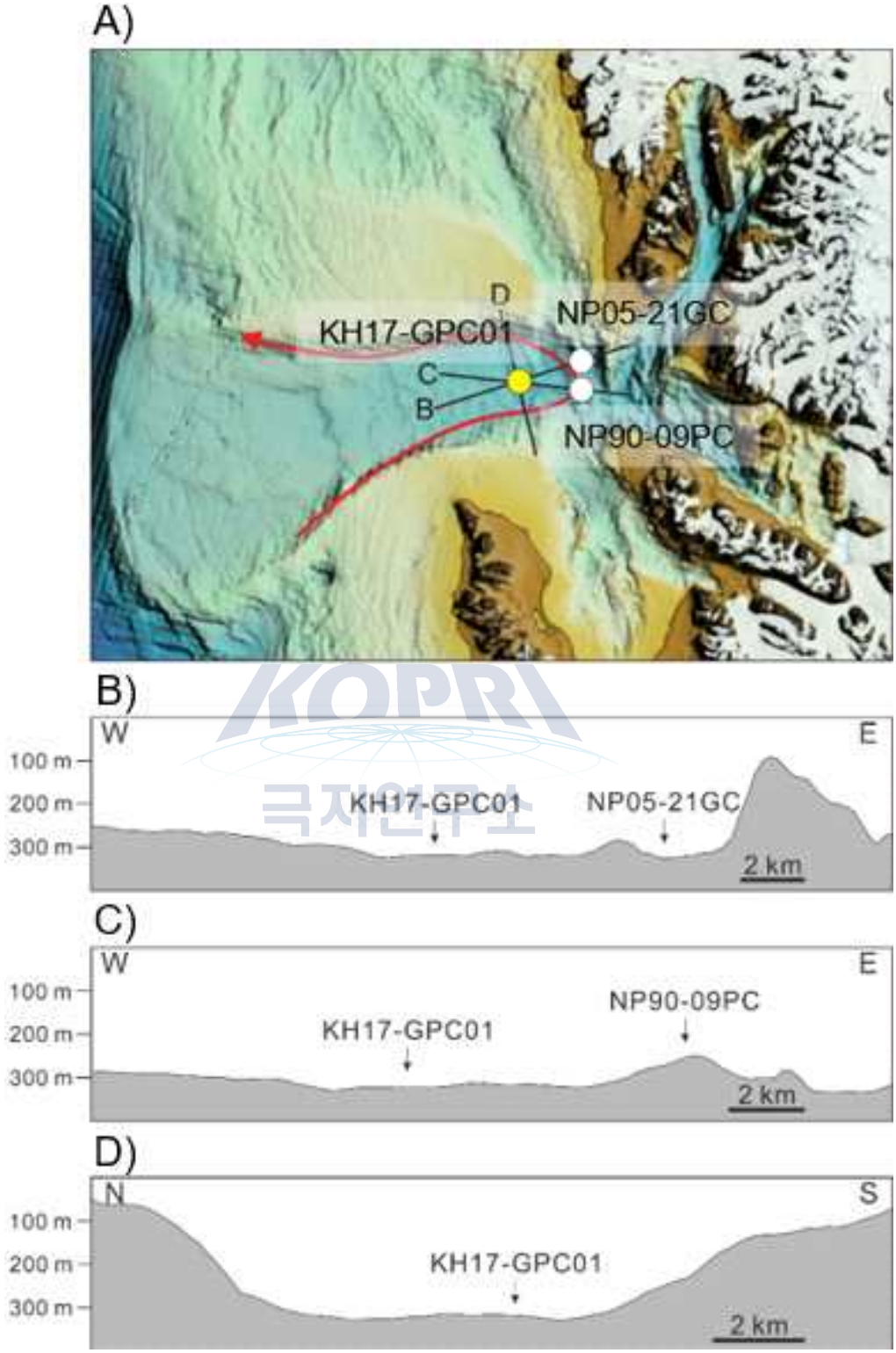


Fig. 95. (A) Map of the study area. The yellow circle indicates the site of sediment core KH17-GPC01, while the white circles represent the sites of sediment cores NP05-21GC and NP90-09PC. Atlantic Water inflow is marked with a red arrow. B, C, and D lines are represented by black lines. (B-D) Topography along the black lines.

(2) 연구 방법

(가) 퇴적물 코어

- 지난 2019년 노르웨이 지질조사소(NGU)가 RVIB Kronpris Haakon을 이용하여 콩스피오르드 해곡 중심부에서 획득한 KH17-GPC01 (79.027° N, 10.756° E, 수심 325 m)을 활용하였고 콩스피오르드 해곡 주변부에서 획득한 두 퇴적물 코어 NP05-21GC (79.051° N, 11.090° E, 수심 327 m; Skirbekk et al., 2010)와 NP90-09PC (79.022° N, 11.104° E, 수심 276 m; Landvick et al., 2005)를 비교 대상 코어로 이용함(Fig. 95A)

(나) KH17-GPC01 입도 end-member 모델링

- 극지연구소에서 약 5 cm 간격으로 측정한 입도 자료의 입도 분포 곡선을 이용하여 AnalySize 프로그램(Paterson and Heslop, 2015)으로 엔드 멤버 모델링을 수행함

(다) 연대 모델 구축

- KH17-GPC01의 연대 모델은 퇴적물 코어에서 획득한 조개껍질과 유공충의 방사성탄소연대를 AWI MICADAS (독일)에서 추가로 분석한 결과와 기존 방사성탄소연대 결과를 이용하였고 비교 대상 코어의 연대 모델은 이전 연구에서 제시된 방사성탄소연대 결과를 활용함.
- 연대 모델 구축을 위해 각 퇴적물 코어의 방사성탄소연대 결과는 Calib Rev. 8.1.0 프로그램(Heaton et al., 2020)의 Marine20 data set으로 delta R은 −61 ± 37 yrs (Pieńkowski et al., 2022)를 적용하여 보정하였음. 연대 모델 구축에는 BACON age-depth modelling 프로그램(Blaauw and Christen, 2011)을 이용함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) KH17-GPC01 입도 end-member 재설정 및 각 end-member의 특징

- KH17-GPC01의 입도 end-member는 분포 곡선의 유사성을 고려하여 총 4개의 end-member에서 총 3개의 end-member (EM1-3)로 재설정됨(Fig. 96A)
- EM1의 분포는 주로 0.3-80 um에서 나타나며, 200-1000 um의 조립한 입자도 일부 포함함(Fig. 96B). 주요모드가 5.5 um에서 형성되는 EM1의 세립한 입자들은 빙하 융빙수나 육지에서 유입되는 강물 혹은 연안 침식의 영향으로 부유된 입자들이 퇴적된 것으로 보임. 200-1000 um의 조립한 입자들은 빙하 전면부에서 떨어져 나온 빙산들이 이동하다가 퇴적시킨 것으로 생각됨
- EM2의 분포는 주로 0.5-300 um에서 나타나며 주요모드는 EM1보다 약간 조립한 10 um에서 형성됨(Fig. 96C). EM2도 EM1과 같은 방식으로 부유된 입자들이 퇴적되었을 것으로 여겨짐

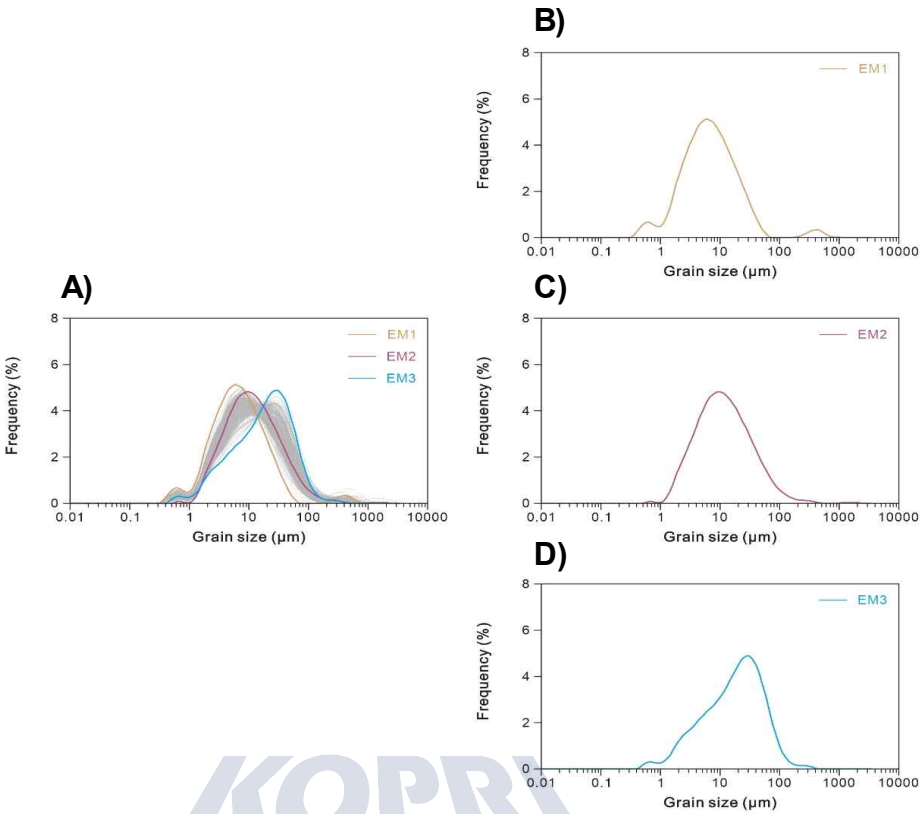


Fig. 96. (A) Grain size distribution curves of each sampling depth for sediment core KH17-GPC01 and three end-members. (B-D) Grain size distribution curves of each end-member.

KOPRI 극지연구소

- EM3의 분포는 주로 0.4-300 um에서 나타나며 주요모드는 다른 두 엔드멤버보다 상당히 조립함(30 um) (FIg. 96D). 10-63 um 입자가 59%를 차지하는데 해류의 상대적인 세기를 지시하는 sortable silt (SS; McCave et al., 1995)의 입자를 많이 포함하는 것으로 보아 해류의 영향을 강하게 받은 것으로 보임

(나) 연대 모델

- KH17-GPC01에서 퇴적률은 약 12,000년 전부터 약 9,000년 전까지 높게 나타나고 이후 변동성이 심하지만 이전 시기보다 퇴적률이 낮게 나타남(Fig. 97)
- 비교 대상 퇴적물 코어인 NP05-21GC에서는 퇴적률이 약 10,000년 전까지 높게 나타나다가 급격하게 낮아지는 것을 볼 수 있고, NP90-09GC에서는 퇴적률이 약 12,000 전부터 급격하게 낮아졌으며 약 9,000년 동안은 약 48 cm 밖에 퇴적되지 않음(Fig. 97)
- 코어의 윗부분과 아랫부분에서 보다 정밀한 퇴적률 결과를 얻기 위해 47, 1386.5, 1401.5, 1502cm에서 조개껍질과 유공충을 획득하여 독일 AWI-MICADAS에 탄소

(^{14}C) 연대측정 분석을 의뢰하였음

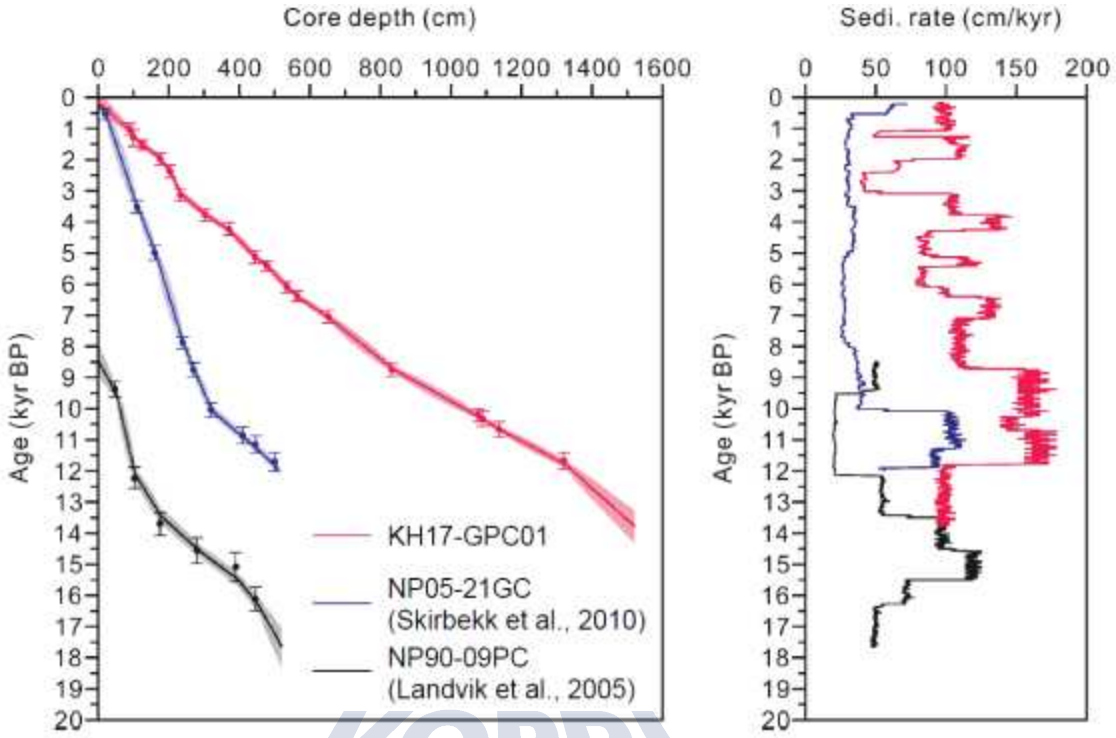


Fig. 97. Age-depth models and sedimentation rates for sediment cores KH17-GPC01, NP05-21GC, and NP90-09PC.

KOPRI
극지연구소

(다) 퇴적 환경 변화

- 콩스피오르드 해곡 지역은 지질학적 연대에 따라 다른 퇴적 환경을 나타냄(Fig. 98)
- Last deglaciation (Last glacial maximum 이후 약 11,700년 전)은 평균 SS와 EM3의 비율이 낮은 것으로 보아 해류의 영향력이 약한 시기였으며 빙하 후퇴 양상(Fig. 99)을 고려했을 때 부유된 입자들은 융빙수 유출의 영향을 받은 것으로 보임
- 홀로세 초기(약 11,700년 전부터 8,000년 전)은 평균 SS와 EM3의 비율이 위로 갈수록 증가하는 것으로 보아 해류의 영향력이 강화되는 시기로 생각됨
- 홀로세 중기(약 8,000년 전부터 4,000년 전)은 평균 SS와 EM3의 비율이 위로 갈수록 감소하는 것으로 보아 해류의 영향력이 약화되는 시기로 여겨짐
- 홀로세 후기(약 4,000년 전에서 현재)은 평균 SS와 EM3의 비율이 낮고 EM1과 EM2의 비율이 높은 것으로 보아 부유된 입자들이 주로 퇴적되는 환경으로 보임
- 콩스피오르드 해곡 지형의 중심부에서 획득한 퇴적물 코어(KH17-GPC01)가 가장자리에서 획득한 퇴적물 코어들(NP05-21GC, NP90-09GC)보다 다량의 퇴적물이 공급되는 육상에서 멀리 떨어져 있는데 퇴적률이 높게 나타나는 것으로 보아 부유된 퇴적물이 해류에 따라 이동되다가 해곡 중심 지형에서 와(eddy)가 발달하여 퇴적되는 것으로 보임(Fig. 95A)
- KH17-GPC01의 시기에 따른 퇴적률 변화는 EM3의 비율 변화와 경향성이 유사

(Fig. 98)한데 해류가 강해질수록 와가 더 잘 발달하여 다량의 퇴적물을 퇴적시키는 것으로 생각됨

- 해류의 흐름이 발생하는 곳에 위치한 NP90-09GC는 다른 두 퇴적물 코어보다 약 12,000년 전 이후로 퇴적률이 급격하게 낮아지는데 EM3의 비율 증가와 조립해진 평균 SS를 고려할 때, 강해진 해류의 흐름이 퇴적보다 침식을 발생시키는 것으로 보임
- 콩스피오르드 지역은 약 11,000년 전 이후로 빙하가 육상으로 후퇴(Fig. 99)하여 퇴적물 공급이 줄어들고 이는 NP05-21GC의 퇴적률에서 잘 나타남. 약 11,000년 전 이후로 퇴적률이 높게 유지될 수 있도록 퇴적물을 공급하는 과정이 무엇인지 추후 연구를 통해 해석할 필요가 있음

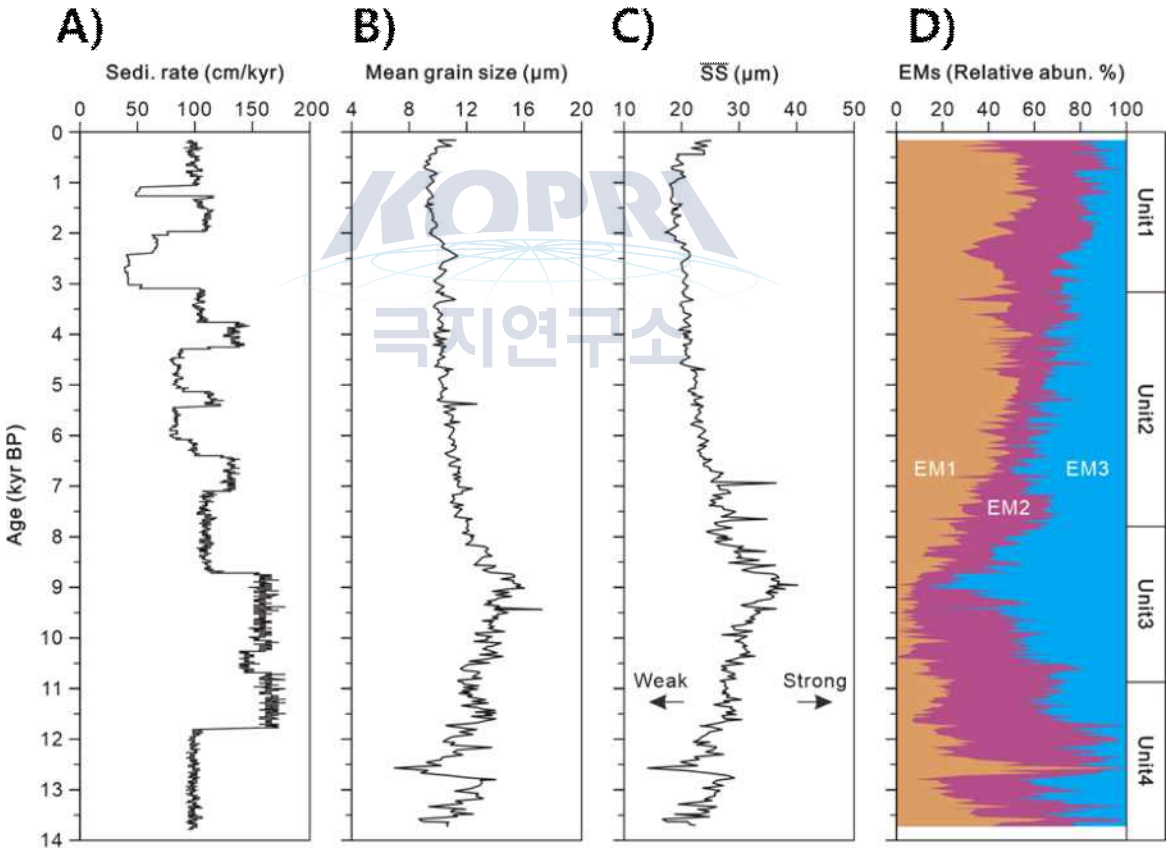


Fig. 98. (A) Sedimentation rates, (B) mean grain size, (C) mean sortable silt, and (D) relative abundance of grain size end-members, with the age scale.

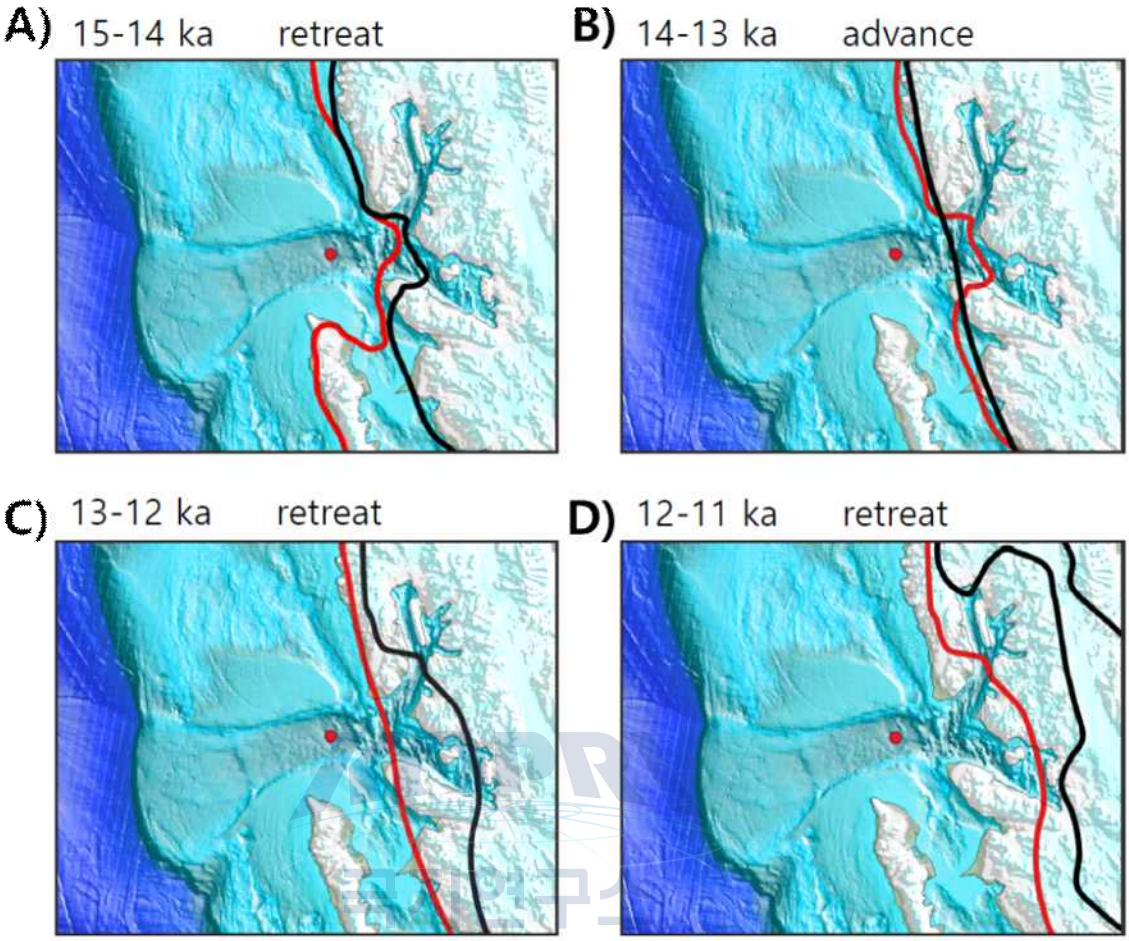


Fig. 99. Glacial distribution: (A) 15–14 ka, (B) 14–13 ka, (C) 13–12 ka and (D) 12–11 ka in the study area. The red circle indicates the site of sediment core KH17-GPC01. Red lines represent older ages than the black lines.

마) 자생성 퇴적물 내 희토류 패턴 기반 황화철 풍화 추적

(1) 연구 목적

- 해양 퇴적물의 침출 실험을 통해 획득되는 수산화철(Fe-oxyhydroxide) 기반의 자생 성분(authigenic phases)은 주로 주변 해수의 침전으로부터 형성되기 때문에, 자생 성분 내 희토류(rare earth element; REE) 원소 농도 및 네오디뮴 동위원소 비는 과거 해수 성분을 대변하는 지시자(proxy)로서 널리 활용됨. 실제, 자생성 네오디뮴 동위원소 비는 과거 전지구적 심층순환의 추적자로 활용되거나(e.g., Böhm et al., 2015; Rutberg et al., 2000), 대륙으로부터 유입되는 풍화 물질 변화 복원에 이용됨(Bayon et al., 2004; Jang et al., 2020)
- 세계 주요 강물 퇴적물을 대상으로 수행된 선행 연구에 따르면(Bayon et al.,

2020), 자생성 희토류 원소 농도 또한 화학적 풍화 양상을 추적하는 데 활용성이 있음. 이는 퇴적물 내 자생성분에서 분석된 희토류 원소 농도를 강물 실트 퇴적물에서 분석된 희토류 원소 농도의 평균값(World River Average Silt; WRAS after Bayon et al. 2015)으로 나누어 표준화한 뒤, concavity index (CI = GdN/(LaN × YbN)1/13) 계산을 통해 중희토류(middle REE) 부화(enrichment) 정도를 수치화하는 방법을 통해 실현 가능함. 해당 방법이 적용된 선행 연구에 따르면, 퇴적암 기반 배수지를 관통하는 강물 퇴적물에서의 CI 값은 1.5 이상에서 분포하는 반면, 결정질의 화성암 및 변성암을 지나는 강물 퇴적물에서는 CI 값이 1.2에서 2 사이에서 분포함(Bayon et al., 2004)

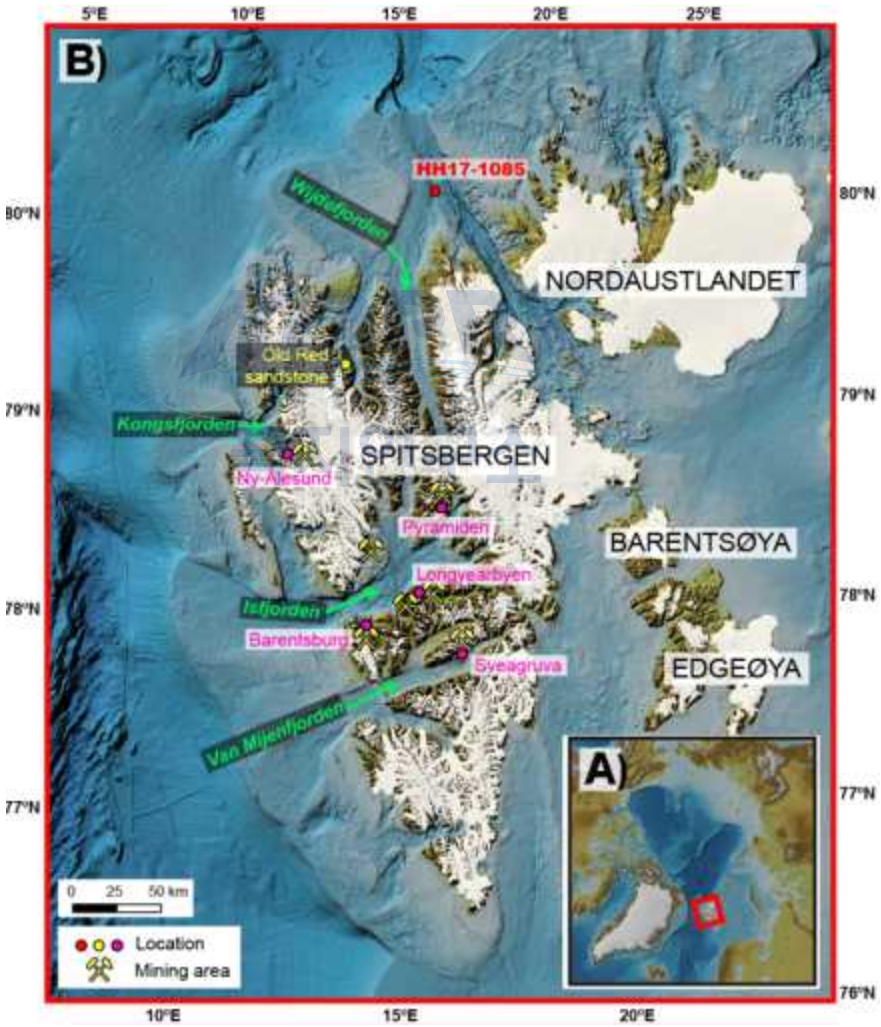


Fig. 100. Map of (A) the Arctic Ocean and (B) Svalbard. Sampling locations for core HH17−1085−GC and the Devonian Old Red sandstone are indicated with yellow and red circles, respectively. Locations for coal mining activity are also marked with adequate symbols. The bathymetric information is based on IBCAO 4.0 bathymetric grid (Jakobsson et al., 2020) with the published seafloor information (Allaart et al., 2020).

- 특징적으로, 배수지에 셰일이 풍부한 메켄지 강 및 가오핑(Gaoping) 강 등과 같은 일부 강물 퇴적물의 경우, CI 값은 2.5 이상을 보이며 중희토류 부화 양상이 매우 두드러짐(Bayon et al., 2004). 이는 일반적인 해양 및 강물 퇴적물 내 자생성분에서 분석된 CI 값을 크게 웃도는 수치임. Bayon et al. (2004)은 메켄지 강 및 가오핑 강 지역에서 사전 보고된 황화물 풍화 양상(sulfide weathering)을 근거로, 셰일 퇴적층 내 황철광 산화 현상(terrestrial pyrite oxidation)이 자생성 퇴적물 내 높은 CI 값(>2.5)을 유발한 것으로 해석함
- 본 연구에서는 빙하환경에서 황철광 산화가 주요 생지화학적 과정으로 작동한다는 점을 바탕으로(Anderson et al., 2000; Torres et al., 2017; Wadham et al., 2019), 높은 CI 값과 황철광 산화 현상 간의 관계성을 평가하고자, 지난 16,300년 동안 꾸준히 빙하 영향권에 있던 스발바르 북부 대륙붕 지역에서 획득한 코어퇴적물(Site HH17-1085-GC) 내 자생성 희토류 원소 농도 분석을 수행함(Fig. 100)

(2) 연구 방법

- 2017년 수행된 한국-노르웨이 국제공동 스발바르 탐사 동안 스발바르 북부 대륙붕 지역에서 획득한 코어퇴적물 HH17-1085-GC (80.274° N, 16.211° E, 코어길이 462 cm, 수심 322 m from Jang et al. 2021)와 이들의 주요 기원암으로 알려진 데본기 붉은 사암(Devonian Old Red sandstone; 79.389° N, 13.622° E from Jang et al., 2020)을 대상으로 연구를 수행함. 코어퇴적물은 약 5-25 cm 간격으로 추가 샘플링 과정을 거쳐 부시료 29점을 확보하였고, 이후 암석 시료와 함께 동결건조 및 아게이트를 이용하여 균질하게 분말화 과정을 거침
- 균질하게 분말화 시료는 0.02M hydroxylamine hydrochloride in 25% acetic acid를 활용하여 약 1시간 동안 침출(leaching)하여 퇴적물 내 자생성분을 확보함. 획득한 자생성분은 증발 후 다시 묽은 질산에 녹여 희석한 뒤, 서울대학교 농생명과학공동기기원의 Agilent 7900 유도결합 플라즈마 질량분석기(inductively coupled plasma mass spectrometry)를 활용하여 희토류 원소 분석에 활용됨. 분석 오차는 5% 미만으로 확인됨. 희토류 농도 분석 결과는 WRAS 값(Bayon et al. 2015)을 기반으로 normalize 된 뒤, CI 값 계산에 활용되었으며, normalize 된 희토류 원소 농도는 아래첨자 'N' 으로 추가 표기함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 희토류 원소 농도

- 데본기 붉은 사암 내 침출물의 희토류 원소 농도는 코어퇴적물 내 침출물의 그것에 비해 높게 나타남(Fig. 101). 예를 들어, 데본기 붉은 사암 내 침출물의 란타늄(La)과 가돌리늄(Gd) 농도는 각각 2.6 mg/g, 1.0 mg/g 수준인 데 반해, 코어퇴적물

내 침출물의 분석값은 각각 0.58~2.0 mg/g (1.2±0.38, 1 SD, n= 29), 0.30~0.79 mg/g (0.56±0.16, 1 SD, n= 29) 범위에서 관찰됨. 마찬가지로, 데본기 붉은 사암의 침출물 내 이터븀(Yb) 농도는 0.43 mg/g로, 코어 1085 퇴적물 침출물에서 분석된 Yb 농도 범위인 0.005~0.21 mg/g (0.14±0.05, 1 SD, n= 29)에 비해 높게 형성됨. 끝으로, 코어퇴적물 내 침출물의 희토류 농도는 코어 상부로 갈수록 전반적으로 낮아지는 경향성이 있음(Fig. 101)

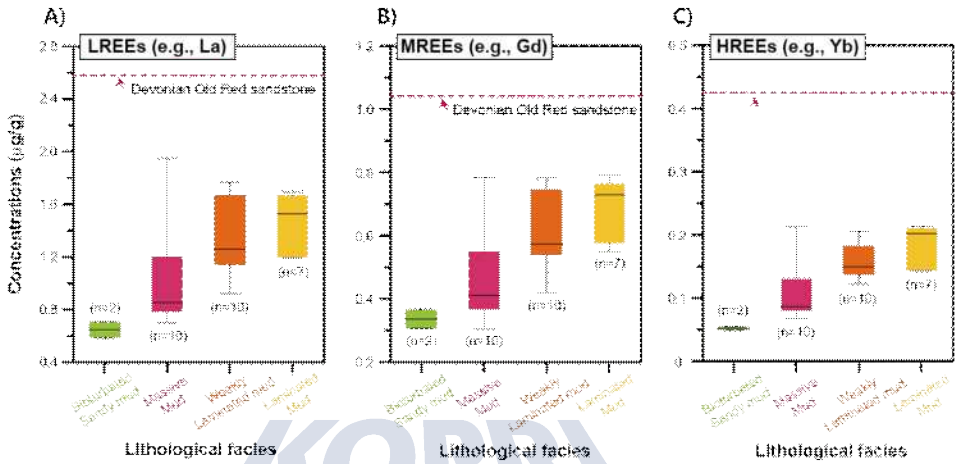


Fig. 101. Box and whisker plots of (A) LREE (La), (B) MREE (Gd), and(C) HREE (Yb) concentrations in the leached authigenic phases of core 1085 in response to changes in lithological facies. The results in the leached weathering phases of the Devonian Old Red sandstone are also marked with pink dashed lines for comparison.

(나) 황철광 산화 현상 추적 프록시

- 코어퇴적물 및 데본기 붉은 사암 내 침출물의 WRAS-normalized 희토류 원소는 모두 중희토류 부화 양상을 보임(Fig. 102). 단, 데본기 붉은 사암에서 계산된 희토류의 CI 값은 2.0 으로(white circle with red boundary in Fig. 103), 코어퇴적물의 CI 값인 2.3~3.8에 비해 상대적으로 낮음(2.8±0.3, 1 SD, n=29) (red squares in Fig. 103). 이는 코어퇴적물 내 자생성분이 주요 근원암인 데본기 붉은 사암으로부터 직접 유래하지 않음을 의미함
- 코어 1085 퇴적물 내 자생성분의 CI 값의 범위는, 일반적인 해양퇴적물 내 자생성분에서 분석된 희토류 원소의 평균 CI 값인 ~1.8±0.5(1 SD, n=93; yellow squares in Fig. 103)에 비해서도 크게 웃돔. 또한, 유공충 및 물고기 이빨 등에서 분석된 희토류 농도로 계산된 CI의 평균값인 1.2±0.3(1 SD, n=43) 및 1.5±0.4(1 SD, n=25) (dark brown diamonds in Fig. 103)에 비해서도 월등히 높은 수준임. 그 밖의 공극수, 쇄설성(detrital) 퇴적물 및 해수에서 계산된 CI의 평균값은 1.2±0.5(1 SD, n=391; white circles with pink boundaries in Fig. 103),

1.1±0.3(1 SD, n=104; orange triangles in Fig. 103) 그리고 1.0±0.3(1 SD, n=1778, white circles with grey boundaries in Fig. 103) 수준으로, 중희토류 부화 양상이 관찰되지 않음(For references, see Table 17)

- 해양퇴적물 내 자생성분의 중희토류 부화 현상은 일반적으로 수산화철이 생성되는 과정에서 타 희토류 원소 대비 중희토류가 선별적으로 결합되었거나(Martin et al., 2010), 초기 속성과정 동안 산소 결핍 환경에서 중희토류가 부화된 공극수가 해수-퇴적물 경계부로 확산된 결과(Haley et al., 2004)로 해석됨. 하지만, 앞서 기술하였듯이 1085 코어퇴적물 내 CI 값은, 그동안 자생성 해양퇴적물에서 보고된 CI 값이 비해 매우 높게 분포함. 스발바르 자생퇴적물 내 중희토류 부화를 일으키는 추가 요인이 있는 것으로 사료됨
- 연구배경 및 목적에서 기술하였듯이, 높은 CI 값을 유발하는 원인에 대한 힌트는 세계 주요 강물 퇴적물을 대상으로 한 선행 연구를 통해 얻을 수 있음(Bayon et al., 2020; green squares in Fig. 103). 세계 주요 강물 내 자생성분에서 분석된 CI 평균값은 2.1±0.6(1 SD, n=74)으로 해양퇴적물 내 자생성분에서 분석된 결과와 큰 차이가 없었으나, 퇴적암 기반 집수지역을 배수하는 일부 강(플라이, 메켄지, 가오핑 및 파라나 강)에서 획득한 퇴적물 내 자생성분에서 CI 값이 3.2에서 4.5 사이의 높은 범위에서 관찰됨

KOPRI 극지연구소

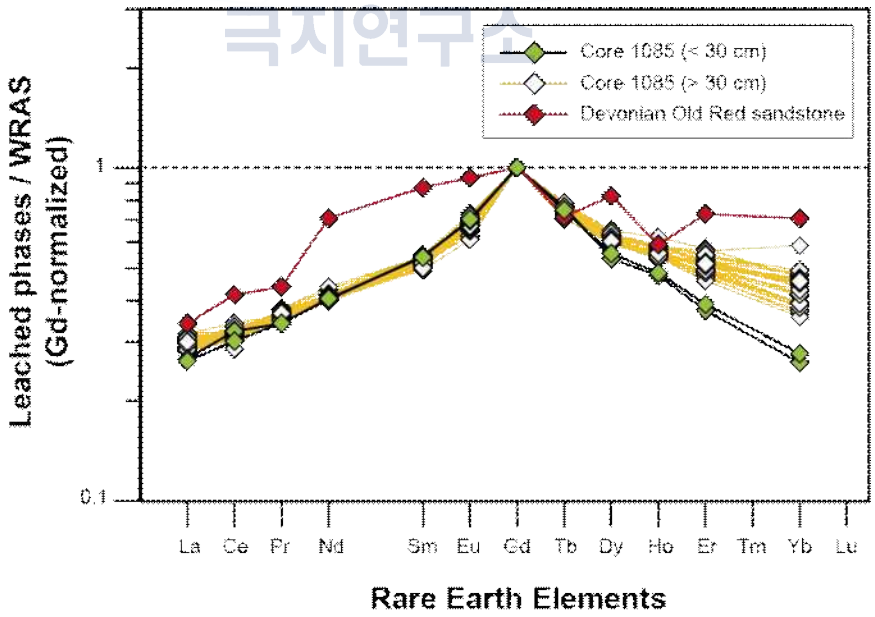


Fig. 102. Shale-normalized (WRAS; Bayon et al., 2015) REE patterns for the leached phases of core 1085 and the Devonian Old Red sandstone. The MREE enrichments are prevalent in core 1085, but more pronounced in bioturbated sandy mud facies (> 30 cm; green diamonds) compared to the other massive and laminated deposits (< 30 cm; white diamonds). Note that the REE data were also normalized by GdWRAS for clarity.

- 최근 메켄지 강 및 지류 지역에서 획득한 부유성 퇴적물을 대상으로 독립적으로 수행된 희토류 분석 연구에서도 유사한 결과를 보임(CI ~ 3.2±0.6, n=14, 1 SD from Larkin et al., 2021; sky blue squares in Fig. 103)
- 메켄지 강과 가오핑 강 주변 배수지에서 황화물 풍화가 매우 두드러지게 이루어진다는 선행 연구를 근거로(Blattmann et al., 2019; Calmels et al., 2007), 퇴적물 내 자생성분에서 관찰되는 높은 CI 값(>2.5)은 셰일 내 황철광 산화에 의한 것으로 해석됨
- 실제, São Domingos 광산 지역에서 획득한 광산토분(mine soils)의 침출물에서 분석한 희토류 원소의 CI 값은 1.6에서 4.2 사이에서 분포하며 극심한 중희토류 부화 현상을 보임(2.5±0.7, n=12, 1 SD; Pérez-López et al., 2010). 또한, 광산배수물(acid mine drainage)의 분석 결과 또한 CI 값이 1.8에서 5.1 사이에 분포하며(2.7±0.7; n=112, 1 SD; León et al., 2021; Pérez-López et al., 2010), 황철광 산화가 풍화산물 내 중희토류 부화 현상을 유발한다는 앞의 가설을 뒷받침함
- 결과적으로, 높은 CI 값(>2.5)은 황철광 산화 현상을 추적하는 프록시로 활용이 가능함. 즉, 북부 스발바르 퇴적물 전반에서 관찰되는 높은 CI 값은, 과거 16,300년 동안 북부 스발바르 대륙붕 지역이, 빙결 풍화 과정으로 활성화된 황철광 산화 작용의 영향에 있었음을 의미함
- 본 연구를 통해 소개된 CI 프록시가 다양한 환경을 대변하는 코어퇴적물에 적용됨으로써, 기후 변화에 따른 극지방 영역 변화가 생지화학적 황(S) 및 철(F) 사이클에 미치는 영향력을 파악할 수 있는 주요 자료로 활용될 수 있길 기대함

KOPRI 극지연구소

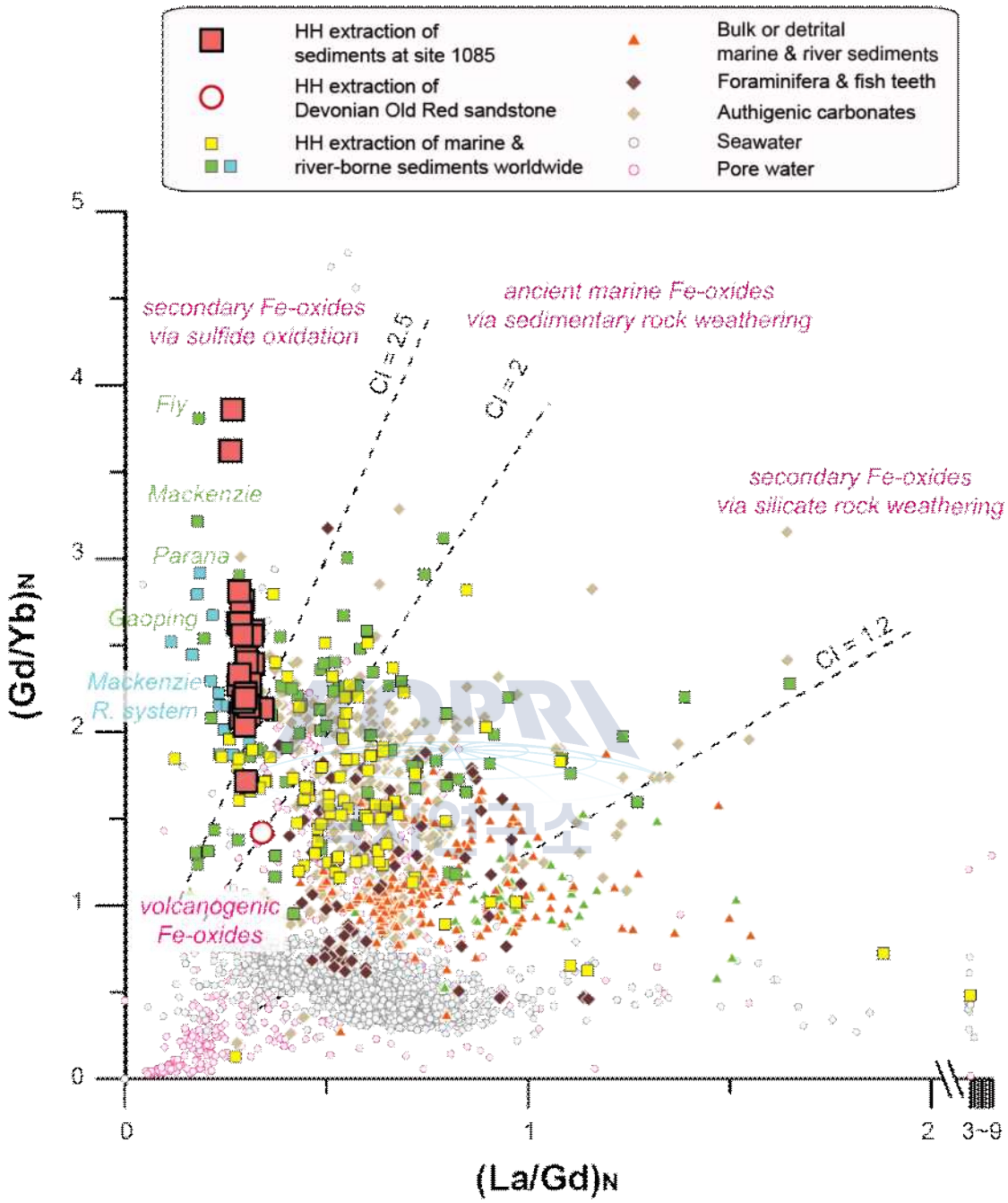


Fig. 103. Concavity index (CI) for the leached phases of marine sediments at site 1085 and the Devonian Old Red sandstone. For comparison, the reported REE measurements from different archives such as the leached phases of marine and river sediments, bulk or residual marine and river sediments, foraminifers and fossil fish teeth, authigenic carbonates and dissolved phases of seawater and pore water are marked with different symbols (for references, see Table 1). Note that the leached riverine sediments collected from the Mackenzie River system (Larkin et al., 2021) are exclusively marked with sky blue squares.

Table 17. Reference list for reported REE data.

• Leached phases of marine sediments	
Basak et al., 2011	Basak, C., Martin, E.E., Kamenov, G.D., 2011. Seawater Pb isotopes extracted from Cenozoic marine sediments. Chem. Geol. 286, 94-108.
Bayon et al., 2002	Bayon, G., German, C.R., Boella, R.M., Milton, J.A., Taylor, R.N., Nesbitt, R.W., 2002. An improved method for extracting marine sediment fractions and its application to Sr and Nd isotopic analysis. Chem. Geol. 187, 179-199.
Bayon et al., 2004	Bayon, G., German, C.R., Burton, K.W., Nesbitt, R.W., Rogers, N., 2004. Sedimentary Fe-Mn oxyhydroxides as paleoceanographic archives and the role of aeolian flux in regulating oceanic dissolved REE. Earth Planet. Sci. Lett. 224, 477-492.
Blaser et al., 2016	Blaser, P., Lippold, J., Gutjahr, M., Frank, N., Link, J.M., Frank, M., 2016. Extracting foraminiferal seawater Nd isotope signatures from bulk deep sea sediment by chemical leaching. Chem. Geol. 439, 189-204.
Casse et al., 2019	Casse, M., Montero-Serrano, J.-C., St-Onge, G., Poirier, A., 2019. REE distribution and Nd isotope composition of estuarine waters and bulk sediment leachates tracing lithogenic inputs in eastern Canada. Mar. Chem. 211, 117-130.
Martin et al., 2010	Martin, E.E., Blair, S.W., Kamenov, G.D., Scher, H.D., Bourbon, E., Basak, C., Newkirk, D.N., 2010. Extraction of Nd isotopes from bulk deep sea sediments for paleoceanographic studies on Cenozoic time scales. Chem. Geol. 269, 414-431.
Wilson et al., 2013	Wilson, D.J., Piotrowski, A.M., Galy, A., Clegg, J.A., 2013. Reactivity of neodymium carriers in deep sea sediments: Implications for boundary exchange and paleoceanography. Geochim. Cosmochim. Acta 109, 197-221.

• Foraminifers	
Bayon et al., 2004	Bayon, G., German, C.R., Burton, K.W., Nesbitt, R.W., Rogers, N., 2004. Sedimentary Fe-Mn oxyhydroxides as paleoceanographic archives and the role of aeolian flux in regulating oceanic dissolved REE. Earth Planet. Sci. Lett. 224, 477-492.
Blaser et al., 2016	Blaser, P., Lippold, J., Gutjahr, M., Frank, N., Link, J.M., Frank, M., 2016. Extracting foraminiferal seawater Nd isotope signatures from bulk deep sea sediment by chemical leaching. Chem. Geol. 439, 189-204.
Charbonnier et al., 2012	Charbonnier, G., Pucéat, E., Bayon, G., Desmares, D., Dera, G., Durlet, C., Deconinck, J.-F., Amédro, F., Gourlan, A.T., Pellenard, P., 2012. Reconstruction of the Nd isotope composition of seawater on epicontinental seas: Testing the potential of Fe-Mn oxyhydroxide coatings on foraminifera tests for deep-time investigations. Geochim. Cosmochim. Acta 99, 39-56.
Molina-Kescher et al., 2014b	Molina-Kescher, M., Frank, M., Hathorne, E.C., 2014b. Nd and Sr isotope compositions of different phases of surface sediments in the South Pacific: Extraction of seawater signatures, boundary exchange, and detrital/dust provenance. Geochem. Geophys. Geosyst. 15, 3502-3520.
Skinner et al., 2019	Skinner, L.C., Sadekov, A., Brandon, M., Greaves, M., Plancherel, Y., de la Fuente, M., Gottschalk, J., Souanef-Ureta, S., Sevilgen, D.S., Scrivner, A.E., 2019. Rare earth elements in early-diagenetic foraminifer 'coatings': Pore-water controls and potential palaeoceanographic applications. Geochim. Cosmochim. Acta 245, 118-132.

• Fish teeth	
Martin et al., 2010	Martin, E.E., Blair, S.W., Kamenov, G.D., Scher, H.D., Bourbon, E., Basak, C., Newkirk, D.N., 2010. Extraction of Nd isotopes from bulk deep sea sediments for paleoceanographic studies on Cenozoic time scales. Chem. Geol. 269, 414-431.

• Porewater	
Abbott et al., 2015a	Abbott, A.N., Haley, B.A., McManus, J., 2015a. Bottoms up: Sedimentary control of the deep North Pacific Ocean's εNd signature. Geology 43, 1035-1035.
Bayon et al., 2011	Bayon, G., Birot, D., Ruffine, L., Caprais, J.C., Ponzevera, E., Bollinger, C., Donval, J.P., Charlou, J.L., Voisset, M., Grimaud, S., 2011. Evidence for intense REE scavenging at cold seeps from the Niger Delta margin. Earth Planet. Sci. Lett. 312, 443-452.
Deng et al., 2017	Deng, Y., Ren, J., Guo, Q., Cao, J., Wang, H., Liu, C., 2017. Rare earth element geochemistry characteristics of seawater and porewater from deep sea in western Pacific. Sci. Rep. 7, 16539.
Elderfield and Sholkovitz, 1987	Elderfield, H., Sholkovitz, E.R., 1987. Rare earth elements in the pore waters of reducing nearshore sediments. Earth Planet. Sci. Lett. 82, 280-288.
Haley et al., 2004	Haley, B.A., Klinkhammer, G.P., McManus, J., 2004. Rare earth elements in pore waters of marine sediments. Geochim. Cosmochim. Acta 68, 1265-1279.
Himmler et al., 2013	Himmler, T., Haley, B.A., Torres, M.E., Klinkhammer, G.P., Bohrmann, G., Peckmann, J., 2013. Rare earth element geochemistry in cold-seep pore waters of Hydrate Ridge, northeast Pacific Ocean. Geo-Mar. Lett. 33, 369-379.
Kim et al., 2012	Kim, J.-H., Torres, M.E., Haley, B.A., Kastner, M., Pohlman, J.W., Riedel, M., Lee, Y.-J., 2012. The effect of diagenesis and fluid migration on rare earth element distribution in pore fluids

	of the northern Cascadia accretionary margin. Chem. Geol. 291, 152-165.
Sholkovitz et al., 1989	Sholkovitz, E.R., Piepgras, D.J., Jacobsen, S.B., 1989. The pore water chemistry of rare earth elements in Buzzards Bay sediments. Geochim. Cosmochim. Acta 53, 2847-2856.
Sholkovitz et al., 1992	Sholkovitz, E.R., Shaw, T.J., Schneider, D.L., 1992. The geochemistry of rare earth elements in the seasonally anoxic water column and porewaters of Chesapeake Bay. Geochim. Cosmochim. Acta 56, 3389-3402.
Soyol-Erdene and Huh, 2013	Soyol-Erdene, T.-O., Huh, Y., 2013. Rare earth element cycling in the pore waters of the Bering Sea Slope (IODP Exp. 323). Chem. Geol. 358, 75-89.
Yang et al., 2018a	Yang, J., Kim, J.-H., Torres, M., Haley, B., 2018a. Data report: dissolved rare earth elements (REEs) in the pore fluids of Sites U1378, U1380, U1381, and U1414 drilled during IODP Expeditions 334 and 344, Proc. IODP Vol. 344, doi:10.2204/iodp.proc.2344.2209.2018.

• Fine-grained detrital sediments	
Bayon et al., 2015	Bayon, G., Toucanne, S., Skonieczny, C., Andre, L., Bermell, S., Cheron, S., Dennielou, B., Etoubleau, J., Freslon, N., Gauchery, T., Germain, Y., Jorry, S.J., Menot, G., Monin, L., Ponzevera, E., Rouget, M.L., Tachikawa, K., Barrat, J.A., 2015. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited. Geochim. Cosmochim. Acta 170, 17-38.

• Seawater	
Abbott et al., 2015b	Abbott, A.N., Haley, B.A., McManus, J., Reimers, C.E., 2015b. The sedimentary flux of dissolved rare earth elements to the ocean. Geochim. Cosmochim. Acta 154, 186-200.
Alibo and Nozaki, 1999	Alibo, D.S., Nozaki, Y., 1999. Rare earth elements in seawater: particle association, shale-normalization, and Ce oxidation. Geochim. Cosmochim. Acta 63, 363-372.
Amakawa et al., 2000	Amakawa, H., Alibo, D.S., Nozaki, Y., 2000. Nd isotopic composition and REE pattern in the surface waters of the eastern Indian Ocean and its adjacent seas. Geochim. Cosmochim. Acta 64, 1715-1727.
Bayon et al., 2011	Bayon, G., Birot, D., Ruffine, L., Caprais, J.C., Ponzevera, E., Bollinger, C., Donval, J.P., Charlou, J.L., Voisset, M., Grimaud, S., 2011. Evidence for intense REE scavenging at cold seeps from the Niger Delta margin. Earth Planet. Sci. Lett. 312, 443-452.
Behrens et al., 2018	Behrens, M.K., Pahnke, K., Paffrath, R., Schnetger, B., Brumsack, H.-J., 2018. Rare earth element distributions in the West Pacific: Trace element sources and conservative vs. non-conservative behavior. Earth Planet. Sci. Lett. 486, 166-177.
Deng et al., 2017	Deng, Y., Ren, J., Guo, Q., Cao, J., Wang, H., Liu, C., 2017. Rare earth element geochemistry characteristics of seawater and porewater from deep sea in western Pacific. Sci. Rep. 7, 16539.
Elderfield and Sholkovitz, 1987	Elderfield, H., Sholkovitz, E.R., 1987. Rare earth elements in the pore waters of reducing nearshore sediments. Earth Planet. Sci. Lett. 82, 280-288.
Garcia-Solsona et al., 2014	Garcia-Solsona, E., Jeandel, C., Labatut, M., Lacan, F., Vance, D., Chavagnac, V., Pradoux, C., 2014. Rare earth elements and Nd isotopes tracing water mass mixing and particle-seawater interactions in the SE Atlantic. Geochim. Cosmochim. Acta 125, 351-372.
German and Elderfield, 1989	German, C.R., Elderfield, H., 1989. Rare earth elements in Saanich Inlet, British Columbia, a seasonally anoxic basin. Geochim. Cosmochim. Acta 53, 2561-2571.
German et al., 1991	German, C.R., Holliday, B.P., Elderfield, H., 1991. Redox cycling of rare earth elements in the suboxic zone of the Black Sea. Geochim. Cosmochim. Acta 55, 3553-3558.
Grasse et al., 2017	Grasse, P., Bosse, L., Hathorne, E.C., Böning, P., Pahnke, K., Frank, M., 2017. Short-term variability of dissolved rare earth elements and neodymium isotopes in the entire water column of the Panama Basin. Earth Planet. Sci. Lett. 475, 242-253.
Greaves et al., 1999	Greaves, M.J., Elderfield, H., Sholkovitz, E.R., 1999. Aeolian sources of rare earth elements to the Western Pacific Ocean. Mar. Chem. 68, 31-38.
Grenier et al., 2013	Grenier, M., Jeandel, C., Lacan, F., Vance, D., Venchiarutti, C., Cros, A., Cravatte, S., 2013. From the subtropics to the central equatorial Pacific Ocean: Neodymium isotopic composition and rare earth element concentration variations. J. Geophys. Res. Oceans 118, 592-618.
Haley et al., 2014	Haley, B.A., Frank, M., Hathorne, E., Pisias, N., 2014. Biogeochemical implications from dissolved rare earth element and Nd isotope distributions in the Gulf of Alaska. Geochim. Cosmochim. Acta 126, 455-474.
Hathorne et al., 2015	Hathorne, E.C., Stichel, T., Brück, B., Frank, M., 2015. Rare earth element distribution in the Atlantic sector of the Southern Ocean: The balance between particle scavenging and vertical supply. Mar. Chem. 177, 157-171.
Himmler et al., 2013	Himmler, T., Haley, B.A., Torres, M.E., Klinkhammer, G.P., Bohrmann, G., Peckmann, J., 2013. Rare earth element geochemistry in cold-seep pore waters of Hydrate Ridge, northeast Pacific Ocean. Geo-Marine Letters 33, 369-379.
Jeandel et al., 2013	Jeandel, C., Delattre, H., Grenier, M., Pradoux, C., Lacan, F., 2013. Rare earth element concentrations and Nd isotopes in the Southeast Pacific Ocean. Geochem. Geophys. Geosyst.

	14, 328-341.
Lacan and Jeandel, 2004	Lacan, F., Jeandel, C., 2004. Neodymium isotopic composition and rare earth element concentrations in the deep and intermediate Nordic Seas: Constraints on the Iceland Scotland Overflow Water signature. Geochem. Geophys. Geosyst. 5, 10.1029/2004GC000742.
Lacan and Jeandel, 2005	Lacan, F., Jeandel, C., 2005. Acquisition of the neodymium isotopic composition of the North Atlantic Deep Water. Geochem. Geophys. Geosyst. 6.
Laukert et al., 2017	Laukert, G., Frank, M., Bauch, D., Hathorne, E.C., Rabe, B., von Appen, W.-J., Wegner, C., Zieringer, M., Kassens, H., 2017. Ocean circulation and freshwater pathways in the Arctic Mediterranean based on a combined Nd isotope, REE and oxygen isotope section across Fram Strait. Geochim. Cosmochim. Acta 202, 285-309.
Laukert et al., 2019	Laukert, G., Makhotin, M., Petrova, M.V., Frank, M., Hathorne, E.C., Bauch, D., Böning, P., Kassens, H., 2019. Water mass transformation in the Barents Sea inferred from radiogenic neodymium isotopes, rare earth elements and stable oxygen isotopes. Chem. Geol. 511, 416-430.
Lemaitre et al., 2014	Lemaitre, N., Bayon, G., Ondréas, H., Caprais, J.-C., Freslon, N., Bollinger, C., Rouget, M.-L., de Prunelé, A., Ruffine, L., Olu-Le Roy, K., Sarthou, G., 2014. Trace element behaviour at cold seeps and the potential export of dissolved iron to the ocean. Earth Planet. Sci. Lett. 404, 376-388.
Mitra et al., 1994	Mitra, A., Elderfield, H., Greaves, M.J., 1994. Rare earth elements in submarine hydrothermal fluids and plumes from the Mid-Atlantic Ridge. Mar. Chem. 46, 217-235.
Molina-Kescher et al., 2014a	Molina-Kescher, M., Frank, M., Hathorne, E., 2014a. South Pacific dissolved Nd isotope compositions and rare earth element distributions: Water mass mixing versus biogeochemical cycling. Geochim. Cosmochim. Acta 127, 171-189.
Nozaki et al., 1999	Nozaki, Y., Alibo, D.-S., Amakawa, H., Gamo, T., Hasumoto, H., 1999. Dissolved rare earth elements and hydrography in the Sulu Sea. Geochim. Cosmochim. Acta 63, 2171-2181.
Nozaki and Alibo, 2003	Nozaki, Y., Alibo, D.S., 2003. Importance of vertical geochemical processes in controlling the oceanic profiles of dissolved rare earth elements in the northeastern Indian Ocean. Earth Planet. Sci. Lett. 205, 155-172.
Osborne et al., 2015	Osborne, A.H., Haley, B.A., Hathorne, E.C., Plancherel, Y., Frank, M., 2015. Rare earth element distribution in Caribbean seawater: Continental inputs versus lateral transport of distinct REE compositions in subsurface water masses. Mar. Chem. 177, 172-183.
Schijf et al., 1995	Schijf, J., De Baar, H.J.W., Millero, F.J., 1995. Vertical distributions and speciation of dissolved rare earth elements in the anoxic brines of Bannock Basin, eastern Mediterranean Sea. Geochim. Cosmochim. Acta 59, 3285-3299.
Shiller et al., 2017	Shiller, A.M., Chan, E.W., Joung, D.J., Redmond, M.C., Kessler, J.D., 2017. Light rare earth element depletion during Deepwater Horizon blowout methanotrophy. Sci. Rep. 7, 10389.
Sholkovitz et al., 1992	Sholkovitz, E.R., Shaw, T.J., Schneider, D.L., 1992. The geochemistry of rare earth elements in the seasonally anoxic water column and porewaters of Chesapeake Bay. Geochim. Cosmochim. Acta 56, 3389-3402.
Stichel et al., 2012	Stichel, T., Frank, M., Rickli, J., Hathorne, E.C., Haley, B.A., Jeandel, C., Pradoux, C., 2012. Sources and input mechanisms of hafnium and neodymium in surface waters of the Atlantic sector of the Southern Ocean. Geochim. Cosmochim. Acta 94, 22-37.
Tachikawa et al., 1999	Tachikawa, K., Jeandel, C., Roy-Barman, M., 1999. A new approach to the Nd residence time in the ocean: the role of atmospheric inputs. Earth Planet. Sci. Lett. 170, 433-446.
Tazoe et al., 2011	Tazoe, H., Obata, H., Gamo, T., 2011. Coupled isotopic systematics of surface cerium and neodymium in the Pacific Ocean. Geochem. Geophys. Geosyst. 12.
Wang and Yamada, 2007	Wang, Z.-L., Yamada, M., 2007. Geochemistry of dissolved rare earth elements in the Equatorial Pacific Ocean. Environmental Geology 52, 779-787.
Yang and Haley, 2016	Yang, J., Haley, B., 2016. The profile of the rare earth elements in the Canada Basin, Arctic Ocean. Geochem. Geophys. Geosyst. 17, 3241-3253.
Zhang and Nozaki, 1998	Zhang, J., Nozaki, Y., 1998. Behavior of rare earth elements in seawater at the ocean margin: a study along the slopes of the Sagami and Nankai troughs near Japan. Geochim. Cosmochim. Acta 62, 1307-1317.
Zhang et al., 2008	Zhang, Y., Lacan, F., Jeandel, C., 2008. Dissolved rare earth elements tracing lithogenic inputs over the Kerguelen Plateau (Southern Ocean). Deep-Sea Res. II 55, 638-652.
Zheng et al., 2016	Zheng, X.-Y., Plancherel, Y., Saito, M.A., Scott, P.M., Henderson, G.M., 2016. Rare earth elements (REEs) in the tropical South Atlantic and quantitative deconvolution of their non-conservative behavior. Geochim. Cosmochim. Acta 177, 217-237.

2-4) 4차년도

가) 벨준트 피오르드 빙하 역사 및 퇴적환경 정밀 복원

(1) 연구 목적

- 기후 변화에 민감하게 반응하는 스발바르 피오르드 지역을 대상으로 홀로세 빙하 역사와 환경변화는 비교적 정밀한 복원 연구가 수행된 반면, 후기 바이크셀리안 해빙기와 홀로세 전이 구간의 환경변화 복원 연구는 매우 미비함(Fansworth et al., 2020)
- 이 전이 구간은 급격히 기후가 냉각되었던 영거드라이아스를 특징으로 함. 이러한 급격한 기후 변동에 의한 빙하 거동에 대한 정보는 과거 및 현재의 기후 변화에 따른 피오르드 빙하 거동 및 환경 변화를 이해하는데 필수적임에도 불구하고, 해당 시기에 대한 스발바르 피오르드 연구 및 지질 기록이 매우 부족한 상황임

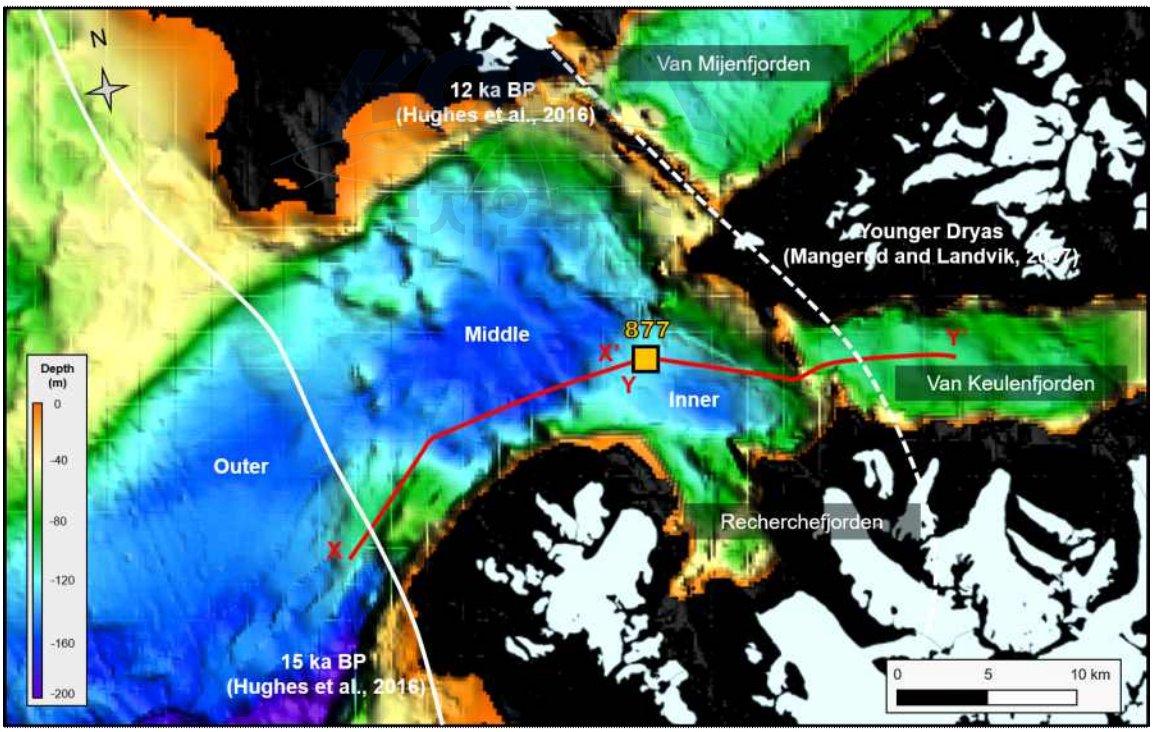


Fig. 104. Physiographic map of Bellsund and its tributary fjords (Van Mijenfjorden, Van Keulenfjorden, and Reshershefjorden). An orange box and a red line mark locations of the studied core (HH18-877-GC) and subbottom acoustic profiling, respectively. The white solid and dashed lines indicate the ice fronts of the Svalbard-Barents Seas Ice Sheet (SBIS) from the most credible DATED-1 timeslices at 15 ka BP and 12 ka BP, respectively (data from Hughes et al., 2016).

- 이전 3차년도 연구에서는 스발바르 남서부 지역에 위치한 벨준트 피오르드 지역에서 획득된 천부지층탄성파 자료의 음향 특성 및 층서를 지류 피오르드 반커일렌 피오르드이 기존 층서(Kempf et al., 2013)와 비교하고 중력시추코어에 대한 연대 모델 구축 및 다중프록시 분석을 수행함으로써, 영거드라이아스 시기를 포함한 퇴적환경 변화와 퇴적물 기원지 해석을 위한 일차적인 연구를 진행하였음
- 본 연구에서는 천부지층탄성파 층서와 중력시추코어의 퇴적상을 세분화하여 시기에 따른 빙해양 퇴적 환경을 보다 정밀하게 해석하고, 남부 스발바르 피오르드의 표층퇴적물의 광물 조성을 비교함으로써 광물 분석 결과를 활용한 벨준트 피오르드로 유입되는 퇴적물 기원지의 변화를 지시하는 프록시를 검증 및 제시하고자 함
- 더 나아가, 주변 빙하로부터의 빙하 영향을 판별할 수 있는 프록시인 철산화광물의 함량 변화(Jang et al., 2023)를 퇴적물 기원지 프록시와 비교하고, 유기지화학 분석을 통해 벨준트 피오르드의 지류 피오르드인 반커일렌 피오르드(동부)와 르셰르셰 피오르드(서부) (Fig. 104)의 빙하 거동에 따른 퇴적물 유입의 변화를 복원하고자 함

(2) 연구 방법

(가) 중력시추코어 퇴적상 세부 정립 및 퇴적환경 해석

- 이전 연구에서 정립한 연대 모델 기반 각 퇴적상 세분화
- 시기별 퇴적상의 대표적인 환경 특징 해석

(나) 천부지층 탄성파 층서 해석

- 이전 연구에서 정의한 탄성파 층서와 연대 모델을 정립한 중력시추코어 간 대비를 통해 각 층서를 대변하는 빙해양 환경 해석

(다) 벨준트 피오르드의 퇴적물 기원지 프록시 검증

- 남부 스발바르 피오르드의 표층퇴적물을 대상으로 기분석된 광물 분석 결과를 활용 (Vogt and Jang, 2023)
- 각 피오르드 표층퇴적물의 석영(quartz), 사장석(plagioclase), 탄산염 광물(carbonate) 및 사장석/탄산염(Plg/Carb) 비 분포 비교. 이전 연구에서는 사장석과 백운석(dolomite)의 비를 활용하고자 하였으나, 벨준트 지역과 비교하여 남부 호른준트 지역은 백운석에 비해 방해석(calcite)가 풍부한 지역으로써(Görlich, 1986) 남서부 스발바르 피오르드의 퇴적물 기원지를 대변할 프록시를 제시하기 위해 백운석과 방해석을 합친 탄산염 광물 함량을 연구에 적용함

(라) 벨준트 피오르드 및 지류 피오르드의 빙하 활동의 영향력 평가

- 벨준트 피오르드의 중력시추코어 퇴적물을 대상으로 기 분석된 광물 결과 중 철산화

광물(Fe-(oxyhydr)oxides, FeOx)의 함량 변화를 검토

- 스발바르 피오르드 지역에서 퇴적물 내 철산화광물은 담수성 융빙수와 해수와의 접점에서 추적되는 점을 착안하여 Jang et al. (2023)에 빙하 거동의 영향을 평가하는 프록시로 제시된 바 있음
- 특히, 이러한 프록시는 주변 빙하의 전면에 인접한 지역 또는 빙하 융빙의 정도에 따라 영향력을 미칠 수 있는 일정 거리에 위치한 지역을 대상으로 다른 프록시와 독립적으로 빙하 거동의 영향력을 평가 가능

(마) 유기지화학 분석

- 스발바르 지역에서 피오르드 퇴적물 내 총 유기탄소(TOC)와 유기질소(N_{org}) 비는 육상기원 유기물과 해양기원 유기물의 기여도를 판별하는 지표로 활용되기 때문에 (Knies and Martinez, 2009), 피오르드 퇴적물의 육상기원 유입의 영향력을 평가하기 위해 유기지화학 분석을 수행함
- 본 연구에서 사용된 TOC, N_{org}, 유기탄소동위원소($\delta^{13}C_{org}$)는 극지연구소 Thermo Flash 2000 EA-IRMS 분석기를 활용하여 수행
- 총 유기탄소(TOC)와 유기탄소동위원소($\delta^{13}C_{org}$) 측정을 위해, 동결건조된 퇴적물 시료를 염산으로 24시간 처리하여 무기 탄산염을 제거한 시료를 활용
- 유기 질소(N_{org})를 얻기 위해, 추가적으로 원시 시료를 KOBr-KOH 용액으로 처리하여 무기 질소와 유기 질소를 분리하여(Silva and Bremner, 1966) 무기 질소를 분석하고, 동결건조된 퇴적물 시료에서 측정된 총 질소에서 무기 질소를 뺀 값으로 계산함. 측정값의 오차는 분석 결과 값의 0.2 ‰ 이내로 확인

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 퇴적상 및 퇴적환경

- 연대 모델 결과를 비교하여 중력시추코어의 퇴적상을 총 6개로 세분화함(Fig. 105)
- Facies 1: 이전 연구 결과 동일하며, IRD를 포함한 희미한 층리(layer) 혹은 엽리층리(lamination)를 특징으로 한 담갈색 사질 니로써, 영거드라이아스 후기의 빙하 융빙수에 의한 퇴적체로 해석(Forwick and Vorren, 2009)
- Facies 2: IRD를 포함한 괴상(massive)의 담갈색 사질 니로써, 하부 퇴적상을 침식함. 하부 퇴적상과 관계와 암상 특징 및 구조에 근거하여, 홀로세가 시작되면서 발생한 강한 융빙수 방출의 영향으로 조성된 강한 hyperpycnal flow 퇴적체로 해석되며(Zavala and Pan, 2018)
- Facies 3: IRD를 포함한 뚜렷한 엽리 층리로 구성된 담갈색의 니로써, 초기 홀로세 동안의 빠른 빙하 후퇴 과정에서 형성된 저탁류 퇴적체로 해석(Stow, 1979; Ó Cofaigh et al., 2001)
- Facies 4: 소량의 IRD를 포함한 생교란 니 또는 사질 니로 구성되며 담갈색과 황록

색 퇴적층이 교호함. 중기 홀로세에 접어들기 이전 대 부분의 빙하가 후퇴된 시점에 형성된 빙해양 퇴적층으로 해석(Lucchi et al., 2013; Forwick and Vorren, 2009)

- Facies 5: 상부 퇴적상 Facies 4와 퇴적구조나 퇴적물 조직 특성은 유사하나 황록색 퇴적층으로 구성되며, 후기 홀로세 동안 지류 피오르드에 발달된 조수빙하의 영향을 받은 빙해양 퇴적층으로 해석(Joe et al., 2022)
- Facies 6: IRD를 포함한 황록색의 미약한 생교란을 특징으로 한 사질 니로써, 최근 1900년 이후로의 조수 빙하의 영향을 받은 빙해양 퇴적층으로 해석(Joe et al., 2022)

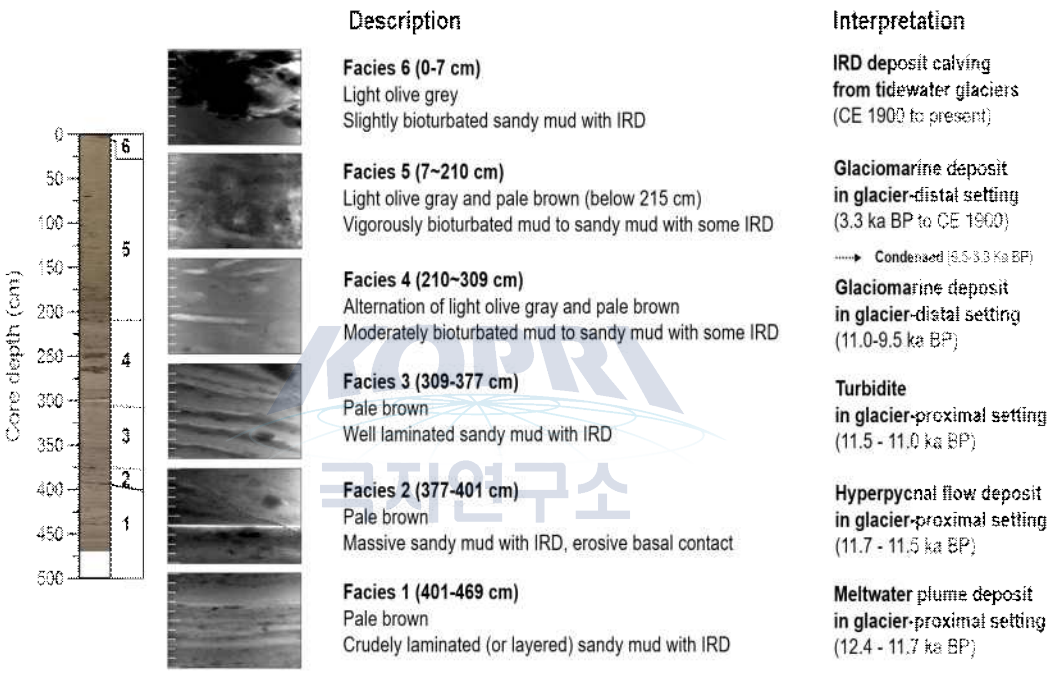


Fig. 105. Description and interpretation for lithofacies of core HH19-877-GC.

(나) 천부지층 탄성파 자료와 중력시추코어 대비를 통한 지역적 층서 해석

- 본 연구에서는 이전 연구에서 반커일렌 피오르드의 층서를 대략적인 시기를 고려하여 일차적으로 천부지층탄성파 층서를 BS1-5를 정의하였으나, 연대 모델을 정립한 중력시추코어 간의 대비를 통해 BS0-4로 재정의함(Fig. 106)
- 탄성파 자료상의 반사면은 음향 임피던스의 수직적 변화로부터 기인하며, 이는 퇴적물 밀도와 p파 속도에 의해 제어되며, 퇴적물 시추코어의 물성 변화에 기인함
- 스발바르 피오르드 퇴적물의 물성 변화는 암석학적 변동과 빙하 활동과 연관된 퇴적물 압밀도의 차이로 인해 발생할 수 있으며(Forwick and Vorren, 2009; 2010), 음향적 성층화는 주로 세립질 퇴적물 내에 포함된 조립질 입자의 퇴적에 기인함(Ahn

et al., 2024; Joe et al., 2022; Lucchi et al., 2013; Pedrosa et al., 2011)

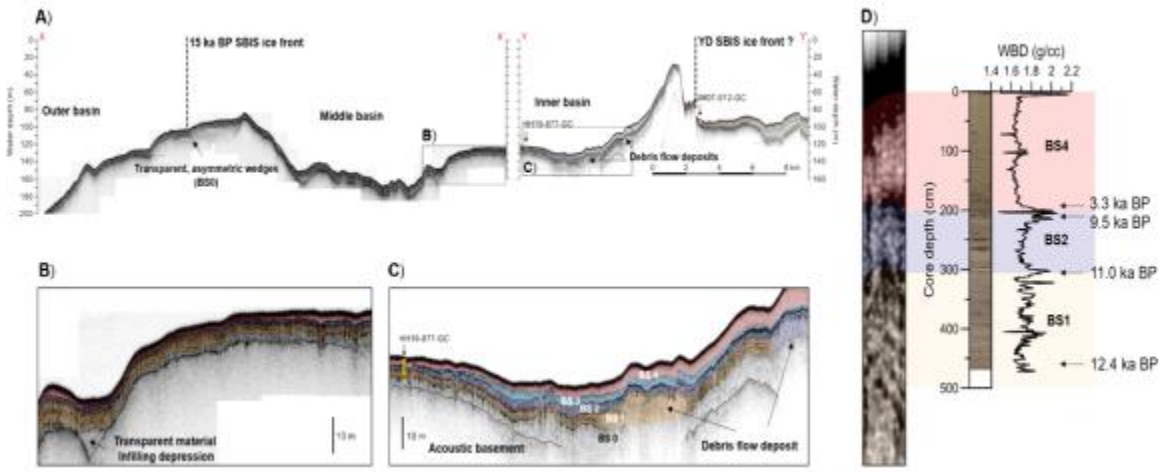


Fig. 106. (A) Subbottom acoustic profiling (SBP) data from Bellsund to the outer Van Keulenfjorden, showing the grounding zone wedge (GZW). (B) and (C) present the defined seismic units (BS0–4) in the outer margin and the central part of the Bellsund's inner basin, respectively. (D) Results of the core–seismic correlation based on the variation in wet bulk density (WBD) of sediment core HH19–877–GC and reflection patterns of SBP data.

- 중력시추코어의 뚜렷한 밀도 증가와 천부지층 탄성파 층서의 반사면의 대비를 통해 다음과 같이 재정의한 탄성파 층서의 연대를 일차적으로 제한함: (1) BS0와 BS1 (>11.0 ka), (2) BS2 (11.0-9.5 ka), (3) BS3 (9.5-3.3 ka), (4) BS4 (3.3 ka 이후)
- 벨준트 피오르드 중부 분지의 외곽은 뚜렷한 지형적 고지대를 특징으로 하며, 외측 사면에는 비대칭 쐐기가 중첩되어 나타남. 이러한 지형은 해양기저 빙하가 후퇴 중 정지된 상태에서 빙하 전면에 발달되는 빙하기원 지형(grounding zone wedge, GZW)의 전형적 특징임(Batchelor and Dowdeswell, 2015). 특히, 이러한 지형은 최하부 탄성파 층서 BS0 해당하며, BS0의 층서적 위치와 음향적 특성은 빙하 전면과 기저에 발달되는 빙퇴적으로 해석됨(Flink et al., 2017; Forwick and Vorren, 2010; Kempf et al., 2013; Noormets et al., 2021)
- 벨준트 피오르드에서 이러한 GZW의 위치는 이전 복원된 15 ka 시점의 스발바르-바렌츠해 빙상의 빙하 분포와 일치하며(Hughes et al., 2016), 약 15 ka 까지 벨준트 피오르드의 대부분 지역이 빙하에 덮여있었음을 지시함
- BS0 위에 놓인 음향 성층화를 특징으로 한 BS1은 코어 877-GC의 해당 구간은 융빙수 퇴적체(Facies 1), hyperpycnal flow 퇴적체(Facies 2) 및 저탁류 퇴적체(Facies 3)로 구성되며, 퇴적물 코어의 연대를 고려하여 BS1의 퇴적은 약 15 ka BP 이후 벨순드에서 SBIS의 후퇴와 함께 시작되어 11.0 ka BP에 종료된 것으로 추정

- BS1를 피복하는 BS2는 11.0-9.5 ka BP 동안 퇴적된 약한 불연속적 층리를 특징으로 하며, 빙하로부터 먼 환경에서 소량의 IRD(Facies 4)를 포함한 생물교란 니질 및 사질 니층으로 구성. 특히, 반 커일렌 피오르드 입구 주변 사면에서 BS2 내에 암설류 퇴적체과 관찰되며, 이 암설류 퇴적체는 하부 층 BS1을 침식함
- 음향학적으로 투명한 BS3의 퇴적은 벨준트 피오르드의 내부 분지에 제한된 반면, 최상부 단위인 BS4는 하부 단위(BS2와 BS3)에 대해 비교적 평행하게 퇴적되어 중부 분지에서 내부 분지까지 전역에 걸쳐 분포. 특히, BS3가 분석 퇴적물코어의 210-180 cm 구간에서 관찰된 결층(9.5-3.3 ka BP)과 일치하며(Fig. 106), 남부 스발바르 피오르드에서 강화된 해저류(bottom current)에 의한 퇴적양상과 동일함(Joe et al., 2022). 이러한 맥락에서 내부 분지의 BS3의 분포는 해저류에 의해 휩쓸려 퇴적된 세립질 퇴적층일 가능성이 높음
- BS4는 3.3 ka BP 이후 지류 피오르드에 발달된 조수 빙하의 영향을 받은 빙하 해양 퇴적물(Facies 5)로 구성됨

(다) 남서부 스발바르 피오르드 표층퇴적물의 광물 조성 및 퇴적물 기원지 프록시

- 남서무 스발바르 내 벨준트와 호른준트 피오르드와 지류 피오르드를 대상으로 기 분석된 표층퇴적물 내 석영, 사장석, 탄산염 및 사장석/탄산염 비를 비교함(Fig. 107)

KOPRI 극지연구소

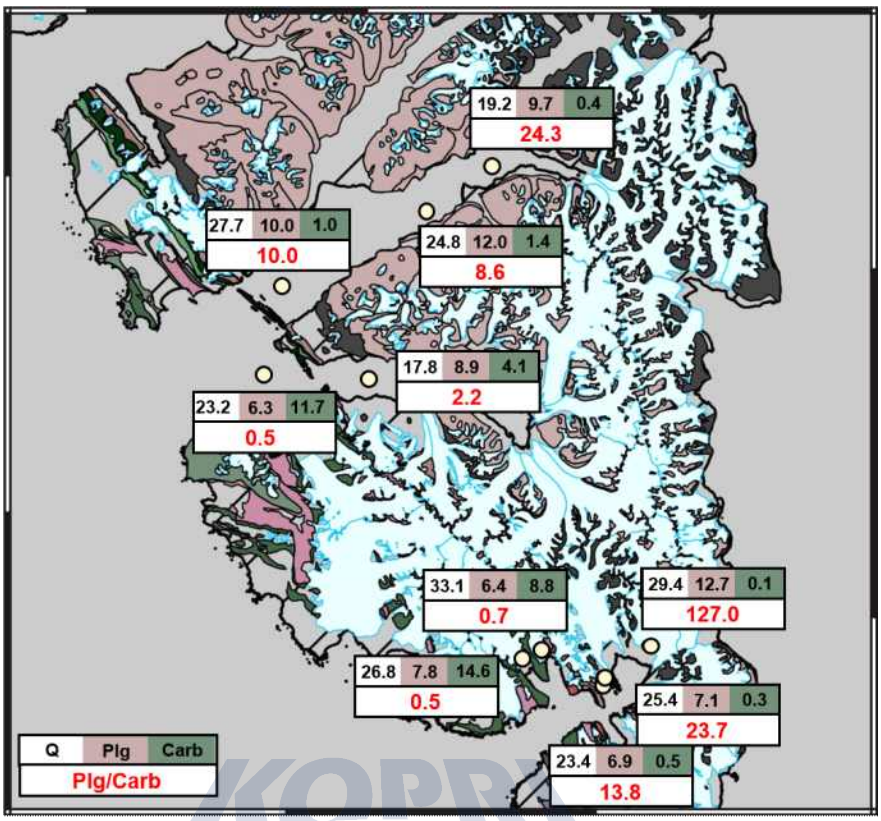


Fig. 107. Regional distribution of bulk mineral compositions including the quartz, plagioclase, carbonate, and plagioclase to carbonate ratio for surface sediments from northwestern Svalbard fjords.

KORDI 극지연구소

- 반 미엔 피오르드, 반 커일렌 피오르드, 그리고 호른준트 내만에서는 탄산염 광물의 함량이 매우 낮거나 미비한 수준(0.1-4.1%)인 반면, 벨준트 피오르드와 호른준트 외만에서는 탄산염 광물의 함량이 최소 8% 이상으로 크게 증가함을 확인. 이러한 지역적 차이는 서 스피츠베르겐 습곡대(West Spitsbergen Fold Belt, WSFB)에 의해 구분되는 서부 지역 탄산염 지괴와 WSFB 동부 지역을 포함한 중앙 제3기 분지(Central Tertiary Basin, CTB)를 구성하는 규질쇄설성 퇴적암 지괴의 분포에 기인한 것으로 판단됨(Dallmann and Elvevold, 2015)
- 탄산염 광물의 조성과 달리, 석영과 사장석의 지역적 변동성은 상대적으로 두드러지지 않는데(Fig. 107), 이는 벨준트와 호른준트 피오르드 사이에 위치한 Wedel Jarlsberg Land에 국지적으로 분포하는 흑운모편암, 석영암, 사암의 영향으로 해석됨
- 남부 스발바르의 이러한 지구조적 특징에 따른 기반암 구역화를 고려하여, 벨준트와 호른준트 피오르드에 유입되는 육상 퇴적물 기원을 구분하기 위해 사장석/탄산염 비비(Plg/Carb)를 비교한 결과, WSFB 서부 지역와 WSFB 동부 지역을 포함한 CTB 지괴에 따른 지역적 변동성에 매우 뚜렷하게 관찰됨. 서부 지역은 사장석/탄산염 비가 매우 낮게 나타나며(<1), 동부 지역으로 갈수록 비율이 최대 127까지 크게 증가

함(Fig. 107). 따라서, 남서부 스발바르 피오르드에서 사장석/탄산염 비는 육상 퇴적물 기원지를 대변할 수 있는 프록시로 활용 가능성 확인

(라) 중력시추코어 퇴적물 내 철산화광물 함량 변화

- 이전 연구에서 확인하였듯이, 분석 퇴적물코어의 석영 함량은 17.6에서 39.2 wt.%의 범위를 보이며(Fig. 108), 코어 퇴적물의 사질 함량과 동일한 거동함. 본 연구에서는 백운석 함량 대신 백운석과 방해석을 포괄하는 탄산염 광물의 함량을 비교하였으나, 이제 백운석 함량의 변화와 큰 변동성은 없었음. 이는 탄산염 광물 내 방해석이 우세한 호른준트 피오르드와 달리, 벨준트 피오르드는 탄산염 광물 내 백운석이 우세함을 의미함
- 사장석과 탄산염 함량은 일반적으로 15 wt.% 이하이며, 210 cm 이하의 하부 구간에서는 두 광물이 상반되는 경향을 보이며 변동함. 상부 구간에서는 사장석 함량이 비교적 감소하는 반면, 탄산염 함량은 증가함
- 퇴적물 철산화광물(FeOx)의 함량은 0에서 3.0 wt.%의 범위로 변화하며, 특히 280cm의 하부에서 네 차례의 강한 증가가 관찰되는 반면, 280–200cm 구간에서 철산화광물은 결핍됨. 200cm 상부 구간은 비교적 소량이긴 하지만 지속적인 철산화광물의 퇴적을 보이며, 특히 상부 24cm 구간에서 최대 3 wt.%까지 주요 증가가 나타남

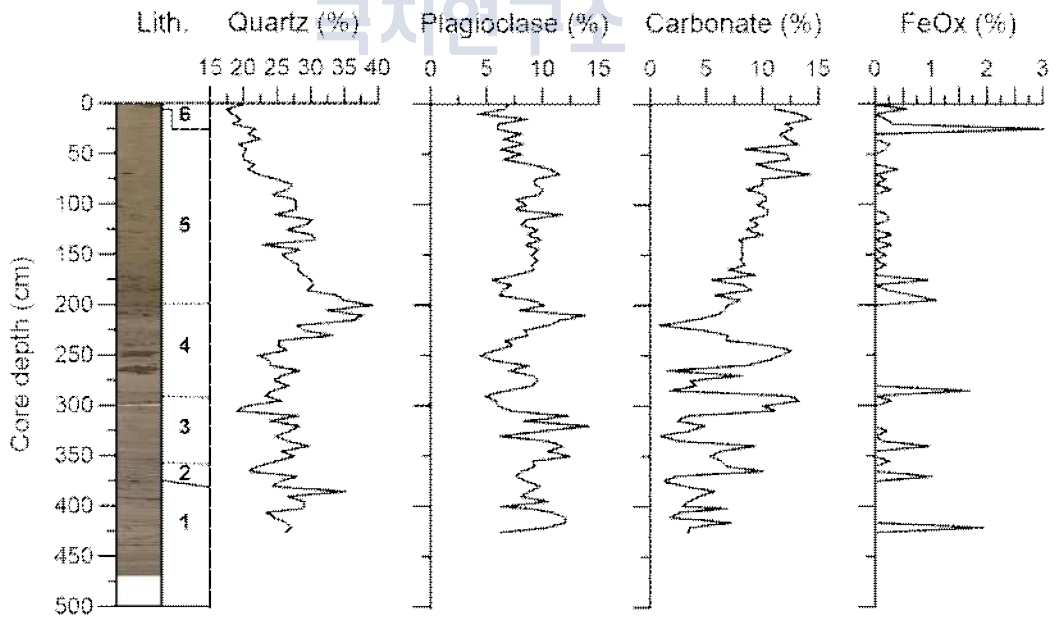


Fig. 108. Up–core variations in bulk mineral compositions, including quartz, plagioclase, carbonate, and Fe–(oxyhydr)oxides (FeOx) in core HH19–877–GC.

(마) 유기지화학 조성 변화

- 분석 퇴적물코어에서 총 유기탄소(TOC)는 0.6-1.9 %의 함량을 보이며 큰 변동성은 없었음. 그러나, 210-180cm 구간에서 TOC가 크게 감소함(Fig. 109)

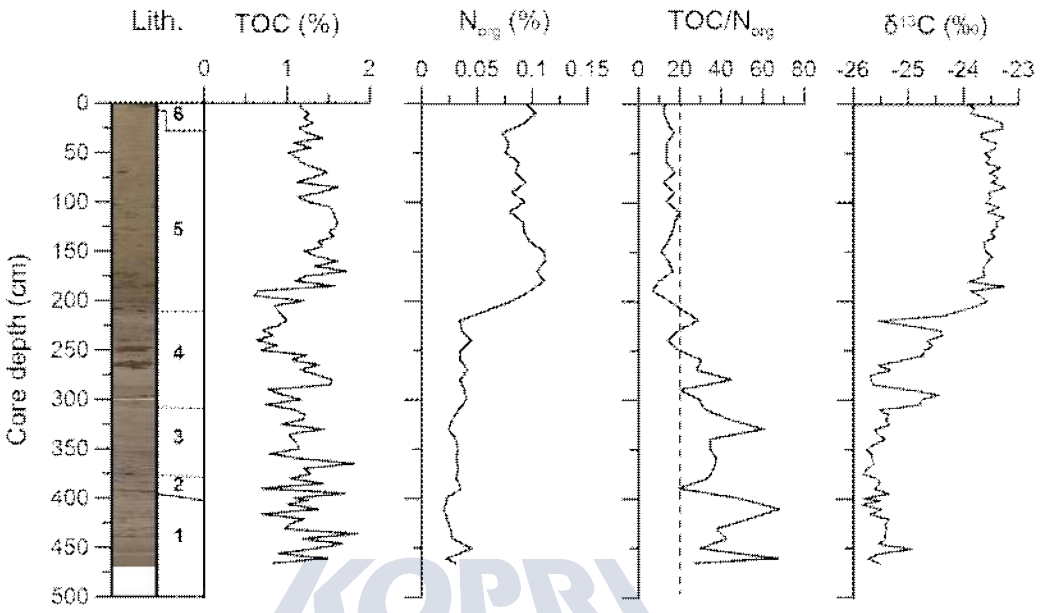


Fig. 109. Up-core variations in TOC, N_{org}, TOC/N_{org} ratio, and $\delta^{13}C$ in core HH19-877-GC.

KOPRI 극지연구소

- 유기 질소(N_{org})는 전반적으로 0.02% 이상으로, 180cm 상부에서 증가하기 시작하여 0.7%를 초과함. TOC와 N_{org}의 비(TOC/N_{org})는 68.1-6.6 범위로 상향 감소함. 특히, 210cm 하부에서 이 비율은 20을 초과하며, 육상기원 유입 매우 지배적임을 지시함. 유기탄소 동위원소($\delta^{13}C_{org}$)는 210cm 하부에서 평균 -25.4‰로 낮고 일정한 값을 유지하는 하지만, 215-305cm 구간에서 -24.4‰까지 증가하기도 함. **210cm** 상부는 $\delta^{13}C_{org}$가 -23.6‰까지 급격히 증가한 후에 높은 값을 유지함

(바) 후기 제4기 마지막 해빙기-홀로세 초기 해빙기(15-10.7 ka BP) 정밀 복원

- 15 ka BP 시점의 SBIS 복원 결과와 GZW 분포에 근거하여(Hughes et al., 2016) (Fig. 106), 벨준트 피오르드는 15 ka BP까지 SBIS에 의해 중부 분지까지 채워져 있었던 것으로 해석됨. 15 ka BP 이후, 벨준트 피오르드에서 빙하 후퇴의 특징은 빙하에 인접한 환경에서 나타나는 융빙수 방출, hyperpycnal flow 및 저탁류의 영향을 빙하기원 퇴적환경으로 기록됨. 이러한 빙하 후퇴 양상은 약 11 ka BP까지 벨준트 피오르드의 지류 피오르드인 반 미엔 피오르드, 반 커일렌 피오르드 및 르셰르셰 피오르드의 입구(mouth)까지 이어졌으며, 이 기간 동안 뚜렷한 빙하의 재 전진/확장은 없었던 것으로 확인됨
- 이러한 빙하 후퇴 기간 내에는 그린란드 대기 온도의 급격한 냉각(Buizert et al.,

2018)과 대서양 자오선 순환(AMOC)의 약화(Ritz et al., 2013)를 특징으로 하는 영거드라이아스 시기(12.9–11.7 ka BP)를 포함하며(Fig. 110), 이 기간은 그린란드(Larsen et al., 2016) 및 북미(Margold et al., 2018) 빙상의 확장되는 시기임. 스발바르 내 여러 피오르드에서도 해당 기간에 빙하의 성장 가능성을 제시하는 여러 기록들이 보고된 반면(Allaart et al., 2020; Forwick and Vorren, 2009; Jang et al., 2021; Svendsen et al., 1996; Nielsen and Rasmussen, 2018), 벨준트 피오르드에서는 이러한 특징이 전혀 나타나지 않았음

- 벨준트 피오르드에서 분석된 결과는 과거 벨준트 피오르드 인근 육상 기록으로 추측된 환경과 일치함(Landvik et al., 1992; Landvik et al., 1987; Mangerud et al., 2006; Mangerud and Landvik, 2007). 현재까지 영거드라이아스 시기에 대한 벨준트 피오르드의 지질 기록은 제시된 바가 없으며, 이러한 연구 결과는 육상 기록을 통한 추측을 지지할 수 있는 피오르드 지질 기록을 제공할 수 있음. 특히, 피오르드에서 확인된 직접적 증거는 피오르드 환경에서 과대모의 될 수 있는 SBIS 복원 결과(Fansworth et al., 2020)에 대한 보정을 위해, 활용될 수 있을 것으로 기대됨
- 영거드라이아스 이후 벨준트 피오르드는 약 11 ka BP까지 빠른 빙하 후퇴로 인한 융빙수 방출, hyperpycnal flow, 저탁류 등 강한 퇴적 환경이 조성되었으며, 급격한 대기 온도 상승과 함께 강화된 AMOC 이상 현상을 동반한 빠른 빙하후퇴는 IRD 퇴적의 뚜렷한 증가(Fig. 110)로 더욱 뒷받침됨
- 특히, 기후 온난화와 벨준트 피오르 및 그 지류 피오르드로의 따뜻한 대서양 해수의 유입(Hald et al., 2004; Skirbekk et al., 2010)은 11.8–11.3 ka BP 사이 반 커일렌 피오르드에 빙하 후퇴를 가속화했을 가능성이 높으며(Kempf et al., 2013), 빙하 후퇴에 따른 육상기원 물질 유입의 영향력은 20을 초과하는 높은 TOC/N_{org} 비로 기록됨
- 퇴적물코어에서 사장석/탄산염 광물 비(Plg/Carb)의 변동은 벨준트 피오르드로 유입되는 퇴적물 공급원의 변화를 반영함. 이 기간 동안 이 비는 약 0.5–8 범위로 큰 변동성을 보이는데, 이는 벨준트 피오르드의 지류 피오르드, 특히 반 커일렌 피오르드(>1)와 르셰르셰 피오르드(<1)의 퇴적물 유입의 영향이 변화하였음을 지시함. 분명, 반 미엔 피오르드에서 기원한 퇴적물 공급의 가능성을 배제할 수는 없으나, 비교적 벨준트 피오르드의 남서부 위치한 퇴적물코어의 정점을 고려하면, 1을 초과하는 사장석/탄산염 광물 비를 특징으로 한 퇴적물 유입에 대하여 반 미엔 피오르드의 퇴적물 공급에 대한 기여는 미비할 것으로 사료됨
- 퇴적물 내 철산화광물(Fe–(oxyhydr)oxide)의 함량 변화는 인근 빙하로부터 방출된 용융수의 영향 또는 빙하 활동에 대한 독립적인 증거를 제공(Jang et al., 2023). 퇴적물코어에서 철산화광물의 농도는 약 11.9–10.7 ka BP 동안 뚜렷한 증가를 보이며(Fig. 110), 특히 1 이상의 사장석/탄산염 광물 비와 일치하는 철산화광물의 증가 양상은 반 커일렌 피오르드에 존재한 빙하로부터 기인한 용융수 방출 사건과 이에 따른 육상기원의 퇴적물 유입을 시사함

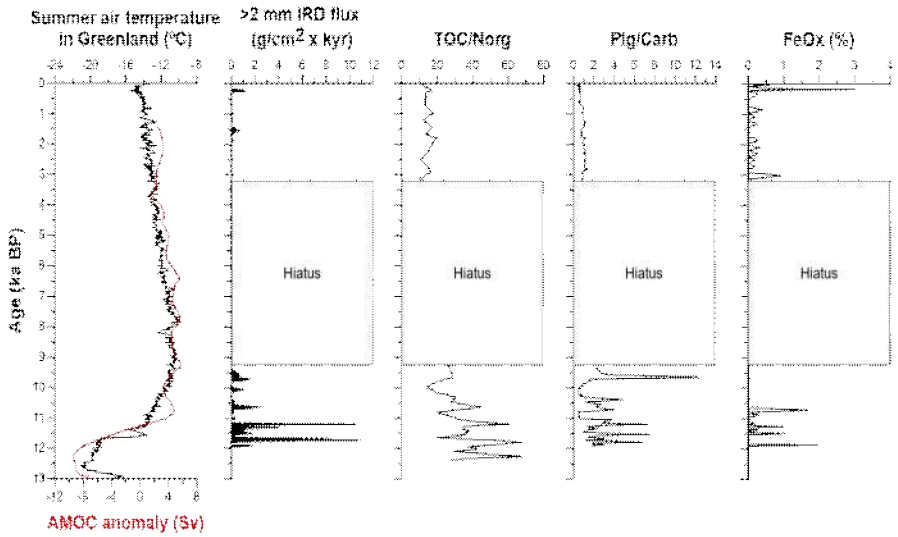


Fig. 110. Comparison among the multi-proxy data, such as IRD flux, TOC/Norg ratio, Plg/Carb ratio, and FeOx, in sediment core HH19-877-GC with temporal variations in the summer air temperature in Greenland and AMOC.

(사) 홀로세(10.7 ka BP-현재) 정밀 복원

- 10.7-9.5 ka BP의 홀로세 초기는 소량의 IRD 퇴적과 생교란된 니와 사질 니(Facies 4)로의 퇴적상 변화를 특징으로 하며, 이는 빙하로부터 먼 환경으로의 전환을 반영함. TOC/N_{org} 비는 10 ka BP까지 14.1로 감소하고 이후 29.0까지 증가하는데, 이러한 증가 양상은 사장석/탄산염 광물 비의 증가와 일치함. 반면, 철산화광물은 10.7 ka BP 이후의 홀로세 초기 동안 퇴적되지 않는데(Fig. 110), 이는 대부분의 빙하가 빠르게 후퇴하여 빙하의 영향이 최소화되었음을 시사함. 이러한 맥락에서, 10.7 ka BP 이후 빙하의 영향이 매우 약해진 시기에 사장석/탄산염 광물 비의 감소는 르셰르셰 피오르드에서 기원한 퇴적물 유입이 일시적으로 벨준트 피오르드에 영향을 크게 미친 것으로 해석됨
- 그러나, 10 ka BP 이후 사장석/탄산염 광물 비는 급격히 증가하며, 이는 반 미엔 피오르드와 반 커일렌 피오르드 기원의 퇴적물 유입의 증가를 지시함. 빙하가 대부분 사라진 환경에서, 급격한 퇴적물 유입의 변화는 빙하 활동 이외의 환경적 요인에 따른 해석이 요구되며, 이에 대해 BS2 층에 발달된 암설류 퇴적체를 (Fig. 106)을 주목할 필요가 있음. 이 암설류는 반 커일렌 피오르드의 외곽 사면부에 발달되어, 사장석/탄산염 광물 비가 높은 퇴적물로 구성된 BS1 층을 침식했을 뿐만 아니라 반 커일렌 피오르드 퇴적물을 벨준트 피오르드로 운반하는 데 중요한 역할을 했을 가능성이 큼. 이 시기의 대규모의 퇴적물 재동(reworking)은 사면 불안정의 결과로 판단되며, 홀로세 초기에 스발바르 연안과 육상 환경에 발생각 빠른 지구조적 융기

(Forman et al., 2004)가 해당 시기의 암설류를 형성했을 것으로 보임

- 9.5–3.3 ka BP 동안 퇴적물 기록은 사질 함량이 급격히 증가하며 퇴적률이 매우 낮은 결층(hiatus)로 확인됨. 홀로세 초–중기를 특징짓는 이러한 퇴적 현상은 스발바르 남부의 스토르 피오르드에서도 동일하게 관찰됨(Joe et al., 2022; Łącka et al., 2015; Nielsen and Rasmussen, 2018; Rasmussen and Thomsen, 2014; 2021). 이러한 퇴적환경은 다양한 환경적 요인을 반영할 수 있음
- 극단적으로 낮은 퇴적률은 홀로세 초기의 빠른 빙하 후퇴로 인한 빙하 감소와 관련된 육상기원 퇴적물 유입의 감소를 반영하는 것으로 해석됨. 대부분의 빙하가 사라졌음에도 불구하고, 사질 함량의 증가는 이 시기에 생존한 스발바르 육상 빙하의 영향일 수 있음(Farnsworth et al., 2020; Fjeldskaar et al., 2018). 그러나, 벨준트 피오르드의 중부 분지(퇴적물코어 정점 포함)에서 SBP 자료로 관찰된 지역적 결층과 이에 상응하는 내부 분지 퇴적층(BS3)의 분포는 이러한 결층 형성의 주요 원인이 북대서양 유입 증가로 인해 강화된 해저류의 분급 현상임을 지시함. 특히, 벨준트 트로프(Ślubowska–Woldengen et al., 2007) 와 스토르 피오르드(Rasmussen and Thomsen, 2015)의 여러 코어퇴적물 기록은 약 10 ka BP 이후 강한 해저류 환경에서 서식했던 *Cibicides lobatulus*의 증가를 보임
- 약 3.3 ka BP 이후 홀로세 후기 동안 벨준트 피오르드는 IRD의 간헐적 퇴적과 생교란된 니와 사질 니 퇴적상(Facies 5)을 특징으로 함. 이는 Facies 4와 유사하게 빙하 전면으로부터 비교적 먼 환경의 퇴적 환경을 반영함(Forwick and Vorren, 2009; Joe et al., 2022; Lucchi et al., 2013; Nielsen and Rasmussen, 2018; Rasmussen and Thomsen, 2014).
- 간헐적인 IRD의 퇴적은 벨준트 피오르드의 지류 피오르드에 조수 빙하의 성장이 있었음을 나타내며(Kempf et al., 2013; Larsen et al., 2018; Moskalik et al., 2018), 신빙기(Neoglacial) 기간의 빙하 활동의 증가와 일치함(Farnsworth et al., 2020). 해당 시기에 TOC/N_{org} 비는 10–20으로 비교적 감소하지만, 벨준트 피오르드로 유입되는 육상기원 퇴적물 유입이 여전히 우세했음을 지시함(Knies and Martinez, 2009).
- 사장석/탄산염 광물 비가 1 내지 그 이하로 유지되는 것은 주로 남부 지류 피오르드인 르셰르셰 피오르드에서 공급되는 퇴적물 유입이 지배적임을 나타내며, 지속적이고 일정한 철산화광물의 퇴적은 르셰르셰 피오르드의 조수 빙하가 홀로세 후기 동안 벨준트 피오르드 퇴적물 공급의 주요 원인임을 시사함. 이러한 맥락에서, 코어퇴적물 최상부에 관찰된 급격한 철산화광물 증가는 소빙기(Little Ice Age) 동안 르셰르셰 피오르드 조수 빙하의 서지(surge)형 전진과 후퇴의 흔적일 가능성이 큼(Moskalik et al., 2018)
- 본 연구 내용을 바탕으로 천부지층탄성파 자료 및 HH19–877–GC 코어의 다중 프록시 분석 결과 기반 영거드라이아스 이후 빙하 거동 및 퇴적환경 복원 연구에 대한 논문을 국제학술지(SCI)에 투고(4월) 및 게재(9월)

KOPRI 극지연구소

나) 마지막 해빙기 이후 콩스피오르드 빙하 역사 및 퇴적환경 정밀 복원

(1) 연구 목적

- 스발바르 북서부에 위치한 콩스피오르드는 따뜻한 해류의 유입과 빙하 활동이 기후 변화에 어떻게 반응하는지 이해하는데 중요한 지역임
- 입도 end-member 모델링은 퇴적물의 유입, 운송, 퇴적 등 전반적인 퇴적 과정을 이해하는데 도움을 주고, 자생성과 쇄설성 네오디뮴 동위원소는 각각 수괴 특징과 퇴적물 기원지 추정에 큰 역할을 함
- 본 연구에서는 콩스피오르드 해곡에서 획득한 퇴적물 코어에 입도 end-member 모델링과 네오디뮴 동위원소 분석을 진행하여 기후 변화에 따라 해류 유입과 빙하활동에 의해 퇴적 환경이 어떻게 달라지는지 알아보고자 함

(2) 연구 방법

(가) 시료 및 데이터

- 퇴적물 코어는 2019년 RVIB Kronpris Haakon을 이용하여 콩스피오르드 해곡(Kongsfjordrenna) 중심부에서 획득한 심부퇴적물 코어 KH17-GPC01와 2022년과 2023년 한-노 스발바르 국제공동탐사 기간 중 RV Helmer Hanssen을 이용하여 획득한 콩스피오르드와 크로스피오르드의 천부퇴적물 코어 6점(HH22-1159-MUC, HH22-1161-MUC, HH22-1163-MUC, HH23-1061-MUC, HH23-1071-MUC, HH23-1073-MUC)을 대상으로 함(Fig. 111)
- 수괴 특징을 파악하기 위해 2022년 한-노 스발바르 국제공동탐사에서 콩스피오르드의 바깥쪽에서 안쪽까지 세 정점에서 수집한 CTD (Conductivity, Temperature, and Depth) 자료(HH22-1158-CTD, HH22-1160-CTD, HH22-1162-CTD)를 추가로 연구에 활용하였으며, 부유 입자의 입도 특징을 파악하기 위해 HH22-1162-CTD 자료 수집중 수심 10 m에서 획득한 부유 입자(HH22-1162-SPM)도 연구에 활용함(Fig. 111)

(나) 입도 분석

- 심부퇴적물 코어(KH17-GPC01)에서 약 5 cm 간격으로 채취한 시료와 천부퇴적물 코어 6점의 표층퇴적물(0-0.5 cm) 및 수심 10 m에서 획득한 부유 입자(HH22-1162-SPM)를 동결 건조하여 분석에 이용함
- 입도 분석에는 극지연구소의 레이절 회절 방식 Mastersizer 3000을 활용함

(다) KH17-GPC01 퇴적물 입도 end-member 모델링

- 심부 퇴적물 코어에서 분석된 모든 시료의 퇴적물 입도 분포 곡선은 AnalySize 프로그램(Paterson and Heslop, 2015)을 이용한 입도 end-member 모델링에 활용됨

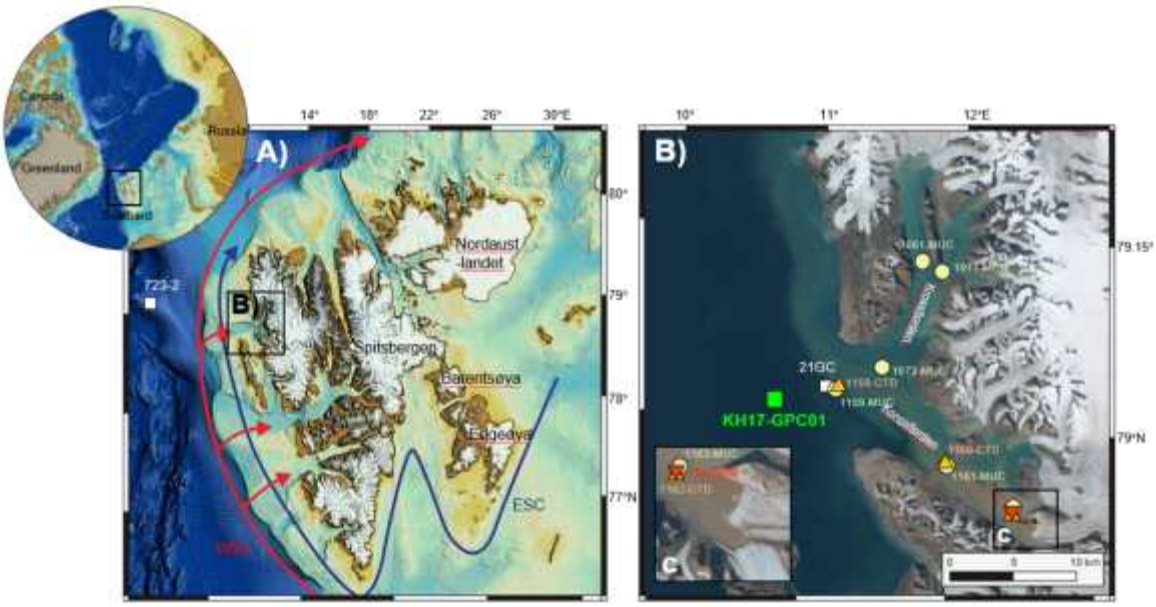


Fig. 111. Map of Arctic, (A) Svalbard, and (B) northwestern Svalbard. WSC: West Spitsbergen Current, ESC: East Spitsbergen Current.

(라) 네오디뮴 동위원소

- 심부퇴적물 코어(KH17-GPC01)에서 약 50 cm 간격으로 샘플링한 시료와 천부퇴적물 코어 6점의 표층 퇴적물(0-0.5 cm)를 분석에 이용함
- 모든 퇴적물 시료는 동결건조 후 균질하게 분말화 과정을 거쳤으며, 0.02M hydroxylamine hydrochloride in 25% acetic acid (HH 용액)로 약 1시간 동안 침출(leaching)하여 퇴적물 내 자생성분을 확보함. 퇴적물 내 쇄설성분은 자생성분이 추출되고 남은 잔여퇴적물에 다량의 HH 용액을 첨가하여 자생성분을 완전히 제거한 뒤 수산화나트륨(NaOH)과 과산화나트륨(Na_2O_2)은 초고온에서 반응시키는 알칼리 융해법(alkaline fusion)으로 확보함
- 확보된 퇴적물 내 자생 및 쇄설성분들은 양이온 교환 레진인 TRU 레진 및 Ln 레진을 컬럼 크로마토그래피 방법에 순차적으로 활용하여 주변 매트릭스(matrix)로부터 네오디뮴을 분리함
- 분리가 완료된 네오디뮴에서 극지연구소 내 열이온화질량분석기(Thermal Ionization Mass Spectrometer; TIMS)를 통해 동위원소 비($^{143}Nd/^{144}Nd$)가 분석됨. 자연 시료 내에서 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 비의 변화폭은 매우 작아 콘드라이트 운석의 네오디뮴 동위원소 비 분석 값(chondritic uniform reservoir, $(^{143}Nd/^{144}Nd)CHUR = 0.512638$; Jacobsen and Wasserburg 1980)에 대한 상대적인 변화량에 1을 곱한 값인 εNd 값값($[(^{143}Nd/^{144}Nd)sample/(^{143}Nd/^{144}Nd)CHUR - 1] \times 10^4$)을 이용함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 수층 특성

- CTD 자료의 온도와 염분 결과를 바탕으로 세 정점 모두에서 네 개의 뚜렷한 수층(Surface Water, SW; Intermediate Water, IW; Atlantic Water, AW; Transformed Atlantic Water; TAW) 구분됨(Fig. 112). 수층 구분은 과거 콩스피오르드에서 수행된 Cottier et al., (2005)의 분류를 활용함
- 수층의 가장 윗 쪽에 위치한 SW는 상대적으로 낮은 염분(31.00에서 33.95 psu)을 보였으며, 염분은 피오르드 안쪽 지점(HH22-1162-CTD)으로 갈수록 눈에 띄게 감소함. SW의 수온은 4° C에서 8° C 사이였으며, 피오르드 바깥쪽 지점(HH22-1158-CTD)에서 더 높은 온도가 관찰됨. SW의 두께는 피오르드 안쪽에서 바깥쪽까지 27 m에서 12 m로 감소함
- SW 아래에서는 IW가 전이층으로 위치했으며, SW에 비해 염분은 증가하고 수온은 감소함. IW 층의 두께는 안쪽에서 바깥쪽까지 29 m에서 10 m로 감소함
- AW는 IW 아래 염분이 약 34.65 psu로 안정화되면서 수온이 3° C 이상인 수층으로, 바깥쪽 및 중간 정점에서 150 m 전후로 두껍게 나타났으나, 안쪽 정점에서는 5 m로 얇게 나타남
- TAW는 AW 아래에서 식별되었으며, 염분의 변화는 크지 않으나 3° C 이하의 수온을 가진 상대적으로 차가운 수층임. 이 수층은 대서양과 북극에서 유입되는 해수가 혼합되어 형성될 수 있음

KOPRI 극지연구소

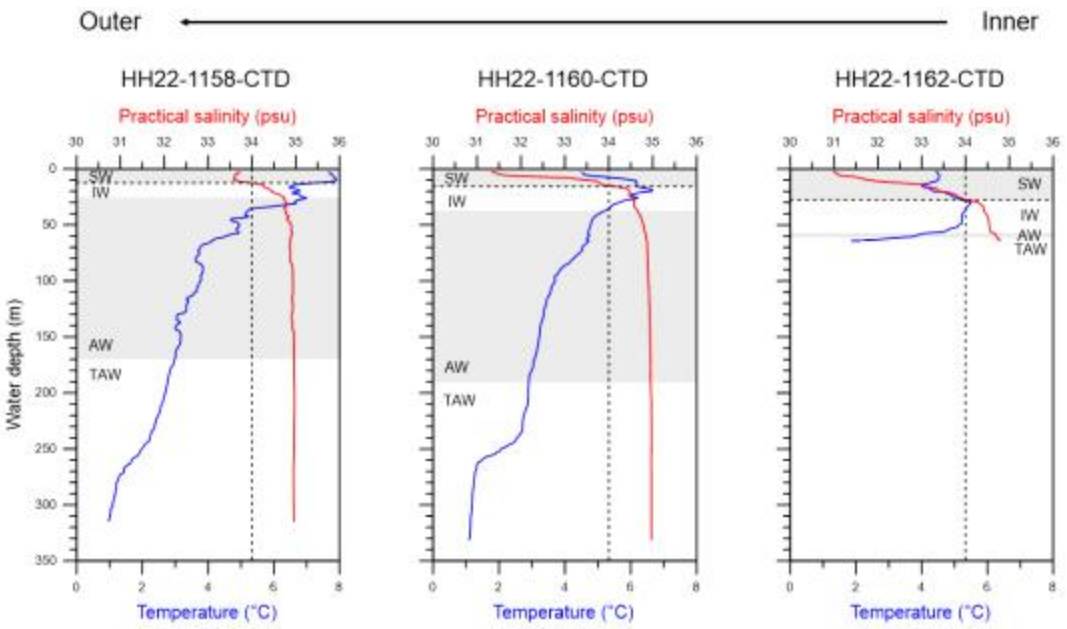


Fig. 112. CTD (Conductivity, Temperature, and Depth) profiles and classified water mass distribution measured in Kongsfjorden in July of 2022.

(나) 부유 입자와 표층 퇴적물의 입도 분포와 심부퇴적물의 입도 end-member 특징

- HH22- 1162- SPM의 입도 분포는 0.3 μm에서 1300 μm의 범위를 보이며, 주로 매우 세립한 실트에서 중간 실트(very fine to medium silt, 2-16 μm; 75.7%)로 구성되어 있음(Fig. 113A). 점토 성분(<2 μm; 9.2%)은 모래 성분(63- 2000 μm; 4.2%)보다 많음. 모드 값은 6.32 μm로 나타남
- 조수 빙하와 인접한 정점에서 획득한 퇴적물 코어 HH22-1163-MUC을 제외한 5 정점에서의 표층 퇴적물은 0.3 μm에서 800 μm의 입도 범위를 보이면서 HH22-1162-SPM과 대체로 비슷한 입도 분포 특징을 나타냄(Fig. 113B, solid lines). HH22-1163-MUC의 표층 퇴적물은 다른 표층 퇴적물 보다 더 조립한 입도 분포를 보였으며(Fig. 113B, dotted line), 모드 값도 19.95 μm로 상대적으로 조립함. 이는 빙하 전면부에서 조립한 입자들이 퇴적된 결과로 여겨짐

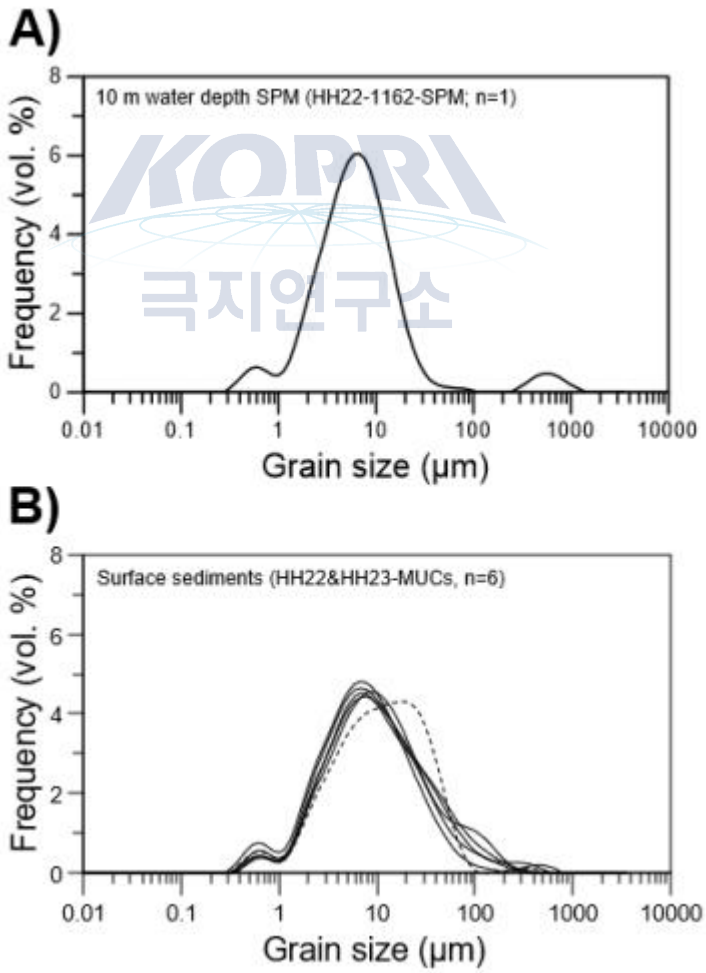


Fig. 113. Grain size distributions of (A) HH22-1162-SPM and (B) surface sediments of HH22 and HH23 multicores. Note that grain size distribution of HH22-1163-MUC is represented by a dotted line.

- 이전 연구에서 KH17-GPC01의 end-member는 세 개로 결정됨. 추출된 end- member들은 0.3 μm에서 1000 μm의 입도 범위를 보임(Fig. 114). 첫 번째 엔드 멤버는 가장 세립하며, 주로 매우 세립한 실트에서 중간 실트(69.4%)로 구성되어 있었고, 모드 값은 6.32 μm로 나타남(Fig. 114A)
- 두 번째 엔드 멤버는 첫 번째 엔드 멤버와 비슷한 입도 분포를 보였지만 약간 더 조립하며, 모드 값은 11.95 μm이고 68%의 세립한 실트에서 조립한 실트(fine to coarse silt; 4-31 μm)로 구성되어 있음(Fig. 114B). 두 엔드 멤버는 유사점이 많아 본 연구에서 EM1a와 EM1b로 분류됨
- 세 번째 엔드 멤버는 EM2로, EM1a와 EM1b에 비해 더 조립한 입도 분포를 보임(Fig. 114C). EM2는 중간 실트에서 매우 조립한 실트(medium to very coarse silt, 8-63 μm; 64.6%)를 상당 비율로 포함하고 있으며, 모드 값은 29.25 μm로 나타남

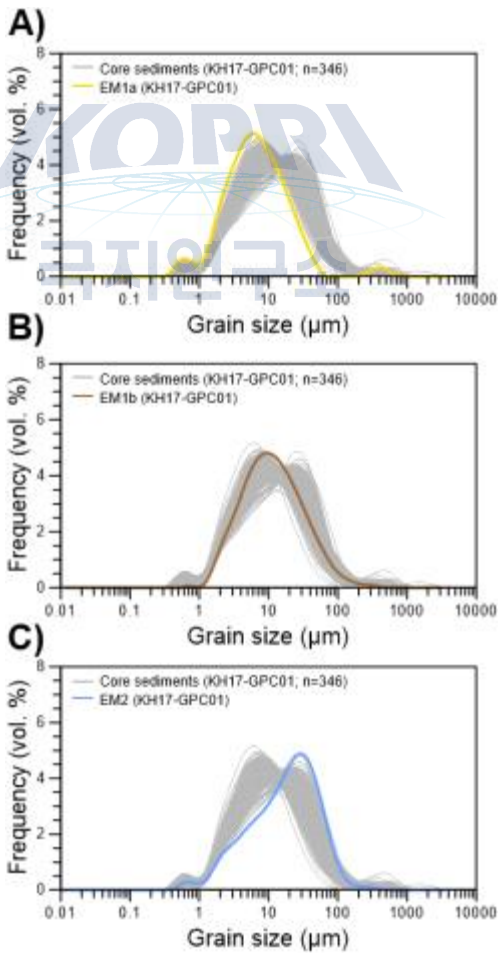


Fig. 114. Grain size end-members: (A) EM1, (B) EM2, and (C) EM3, from sediment core KH17-GPC01. Gray lines represent the grain size distributions of each sample from sediment core KH17-GPC01.

(나) 네오디뮴 동위원소

- 콩스피오르드와 크로스피오르드에서 채취한 표층 퇴적물의 자생성 εNd는 -12.3에서 -11.4 사이의 값을 가졌고, 쇄설성 εNd은 −15.6에서 -12.1 사이의 값을 보였으며, 모든 시료에서 자생성 εNd 값이 쇄설성 εNd 값보다 높게 나타남(Fig. 115A)
- KH17−GPC01 코어의 경우, 자생성 εNd 값은 −13.2에서 −10.6 사이였고, 쇄설성 εNd 값은 −15.9에서 -13.3 사이로 나타남. 코어의 하부(770 cm까지)에서는 퇴적물의 자생성분과 쇄설성분 모두 εNd 값이 더 낮은 경향을 보였으나, 두 시료(1402 cm: −13.3, 1401 cm: −14.2)의 쇄설성 εNd 값은 상대적으로 높은 반면, 자생성 εNd 값은 낮게 유지됨(Fig. 115B)

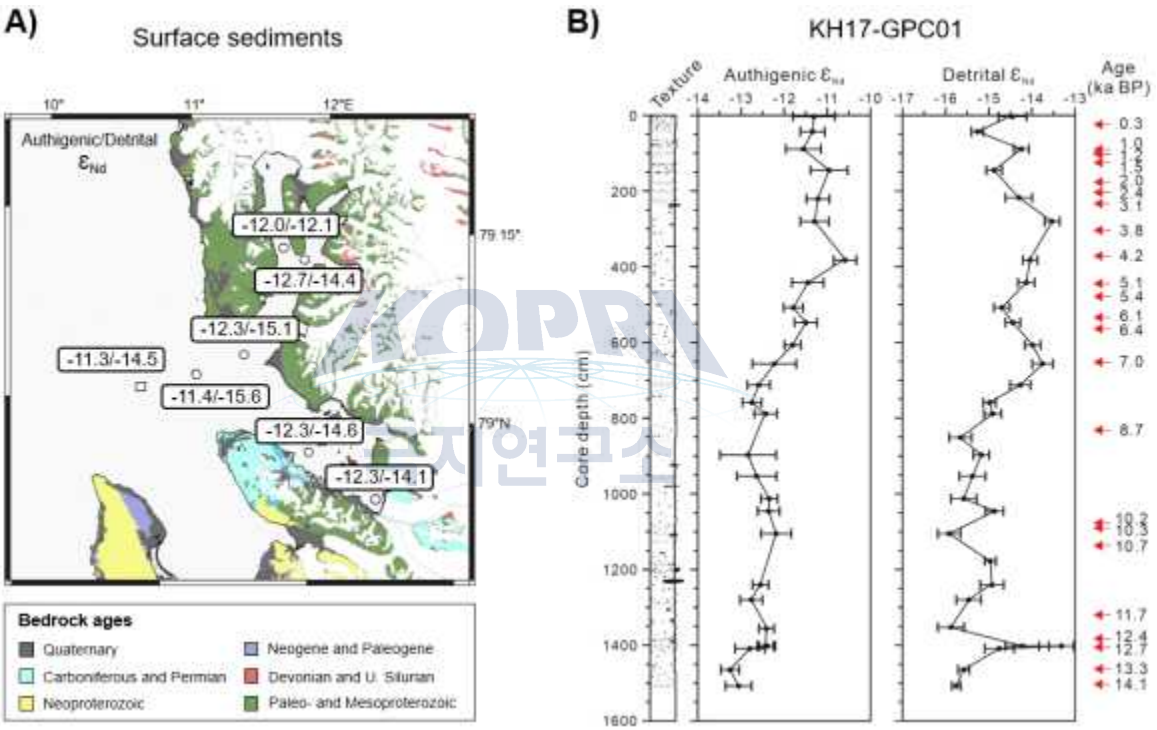


Fig. 115. (A) Authigenic and detrital εNd values from surface sediments, along with a bedrock map. (B) Variations in authigenic and detrital εNd for sediment core KH17- GPC01. Error bars for εNd represent ±2σ uncertainties.

(라) 빙해양 퇴적환경 정밀 복원

- 피오르드에서는 퇴적물 공급이 주로 조수 빙하와 하천에서 방출되는 탁한 담수에서 비롯됨(Howe et al., 2010). 이 담수는 해수보다 밀도가 낮아 용승 과정으로 피오르드 내 SW 형성에 기여함(Cottier et al., 2005). 콩스피오르드에서도 SW는 탁한 담수에 포함된 입자를 외해로 운반하는 역할을 함
- 조수 빙하 근처의 10 m 수심에서 채취한 HH22−1162−SPM의 입도 분포는 탁한 담수의 입자가 상대적으로 세립하다는 것을 나타냄. KH17−GPC01 코어의 EM1a는

HH22-1162-SPM의 입자 분포 특성과 매우 유사하며(Figs. 113A, 114A), 이 유사성은 EM1a가 주로 융빙수 방출에서 비롯된 입자가 퇴적된 영향을 받음을 시사함

- KH17-GPC01 코어의 EM1b도 융빙수 방출의 영향을 반영할 수 있지만, EM1a와 HH22- 1162- SPM에 비해 조립한 입자(조립한 실트; 16-31 μm)가 포함되어 있음(Fig. 114B). EM1b에서 조립한 입자는 해류에 의한 해안 침식으로 퇴적될 수 있음(Joo et al., 2019)
- EM2는 가장 조립한 엔드 멤버로(Fig. 114C), 융빙수 방출로 인한 세립한 입자의 공급이 감소하거나 해류에 의한 퇴적물 고르기(winnowing)이 증가한 퇴적 환경을 나타낼 수 있음
- 콩스피오르드 해곡에서 영거드라이아스기(Younger Dryas, 12.9-11.7 ka BP) 초기에 EM1a의 비율이 증가하는 것은 영구적인(혹은 장기적인) 해빙이 조립한 입자의 유입을 방해하였고, 약한 해류 세기로 퇴적물 고르기 효과가 거의 없었음을 나타냄(Fig. 116). 영거드라이아스기 후기에 EM1b의 비율 증가는 계절성 해빙 조건으로의 변화와 함께 약간의 기온 상승을 반영하는 것으로 보임
- 홀로세의 시작과 함께 빙하가 급작스럽게 붕괴되면서 빙하 쇄설성 입자(IRD)가 급격한 증가함(Fig. 6). 이후 EM1a와 EM1b 비율은 모두 감소했으며, 특히 EM1a는 전체 시기에서 가장 낮은 값을 보임(Fig. 116). 이러한 변화는 융빙수로 유입되는 퇴적물의 양이 감소했음을 나타내는데, 급격한 빙하 후퇴로 인해 빙하 전선에서 멀어졌기 때문으로 보임. 반면, EM2의 비율 증가는 해류의 상대적인 영향력을 나타내는 SS mean의 증가와 일치하면서 해류의 강화된 영향을 반영함(Fig. 116)
- 홀로세 중기의 스발바르 홀로세 빙하 최소기(Holocene Glacial Minimum; Farnsworth et al., 2020) 이후 조수 빙하가 다시 전진하면서 EM1a의 비율이 증가했으며, IRD의 수도 유사하게 증가함(Fig. 116). EM1a와 IRD의 경향이 일치하는 것은 빙하 활동이 증가하면서 융빙수 유출이 강화되었음을 나타냄(Forwick and Vorren, 2009). 반면, EM2의 감소는 연구 지역에서 바닥 해류의 영향이 줄어든 것을 나타냄(Fig. 116)
- 쇄설성 εNd 값은 퇴적물의 기원지 유추에 활용될 수 있음. 콩스피오르드와 크로스피오르드의 표층 퇴적물 분석 결과에 따르면, 피오르드 바깥쪽이 피오르드 안쪽보다 더 낮은 쇄설성 ε_{Nd} 값을 보임(Fig. 115A). 콩스피오르드 해곡의 심부퇴적물에서 쇄설성 ε_{Nd} 값은 EM1a와 비슷하게 변화하면서 쇄설성 ε_{Nd} 값이 빙하 전면부의 위치와 연관될 수 있음을 나타냄(Fig. 116). 빙하가 육상으로 대부분 후퇴한 홀로세 초기에 콩스피오르드 해곡에서 쇄설성 ε_{Nd} 값이 낮게 유지되는 것은 강화되는 해류의 영향으로 피오르드 바깥쪽에서 침식된 퇴적물이 유입되었음을 가능성을 나타냄
- 해양 퇴적물은 주변 해수에서 Nd를 흡수할 수 있기 때문에 자생성 εNd 분석은 해수 환경 특성을 복원하는 데 중요한 지표로 활용될 수 있음(Jang et al., 2017; Bayon et al., 2004). 콩스피오르드와 크로스피오르드 수역은 대서양수(AW)와 북극해수(ArW)의 영향을 받으며, 이전 연구에서 TAW의 해수 ε_{Nd} 값은 -11.3에서 -

10.7로 보고되었고, ArW의 해수 ε_{Nd} 값은 -9.9로 분석됨(Laukert et al., 2017). 지역적인 융빙수 방출의 영향을 받은 해수 εNd 값에 대한 직접적인 측정값은 없었지만, 표층 퇴적물의 자생성 εNd 값을 통해 −12.7에서 -12.0 사이로 유추할 수 있음(Fig. 115A)

- 약 14 ka BP에서 10 ka BP까지, 자생성 εNd 값이 -12보다 낮은 것은 콩스피오르드 해곡이 융빙수 방출의 영향을 많이 받았음을 나타냄(Fig. 117). 약 10 ka BP에서 8 ka BP 에는 높은 EM2/(EM1a + EM1b) 비율로 해류의 영향력(EM2)이 퇴적물 공급의 영향력(EM1a 및 EM1b)보다 높음을 나타냄(Fig. 117). 이에 더불어, 이 시기 동안 상대적으로 따뜻한 수역과 관련된 유공충 종인 *Cassidulina reniforme*의 가 많아지는 것은 콩스피오르드 해곡의 바닥 수층이 AW의 강한 영향을 받았음을 나타냄(Fig. 117) (Skirbekk et al., 2010)
- 따뜻한 AW의 유입은 100m 수심에서의 해수온도 복원으로 확인됨(Fig. 7)(Werner et al., 2016). 현재 AW의 해수 ε_{Nd} 값이 아이슬란드−스코틀랜드 수역에서 −13.0인 점을 고려할 때(Lacan and Jeandel, 2004), 강하게 유입되는 AW가 융빙수 방출이 줄어든 시기에도 낮은 authigenic εNd 값을 유지시키는 것으로 생각됨. 7 ka BP 이후, 자생성 ε_{Nd} 값이 약 −11로 높아지면서 TAW의 해수 값과 일치하는데, 이러한 경향은 AW 영향의 감소와 ArW 영향의 증가를 시사함. 이는 *C. reniforme*의 감소(Skirbekk et al., 2010) 및 차가운 해수온도(Werner et al., 2016)와 해류 영향력 감소의 경향성과도 일치함(Fig. 117).
- 본 연구 내용을 바탕으로 KH17-GPC01 코어의 다중 프록시 분석 결과 기반 과거 14,000년 전 빙하 거동 및 퇴적환경 복원 연구에 대한 논문 초안을 국제학술지(SCI)에 투고(6월)

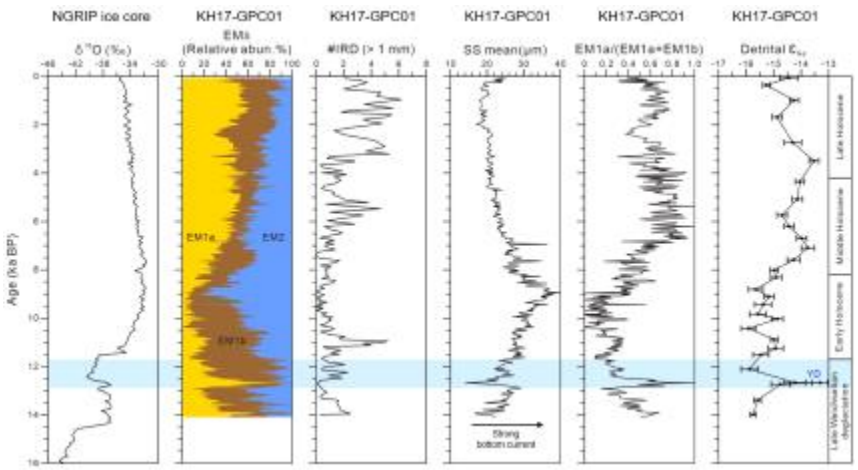


Fig. 116. Variation in $\delta^{18}O$ from the Greenland NGRIP ice core (NGRIP community members, 2004) and the relative abundances of grain size end-members, number of IRDs (> 1mm), mean sortable silt (SS mean), EM1a/(EM1a+EM1b) grain size end member ratio, and detrital ε_{Nd} for sediment core KH17-GPC01.

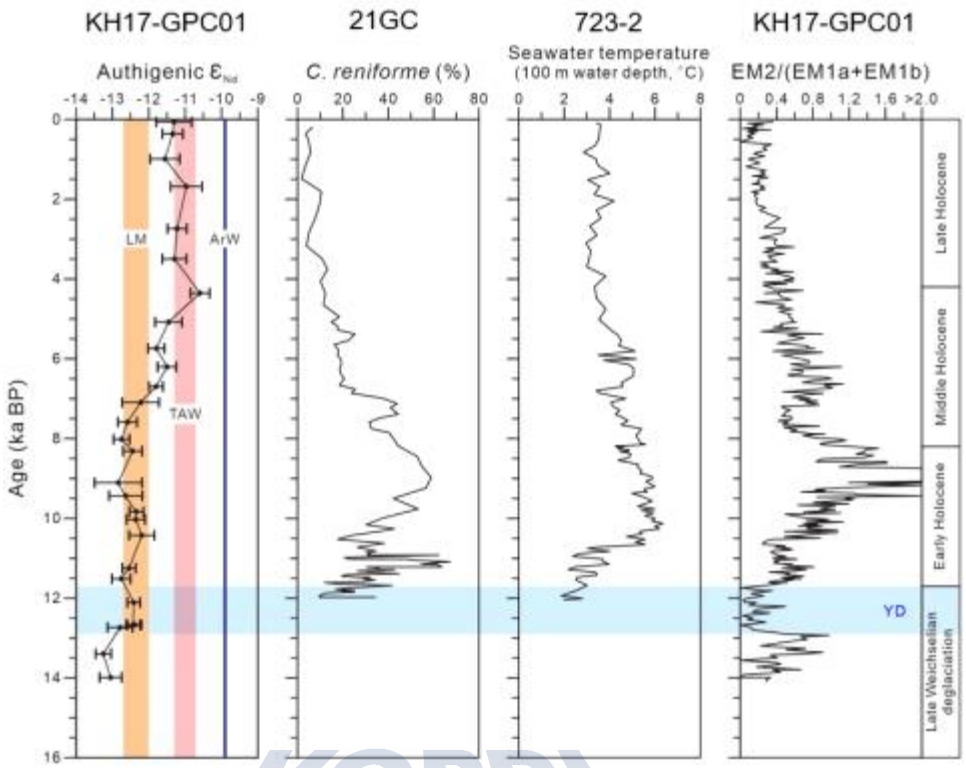


Fig. 117. Variations in authigenic εNd for sediment core KH17-GPC01, the relative abundance of *Cassidulina reniforme* in sediment core NP05-11-21 GC (Skirbekk et al., 2010), reconstructed sea water temperature in sediment core MSM5/5-723-2 (Werner et al., 2016), and the EM2/(EM1a+EM1b) grain size end-member ratio in sediment core KH17-GPC01. Orange, pink, and blue vertical bands indicated in authigenic ε_{Nd} values represent the ranges of LM (local meltwater), TAW (Transformed Atlantic Water), and ArW (Arctic Water), respectively.

다) 힌로펜 해협 및 북부 스발바르 메가슬라이드 지역 퇴적물 시추코어 분석

(1) 연구 목적

(가) 힌로펜 해협

- 힌로펜 해협(Figs. 118A, C)은 수심 경사를 따라 해류가 강하게 유입되는 지역으로, 스발바르 서부의 스피츠베르겐(Spitsbergen) 섬 북부와 스발바르 동부의 노르드아우스트란데트(Nordaustlandet) 섬에 발달한 피오르드 주변에서의 빙하 활동의 영향을 받는 지역임
- 본 연구는 힌로펜 해협에서 해류 유입과 지역별 빙하 활동에 따른 복잡한 퇴적 환경 변화를 복원하기에 앞서, 입도 end-member 모델링을 활용하여 홀로세 기간 동안의 기본적인 퇴적환경 변화를 파악하고자 함

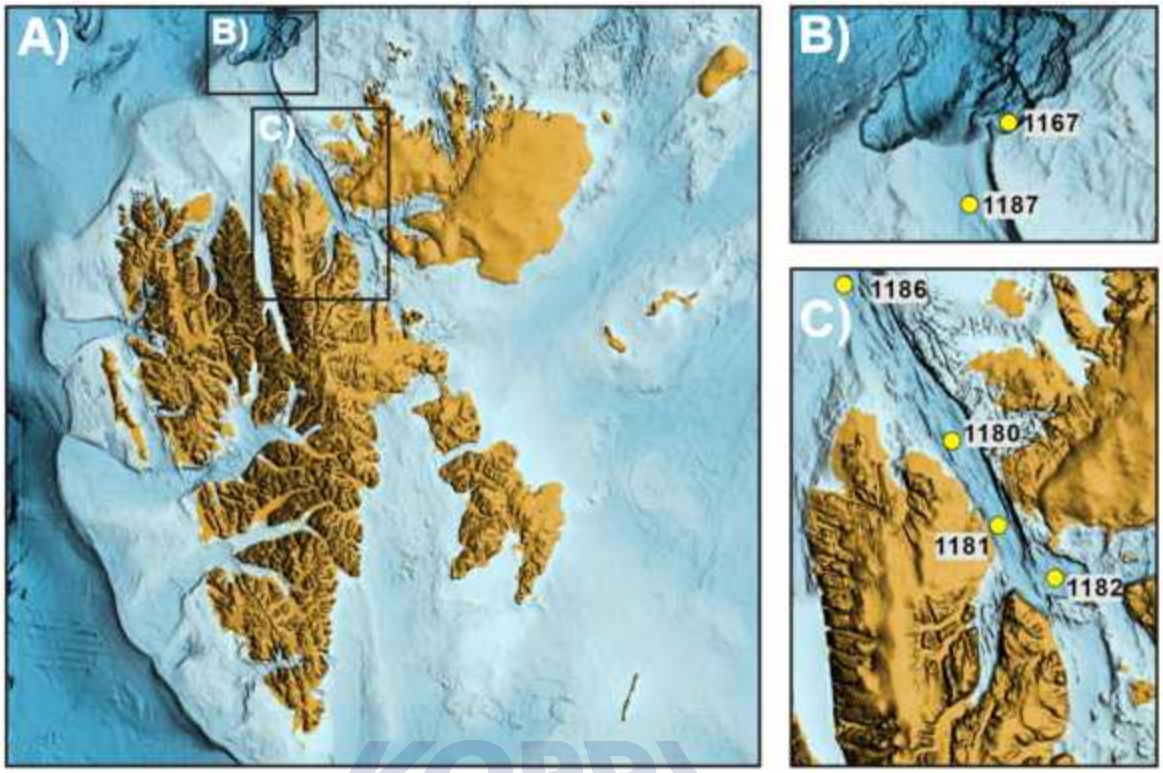


Fig. 118. Map showing (A) Svalbard, (B) northern Svalbard megaslide, and (C) Hinlopen Strait. Yellow circles mark the gravity core sites.

KOPRI
극지연구소

(나) 북부 스발바르 메가 슬라이드 지역

- 해저 슬라이드의 형성은 거대 쓰나미 발생에 따른 해저지형 및 연안 환경에 중대한 영향을 미치는 자연적 위험 요소이기 때문에, 사면붕괴의 성인과 발생 요인을 밝히는 것은 미래 사면붕괴에 대한 조짐을 확인하는 데 매우 중요하며 현재까지 이러한 미래 사면붕괴 발생을 예측하는 것은 주요 연구 대상임(Winkelmann et al., 2010)
- 북부 스발바르에 발달된 대규모 메가 슬라이드(Fig. 118B)는 과거 약 3만년 전 발생한 것으로 여겨졌으나(Winkelmann et al., 2008; Winkelmann and Stein, 2007), 계단 형식으로 여러 구획을 이루는 다양한 슬라이드의 형태로 보아 단일(single) 성인 보다는 후퇴(retrogressive) 성인일 가능성을 보임(예, Barrett et al., 2021)
- 본 연구는 이러한 지형적 특징을 고려하여 가장 최근에 발생한 것으로 추정되는 북부 스발바르 메가 슬라이드 지역 최남단 구역을 대상으로 그 성인 및 형성 시기를 규명하는 것을 최종 목적으로 스발바르 북부 대륙붕 지역과 메가 슬라이드 지역에서 획득한 두 점의 퇴적물 코어에 대한 기초자료 분석을 수행함

(2) 연구 방법

(가) 퇴적물 코어

- 2022년 RV Helmer Hanssen을 이용한 스발바르 국제공동탐사 기간 중 북부 스발바르 메가슬라이드 지역에서 획득한 심부퇴적물 코어 2점(HH22-1167-GC, HH22-1187-GC: Fig. 118B)과 힌로펜 해협에서 획득한 심부퇴적물 코어 4점(HH22-1180-GC, HH22-1181-GC, HH22-1182-GC, HH22-1186-GC; Fig. 118C)을 대상으로 연구를 수행함

(나) 입도 분석

- 퇴적물 코어 별로 약 5 cm 간격으로 채취한 부시료는 동결 건조시킨 뒤 유기물을 제거하기 위해 35%의 과산화수소로 전처리함
- 유기물이 제거된 퇴적물 시료들은 극지연구소에서 레이저 회절 방식의 Mastersizer 3000을 이용하여 입도 분석함

(다) 입도 end-member 모델링

- 퇴적물 코어별로 분석된 모든 퇴적물 시료의 입도 분포 곡선을 활용하여 Matlab 기반의 AnalySize로 입도 end-member 모델링을 수행함(Paterson and Heslop, 2015). 입도 end-member 모델링에서 end-member의 수는 end-member의 수와 결정계수 그래프에서 변곡점에 해당하는 end-member 수 근처에서 후보군을 정한 뒤 실제 분석된 퇴적물 시료의 입도 분포 곡선들과 비교를 통해 결정함(Ahn et al., 2024)

(라) 유공충 시료 확보 및 방사성 탄소동위원소 연대 분석

- 힌로펜 해협 퇴적물 코어 4점의 퇴적물 시료에서 저서성 유공충을 확보하여 독일 알프레드 베게너 극지연구소(AWI)에서 방사성탄소연대를 측정함. 각 퇴적물 코어의 방사성탄소연대 결과는 Calib Rev. 8.1.0 프로그램(Heaton et al., 2020)으로 보정함. 연대결과 보정에는 Marine20 data set과 −61 ± 37 yrs의 regional reservoir age (delta R; Pieńkowski et al., 2022)를 적용하였으며, 추후 각각의 퇴적물 코어의 다른 심도에서 저서성 유공충을 확보하여 추가적인 방사성 탄소연대 측정을 진행한 뒤 연대 모델을 구축할 필요가 있음
- 스발바르 북부 대륙붕과 메가 슬라이드 지역에서 획득된 두 점의 퇴적물 코어 HH19-1187-GC와 HH19-1167-GC의 연대 모델 구축을 위하여, 각 코어별 5 cm 간격으로 저서성 유공충을 채취하였으나, 해당 시료에 대한 연대 분석은 추후 AWI에 의뢰할 계획임

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 힌로펜 해협 퇴적물 코어의 퇴적물 입도 end-member 특징

- 퇴적물 코어별 2-5개의 입도 end-member가 추출되었고, 각 end-member의 입도 분포 특징을 바탕으로 3개의 end-member 그룹(EM1-3)으로 분류함(Fig. 119)
- EM1은 0.3 μm에서 1000 μm의 입도 범위를 보이며, 세립한 실트에서 조립한 실트(fine to coarse silt)를 많이 포함하여 3개의 end-member 그룹 중 가장 세립한 입도 특징을 나타냄(Fig. 119). EM1은 비데피오르드 퇴적물 코어에서 laminated mud 퇴적상과 대응되는 end-member(Ahn et al., 2024)와 유사한 입도 특징을 나타내는 것으로 보아 융빙수의 영향을 많이 받은 퇴적물로 여겨짐
- EM2는 0.4 μm에서 600 μm의 입도 범위를 나타내며, 중간 실트에서 아주 조립한 실트(medium to very coarse silt)를 많이 포함하여 상대적으로 조립함(Fig. 119). EM2는 세립한 입자보다 조립한 입자를 상대적으로 많이 포함하면서 비데피오르드 퇴적물 코어에서 massive mud 퇴적상과 대응되는 end-member(Ahn et al., 2024)와 유사한 특징을 나타내는 것으로 보아 해류의 영향을 많이 받아 세립한 입자가 winnowing된 환경을 반영하는 것으로 여겨짐
- EM3는 0.4 μm에서 1000 μm의 입도 범위를 가지며, 분급이 매우 좋지 않고 입도 분포 곡선이 정형화되지 않은 특징을 나타냄(Fig. 119). 이러한 특징은 비데피오르드 퇴적물에서 diamicton 퇴적상과 대응되는 end-member(Ahn et al., 2024)와 유사하며, 퇴적물이 빙하 쇄설물의 영향을 많이 받았음을 보여줌

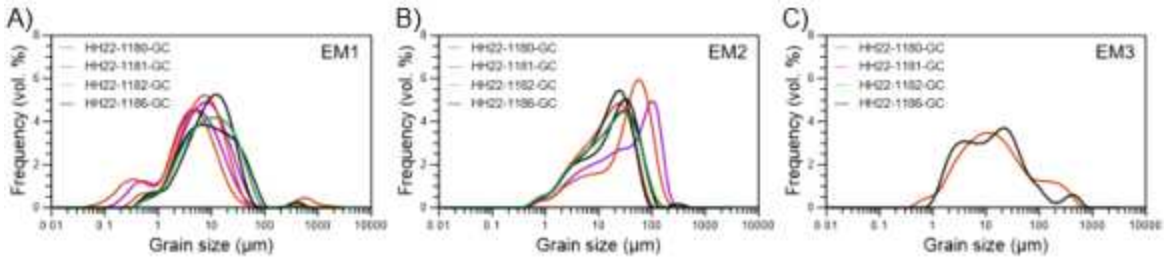


Fig. 119. Grain size end-members: (A) EM1, (B) EM2, and (C) EM3, grouped from sediment cores HH22-1180-GC, HH22-1181-GC, HH22-1182-GC, and HH22-1186-GC.

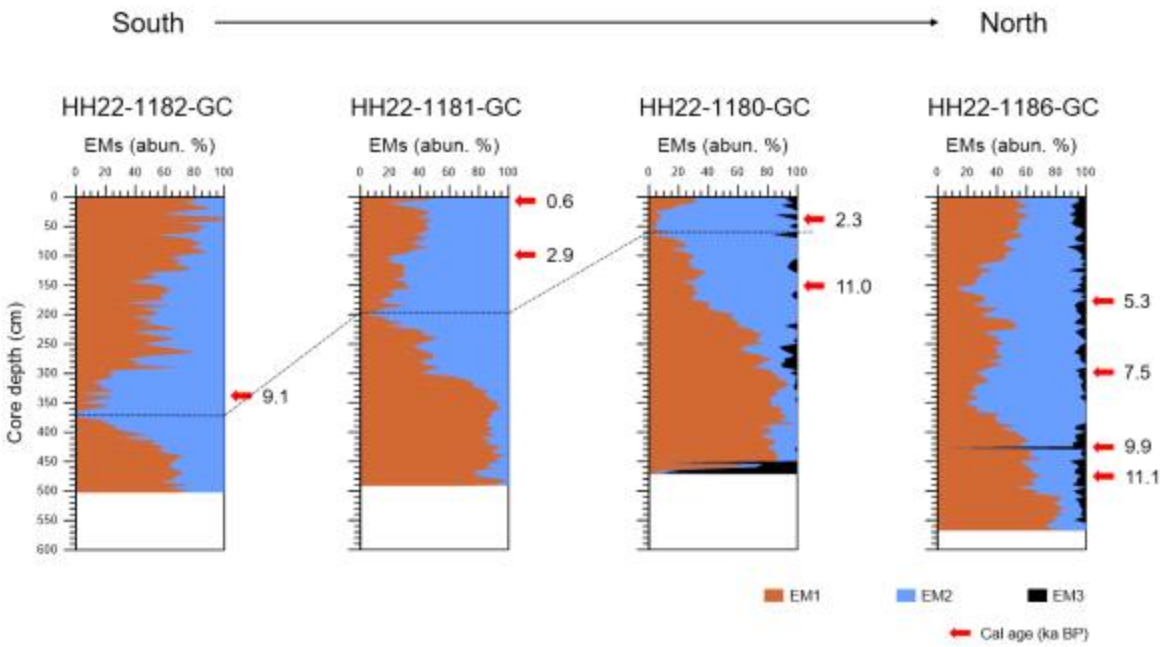


Fig. 120. Variations in the relative abundances of grain size end-member groups for sediment cores HH1182-GC, HH1181-GC, HH1180-GC, and HH1186-GC (from south to north of Hinlopen Strait). Red arrows indicate calibrated AMS ^{14}C ages.

KOPRI 극지연구소

(나) 스발바르 북부 퇴적물 코어의 퇴적물 입도 end-member 특징

- 두 점의 퇴적물 코어는 일차적으로 서로 다른 퇴적구조 양상과 입도를 특징으로 함
- 스발바르 북부 대륙붕 퇴적물 코어 HH22-1187-GC는 상부 10 cm 구간에서 IRD가 우세한 퇴적층으로 구성되며, 대부분 1차 퇴적구조가 없거나 생교란된 구간이 주를 이루며, 350 cm 이하 최하부 구간은 엽리층리가 발달됨
- HH22-1187-GC에서 최상부 IRD 층은 분급이 매우 불량한 특징을 보이는 반면, 그 외 퇴적층은 비교적 세립질 퇴적물이 지배적임. 특히, 구조가 발달하지 않았거나 또는 생교란된 대부분의 퇴적층은 6-8 μm의 주요 입도를 보이며, 엽리층리가 발달된 최하단 층서는 약 5-6 μm의 주요 입도를 특징으로 한 가장 세립질한 퇴적물로 구성됨
- 메가 슬라이드 최남단 퇴적물 코어 HH22-1167-GC는 대부분 엽리층리를 특징으로 하는 퇴적층으로 구성되며, 약 160-185 cm 구간에서 IRD와 사질 입자가 풍부한 층이 퇴적되고 최하부 185 cm 하부에서는 분급이 매우 불량한 diamicton 층으로 구성됨
- HH22-1167-GC에서 엽리층리가 발달된 층은 구성 입도 분포에 따라 크게 두 구간으로 구분되며, 세립질 구간은 HH22-1187-GC의 생교란 된 퇴적층과 유사하고, 그 외는 10- 11 μm의 주요 입도로 비교적 조립함. IRD와 사질 입자가 풍부한 하부

구간은 HH22-1187-GC의 최상부 IRD 층과 입도 분포 양상은 비슷하나 상대적으로 더 조립한 입자를 다량 포함하고 있으며, 최하부 diamicton 층은 가장 분급이 불량한 입도 분포 양상을 보임

- 이러한 특징을 바탕으로 두 점의 퇴적물 코어를 대상으로 총 6개의 입도 end-member가 추출되었으며(Fig. 121). 추후 이 결과는 추가적인 다중프록시 분석과 병행하여 각 층서에 대한 퇴적환경 해석하는데 사용할 예정

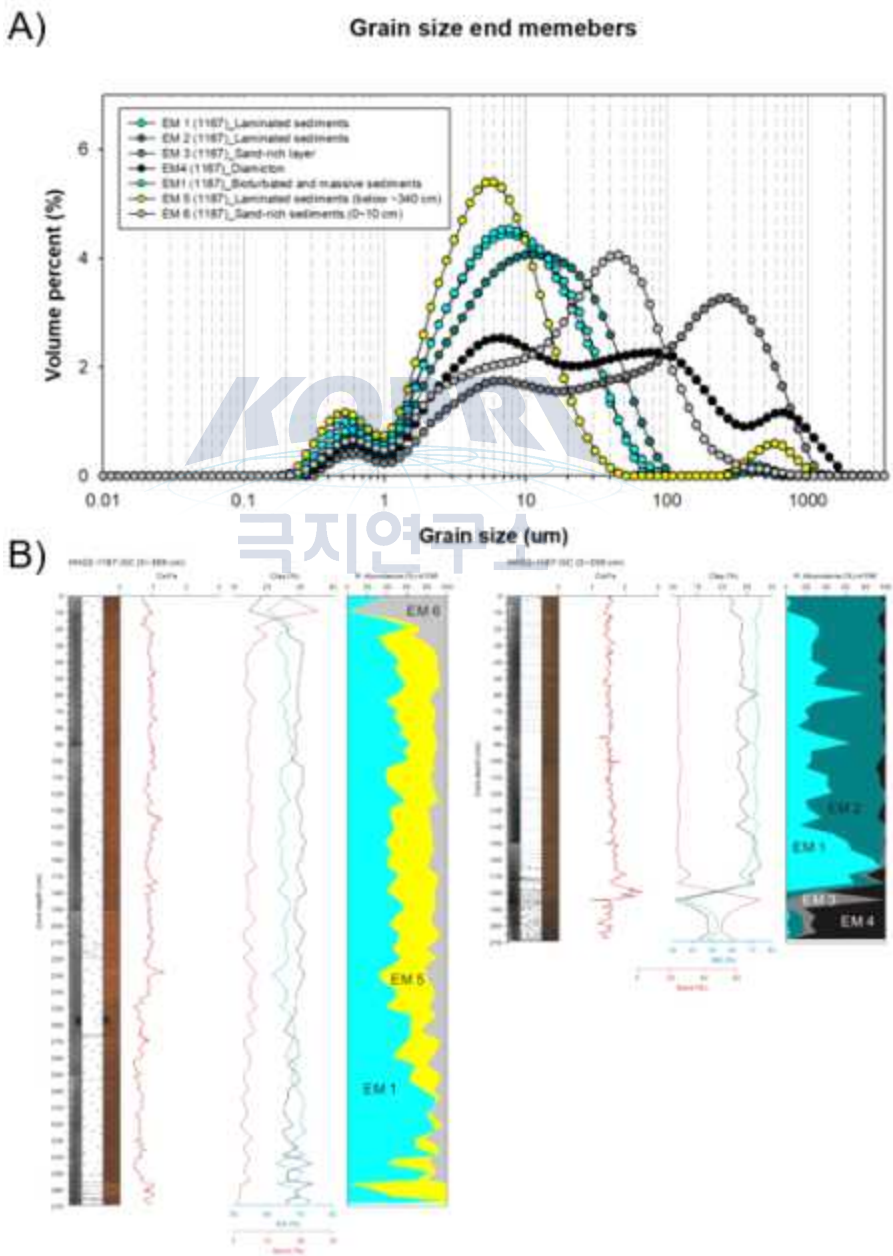


Fig. 121. (A) Grain size end-members extracted from sediment cores HH22-1187-GC and HH22-1167-GC, and (B) their down core variations.

(다) 스발바르 북부 퇴적물 코어의 저서성 유공충

- 방사성 탄소연대 분석을 진행하기에 앞서, 두 점의 코어 퇴적물 시료로부터 연대 분석에 필요한 유공충 껍질을 각 코어별 5 cm 간격으로 확보하고자 하였음
- 북부 대륙붕 지역의 HH22-1187-GC의 경우, 연대 분석 결과를 얻을 수 있을 정도의 저서성 유공충 껍질을 전 구간에 걸쳐 확보하였으며(Fig. 122), 각 시료에 대한 연대 결과를 얻는다면 상당히 견고한 연대 모델을 구축할 것으로 기대됨
- 메가 슬라이드 지역의 HH22-1167-GC의 경우, 160 cm 하부 구간에서는 비교적 연대 분석이 가능한 정도의 저서성 유공충을 확보하였으나(Fig. 122), 상부 구간은 저서성 유공충이 존재하였으나 연대 분석을 할 수준의 양은 확보하지 못하였으며 44-45 cm 구간에서만 연대 분석이 가능할 것으로 판단됨
- 그럼에도 불구하고, HH22-1167-GC에서 160 cm 하부의 연대 결과를 확보한다면, 최하부 185 cm에 발달된 diamicton 층의 퇴적 시기를 판별할 수 있을 것으로 기대됨

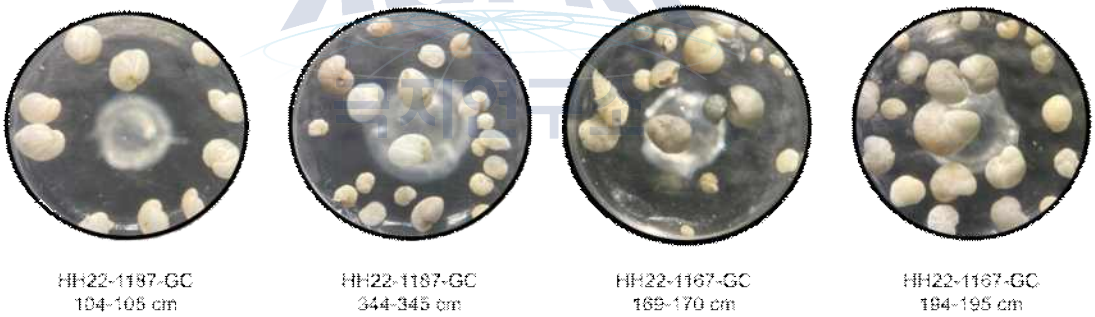


Fig. 122. Benthic foraminifera observed in sediment cores HH22-1187-GC and HH22-1167-GC.

(라) 홀로세 이후 힌로펜 해협 퇴적환경 복원

- 입도 end-member의 상대적인 분포와 탄소 연대 결과를 바탕으로 힌로펜 해협의 퇴적환경을 예비 복원함
- 탄소 연대 결과를 고려했을 때, 힌로펜 해협 가장 남쪽에서 회수한 퇴적물 코어(HH22-1182-GC)에서 북쪽으로 갈수록 홀로세 기간 동안 퇴적율이 낮아짐(Fig. 120). 하지만, 힌로펜 해협 가장 북쪽에서 회수한 퇴적물 코어(HH22-1186-GC)에서는 HH22-1182-GC와 비슷한 홀로세 퇴적율이 나타남(Fig. 120). 이는 힌로펜 해협 북쪽으로 홀로세 기간 동안 다른 지역 혹은 다른 퇴적 과정으로 퇴적물이 공급되었음을 지시함. 추후 네오디뮴 동위원소 분석 등을 통해 퇴적물 공급 차이에 대한

연구를 진행할 필요가 있음

- HH22-1186-GC를 제외한 힌로펜 해협 세 정점의 코어는 약 10 ka BP까지 EM1의 비율이 높으며(Fig. 120), 빙하 후퇴에 따른 융빙수의 영향을 많이 받은 것으로 보임. 세 정점의 코어는 약 10 ka BP 이후 EM2가 증가하는 것에서 빙하가 대부분 육상으로 후퇴하면서 해류의 영향력이 커진 것으로 여겨지며, HH22-1181-GC와 HH22-1180-GC 퇴적물 코어에서는 약 10 ka BP에서 3 ka BP까지 아주 낮은 퇴적율을 보여줌(Fig. 120). 이는 비데피오르드에서 퇴적율이 급격하게 낮아진 시기와 유사함(Ahn et al., 2024). 이 기간 동안 가장 북쪽에 위치한 HH22-1186-GC의 퇴적율은 상대적으로 높게 나타나는데(Fig. 120), 이는 비슷한 위치에서 회수된 퇴적물 코어 NP94-51GC의 퇴적율 특징과 유사함(Ślubowska et al., 2005). 힌로펜 해협 내에서 홀로세 초기와 중기에 퇴적율 차이가 발생하는 이유에 대한 연구가 필요함
- 홀로세 후기에는 EM1의 비율이 다시 증가하는데 힌로펜 해협 주변 피오르드들에서 조수 빙하가 다시 성장하기 때문으로 사료됨(Fig. 120). 홀로세 후기에 EM1의 비율은 HH22-1182-GC에서 HH22-1180-GC로 갈수록 감소하며(Fig. 120), 조수 빙하와의 거리가 영향을 미친 것으로 보임

(마) 스발바르 북부 대륙붕 및 메가 슬라이드 퇴적환경 복원

- 스발바르 북부 대륙붕과 메가 슬라이드 지역에서 획득된 두 점의 퇴적물 코어는 입도, 입도 end-member 및 퇴적구조 면에서 서로 다른 암상학적 특징을 보임
- 북부 대륙붕 퇴적물 코어 HH22-1187-GC는 대부분 일차 퇴적구조가 없거나 생교란된 퇴적층으로 구성되어 있었으며, 일차적으로 이러한 구조적 특징은 과거 빙하 거동에 따른 빙하 영향보다는 스발바르 북부로 유입되는 북대서양 해수 유입의 영향과 힌로펜 해협에서 유입되는 해류의 영향이 클 것으로 예상됨
- 반면, 메가 슬라이드 퇴적물 코어 HH22-1167-GC는 과거 빙하 기저부에서 퇴적되는 빙퇴적층(diamicton 층)이 확인되었으며, 이후 IRD 층의 퇴적과 엽리층리의 발달은 전반적으로 과거 빙하작용의 영향이 기록된 것으로 추측됨. 과거 스발바르-바렌츠해 빙상(SBIS)의 복원 결과를 고려할 때(Hughes et al., 2016), 이 지역에 발달된 빙퇴적층은 분명 마지막 최대 빙하기 또는 더 과거의 SBIS의 영향일 것으로 예상됨. 특히, 퇴적물 코어의 위치가 사면붕괴로 인해 주저앉아 계단 형식으로 형성된 저지대임을 고려한다면, 해당 빙퇴적층을 발달시킨 거대 빙하의 성장과 붕괴로 인한 감압 현상에 의해 마지막 사면붕괴가 일어났을 것으로 기대됨
- 퇴적물 코어 HH22-1167-GC에 대한 추후 연대 분석 결과는 분명 해당 빙퇴적층의 발달 시기를 제한(constraint)할 수 있는 핵심적인 자료가 될 것으로 사료됨

3) 스발바르 환경변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 이해

3-1) 1차년도

가) 인간 활동 간섭 영향력 이해를 위한 시료 선정 및 기초 분석 자료 획득

(1) 시료 선정

- 인류 영향력을 파악하기 위해 2015년과 2019년 획득한 박스코어의 표층 퇴적물을 활용함(Fig. 123)
- 2015년 시료는 호르준드에서 획득한 18점의 박스코어를 포함함(Table 18, Fig. 123)
- 2019년 시료는 이스피오르드에서 2점, 반미엔피오르드에서 4점, 반클렌피오르드에서 1점, 벨준드에서 1점, 호르준드에서 3점, 햄버그북타에서 3점 등 총 14점의 박스코어를 포함함(Table 19, Fig. 123)

Table 18. Box cores collected during the 2015 Svalbard cruise.

No.	Core	Latitude(N)	Longitude(E)	Depth(m)	Sampling Site
1	HH15-1464-BC	77° 05.502'	15° 47.706'	156	Hornsund
2	HH15-1466-BC	77° 00.263'	15° 53.609'	119	Hornsund
3	HH15-1468-BC	77° 05.785'	15° 56.186'	78	Hornsund
4	HH15-1469-BC	77° 02.364'	15° 58.169'	45	Hornsund
5	HH15-1472-BC	76° 59.362'	16° 11.540'	83	Hornsund
6	HH15-1474-BC	77° 01.983'	16° 16.730'	44	Hornsund
7	HH15-1475-BC	77° 01.263'	16° 18.244'	50	Hornsund
8	HH15-1476-BC	77° 00.319'	16° 18.963'	84	Hornsund
9	HH15-1478-BC	76° 59.503'	16° 24.451'	120	Hornsund
10	HH15-1479-BC	77° 00.933'	16° 27.373'	138	Hornsund
11	HH15-1480-BC	77° 02.000'	16° 30.467'	87	Hornsund
12	HH15-1482-BC	77° 03.312'	16° 39.191'	71	Hornsund
13	HH15-1484-BC	76° 57.444'	16° 35.033'	65	Hornsund
14	HH15-1485-BC	76° 59.102'	16° 31.250'	71	Hornsund
15	HH15-1486-BC	76° 58.753'	16° 21.385'	37	Hornsund
16	HH15-1488-BC	76° 54.803'	16° 19.798'	89	Hornsund
17	HH15-1489-BC	76° 56.590'	16° 16.390'	140	Hornsund
18	HH15-1490-BC	76° 56.313'	16° 14.068'	64	Hornsund

Table 19. Box cores collected during the 2019 Svalbard cruise.

No.	Core	Latitude(N)	Longitude(E)	Depth(m)	Sampling Site
1	HH19-847-BC	78° 20.038'	15° 19.875'	257	Isfjorden
2	HH19-850-BC	78° 09.198'	13° 44.472'	425	Isfjorden
3	HH19-855-BC	77° 51.357'	16° 39.488'	33	Van Mijenfjorden
4	HH19-858-BC	77° 49.557'	16° 32.893'	68	Van Mijenfjorden
5	HH19-863-BC	77° 47.182'	16° 00.349'	78	Van Mijenfjorden
6	HH19-868-BC	77° 44.011'	14° 52.408'	107	Van Mijenfjorden
7	HH19-872-BC	77° 34.038'	15° 17.211'	98	Van Keulenfjorden
8	HH19-876-BC	77° 36.520'	14° 34.718'	128	Bellsund
9	HH19-885-BC	76° 56.200'	15° 23.392'	161	Hornsund
10	HH19-888-BC	77° 59.268'	15° 49.207'	203	Hornsund
11	HH19-891-BC	76° 59.325'	16° 18.320'	115	Hornsund
12	HH19-895-BC	77° 02.707'	17° 09.767'	101	Hambergbukta
13	HH19-898-BC	76° 59.794'	17° 21.233'	114	Hambergbukta
14	HH19-900-BC	76° 58.913'	17° 49.765'	126	Hambergbukta

KOPRI 극지연구소

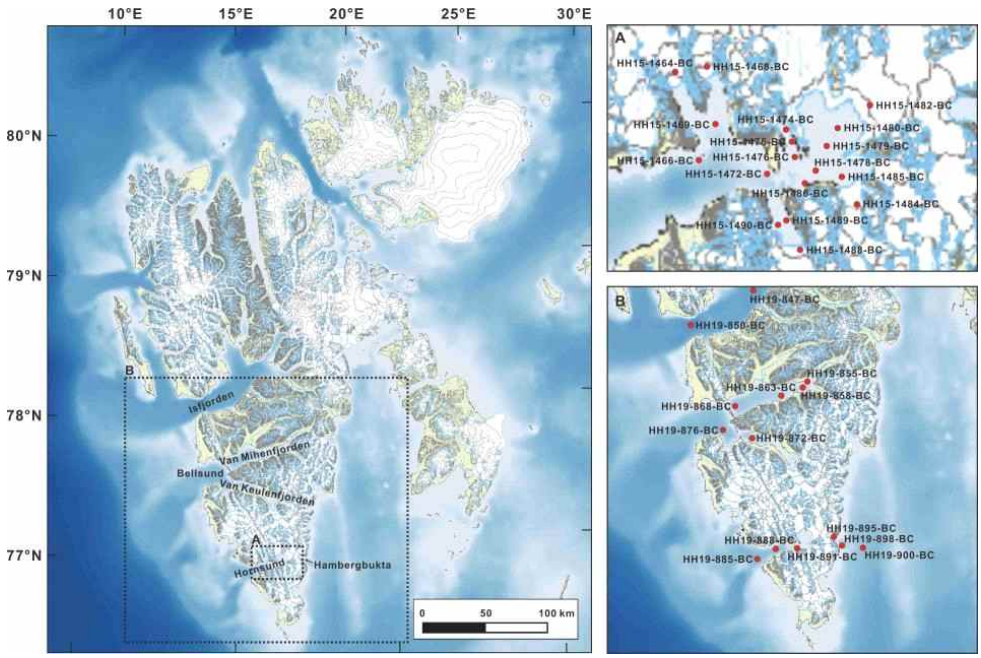


Fig. 123. General map of the Svalbard archipelago with (A) HH15 box core sites and (B) HH19 box core sites.

(2) 기초 분석 방법

- 니질 퇴적물 내 광물을 알아보기 위해 입도 분석과 니질 함량 분석을 진행함
- 입도 분석은 극지연구소에서 유기물 제거를 위해 과산화수소수로 전처리 후 레이저 회절 방식의 입도 분석기(Mastersizer3000, Malvern)를 이용하여 진행함
- 니질 함량은 건조시료를 약 500 mg 씩 소분한 뒤 63 μm 체로 거른 모래를 오븐에 건조시켜 무게를 재고 처음 소분한 양에서 제하여 계산함
- 니질 함량은 입도 분석에서 획득한 모래보다 세립한 입자(<63 μm)들의 양과 비교함

(3) 기초 분석 결과

- 레이저 회절 방식의 입도 분석을 통해 얻은 니질 부피 함량과 체질을 통해 얻은 니질 무게 함량을 비교하니 경향성은 거의 비슷하게 나타남(Fig. 124)
- 두 니질 함량은 HH19 박스 코어 시료에서 지역별로 다르게 나타나며 이스피오르드, 벨준드, 햄버그북타에서는 일반적으로 니질 부피 함량이 높고, 반미엔피오르드, 반클렌피오르드, 호르준드에서는 니질 무게 함량이 높음

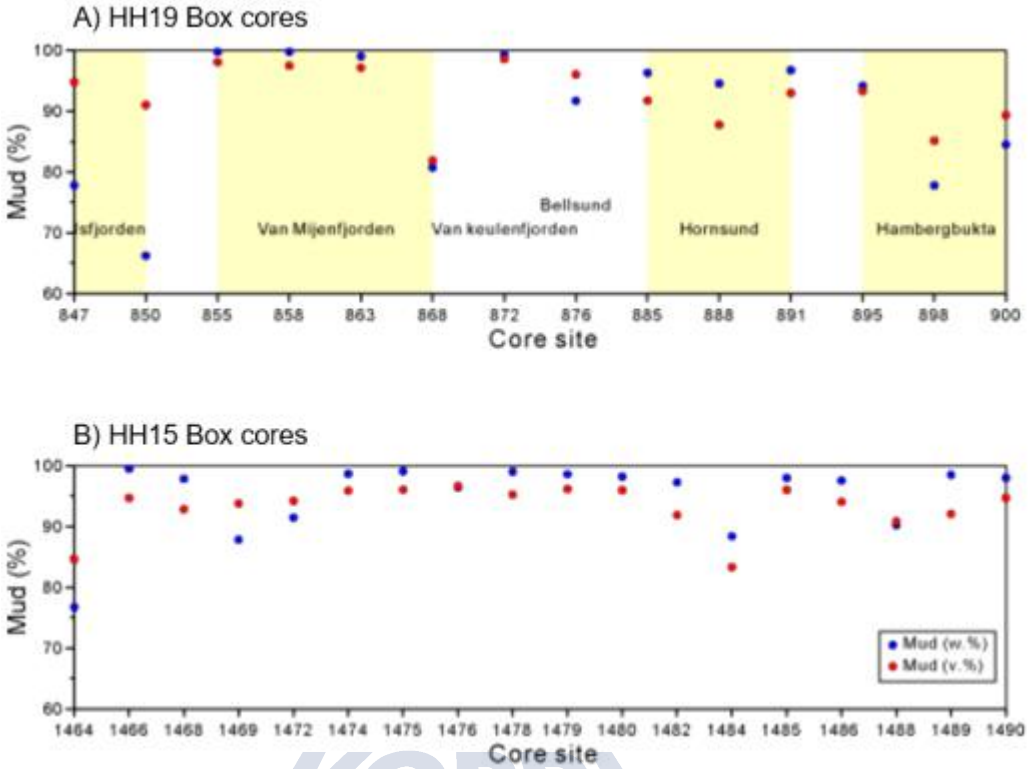


Fig. 124. Mud fractions in surface box core samples from (A) HH19 and (B) HH15 cruises. Blue circles represents the mud weight fraction, while red circles represent the mud volume fraction.

KOPRI 극지연구소

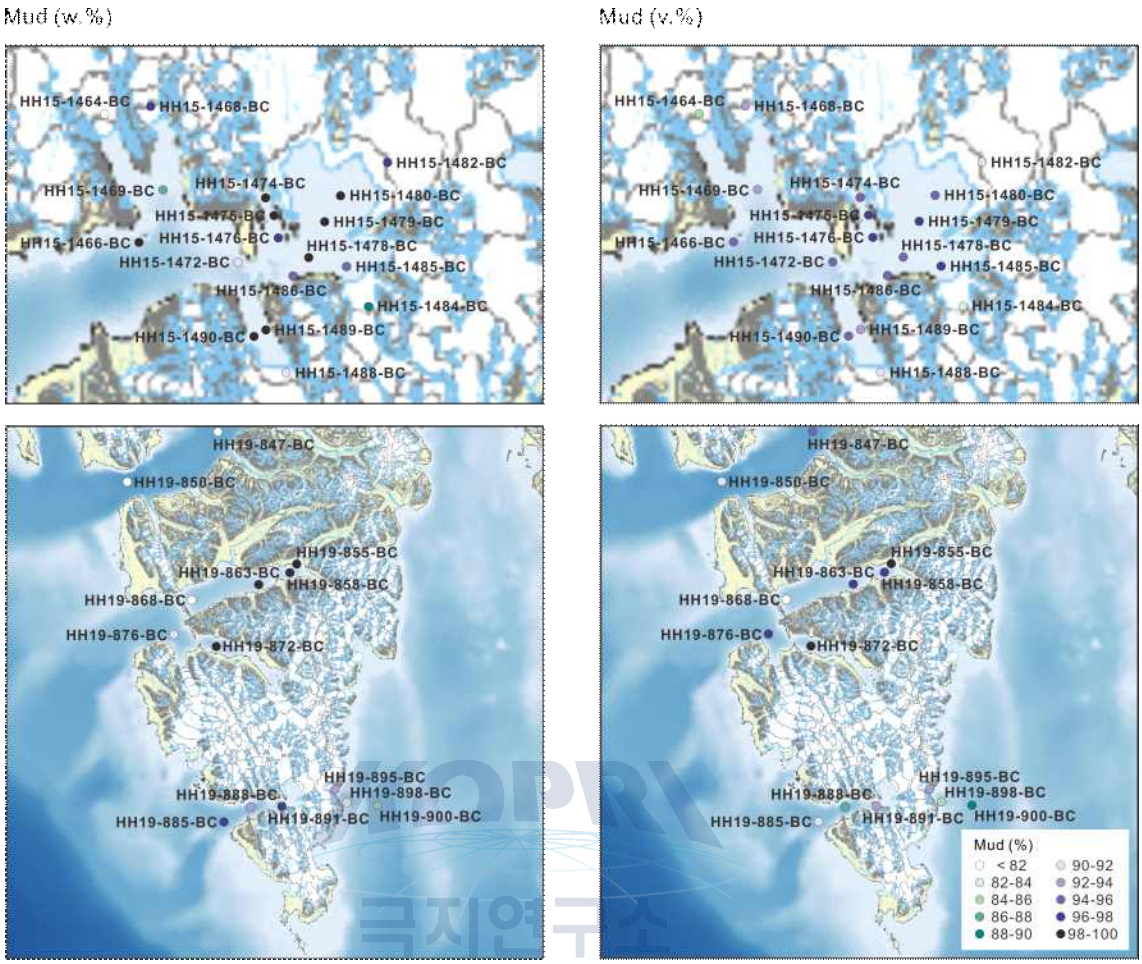


Fig. 125. Spatial distribution of mud fractions depicted with colored circles.

- 이스피오르드에서는 두 니질 부피 함량의 차이가 크게 나타난 반면, 반미엔피오르드와 반클렌피오르드에서는 두 니질 함량의 차이가 작게 나타남
- 호르준드에서 획득한 HH15 박스 코어 시료에서는 HH19 호르준드 박스 코어 시료와 마찬가지로 일반적으로 니질 무게 함량이 니질 부피 함량보다 높음
- 피오르드별 니질 함량의 분포를 보면 일반적으로 피오르드나 지류 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 니질 함량이 줄어들고 피오르드나 지류에서 외해로 가면 니질 함량이 다시 증가함(Fig. 125)
- 지역별로 니질 부피 함량과 니질 무게 함량이 차이를 보이는 이유는 광물 조성의 차이 혹은 오염물 흡착과 연관될 수 있음
- 추후 광물 조성 등의 연구를 통해 지역적 특성을 고려한 인류 영향력 평가 연구가 가능할 것으로 생각됨
- 인류 영향력 평가 연구는 추후 충남대학교(위탁2 과제)와 협업하여 추진

나) 유기분자생체지표 분석 인프라 구축

(1) 연구 목적

- 스발바르 환경변화 기록을 복원하기 위한 퇴적물 내의 유기분자생체지표는 매우 미량으로 존재하기 때문에 시료 채취부터 데이터를 생산하는 과정 중 오염에 특별한 주의가 필요함

(2) 연구 방법

(가) Clean Booth 구축

- 고기후환경 유기지화학 실험실을 구축하여 미량의 유기분자생체지표 분석과 전처리 시 외부로부터의 오염물질을 차단하기 위한 특수 Clean Booth를 제작함
- Clean Booth 프레임은 알루미늄 프로파일, 측면은 Polycarbonate 투명판을 사용하여 가로는 2600 mm, 세로는 2500 mm, 높이는 2050 mm의 규격으로 제작함. 청정한 환경에서 실험이 진행 될 수 있도록 Fan Filter Unit (FFU)을 설치함. FFU는 간헐 가동으로 실험 및 분석이 집중 되어있는 기간에는 집중적으로 가동하고, 나머지 기간에는 청정 유지를 위하여 완속 가동할 예정임. 그리고 협소한 공간의 효율적인 활용을 위하여 출입문은 Sliding door로 설치함(Fig. 126)

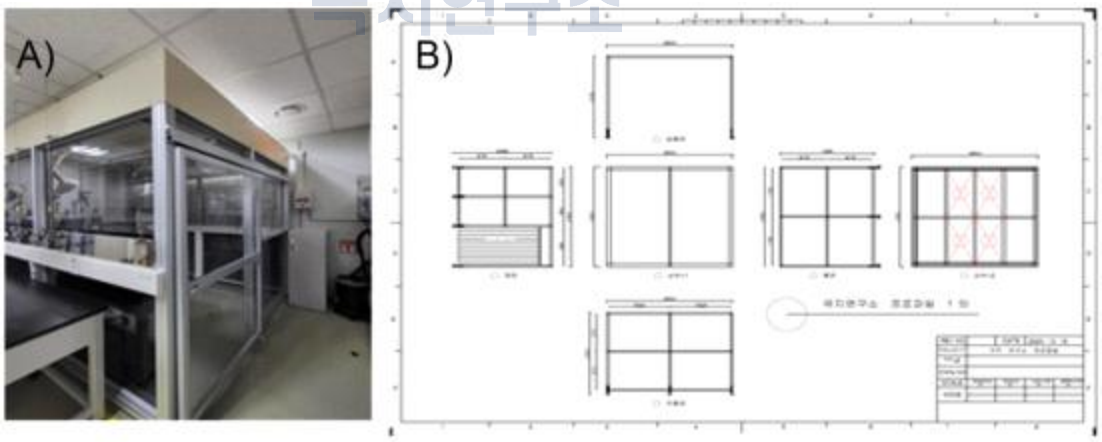


Fig. 126. (A) Clean booth and (B) design drawing of the clean booth.

(나) 가스크로마토그래피 구축

- 유기분자생체지표를 정량 분석하기 위하여 한국 Agilent Technologies 에서 8890GC 모델의 GC-FID (Gas chromatography-Flame Ion Detector)를 설치함 (Fig. 127). 해당 기기를 이용할 경우 샘플을 inlet 부분을 통해 injection 된 후, 컬럼을 지나 두 개의 검출을 통과하고 Dean Switch를 이용하여 복잡한 매트릭스를

지닌 스발바르 퇴적물 내 극미량 성분에 대한 2차원의 정밀한 분석이 가능함

- 기체 크로마토그래피는 기체를 이동상으로 사용하기 때문에 이동상을 사용할 He 가스와 FID 분출구 끝에서 불꽃을 생성시키기 위한 Air 가스가 필요함. 이외에 다른 GC-MS 기기와 유기생체지표를 추출할 때 필요한 N_2 가스를 사용하기 위해 고순도 가스공급설비 공사를 진행함(Fig. 128)

Fig. 127. Constructed GC-FID system for lipid biomarker analysis.

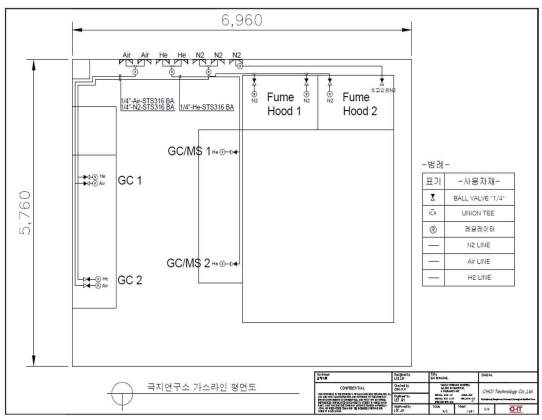


Fig. 128. Constructed gas distribution system in the analytical lab.

3-2) 2차년도

가) 리그닌 분석 인프라 구축

(1) 연구 목적

- 스발바르 피오르드는 각 피오르드마다 빙하 후퇴 정도가 상이하며 육상 환경에 분포하고 있는 bedrock geology 또한 매우 다양하기 때문에 각 피오르드의 특징을 고려한 환경해석이 필수적임
- 스발바르 피오르드 환경 변화를 이해하기 위해 표층퇴적 유기물의 기원 및 특성을 파악하고자 기존 다양한 연구들이 시도되었으나, 대부분 해양에서 채취된 표층 퇴적물 시료를 대상으로 수행되었으며, 전체 스발바르 지역을 대상으로 벌크 인자들을 이용한 연구들이 대부분임
- 따라서, 본 연구에서는 스발바르 8개 피오르드를 대상으로 표층퇴적물 내 분자수준의 리그닌 페놀 바이오마커 분석을 수행하였으며, 추가로 탄소안정동위원소비, 방사성탄소동위원소, 및 쇄설성 네오디뮴 동위원소비 등 분석을 통해 최근 급격한 온난화로 인해 증가하는 육상 기원 유기물의 기원과 특성을 규명하고 스발바르 피오르드 환경을 이해하고자 함

KOPRI 극지연구소

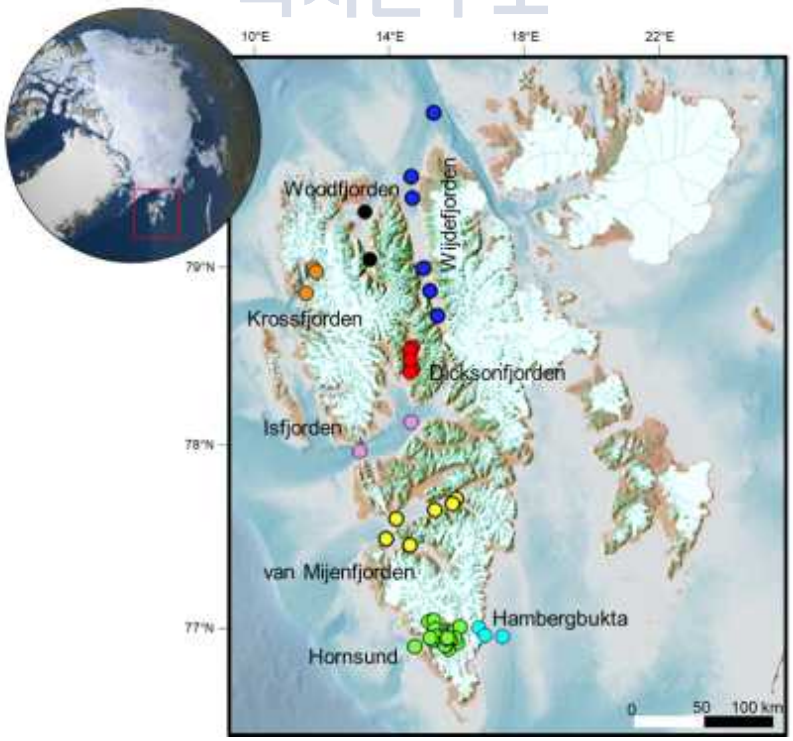


Fig. 129. Map of the Svalbard archipelago showing the sampling sites.

Table 20. Sample information on the fjord surface sediments investigated.

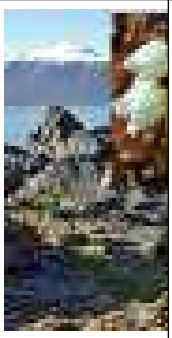
No.	Sample name	Location	Latitude (N)	Longitude (E)	Sampling date (mm/yyyy)	Sample type	Sample depth (cm)	Water depth (m)
1	HH17-1107	Wijdefjorden	79.000	16.220	07/2017	surface sediment	0-1	158
2	HH17-1108	Wijdefjorden	79.160	15.960	07/2017	surface sediment	0-1	145
3	HH17-1109	Wijdefjorden	79.300	15.780	07/2017	surface sediment	0-1	112
4	HH17-1110	Wijdefjorden	79.740	15.420	07/2017	surface sediment	0-1	148
5	HH17-1111	Wijdefjorden	79.870	15.380	07/2017	surface sediment	0-1	163
6	HH17-1086	Wijdefjorden	80.270	16.210	07/2017	surface sediment	0-1	322
7	HH12-964GC	Woodfjorden	79.650	13.750	07/2012	surface sediment	0-1	173
8	HH12-969GC	Woodfjorden	79.350	13.960	07/2012	surface sediment	0-1	50
9	HH19 BOX 847	Isfjorden	78.334	15.331	07/2019	surface sediment	0-1	257
10	HH19 BOX 850	Isfjorden	78.153	13.741	07/2019	surface sediment	0-1	425
11	HH19 BOX 855	van Mijenfjorden	77.856	16.658	07/2019	surface sediment	0-1	33
12	HH19 BOX 858	van Mijenfjorden	77.826	16.548	07/2019	surface sediment	0-1	68
13	HH19 BOX 863	van Mijenfjorden	77.786	16.006	07/2019	surface sediment	0-1	78
14	HH19 BOX 868	van Mijenfjorden	77.734	14.873	07/2019	surface sediment	0-1	107
15	HH19 BOX 872	van Mijenfjorden	77.567	15.287	07/2019	surface sediment	0-1	98
16	HH19 BOX 876	van Mijenfjorden	77.609	14.579	07/2019	surface sediment	0-1	128
17	HH19 BOX 895	Hambergbukta	77.045	17.163	07/2019	surface sediment	0-1	101
18	HH19 BOX 898	Hambergbukta	76.997	17.354	07/2019	surface sediment	0-1	114
19	HH19 BOX 900	Hambergbukta	76.982	17.829	07/2019	surface sediment	0-1	126
20	HH19 BOX 885	Hornsund	76.937	15.390	07/2019	surface sediment	0-1	161
21	HH19 BOX 888	Hornsund	76.988	15.820	07/2019	surface sediment	0-1	203
22	HH19 BOX 891	Hornsund	76.989	16.305	07/2019	surface sediment	0-1	115
23	HH15-1464BC	Hornsund	77.153	16.325	07/2015	surface sediment	0-5	156
24	HH15-1466BC	Hornsund	77.007	16.489	07/2015	surface sediment	0-5	119
25	HH15-1468BC	Hornsund	77.161	16.561	07/2015	surface sediment	0-5	78
26	HH15-1469BC	Hornsund	77.066	16.616	07/2015	surface sediment	0-5	45
27	HH15-1472BC	Hornsund	77.649	16.321	07/2015	surface sediment	0-5	83
28	HH15-1474BC	Hornsund	77.055	16.465	07/2015	surface sediment	0-5	44
29	HH15-1475BC	Hornsund	77.035	16.507	07/2015	surface sediment	0-5	50
30	HH15-1476BC	Hornsund	77.009	16.527	07/2015	surface sediment	0-5	84
31	HH15-1478BC	Hornsund	77.653	16.679	07/2015	surface sediment	0-5	120
32	HH15-1479BC	Hornsund	77.026	16.760	07/2015	surface sediment	0-5	138
33	HH15-1480BC	Hornsund	77.056	16.846	07/2015	surface sediment	0-5	87
34	HH15-1482BC	Hornsund	77.092	17.089	07/2015	surface sediment	0-5	71
35	HH15-1484BC	Hornsund	77.596	16.973	07/2015	surface sediment	0-5	65
36	HH15-1485BC	Hornsund	77.642	16.868	07/2015	surface sediment	0-5	71
37	HH15-1486BC	Hornsund	77.632	16.594	07/2015	surface sediment	0-5	37
38	HH15-1488BC	Hornsund	77.522	16.550	07/2015	surface sediment	0-5	89
39	HH15-1489BC	Hornsund	77.572	16.455	07/2015	surface sediment	0-5	140
40	HH15-1490BC	Hornsund	77.564	16.391	07/2016	surface sediment	0-5	64
41	HH16-1223BC	Hornsund	76.977	15.864	07/2016	surface sediment	0-1	193
42	HH16-1227BC	Hornsund	77.000	15.997	07/2016	surface sediment	0-1	109
43	HH16-1230BC	Hornsund	76.983	16.273	07/2016	surface sediment	0-1	110
44	Koller	Krossfjorden	79.287	12.046	07/2015	surface sediment	0-2	21
45	Mayerbukta	Krossfjorden	79.266	12.160	07/2015	surface sediment	0-2	7
46	Julibreen	Krossfjorden	79.123	11.846	07/2015	surface sediment	0-2	23
47	HH16-1182BC	Dicksonfjorden	78.805	15.362	07/2016	surface sediment	0-1	40
48	HH16-1193BC	Dicksonfjorden	78.646	15.290	07/2016	surface sediment	0-1	109

(2) 연구 방법

(가) 표층퇴적물 시료 획득

- 스발바르 피오르드 총 6개 피오르드(비데, 이스, 반미엔, 햄버그북타, 호른준드)에서 2015년-2019년까지 UiT (The Arctic University of Norway)의 연구선 RV Helmer Hanssen을 활용한 한국-노르웨이 국제공동탐사를 통해 획득한 표층퇴적물 43점을 대상으로 함(Fig. 129, Table 20)
- 추가로 크로스피오르드의 표층퇴적물 3점은 Ny-Alesund Rearch Station의 소형탐사선 MS Teisten을 활용하여 획득하였으며, 우드피오르드의 표층퇴적물 2점은 UiT에서 제공받아 활용하였음

Table 21. Photos of plants investigated in this study (from http://svalbardflora.no/).

	Cassiope	*Salix polaris*	*Moss*	*Dryas*
Photos				
Comments	• One of the most widely distributed of all Svalbard plants.	• Globally, one of the widespread of arctic plants. • Common in the areas around Isfjorden, Kongsfjorden, Woodfjorden, and Wijdefjorden.	• Common all over the high arctic.	• A diagnostic species for the limit between the northern arctic tundra and the polar desert.

KOPRI 극지연구소

Table 22. Sample information on plant and soil samples. '–' denotes "not available".

No.	Sample name	Location	Latitude (N)	Longitude (E)	Sampling date (yyyy.mm)	Sample type	Sample depth (cm)
1	*Cassiope*	Longyearbyen	78.171	16.033	2021.07	plant (n=3)	–
2	*Salix polaris*	Longyearbyen	78.172	16.022	2021.07	plant (n=3)	–
3	*Moss*	Longyearbyen	78.168	16.050	2021.07	plant (n=3)	–
4	*Dryas*	Longyearbyen	78.173	16.082	2021.07	plant (n=3)	–
5	Soil-A1	Longyearbyen	78.171	16.033	2021.07	mineral soil (n=3)	5-10
6	Soil-A2	Longyearbyen	78.172	16.022	2021.07	mineral soil (n=3)	5-10
7	Soil-B	Longyearbyen	78.168	16.050	2021.07	mineral soil (n=3)	5-10
8	Soil-D	Longyearbyen	78.173	16.082	2021.07	mineral soil (n=3)	5-10

(나) 토양 및 식생 시료

- 육상기원 유기물의 기원을 파악하기 위해 롱이어비엔 주변 육상 지역에서 우점한 식생(Cassiope, Salix polaris, Moss, Dryas) 및 동일 정점에서의 토양 시료를 채취하여 총유기탄소함량(TOC; total organic carbon), 탄소안정동위원소비 및 리그닌 바이오마커 분석에 활용함(Tables 21, 22)

(다) 암석 시료

- 암석시료는 서울대학교 및 지질자원연구원에서 제공받았으며, 대부분 롱이어비엔 주변 지역 및 이스피오르드에서 획득하였음(Fig. 130, Table 23). 자세한 시료 정보는 Jang et al. 2020을 참고함

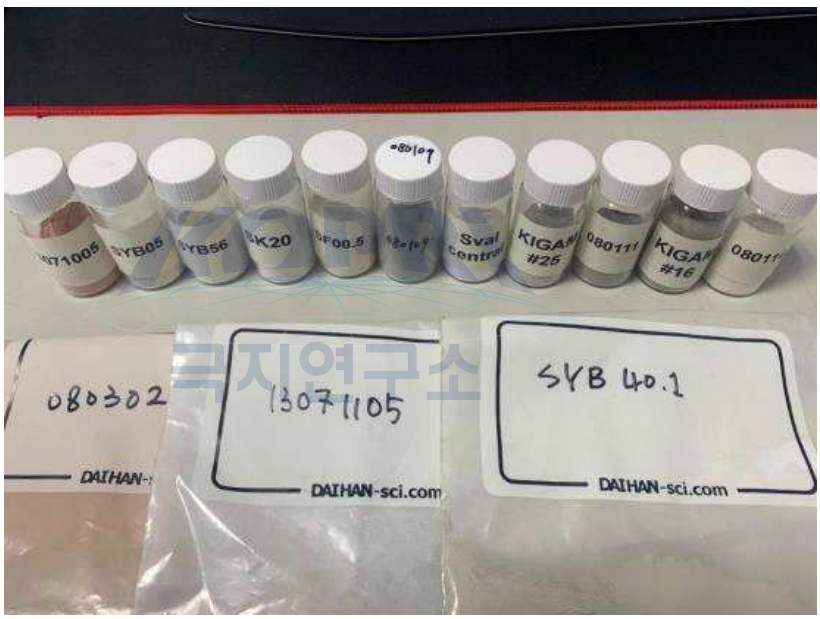


Fig. 130. Photos of the powdered sedimentary rock samples used in this study.

(라) 벌크 유기물 분석

- 피오르드 표층 퇴적물의 쇄설성 네오디뮴 동위원소 비 분석 결과는 Jang et al. 2020을 참고하였으며, 이스피오르드(n = 2), 반미엔피오르드(n = 6), 햄버그북타(n = 3), 호른준드(n = 3), 및 크로스피오르드 (n = 3) 표층 퇴적물 17점은 본 연구에서 추가로 분석하였음
- 피오르드 표층 퇴적물 26점 내 방사성탄소동위원소비 분석은 독일 AWI (Alfred-Wegener-Institute), 미국 Beta Analytic Testing Laboratory, 및 미국 조지아 대학교의 CAIS (Center for Applied Isotope Studies)에 의뢰하였음

Table 23. Sample information on sedimentary rock samples investigated.

No.	Sample name	Location	Latitude (N)	Longitude (E)	Sample type
1	SK01	Skansen, Isfjorden-Billefjorden	78.545	16.183	fresh unweathered sedimentary rock (sandstone)
2	080302	Halvdanpiggen, Woodfjorden	79.389	13.622	fresh unweathered sedimentary rock (red sandstone)
3	13071005	Brøggerhalvøya, Kongsfjorden	78.953	11.758	fresh unweathered sedimentary rock (red sandstone)
4	SYB05	Brøggerhalvøya, Kongsfjorden	78.944	11.724	fresh unweathered sedimentary rock (limestone)
5	SYB56	Brøggerhalvøya, Kongsfjorden	78.941	11.703	fresh unweathered sedimentary rock (dolostone)
6	SK20	Skansen, Isfjorden-Billefjorden	78.539	16.159	fresh unweathered sedimentary rock (dolostone)
7	SYB40.1	Brøggerhalvøya, Kongsfjorden	78.942	11.704	fresh unweathered sedimentary rock (calcareous shale)
8	SF00.5	Brøggerhalvøya, Kongsfjorden	78.915	11.654	fresh unweathered sedimentary rock (chert)
9	080109	Festningen, Isfjorden-Grønfjorden	78.091	13.810	fresh unweathered sedimentary rock (black mudstone)
10	Sval central	Skansen, Isfjorden-Billefjorden	78.545	16.183	fresh unweathered sedimentary rock (anhydrite)
11	KIGAM#25	Rotundafjellet, Isfjorden-Billefjorden	78.475	15.812	fresh unweathered sedimentary rock (shale)
12	080111	Festningen, Isfjorden-Grønfjorden	78.094	13.837	fresh unweathered sedimentary rock (black mudstone)
13	KIGAM#16	Festningen, Isfjorden-Grønfjorden	78.098	13.913	fresh unweathered sedimentary rock (shale)
14	080114	Festningen, Isfjorden-Grønfjorden	78.099	13.948	fresh unweathered sedimentary rock (sandstone)

KOPRI 극지연구소

(마) 분자수준의 리그닌 페놀 바이오마커 분석

- 리그닌 페놀은 육상 식물 조직의 핵심 성분으로 세포벽을 구성하는 물질임. 3차원적으로 불규칙하게 여러 방향으로 가지를 친 분자구조로 이루어져있기 때문에 식물 구조의 지지체를 단단하게 지탱할 수 있도록 강도를 유지시켜줌
- 또한 화학 구조가 매우 복잡한 고분자 물질로 다른 생체 고분자와 달리 산 및 염기, 촉매, 가수분해 등과 같은 화학 반응에 의해 쉽게 분해되지 않고 안정적인 물질임. 따라서 해양 환경으로 이동 및 퇴적된 후에도 그 시그널이 잘 보존되어 있어 육상기원 유기물의 기원을 파악하는 연구에 널리 사용되고 있음
- 리그닌 페놀 바이오마커는 기본 단위체가 불규칙한 생합성 과정을 거치며 다양한 형태를 가지게 되는데 대표적으로 총 3종류로 이루어져있음(C: Cinnamyl phenols; V: Vanillyl phenols; S: Syringyl phenols). 이 외에 p-Hydroxy phenols (P) 등의 유도체가 존재하며 식물의 종과 조직유형에 따라 이들의 조성이 다름(Fig. 131)
- 본 연구에서는 표층퇴적물 48점, 식생 12점, 토양 12점, 그리고 암석시료(sedimentary rock) 14점을 대상으로 리그닌 페놀 바이오마커 분석을 수행함
- 리그닌 페놀은 퇴적물 시료와 copper oxide (CuO)와 ammonium iron(II) sulfate hexahydrate ((NH4)2Fe(SO4)2*6H2O)를 산소가 차단된 환경에서 oxidation 시켜주는 방법으로 실험을 수행하였으며, 이를 위해 특수 제작한 glove box 내에서 일정 시간 이상 질소발생기를 통해 지속적으로 질소를 흘려주어 O_2 농도를 일정 수준 이하(< 0.1 %) 로 낮춘 후 실험을 수행하였음(Fig. 132)

KOPRI 극지연구소

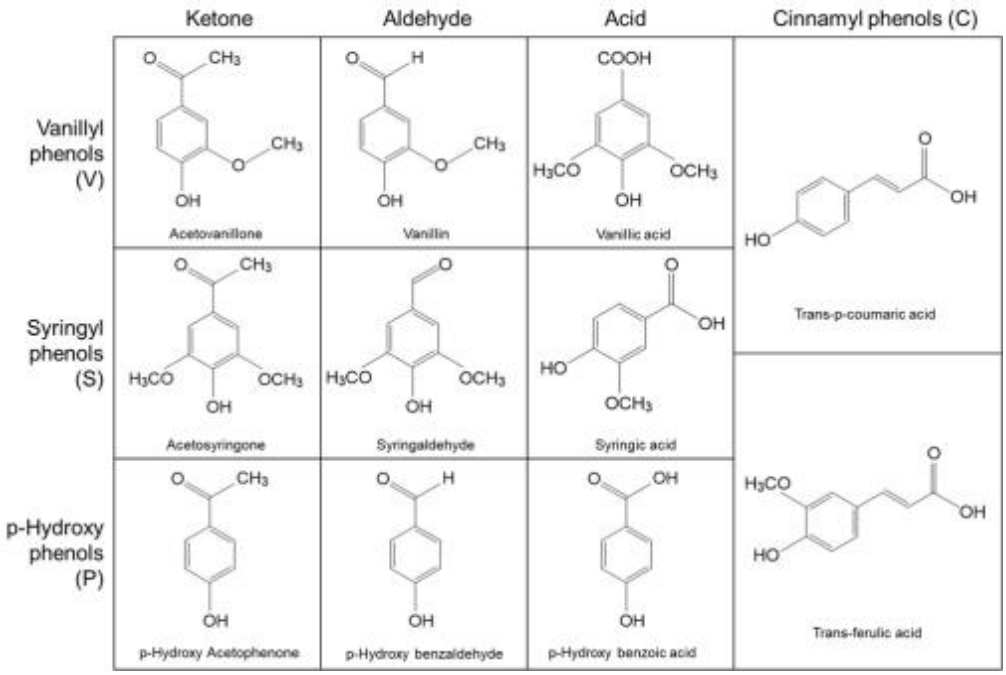


Fig. 131. Structures of lignin phenol monomers released by alkaline CuO oxidation.

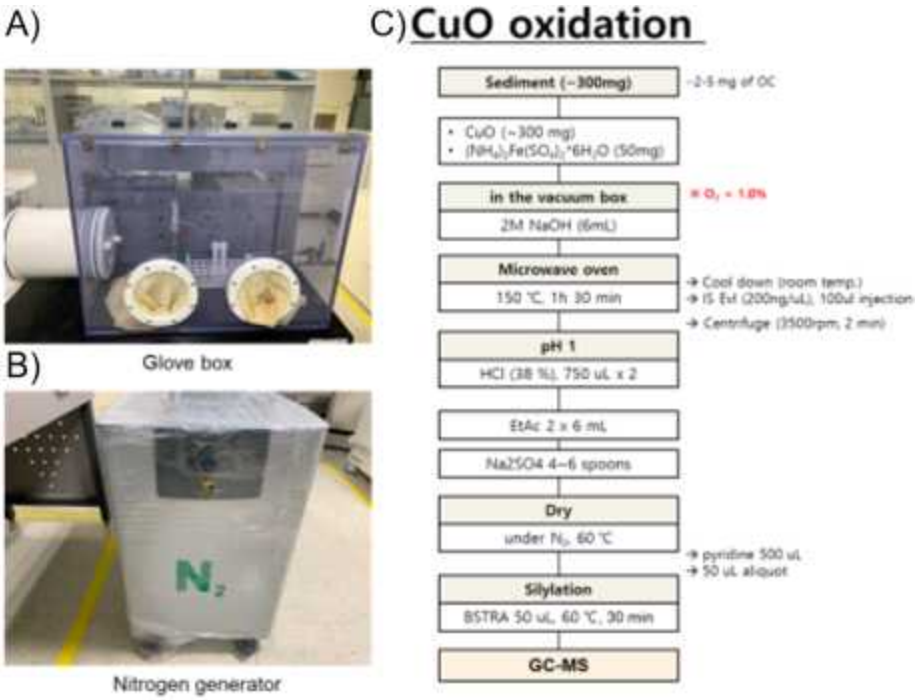


Fig. 132. Photos showing (A) glove box and (B) nitrogen generator and (C) flow chart for the CuO oxidation.

KOEM 금지연구소

- 산소가 차단된 상태에서 퇴적물 시료와 반응시킬 물질들을 혼합 한 뒤, 2M 농도의 NaOH를 주입함.
- 마이크로웨이브오븐(Microwave Digestion System, MARS6 microwave, CEM Corporation, USA)에서 1시간 30분 동안 150℃에서 oxidation 반응을 시켜줌(Fig. 133)

Fig. 133. Photos showing (A) preparation for CuO oxidation and (B) the extraction instrument (Microwave oven) used in this study.

Fig. 134. Photo of the analytical instrument (GC-MS) used in this study.

Table 24. CuO oxidation products used in this study.

No.	CuO name	Full name	Mass (m/z)
1	Vl	Vanillin	194.0
2	Evl	Ethyl vanillin	238.1
3	Vn	Acetovanillone	223.1
4	Si	Syringaldehyde	224.1
5	Vd	Vanillic acid	297.1
6	Sn	Acetosyringone	238.1
7	3,5-Bd	3,5-Dihydroxybenzoic acid	370.2
8	Sd	Syringic acid	342.1
9	pCd	p-Coumaric acid	308.1
10	Fd	Ferulic acid	338.0

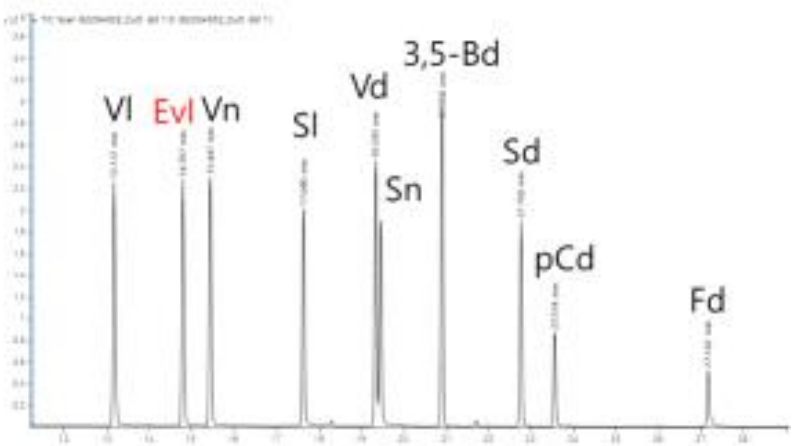
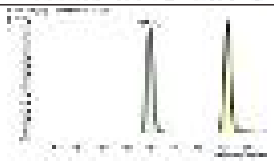
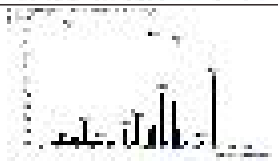
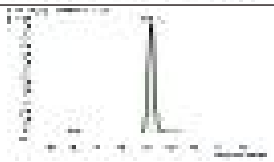
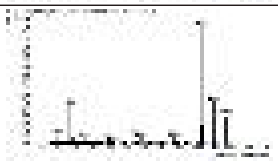
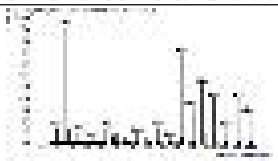
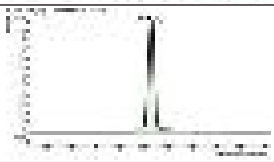
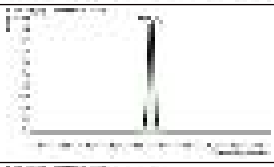
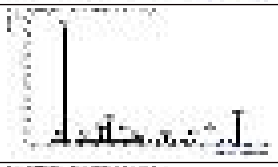
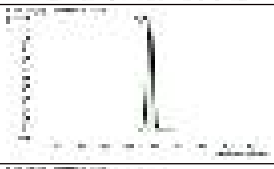
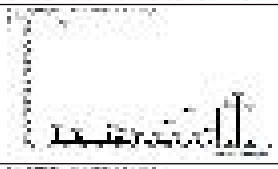
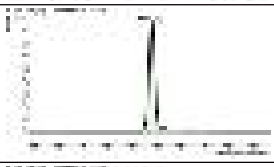
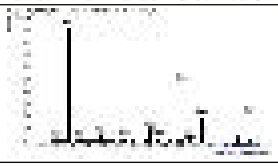
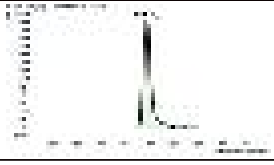


Fig. 135. An example of the GC-MS TIC chromatogram for lignin phenol standards.

Table 25. GC-MS SIM chromatograms and mass fragments for lignin phenol standards.

No	CuO	Individual SIM chromatogram	SIM mass fragment
1	Vl		
2	Evl		
3	Vn		
4	Sl		
5	Vd		
6	Sn		
7	3,5-Bd		
8	Sd		
9	pCd		
10	Fd		

KOPRI 극지연구소

- 산화반응이 완료된 시료는 상온에서 충분히 식혀준 뒤, 염산(HCl)과 에틸아세테이트(Ethyl acetate)와 함께 반응시킨 후, 상층액을 추출함
- sodium sulfate (Na_2SO_4)를 일정량 넣어 추출한 시료 내에 있는 수분 및 불순물을 제거시켜 준 뒤 evaporator를 이용하여 질소를 흘려주면서 농축시킴
- 상용화 되어있는 표준물질(standard)을 GC-MS (Fig. 134)를 이용하여 분석 한 후, 각 물질이 갖고 있는 고유의 질량 값(m/z)과 retention time을 비교하여 시료 내 리그닌 농도를 계산함
- 본 연구에서 사용한 리그닌 페놀 표준물질은 정량(quantification)에 사용하는 Evl (Ethyl vanillin)을 포함한 총 10가지로 각각의 명칭과 약자, 그리고 질량 값을 Table 24 에 나타냄
- 미리 계산된 농도에 맞춰 만들어진 혼합 표준물질을 GC-MS를 통해 분석한 전체 TIC 크로마토그램(Fig. 135), 그리고 개별크로마토그램 및 물질 확인(identification)에 중요한 각각의 SIM mass fragment를 Table 25에 나타냄

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 표층퇴적물의 쇄설성 네오디뮴 동위원소 비

- 스발바르 8개의 피오르드 중 이스(n = 2), 반미엔(n = 6), 크로스피오르드(n = 3), 햄버그북타(n = 3) 및 호른준드(n = 3) 표층 퇴적물의 쇄설성 네오디뮴 동위원소 결과를 Table 26에 나타냄
- 비데(n = 6), 우드(n = 2), 딕슨피오르드(n = 2) 및 호른준드(n = 21) 표층퇴적물의 쇄설성 네오디뮴 동위원소 결과는 Jang et al. 2020에 보고된 값을 참고하여 비교함
- 스발바르 피오르드 표층퇴적물 총 48점의 쇄설성 네오디뮴 동위원소 비는 -24.9 ~ -8.9 로 넓은 범위의 값을 나타냈으며 평균 -14.3±3.2 의 값을 나타냄
- 햄버그북타에서 평균 -9.2±0.3 으로 가장 높은 값을 보였으며 비데피오르드 및 호른준드에서 각각 평균 -14.9±1.0, -14.9±3.9 로 가장 가벼운 값을 보였으나 호른준드는 다른 피오르드에 비해 굉장히 넓은 값의 분포를 보임(Fig. 136)
- 표층 퇴적물의 쇄설성 네오디뮴 동위원소비는 퇴적물의 기원지를 추적하는 지시자로 활용되고 있으며 이는 스발바르 피오르드 표층 퇴적물 내 광물 조성에 영향을 미치는 암석이 어떤 종류인지, 어떤 환경에서 유래한 암석인지를 파악 할 수 있는 지시자로 활용 될 수 있음.
- 스발바르 피오르드의 경우 상당히 넓은 값의 범위를 나타내는 것으로 보아 다양한 종류의 암석으로부터 유래되었음을 알 수 있으며, 대부분의 피오르드에서는 피오르드 내 정점마다 일정한 값을 보이며 상대적으로 단순한 형태의 geology 분포를 보이는 반면, 호른준드는 비교적 넓은 범위의 값을 나타내며 피오르드 내 분포하고 있는 암석의 종류 또한 다양하다는 것을 의미함(Fig. 137)

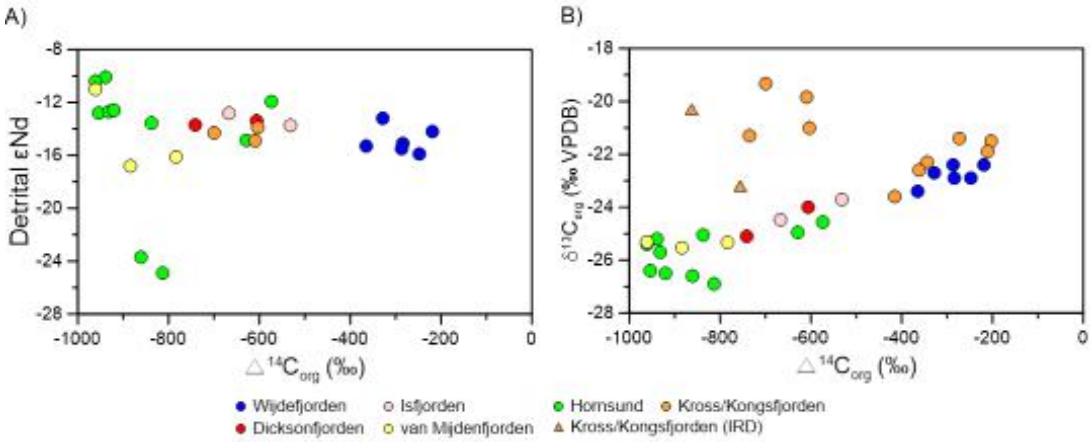


Fig. 136. Scatter plots of (A) detrital neodymium isotope vs. $\triangle^{14}C_{org}$ and B) $\delta^{13}C_{org}$ vs. $\triangle^{14}C_{org}$.

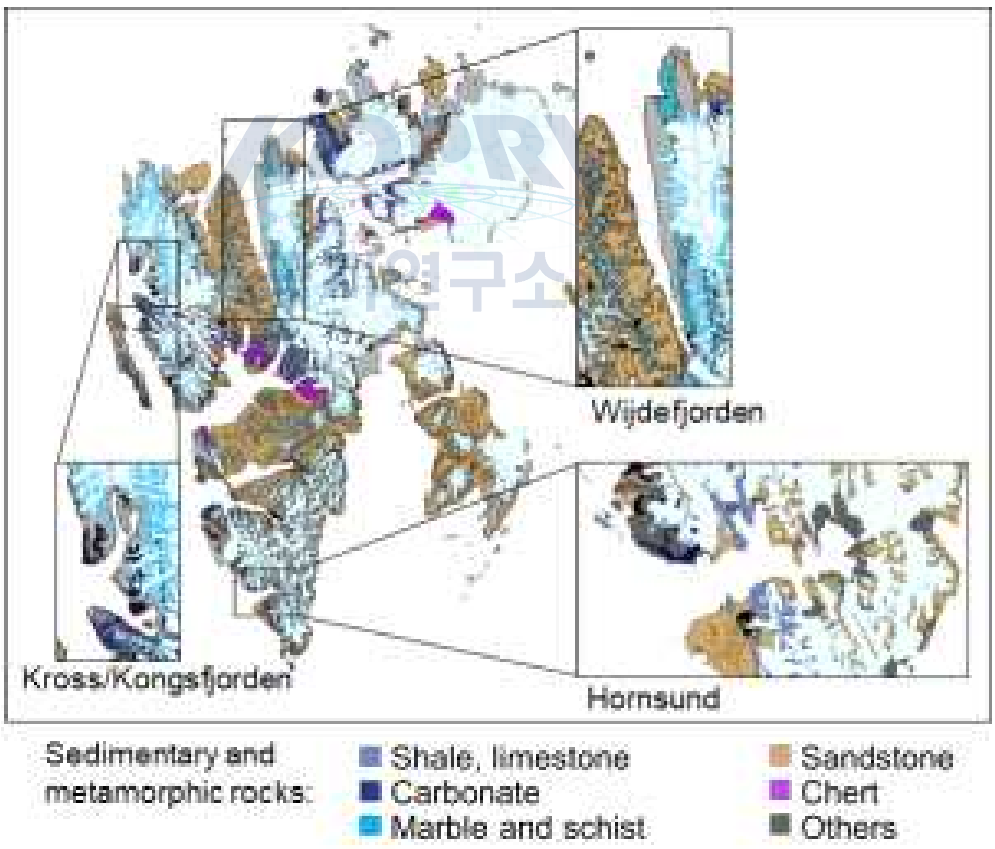


Fig. 137. Distributions of sedimentary and metamorphic rocks in the Svalbard archipelago (data from Dallmann and Elvevold, 2015).

Table 26. Results of detrital neodymium isotope for fjord surface sediments. 'a' indicates data from Jang et al. (2020).

No.	Sample name	Location	Latitude (N)	Longitude (E)	Sampling date (mm/yyyy)	Sample type	Detrital εNd
1	HH17-1107	Wijdefjorden	79.000	16.220	07/2017	surface sediment	−15.3[a]
2	HH17-1108	Wijdefjorden	79.160	15.960	07/2017	surface sediment	−15.1[a]
3	HH17-1109	Wijdefjorden	79.300	15.780	07/2017	surface sediment	−15.9[a]
4	HH17-1110	Wijdefjorden	79.740	15.420	07/2017	surface sediment	−15.5[a]
5	HH17-1111	Wijdefjorden	79.870	15.380	07/2017	surface sediment	−14.2[a]
6	HH17-1086	Wijdefjorden	80.270	16.210	07/2017	surface sediment	−13.2[a]
7	HH12-964GC	Woodfjorden	79.650	13.750	07/2012	surface sediment	−14.1[a]
8	HH12-969GC	Woodfjorden	79.350	13.960	07/2012	surface sediment	−13.7[a]
9	HH19 BOX 847	Isfjorden	78.334	15.331	07/2019	surface sediment	−12.8
10	HH19 BOX 850	Isfjorden	78.153	13.741	07/2019	surface sediment	−13.7
11	HH19 BOX 855	van Mijenfjorden	77.856	16.658	07/2019	surface sediment	−11.0
12	HH19 BOX 858	van Mijenfjorden	77.826	16.548	07/2019	surface sediment	−13.8
13	HH19 BOX 863	van Mijenfjorden	77.786	16.006	07/2019	surface sediment	−16.8
14	HH19 BOX 868	van Mijenfjorden	77.734	14.873	07/2019	surface sediment	−16.1
15	HH19 BOX 872	van Mijenfjorden	77.567	15.287	07/2019	surface sediment	−13.6
16	HH19 BOX 876	van Mijenfjorden	77.609	14.579	07/2019	surface sediment	−14.0
17	HH19 BOX 895	Hambergbukta	77.045	17.163	07/2019	surface sediment	−9.2
18	HH19 BOX 898	Hambergbukta	76.997	17.354	07/2019	surface sediment	−9.4
19	HH19 BOX 900	Hambergbukta	76.982	17.829	07/2019	surface sediment	−8.9
20	HH19 BOX 885	Hornsund	76.937	15.390	07/2019	surface sediment	−11.9
21	HH19 BOX 888	Hornsund	76.988	15.820	07/2019	surface sediment	−14.9
22	HH19 BOX 891	Hornsund	76.989	16.305	07/2019	surface sediment	−13.6
23	HH15-1464BC	Hornsund	77.153	16.325	07/2015	surface sediment	−24.9[a]
24	HH15-1466BC	Hornsund	77.007	16.489	07/2015	surface sediment	−23.7[a]
25	HH15-1468BC	Hornsund	77.161	16.561	07/2015	surface sediment	−12.8[a]
26	HH15-1469BC	Hornsund	77.066	16.616	07/2015	surface sediment	−20.7[a]
27	HH15-1472BC	Hornsund	77.649	16.321	07/2015	surface sediment	−15.0[a]
28	HH15-1474BC	Hornsund	77.055	16.465	07/2015	surface sediment	−12.7[a]
29	HH15-1475BC	Hornsund	77.035	16.507	07/2015	surface sediment	−12.6[a]
30	HH15-1476BC	Hornsund	77.009	16.527	07/2015	surface sediment	−13.0[a]
31	HH15-1478BC	Hornsund	77.653	16.679	07/2015	surface sediment	−13.1[a]
32	HH15-1479BC	Hornsund	77.026	16.760	07/2015	surface sediment	−11.7[a]
33	HH15-1480BC	Hornsund	77.056	16.846	07/2015	surface sediment	−10.1[a]
34	HH15-1482BC	Hornsund	77.092	17.089	07/2015	surface sediment	−10.4[a]
35	HH15-1484BC	Hornsund	77.596	16.973	07/2015	surface sediment	−10.8[a]
36	HH15-1485BC	Hornsund	77.642	16.868	07/2015	surface sediment	−11.3[a]
37	HH15-1486BC	Hornsund	77.632	16.594	07/2015	surface sediment	−14.9[a]
38	HH15-1488BC	Hornsund	77.522	16.550	07/2015	surface sediment	−17.4[a]
39	HH15-1489BC	Hornsund	77.572	16.455	07/2015	surface sediment	−17.0[a]
40	HH15-1490BC	Hornsund	77.564	16.391	07/2016	surface sediment	−16.3[a]
41	HH16-1223BC	Hornsund	76.977	15.864	07/2016	surface sediment	−16.5[a]
42	HH16-1227BC	Hornsund	77.000	15.997	07/2016	surface sediment	−18.3[a]
43	HH16-1230BC	Hornsund	76.983	16.273	07/2016	surface sediment	−14.8[a]
44	Koller	Krossfjorden	79.287	12.046	07/2015	surface sediment	−13.9
45	Mayerbukta	Krossfjorden	79.266	12.160	07/2015	surface sediment	−14.3
46	Julibreen	Krossfjorden	79.123	11.846	07/2015	surface sediment	−14.9
47	HH16-1182BC	Dicksonfjorden	78.805	15.362	07/2016	surface sediment	−13.7[a]
48	HH16-1193BC	Dicksonfjorden	78.646	15.290	07/2016	surface sediment	−13.4[a]

KOPRI 극지연구소

(나) 표층퇴적물의 방사성탄소동위원소

- 스발바르 비데(n = 6), 이스(n = 2), 반미엔(n = 3), 딕슨(n = 2), 크로스피오르드(n = 3) 및 호른준드(n = 10) 표층 퇴적물 총 26점의 방사성탄소동위원소($\triangle^{14}C_{org}$) 값을 Table 27 에 나타냄
- 표층 퇴적물 26점의 $\triangle^{14}C_{org}$ 값은 평균 -663.1±247.5‰로 대부분 상당히 오래된 퇴적물의 영향을 많이 받은 것으로 나타남
- 각 피오르드의 표층퇴적물에서의 $\triangle^{14}C_{org}$ 값을 비교해보면, 반미엔 피오르드, 호른준드에서 각각 평균 -876.4±89.1‰, -842.1±137.0‰, 비데피오르드 -288.5±52.8‰, 이스피오르드 -599.5±95.7‰, 딕슨피오르드 -673.7±95.7‰, 그리고 크로스피오르드에서 평균 -637.6±53.7‰의 값을 각각 나타냄
- 이를 Kim et al. 2011에서 보고된 콩스피오르드 표층퇴적물 및 IRD (ice-rafted detritus)의 유기물 분석 결과 및 $\triangle^{14}C_{org}$ 값과 함께 비교해보았을 때, 상대적으로 young한 signal을 보이는 현생 식생이나 토양 등의 영향보다는 그 외의 오래된 기원물질 (old source)의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있음

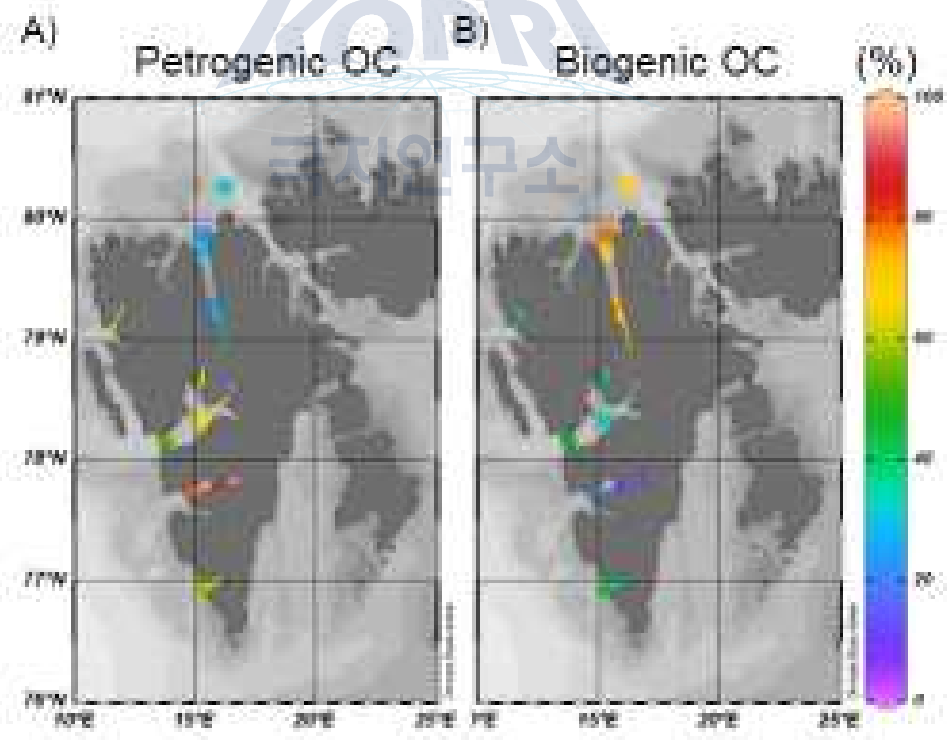


Fig. 138. Spatial distribution of (A) petrogenic OC (%) and (B) biogenic OC (%) calculated based on $\triangle^{14}C_{org}$.

Table 27. Results of radiocarbon isotopes for fjord surface sediments.

No.	Sample name	Location	Sample type	Sample depth (cm)	$\triangle^{14}C_{org}$ (‰)	Reference
1	HH17-1107	Wijdefjorden	surface sediment	0-1	-364.9	Beta512745
2	HH17-1108	Wijdefjorden	surface sediment	0-1	-284.2	Beta512746
3	HH17-1109	Wijdefjorden	surface sediment	0-1	-247.7	Beta512747
4	HH17-1110	Wijdefjorden	surface sediment	0-1	-286.9	Beta512748
5	HH17-1111	Wijdefjorden	surface sediment	0-1	-219.0	AWI2718.1.1
6	HH17-1086	Wijdefjorden	surface sediment	0-1	-328.3	AWI2719.1.1
7	HH19 BOX 847	Isfjorden	surface sediment	0-1	-667.2	UGAMS#60080
8	HH19 BOX 850	Isfjorden	surface sediment	0-1	-531.9	UGAMS#60081
9	HH19 BOX 855	van Mijenfjorden	surface sediment	0-1	-961.3	UGAMS#60082
10	HH19 BOX 863	van Mijenfjorden	surface sediment	0-1	-884.2	UGAMS#60083
11	HH19 BOX 868	van Mijenfjorden	surface sediment	0-1	-783.6	UGAMS#60084
12	HH19 BOX 885	Hornsund	surface sediment	0-1	-573.7	AWI8543.1.1
13	HH19 BOX 888	Hornsund	surface sediment	0-1	-629.1	AWI8544.1.2
14	HH19 BOX 891	Hornsund	surface sediment	0-1	-837.7	AWI8545.1.2
15	HH15-1464BC	Hornsund	surface sediment	0-5	-813.1	UGAMS#60073
16	HH15-1466BC	Hornsund	surface sediment	0-5	-860.9	UGAMS#60074
17	HH15-1468BC	Hornsund	surface sediment	0-5	-954.0	UGAMS#60075
18	HH15-1474BC	Hornsund	surface sediment	0-5	-932.0	UGAMS#60076
19	HH15-1475BC	Hornsund	surface sediment	0-5	-920.3	UGAMS#60077
20	HH15-1480BC	Hornsund	surface sediment	0-5	-939.1	AWI8541.1.1
21	HH15-1482BC	Hornsund	surface sediment	0-5	-961.2	AWI8542.1.2
22	Koller	Krossfjorden	surface sediment	0-2	-603.6	UGAMS#60070
23	Mayerbukta	Krossfjorden	surface sediment	0-2	-699.7	UGAMS#60071
24	Julibreen	Krossfjorden	surface sediment	0-2	-609.5	UGAMS#60072
25	HH16-1182BC	Dicksonfjorden	surface sediment	0-1	-741.4	UGAMS#60078
26	HH16-1193BC	Dicksonfjorden	surface sediment	0-1	-606.1	UGAMS#60079

KOPRI 극지연구소

- 실제로 표층퇴적물의 방사성탄소동위원소 값을 이용하여 표층퇴적 유기물에 영향을 미치는 old한 petrogenic source의 기여도를 파악하기 위해 simple binary mixing model를 적용시켜봄. Two end-member를 사용하였으며 기존 Goni et al., 2005 문헌을 참고하여 $\triangle^{14}C_{petrogenic}$ = −1000‰, 그리고 비교적 young한 signal을 갖는 현생 식생이나 해양환경 등 biogenic한 source의 end-member로 $\triangle^{14}C_{biogenic}$ = 0‰로 가정하였으며 계산한 결과를 Fig. 138에 나타냄
- 그 결과 스발바르 피오르드 표층퇴적물의 petrogenic OC 의 기여도는 21.9%~96.1% 의 범위로 나타냈으며, 평균 66.3%로 petrogenic한 유기물의 영향을 많이 받는 것으로 나타남
- 따라서, 전통적으로 유기물의 기원을 파악하는데 주로 활용되고 있는 bulk parameters (예: TOC/TN ratio, $\delta^{13}C_{org}$ 등) 만을 이용한 기존 연구들에서는 단순히 육상, 해양 기원의 영향만을 파악하였으나(예: Kim et al., 2020; Kumar et al., 2016; Knies et al., 2009 등), 스발바르 피오르드와 같은 조수빙하의 활동이 활발한 지역에서는 상대적으로 old한 유기물의 기원을 고려해야 함을 의미함

(다) 표층퇴적물의 리그닌페놀

- 각 리그닌 페놀 S/V, C/V를 이용하여 gymnosperm과 angiosperm, 그리고 woody와 non-woody로 구분하여 살펴본 결과, 대부분의 피오르드 표층 퇴적물은 woody gymnosperm 기원의 식생의 영향을 가장 많이 받는 것으로 나타났으며 이는 함께 분석한 롱이어비엔 근처 식생 및 토양에서의 결과도 동일하게 나타남(Fig. 139A)

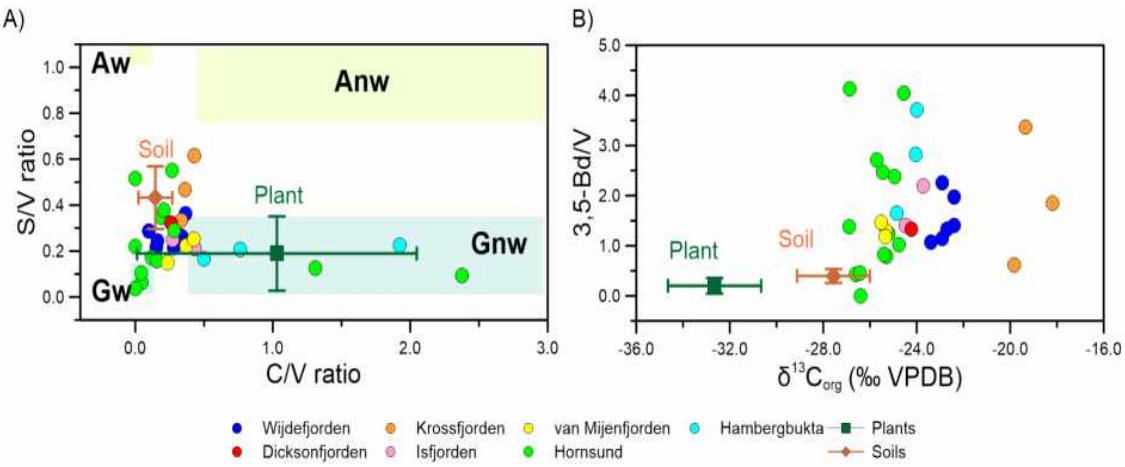


Fig. 139. Scatter plots of (A) C/V vs. S/V ratio and (B) $\delta^{13}C_{org}$ vs. 3,5-Bd/V of fjord surface sediment, plant, and soil samples.

- 그러나, 주로 토양의 degradation 과정에서 파생되는 3,5-Bd를 이용하여 유기물의 degradation 정도의 지시자로 사용되고 있는 3,5-Bd/V (3,5-dihydroxygenzoic acid/Vanillyl phenols ratio) 의 결과로 보았을 때(Fig. 139B), 스발바르 지역 현생 토양이나 식생보다 표층퇴적물은 degradation이 상당히 많이 진행된 상태임을 알 수 있으며 유기물 기원의 관점으로 보았을 때, 앞서 토의한 더 old한 source가 존재함을 다시 한 번 확인 할 수 있음

(라) 스발바르 표층퇴적물의 유기물 기원 규명 및 기여도

- 스발바르 표층 퇴적 유기물의 기원을 파악하기 위해 스발바르 지역에서 처음으로 리그닌 페놀 바이오마커와 $\triangle^{14}C_{org}$ 값을 활용하여 그 기원을 추적하고 각 기여도를 추정해보고자 하였음
- 앞서 토의한 쇄설성 네오디뮴 동위원소비 결과 및 기존 자료들을 종합해 보았을 때, 스발바르 표층 퇴적 유기물에 영향을 미치는 source는 스발바르 전 지역에 분포하고 있는 다양한 sedimentary rock에서 기원하는 old한 source, 즉 petrogenic 성분과 다양한 현생 식생, 토양, 해양환경 등에서 유래하는 biogenic한 source임을 유추해 낼 수 있음. 이러한 점들을 고려할 때, 스발바르 피오르드와 같은 조수빙하 활동이 활발한 지역에서 주요한 biogenic source로는 subglacial source가 있음을 알 수 있음

KOPRI 극지연구소

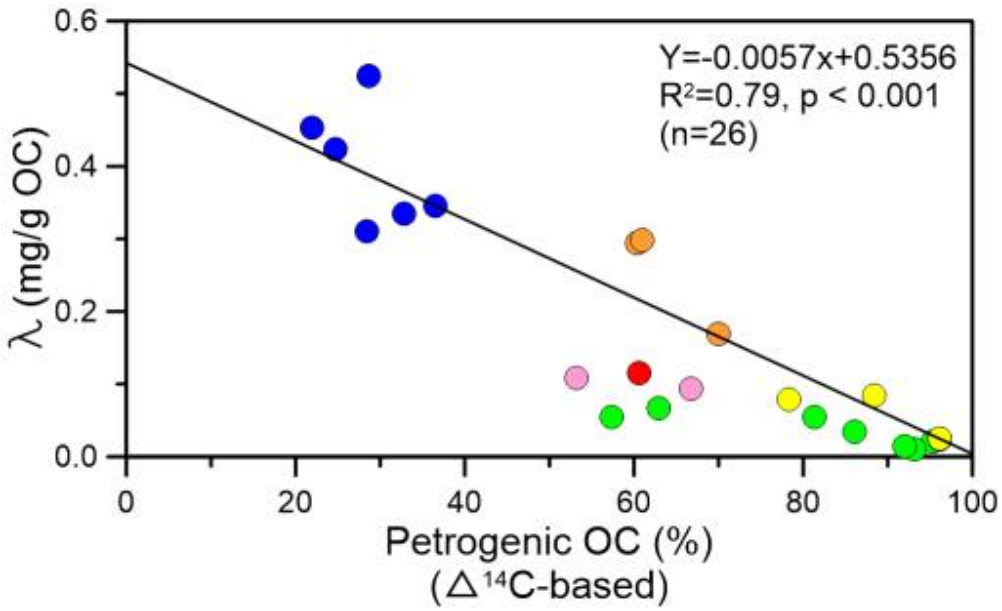


Fig. 140. Scatter plot of petrogenic OC (%) vs. lignin phenols concentration (λ) in fjord surface sediments.

- 이를 리그닌 페놀 바이오마커 결과를 이용하여 각 source의 기여도를 추정해보기 위해 Fig. 140과 같이 △14Corg 값을 이용하여 계산한 petrogenic OC (%)와 리그닌 페놀 농도 값(λ)을 함께 나타냄. 이 그림에서 **petrogenic OC**의 값이 **0** 일 때 **(X= 0)**의 λ는 **subglacial OC**의 **end- member**로 정의 할 수 있음
- 따라서 전체 퇴적 유기물에서 각각의 source들이 기여하는 정도를 다음과 같은 식을 이용하여 계산함

$$F_{petro} + F_{subglacial} + F_{mar}=1$$
$$\lambda_{sample} = (\lambda_{mar} * F_{mar}) + (\lambda_{subglacial} * F_{subglacial}) + (\lambda_{petro} * F_{petro})$$
$$\lambda_{sample} = \lambda_{subglacial} * F_{subglacial}$$

- 전체 표층 퇴적 유기물에서 petrogenic, subglacial, 그리고 marine OC 각각이 차지하는 portion을 각각 F_{petro}, $F_{subglacial}$, 그리고 F_{marine}으로 나타냈으며 이들의 총 합은 1로 나타낼 수 있음
- 스발바르 지역에서 채취한 암석시료의 리그닌 페놀 바이오마커 분석 결과, 모든 암석시료에서 리그닌이 검출되지 않았음. 따라서 **λpetrogenic**과 **λmarine**은 **0**으로 가정 할 수 있으며, 최종적으로 표층퇴적물 시료의 λ농도는 $F_{subglacial}$과 **λsubglacial** 의 곱으로 정의 할 수 있음
- 위의 수식을 이용하여 각 피오르드의 표층 퇴적 유기물에 영향을 미치는 세 가지 source인 petrogenic, subglacial, 그리고 marine OC의 각 기여도를 계산하여 Fig. 141에 나타냄

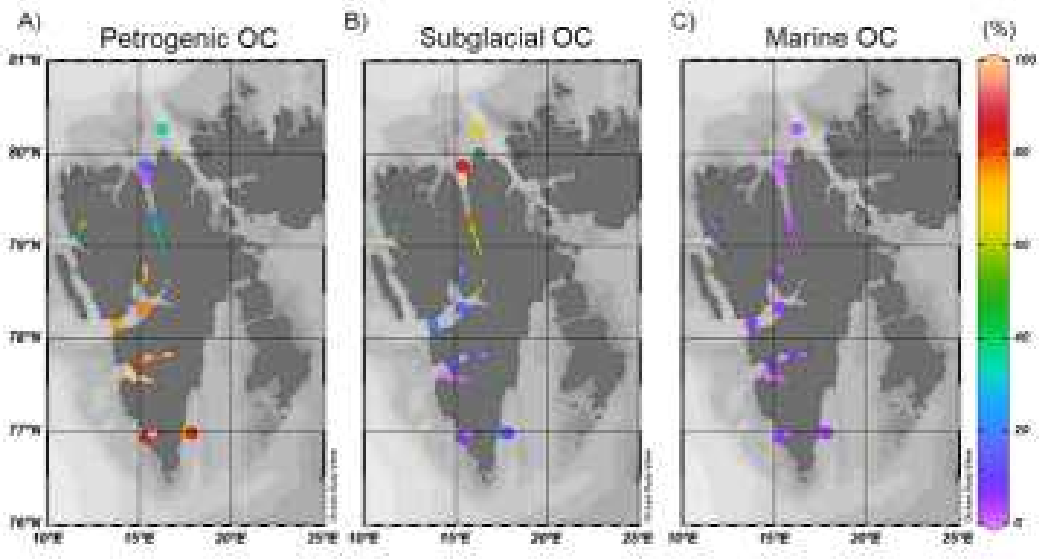


Fig. 141. Spatial distributions of (A) petrogenic OC (%), (B) subglacial OC (%), and (C) marine OC (%) in fjord surface sediments.

- 기여도 계산 결과, subglacial OC (%) 는 0.2%~97.8%, 그리고 marine OC (%) 는 0.1%~6.0%로 해양기원 유기물의 영향은 상대적으로 매우 미미하다는 것을 알 수 있음
- 특히 Fig. 139b에서처럼 $\delta^{13}C_{org}$ 값이 상당히 무거운 값을 갖는 콩스피오르드의 경우, 기존 연구(Kim et al., 2020) 에서 보고된 바에 의하면 marine 기원의 영향을 대부분 많이 받는다고 해석 될 수 있으나 실제로는 대부분 subglacial OC의 영향이 상당부분 차지한다는 것을 알 수 있음. 또한 앞서 토의한 크로스/콩스피오르드에서 무거운 $\delta^{13}C_{org}$ 값을 나타냄과 동시에 굉장히 old한 $\triangle^{14}C_{org}$ 값을 나타내는 것 또한 위와 같은 이유로 해석 될 수 있음
- 이는 기존 스발바르 지역에서 다양한 벌크 인자들을 이용하여 퇴적 유기물의 기원을 파악하는 연구들이 시도되었으나, 스발바르 피오르드와 같이 조수빙하활동이 활발한 지역에서는 단순 육상, 해양 두 가지의 source 만을 고려하는 것이 아닌 이 지역의 자연현상 및 특징을 반영하여 petrogenic OC, 및 subglacial OC의 영향을 반드시 고려해야 함을 알 수 있음
- 각각의 source는 같은 조건에 노출되었을 때 반응속도 및 분해되는 정도 등이 모두 상이하기 때문에 이들이 최종적으로 분해되어 대기 중으로 방출되는 정도 또한 다를 것으로 예상 할 수 있음.
- 따라서 급격한 온난화와 빙하 후퇴를 겪고 있는 스발바르 지역을 이해하고 환경을 해석하기 위해선 반드시 이러한 구체적인 유기물 기원을 파악하는 연구가 필요하다고 사료되어짐. 또한 이를 위해 본 연구에서 시도한 분자수준의 리그닌 페놀 바이오마커 분석이 육상 signal을 대표하는 인자로 상당히 유용하게 사용 될 수 있음을 확인하였음

나) 알케논 분석 인프라 구축

(1) 연구 목적

- 스발바르 지역에서 일어나고 있는 기후 변화를 이해하기 위해서는 기본적으로 과거 수온 변화에 대해 이해가 필요함
- 알케논은 C36-40 Methyl과 Ethyl 케톤으로 이루어진 긴 사슬 구조의 유기화합물로써 이중 결합수가 2개, 3개, 또는 4개로 구성되어 있음(Fig. 142). 알케논의 불포화 정도는 해수면 온도 변화에 민감하여 이러한 특성을 바탕으로 한 과거 수온 복원의 한 방법으로 고해양 연구에 널리 사용되고 있음(Herbert, 2001, Brassell, 2014)
- 지난 40년 동안 알케논에 대해 많은 연구가 이루어졌음에도 불구하고 표준화된 알케논 분석법은 아직 확립되지 않음. 가장 일반적으로는 가스크로마토그래피-불꽃이온화 검출기(GC-FID, Gas chromatography-flame ionization detector)를 활용하여 분석하는 방법임(Longo et al., 2013, Zheng et al., 2015, Zheng et al., 2017)

- 그러나 GC-FID를 이용한 분석은 알케논 크로마토그래피 단일 피크와 비슷한 검출 시간대의 주변 화합물의 간섭으로 인해 정확한 피크 확인(identification) 및 정량(quantification)이 어려움. 그 대안으로 2차원 가스크로마토그래피 비행시간형 질량분석기 (GCXGC-TOFMS, Comprehensive two dimensional Gas chromatography- time-of-flights)가 제안됨

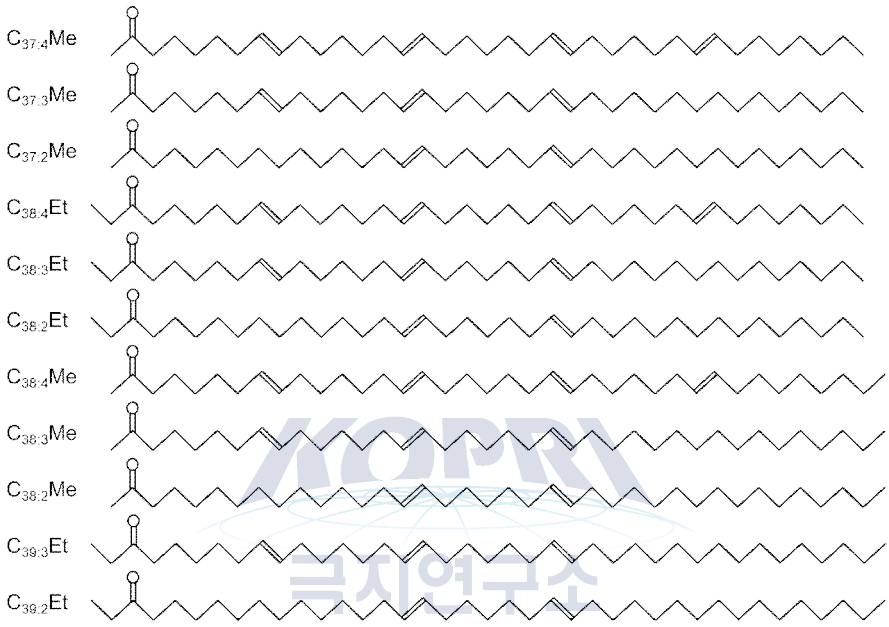


Fig. 142. Chemical structures of alkenones.

- 본 연구는 스발바르 피오르드 퇴적물의 특성에 맞게 적합한 알케논 분석법을 확립하고자 함. 이를 위해 동해 표층 퇴적물 시료와 Haptophyte 배양 시료를 활용하여 GCXGC-TOFMS, 가스크로마토그래피 질량분석기(GC-MS, Gas chromatography-mass spectrometry) 및 GC-FID 분석결과를 각각 비교하고자 함
- 알케논 분석법을 구축하고 스발바르 3개의 피오르드 (이스피오르드, 콩스피오르드, 힌로펜 해협)에서 멀티 코어러로 채집한 9점의 표층 퇴적물과 그린란드 해 표층 퇴적물을 활용하여 과거 수온 복원 연구를 수행함
- 또한 추가적으로, 스발바르 피오르드 (이스피오르드, 콩스피오르드, 힌로펜 해협)과 그린란드 해 표층 퇴적물을 활용하여 스발바르 과거 해빙 환경 및 변화 기록 복원을 위해 HBIs(Highly Branched Isoprenoids) 사용함. 그러나 IP_{25}는 결빙되지 않은 지역(ice-free area)과 연중 결빙(permanent sea ice)된 지역을 구분할 수 없다는 문제점이 제기되어 왔으며 이를 보완하기 위해 식물플랑크톤에서 유래된 유기분자생체지표를 함께 사용한 PIP25라는 지표(index)를 사용하고자 함

- 본 연구에서는 식물플랑크톤 지시자로, HBIs 중 하나인 HBI III(Z)와 sterols 중 brassicasterol 및 dinosterol를 분석하였으며, 이 결과를 바탕으로 계산한 PIP_{25}를 사용하여 스발바르 피오르드(이스피오르드, 콩스피오르드, 힌로펜 해협)와 그린란드 해 과거 해빙 기록을 복원할 예정임

(2) 연구 방법

(가) 배양 시료 준비

- 알케논 분석에 사용한 배양 시료는 기존 관련 문헌을 참고하여 총 2종류를 준비함. 알케논을 생산하는 Haptophyte 종은 서식 환경에 따라 담수종(Group 1), 기수종(Group 2), 해수종(Group 3)로 나눌 수 있으며 그 중에서 각각의 단일종을 분리해서 배양한 시료(기수종, 및 해수종)를 구매하여 사용함
- 배양 시료는 기수종의 대표적인 종인 *Ruttnera lamellosa* 와 해수종의 대표적인 종인 *Emiliania huxleyi*를 선택함(Fig. 143). 두 종 모두 알케논을 풍부하게 생산하는 종으로 알려짐
- *Ruttnera lamellosa*는 영국 런던의 Chelsea Physic Garden에서 수집하여 '12시간 동안 빛–12시간 동안 빛 차단' 사이클에서 백색 형광등으로 15℃에서 4 ~ 6 주 동안 배양함. 배양된 시료는 Culture Collection of Algae & Protozoa (CCAP)에서 구매함
- *Emiliania huxleyi*는 그린란드 주변 북대서양에서 수집하여 '12시간 동안 빛– 12시간 동안 빛 차단' 사이클에서 백색 조명으로 15 ~ 20℃에서 한 달간 배양된 시료임. 배양된 시료는 CCAP에서 구매함

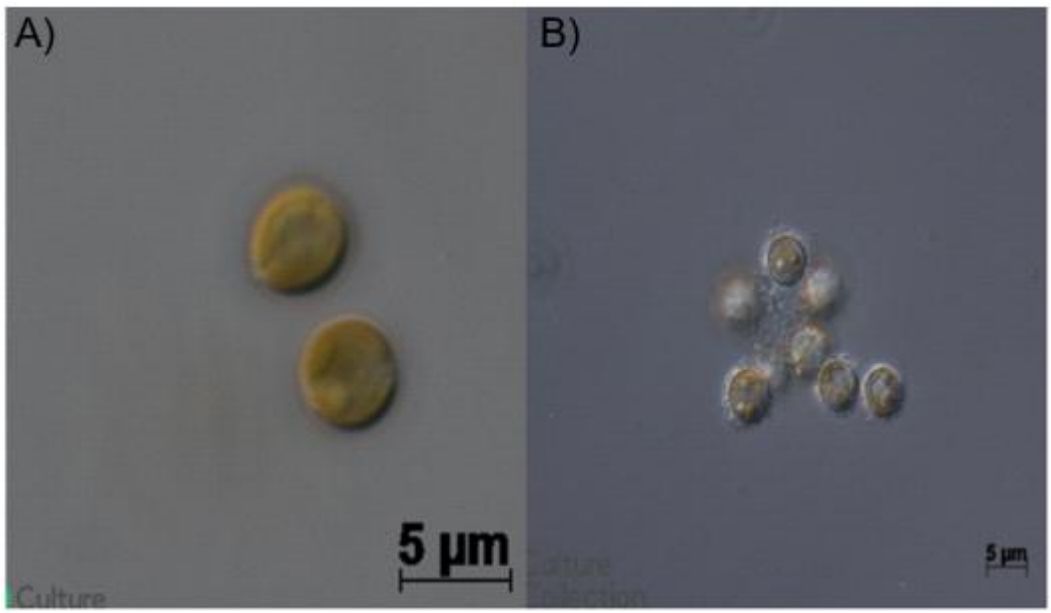


Fig. 143. Microscopic images of (A) *Ruttnera lamellosa* and (B) *Emiliania huxleyi* (Source: CCAP).

- 알케논 분석에 사용하기 전, 450℃에서 4시간 동안 태운 Whatman GF/F 47mm 필터를 이용해서 배양 시료를 필터링 한 뒤 동결건조를 진행하고 분석 전까지 – 20℃ 냉동고에서 보관함(Fig. 144)

Fig. 144. Photo of culture samples of *Emiliania huxleyi* and *Ruttnera spectabilis*.

극지연구소

(나) 알케논 추출 방법 비교

- 알케논 분석법을 확립하기 위해 관련 분석법에 대해 기존 보고된 문헌 조사를 실시함. 각 문헌에서 사용한 해양 퇴적물 내 알케논을 추출하는 방법(추출 용매, 컬럼 종류, 추가 정제 여부 등)이 서로 상이하였으며, 각 문헌에서 보고된 방법을 Table 28에 정리함
- 동해 코어퇴적물 시료를 5cm 간격으로 절개한 후, 동결건조와 분쇄작업을 진행함. 분쇄작업이 완료된 시료를 유리 바이알에 담은 후 일정한 속도로 균일화 작업을 진행함
- 동결건조와 분쇄 및 균일화 작업이 완료된 동해 코어 퇴적물 시료(Table 29)를 이용하여 서로 다른 3개의 추출 방법(Figs. 145–147)을 적용하여 극지연구소에서 보유하고 있는 GC–FID를 사용하여 알케논 분석을 수행함
- 모든 분석은 동일한 조건에서 수행되었으며, 알케논 분석은 중간 극성의 Rtx–200 (105m x 0.25μm x 0.25mm, Restek Pure Chromatography) 컬럼을 사용하여 분석한 후 각 방법의 크로마토그램을 비교하고, 정량 분석을 수행함

Table 28. Comparison of extraction methods for molecular biomarkers related to alkenones.

	Method 1	Method 2	Method 3
Reference	Belt et al., 2012	Zheng et al., 2015	Gal et al., 2018
Extraction	Ultra sonication	Ultra sonication	Ultra sonication
Extraction Solvent	DCM:MeOH 2:1 v/v	DCM:MeOH 2:1 v/v	DCM:MeOH 2:1 v/v
column chromatography	Silica gel	Silica gel Supelco Supelclean Flash column ($LC-NH_2$, 40- 63 μm)	Silica gel
Purification	Saponification	–	–

KOPRI 극지연구소

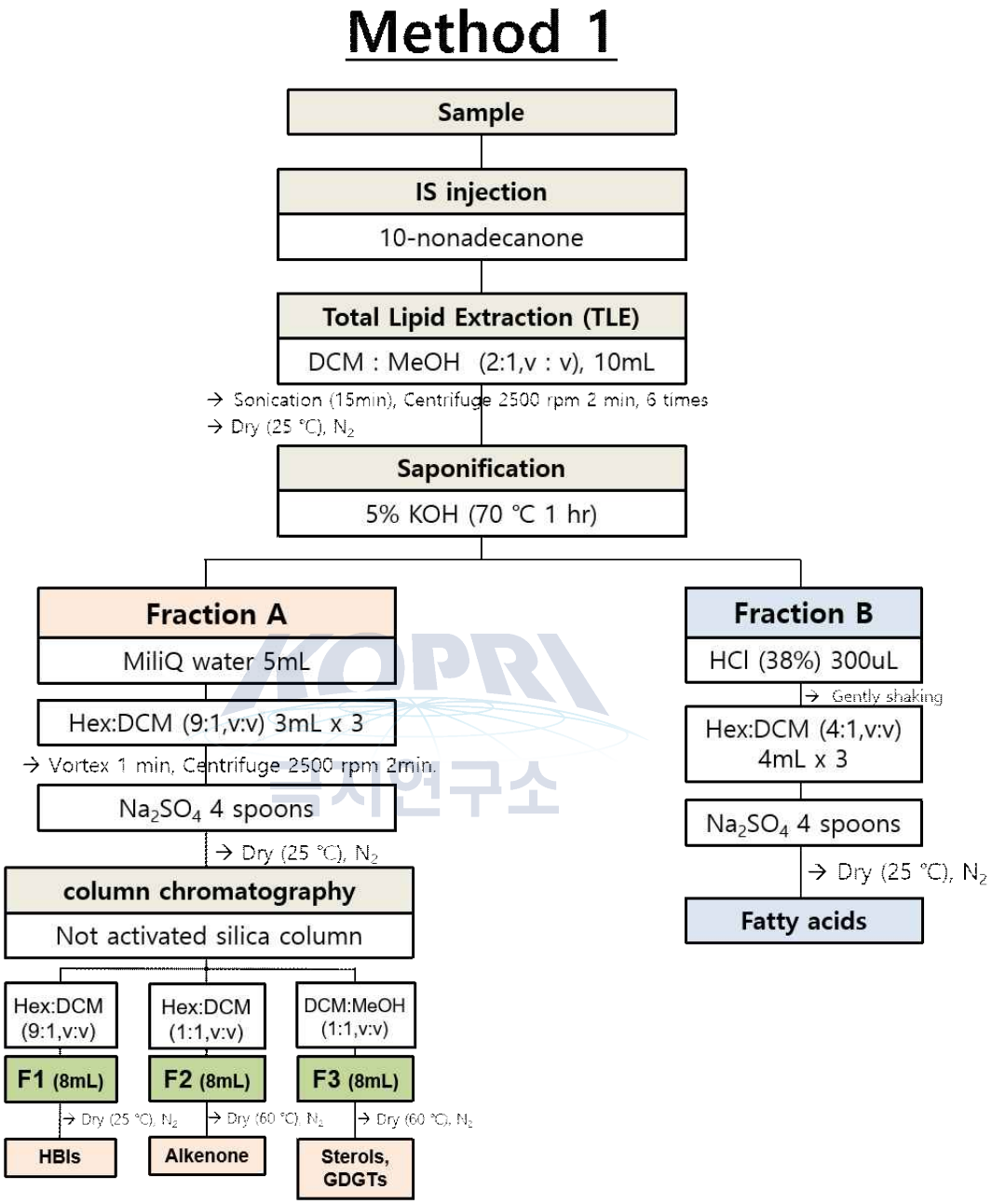


Fig. 145. Flow chart of the extraction method for molecular biomarkers using Method 1 (Belt et al., 2012).

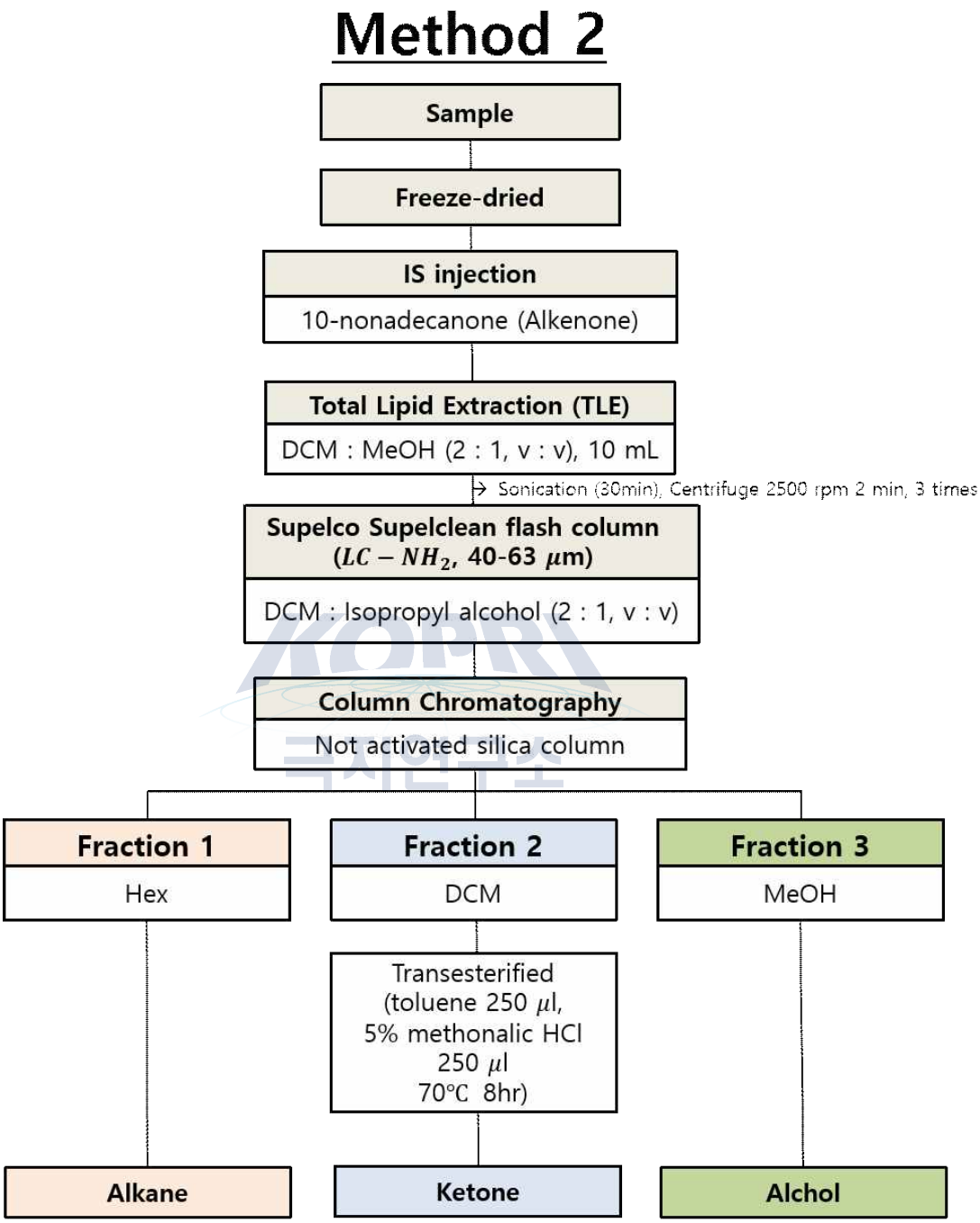


Fig. 146. Flow chart of the extraction method for molecular biomarkers using Method 2 (Zheng et al., 2015).

Method 3

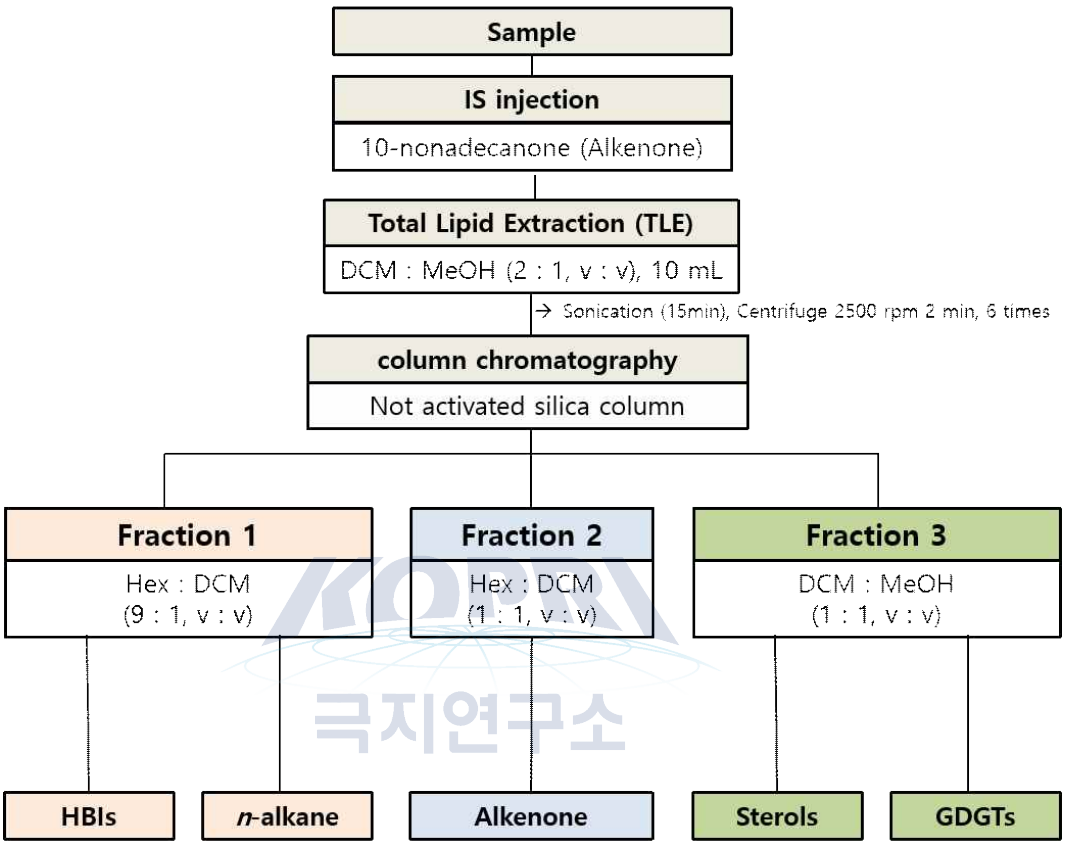


Fig. 147. Flow chart of the extraction method for molecular biomarkers using Method 3 (Gal et al., 2018).

Table 29. East sea sample information used for the extraction method test.

Sampling year	Site	Core name	Latitude	Longitude	Water depth (cm)
2013	East sea	ARA04ES-02MUC-01	35° 59.295N	130° 10.258E	2206

(다) 알케논 분석 방법 비교

- 극지연구소에서 보유하고 있는 GC-MS (5977B, Agilent Technologies), GC-FID (8890GC, Agilent Technologies), 및 Leco Korea에서 보유하고 있는 GCXGC-TOFMS (Pegasus BT 4D, Leco)를 각각 활용하여 분석한 알케논 분석 결과를 비교하기 위해 *Ruttnera spectabilis*와 *Emiliania huxleyi* 배양 시료와 동해 코어 퇴적물 시료를 사용함(Table 30, Fig. 148)
- 필터링을 거친 후 동결 건조가 완료된 배양 시료와 동해 코어퇴적물 시료(Fig. 149)는 GC-MS와 GC-FID로 분석하였으며 중간 극성의 105m 길이의 Rtx-200 컬럼을 사용함. GCXGC- TOFMS는 비극성의 Rtx- i7ms (0.1m x 0.25μm x 0.25mm, Restek Pure Chromatography) 컬럼과 중간 극성의 VF- 200ms (60m x 0.25μm x 0.25mm, Agilent Technologies) 컬럼을 사용하여 분석함(Fig. 150)

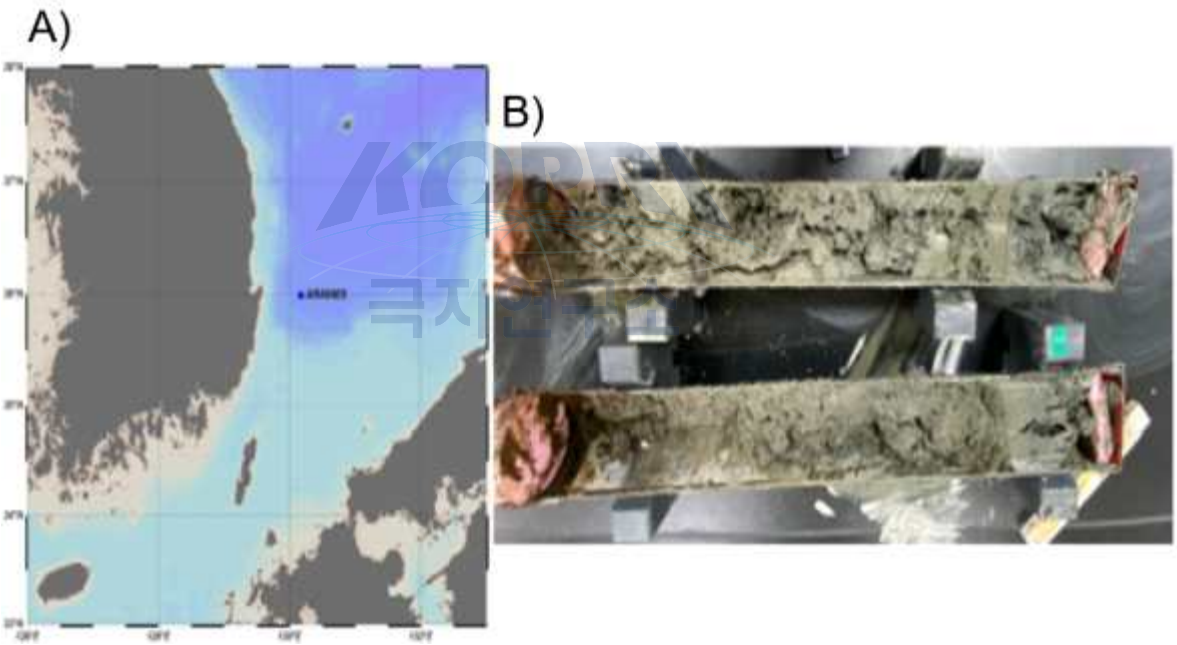


Fig. 148. (A) Map showing the sampling site for the multicore collected in the East Sea and B) split multicore used in this study.

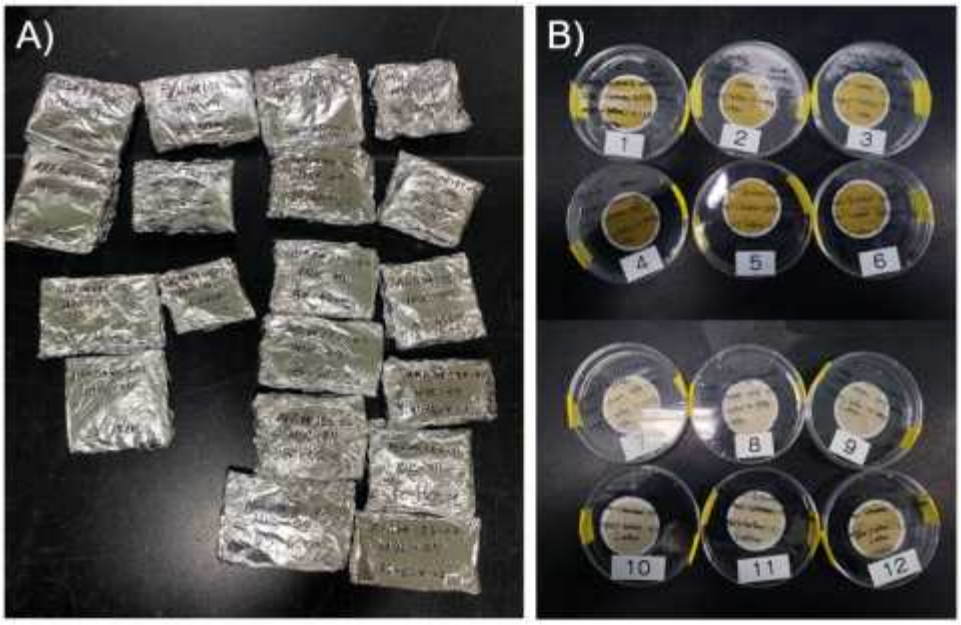


Fig. 149. Photos of A) surface sediment samples collected in the East Sea and B) haptophyte culture samples used for the analytical method comparison.

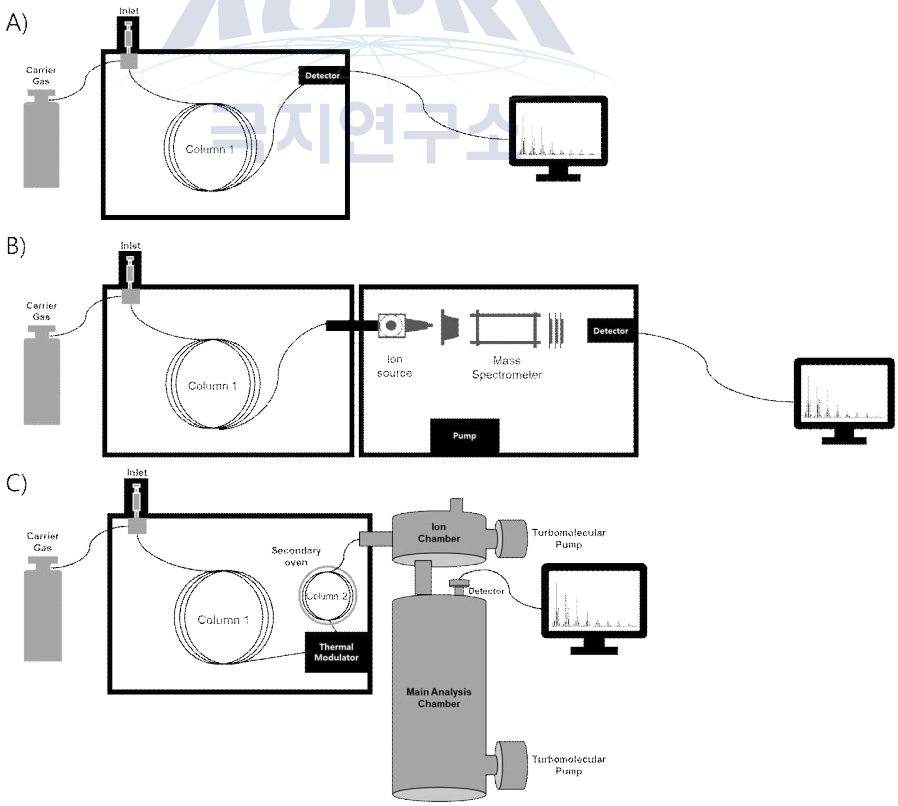


Fig. 150. Scheme of the analytical instruments: (A) GC-FID, (B) GC-MS, and (C) GC×GC-TOFMS used in the analytical method comparison.

(라) 스발바르 피오르드 표층 퇴적물의 유기분자생체지표 분석 방법

- 2022년 R/V Helmer Hanssen을 임차하여 수행한 한국-노르웨이 공동탐사 동안 3개의 피오르드(이스피오르드, 콩스피오르드, 힌로펜 해협)에서 멀티 코어러로 9점의 표층 퇴적물을 획득함
- 3개의 피오르드(이스피오르드, 콩스피오르드, 힌로펜 해협)의 9점 표층 퇴적물과 그린란드해 표층 퇴적물을 동결건조 후에 분쇄작업을 진행함(Table 30 및 Fig. 151)
- 동결건조 및 분쇄작업이 완료된 시료에 알케논, HBIs 및 sterols의 Internal standard (10- nonadecanone, 9- OHD, 5α- androstane- 3β- ol)를 각각 주입한 후 Dichloromethane (DCM)과 Methanol (MeOH)의 혼합 용액을 이용하여 초음파 처리(Sonication)하여 유기물을 추출함
- 추가 cleaning 과정(saponification)을 거친 후 각 단계 마다 극성을 달리하여 Hexane, DCM, 및 MeOH 등 알맞은 용매를 혼합하여 column chromatography를 수행함. 알케논은 분석 전에 Internal Standard (Squalane)를 추가로 주입함
- 최종적으로 추출된 유기분자생체지표 시료는 각 특성에 따라 GC-FID, GC-MS를 활용하여 분석함(Fig. 152)

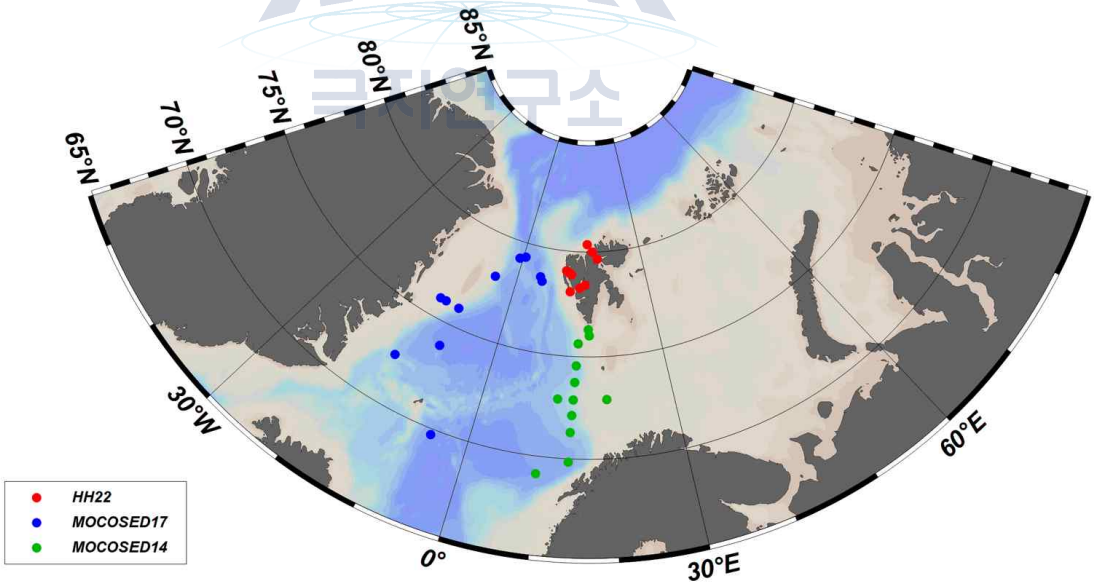


Fig. 151. Map showing the sampling sites of surface sediment samples collected from Svalbard fjords and the Greenland Sea for this study.

Table 30. Information on surface sediment samples collected from Svalbard fjords and the Greenland Sea for alkenone analysis.

No.	Sampling name	Sampling area	Latitude	Longitude	Sampling year
1	HH22-1152-MUC-01	Isfjorden (Inner)	78.405N	15.851E	2022
2	HH22-1154-MUC-01	Isfjorden (Middle)	78.262N	14.541E	2022
3	HH22-1156-MUC-01	Isfjorden (Outer)	78.083N	12.437E	2022
4	HH22-1159-MUC-01	Kongsfjorden (Outer)	79.049N	11.136E	2022
5	HH22-1161-MUC-01	Kongsfjorden (Middle)	78.954N	11.957E	2022
6	HH22-1163-MUC-01	Kongsfjorden (Inner)	78.896N	12.438E	2022
7	HH22-1176-MUC-01	Hinlopen Strait (Inner)	79.651N	18.815E	2022
8	HH22-1179-MUC-01	Hinlopen Strait (Middle)	79.976N	17.559E	2022
9	HH22-1185-MUC-01	Hinlopen Strait (Outer)	80.352N	16.156E	2022
10	MOCOSED14-01	Greenland Sea	72.877N	11.723E	2014
11	MOCOSED14-02	Greenland Sea	72.896N	19.467E	2014
12	MOCOSED14-03	Greenland Sea	69.833N	13.852E	2014
13	MOCOSED14-04	Greenland Sea	71.293N	13.971E	2014
14	MOCOSED14-05	Greenland Sea	72.122N	14.098E	2014
15	MOCOSED14-06	Greenland Sea	72.881N	14.212E	2014
16	MOCOSED14-07	Greenland Sea	73.728N	14.342E	2014
17	MOCOSED14-08	Greenland Sea	74.537N	14.468E	2014
18	MOCOSED14-09	Greenland Sea	75.602N	14.632E	2014
19	MOCOSED14-10	Greenland Sea	76.300N	16.500E	2014
20	MOCOSED14-11	Greenland Sea	76.000N	16.743E	2014
21	MOCOSED14-12	Greenland Sea	69.119N	9.681E	2014
22	MOCOSED17-MT01	Greenland Sea	69.701N	-5.065E	2017
23	MOCOSED17-MT03	Greenland Sea	72.470N	-14.785E	2017
24	MOCOSED17-MT04	Greenland Sea	73.890N	-9.180E	2017
25	MOCOSED17-MT06	Greenland Sea	75.909N	-8.999E	2017
26	MOCOSED17-MT07	Greenland Sea	75.939N	-12.966E	2017
27	MOCOSED17-MT08	Greenland Sea	75.945N	-11.793E	2017
28	MOCOSED17-MT09	Greenland Sea	78.000N	-4.749E	2017
29	MOCOSED17-MT10	Greenland Sea	79.200N	-0.717E	2017
30	MOCOSED17-MT11	Greenland Sea	79.333N	0.591E	2017
31	MOCOSED17-MT12	Greenland Sea	78.579N	5.190E	2017
32	MOCOSED17-MT13	Greenland Sea	78.383N	5.751E	2017

KOPRI 극지연구

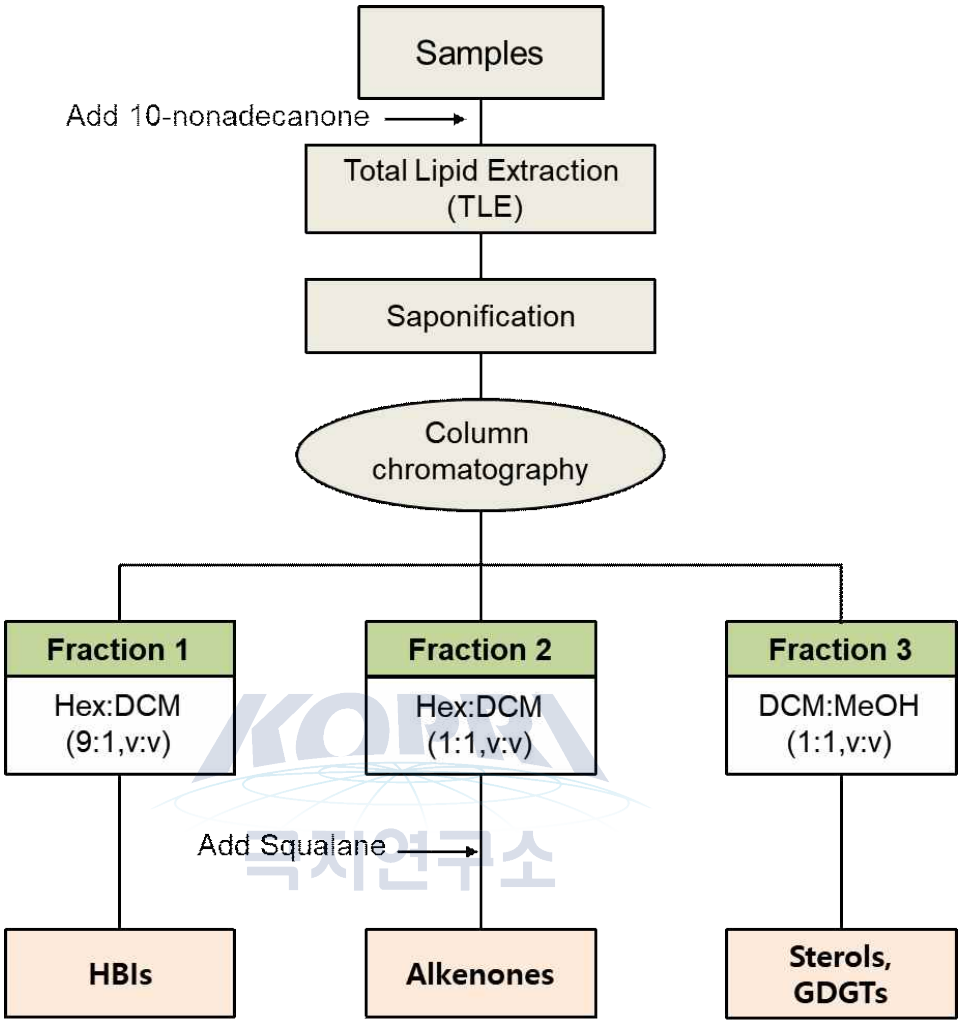


Fig. 152. Flow chart of the extraction method for molecular biomarkers established in this study.

- 모든 분석은 동일한 조건에서 수행되었으며, 알케논은 극지연구소에서 보유하고 있는 GC-FID에 105m 길이의 Rtx-200 컬럼을 장착하여 분석함. HBIs 및 sterols는 GC- MS에 HP- 5ms (30m x 0.25μm x 0.25mm, Agilent Technologies) 컬럼을 장착하여 분석함
- HBIs 분석은 m/z 50 - m/z 500의 TIC mode로 전체 크로마토그램을 확인한 후, m/z 350.3, m/z 348.3, m/z 346.3의 SIM 모드로 총 8개의 compounds (IP_{25}, HBI VI, 5/6 diene, HBI II, HBI III(z), HBI III(E), 5/6 Triene, HBI V)를 분석하여 identification 및 정량 분석을 수행함(Fig. 153)

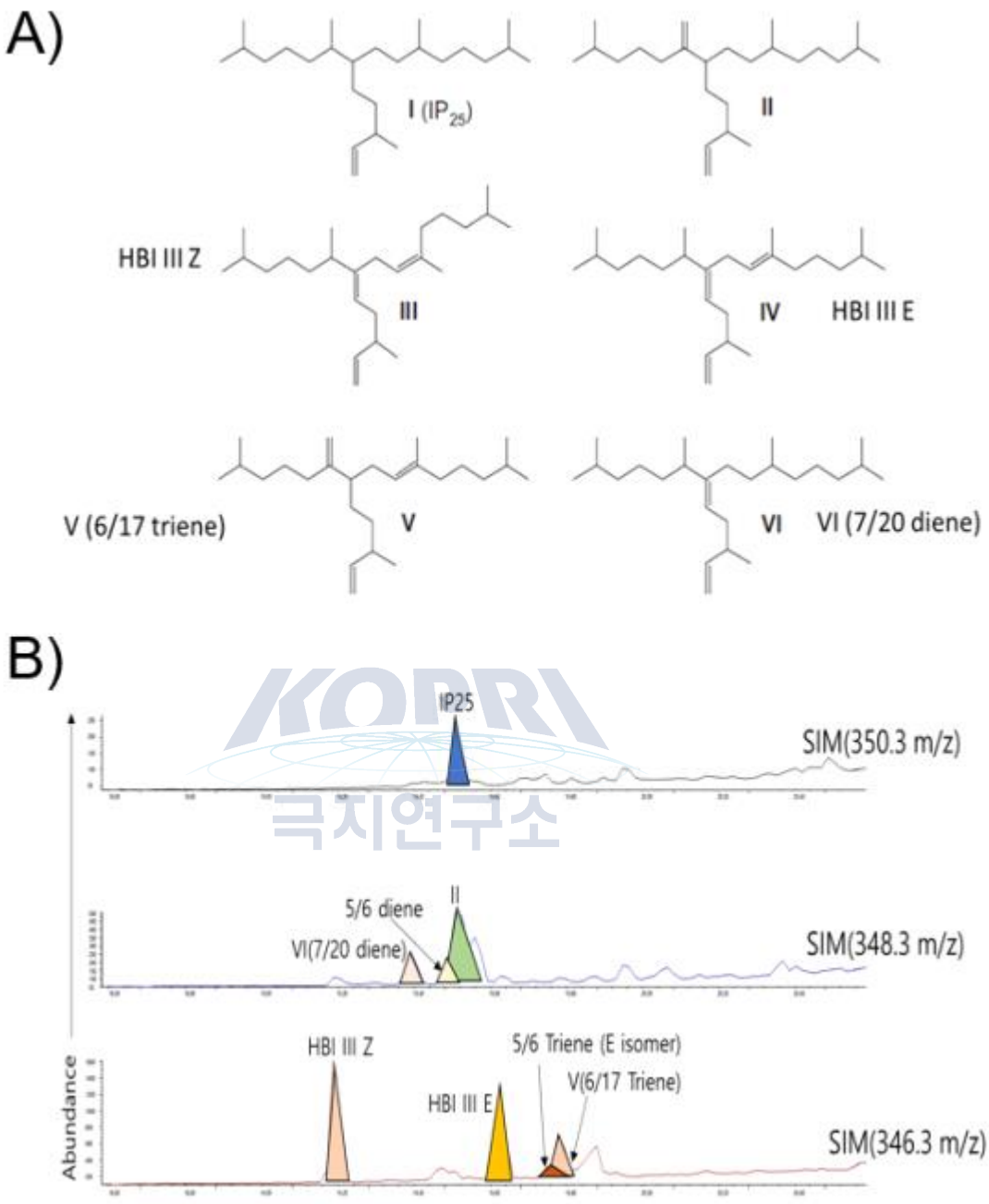


Fig. 153. (A) Chemical structures of HBIs and (B) GC-MS chromatograms for HBIs (SIM mode) obtained from surface sediment samples collected in Svalbard fjords (Isfjorden, Kongsfjorden, and Hinlopen Strait) and the Greenland Sea (MOCSED14 and MOCOSED17).

▪ Sterols 분석은 m/z 50 - m/z 500의 TIC mode로 전체 크로마토그램을 확인한 후, m/z 458, m/z 470, m/z 382, m/z 396의 SIM 모드로 총 6개의 compounds (cholesterol, brassicasterol, 24- methylenecholesterol, campasterol, β-sitosterol, dinosterol)를 분석하여 identification 및 정량 분석을 수행함(Fig. 154)

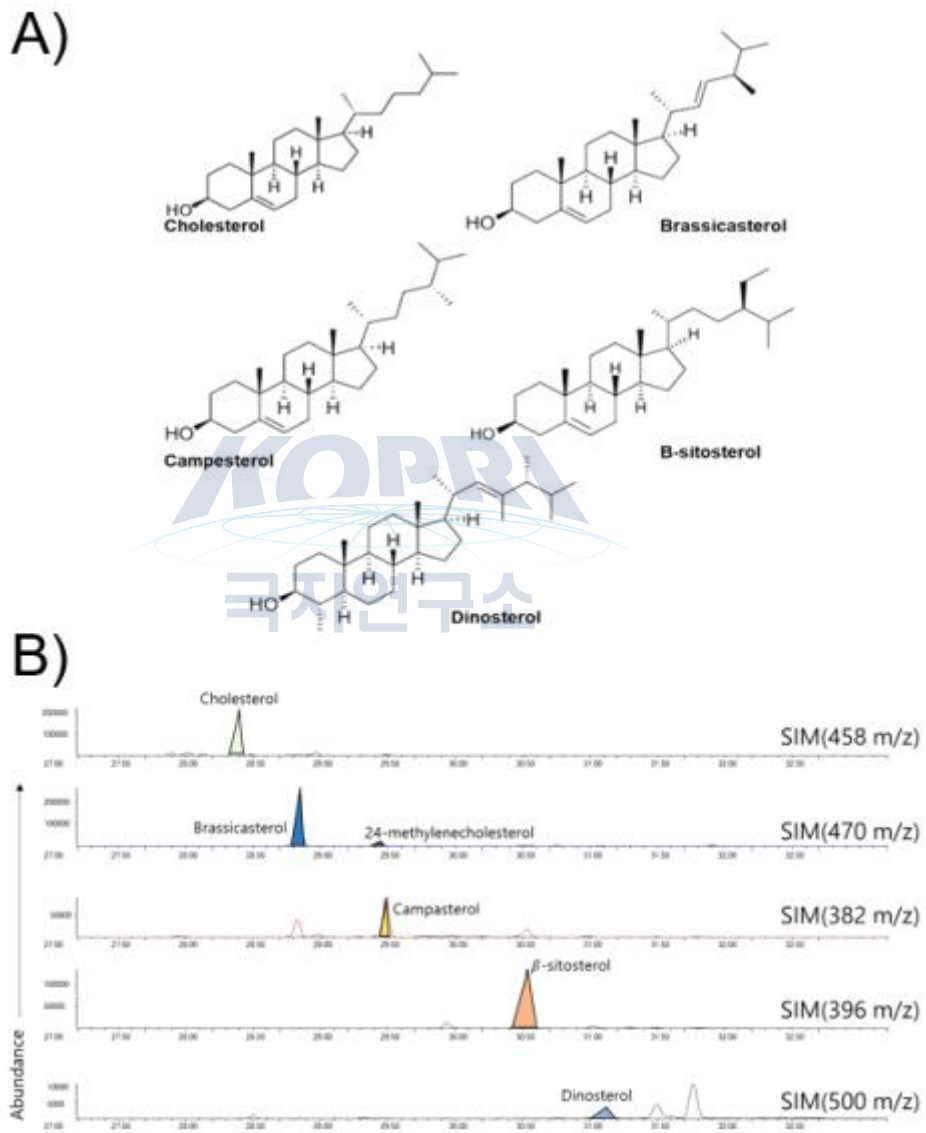


Fig. 154. (A) Chemical structures of sterols and (B) GC-MS chromatograms for sterols (SIM mode) obtained from surface sediment samples collected in Svalbard fjords (Isfjorden, Kongsfjorden, and Hinlopen Strait) and the Greenland Sea (MOCSED14 and MOCOSED17).

3) 연구 결과 및 토의

(가) 알케논 추출 방법 비교

- 동해 코어 퇴적물 시료를 대상으로 서로 다른 추출 방법을 적용하여 획득한 알케논 크로마토그램 결과를 비교함. 모든 방법에서 $C_{37}Me$, $C_{38}Et$, $C_{38}Me$ 및 $C_{39}Et$이 동일하게 검출되었으며, 모든 compound 들이 같은 retention time에 비슷한 intensity로 나타남(Fig. 155)
- 동해 코어 퇴적물 시료를 대상으로 서로 다른 추출 방법을 적용하여 획득한 알케논 농도 분석 결과를 나타냄($C_{37:3}Me$, $C_{37:2}Me$, $C_{38:3}Me$, $C_{38:2}Me$) (Table 31 및 Fig. 156)
- 모든 알케논 농도 값은 동일한 기기 조건에서 3번씩 반복 분석을 통해 획득함
- 알케논 농도 분석 결과, 각 방법에 따라 농도 차이가 있으며 Method 3에서 가장 큰 차이를 보임. 그리고 각 방법 사이의 농도 값의 변동이 큼

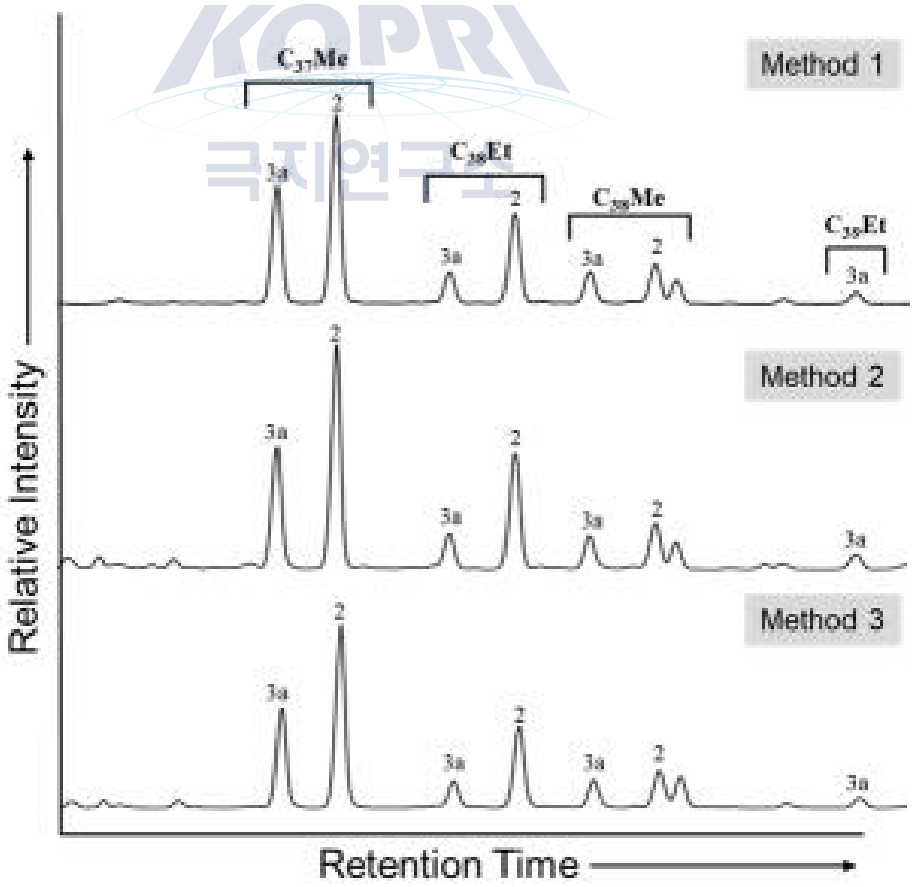


Fig. 155. GC-FID chromatograms of alkenones obtained using different extraction methods.

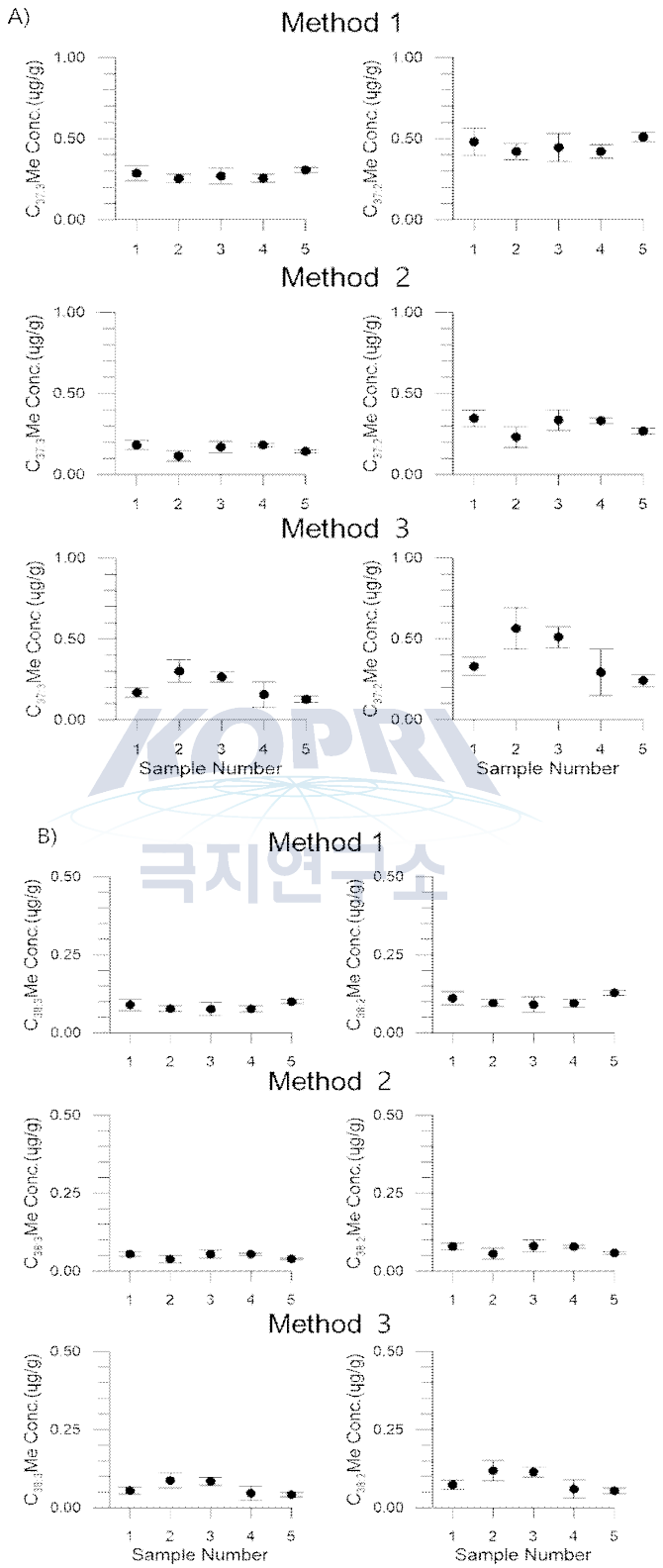


Fig. 156. Results of alkenone concentrations for (A) C_{37}Me and (B) C_{38}Me obtained using different extraction methods.

▪ 동해 코어 퇴적물 시료를 대상으로 서로 다른 추출 방법을 적용하여 획득한 알케논($C_{37:3}Me$, $C_{37:2}Me$, $C_{38:3}Me$, $C_{38:2}Me$)의 peak area를 바탕으로 $U^{K'}_{37Me}$와 $U^{K'}_{38Me}$ 지표(index)를 계산하였으며 계산식은 다음과 같음(Fig. 157)

$$U^{K'}_{37Me} = \frac{C_{37:2}Me}{C_{37:3}Me+C_{37:2}Me}$$

$$U^{K'}_{38Me} = \frac{C_{38:2}Me}{C_{38:3}Me+C_{38:2}Me}$$

Fig. 157. Alkenone indices based on C37Me and C38Me concentrations.

▪ 알케논 농도 자료는 각 방법에 따라 농도 값의 변동이 컸던 반면에, 지표(index) 값은 농도에 비해 그 차이와 변동이 상대적으로 작게 나타남(Table 31, Fig. 158)

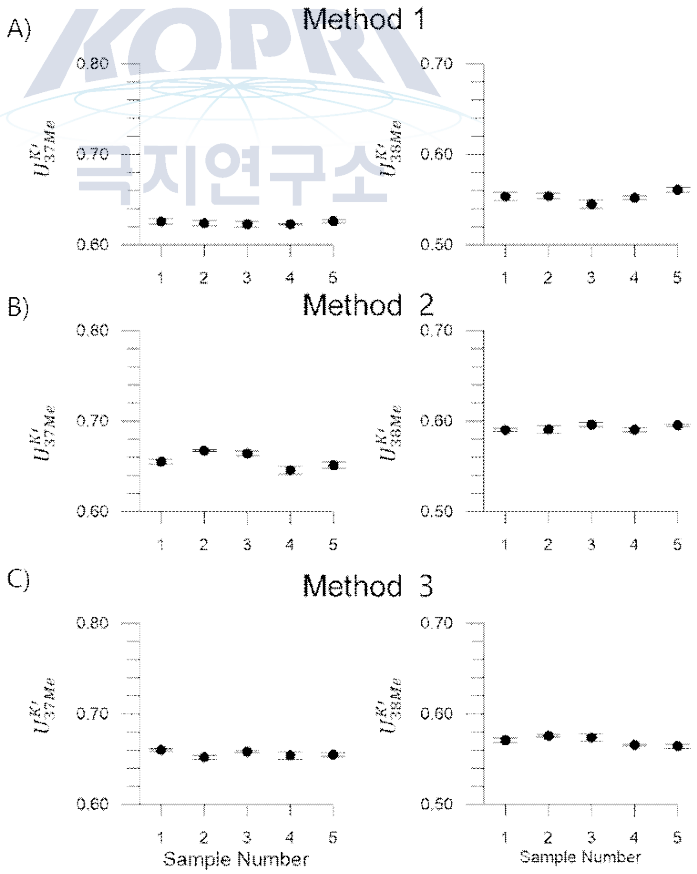


Fig. 158. Results of $U^{K'}_{37Me}$ and $U^{K'}_{38Me}$ indices obtained using (A) Method 1, (B) Method 2, and (C) Method 3.

Table 31. Results of alkenone concentration ($C_{37:3}Me$, $C_{37:2}Me$, $C_{38:3}Me$, and $C_{38:2}Me$), and $U^{K'}_{37Me}$ and $U^{K'}_{38Me}$ indices obtained using different extraction methods.

	$C_{37:3}Me$ (μg/g)	$C_{37:2}Me$ (μg/g)	$C_{38:3}Me$ (μg/g)	$C_{38:2}Me$ (μg/g)	$U^{K'}_{37Me}$	$U^{K'}_{38Me}$
Method 1	0.27	0.46	0.08	0.10	0.62	0.55
Method 2	0.16	0.30	0.05	0.07	0.66	0.59
Method 3	0.20	0.39	0.06	0.08	0.66	0.57

- 알케논 정량 결과에서 각 방법에 따라 농도 값이 지표(index) 값에 비해 변동이 큰 원인에 대한 문헌 조사를 실시함. 문헌 조사 결과, 기존에 Internal standard로 사용한 10-nonadecanone은 column chromatography로 fraction을 나눌 때 알케논이 검출되는 Fraction 2가 아닌 그 전의 Fraction 1으로 추출될 수 있음을 확인함. 이에 대한 대안으로, Fraction 2 분석 전에 Internal standard로 squalane을 추가로 주입 한 후 재실험 및 분석을 진행함
- 알케논을 분석하기 전에 squalane을 추가로 주입 한 후 획득한 알케논 농도 ($C_{37:3}Me$, $C_{37:2}Me$, $C_{38a:3}Me$, $C_{38:2}Me$)와 지표(index) 값($U^{K'}_{37Me}$, $U^{K'}_{38Me}$)을 나타냄 (Fig. 159)
- 두 가지 Internal standard에 따라 각각 알케논 농도를 계산하여 기존 결과와 비교함. 10-nonadecanone을 사용하여 농도를 계산한 결과 각 방법에 따라 농도 값의 변동이 큰 것을 확인함. 그에 반해 squalane을 사용하여 농도를 계산한 결과 각 방법에 따라 농도 값의 변동이 상대적으로 적은 것을 확인함

KOPRI 극지연구소

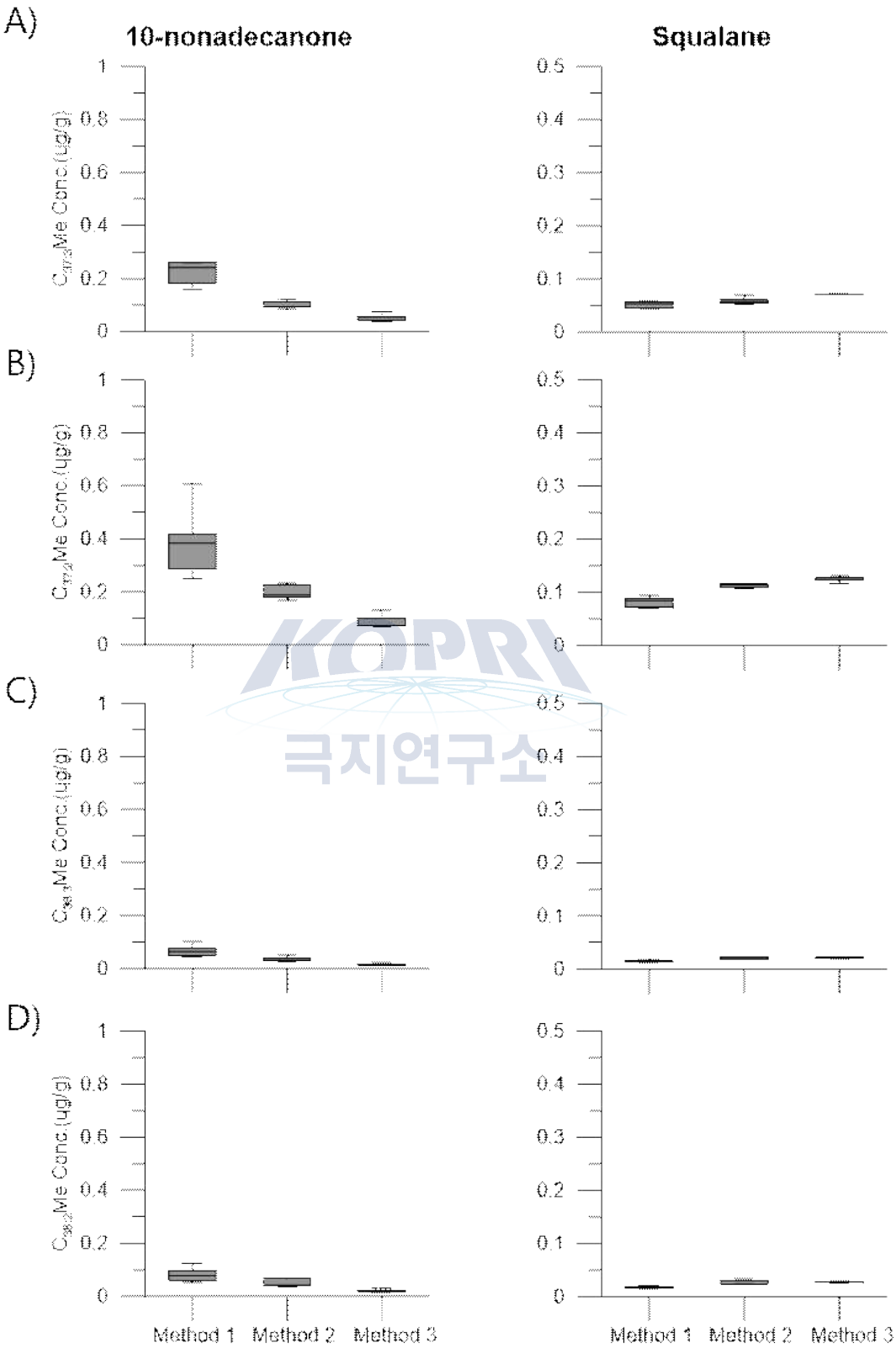


Fig. 159. Results of (A) $C_{37:3}$Me, (B) $C_{37:2}$Me, (C) $C_{38:3}$Me, and (D)$C_{38:2}$Me alkenone concentrations, calculated using 10-nonadecanone and squalane internal standard, obtained using different extraction methods.

KOPRI 극지연구소

(나) 알케논 분석 방법 비교

- 배양 시료와 동해 코어 퇴적물 시료를 각기 다른 분석 기법을 사용하여 획득한 크로마토그램을 비교함. GC-MS와 GC-FID는 2차원 크로마토그램을 획득할 수 있으며 GCXGC-TOFMS는 2차원과 3차원 크로마토그램을 획득할 수 있음(Fig. 160)
- 모든 분석 기법에서 $C_{37}Me$, $C_{38}Et$, $C_{38}Me$, $C_{39}Et$과 $C_{39}Me$이 확인됨. GC-FID에서는 $C_{39:2}Me$이 detection limt (검출한계) 이하로 검출되어 신뢰할 수 있는 정량값을 얻지 못함. 그러나 GCXGC-TOFMS는 GC-FID보다 분리 해상도가 향상되었으며, 3차원으로 명확하게 관찰할 수 있음
- 향후 2차원 가스크로마토그래피를 활용하여 스발바르 피오르드 퇴적물의 알케논을 분석할 경우 GC-FID 보다 향상된 알케논 분리 해상도를 얻을 수 있을 것으로 기대되며 이를 바탕으로 스발바르 피오르드 퇴적물을 활용한 고수온 복원이 가능할 것으로 사료됨

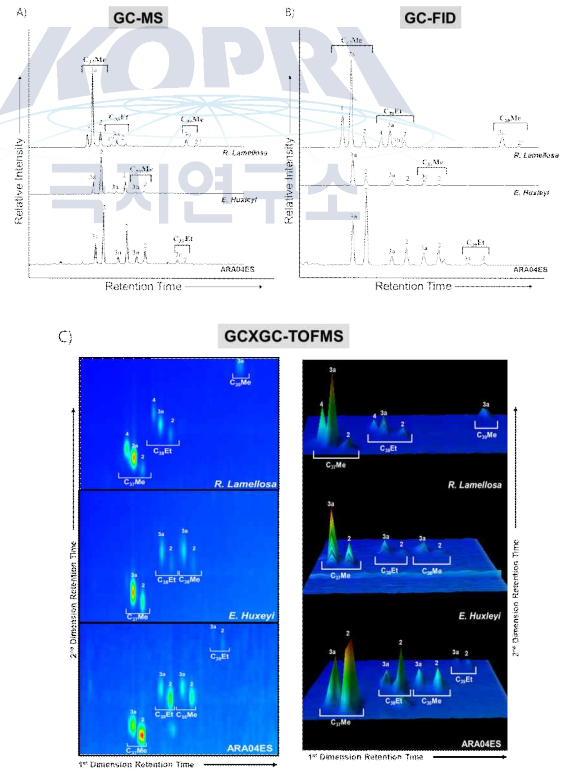


Fig. 160. Comparison of (A) GC-MS, (B) GC-FID, and (C) GCXGC-TOFMS chromatograms for alkenones obtained using different analysis methods for surface sediment samples from the East Sea and haptophyte culture samples.

(다) 스발바르 피오르드 표층 퇴적물의 유기분자생체지표

- 스발바르 3개 피오르드 (이스피오르드, 콩스피오르드, 및 힌로펜 해협)와 그린란드 해 표층 퇴적물(MOCOSED14, MOCOSED17)을 활용하여 분석한 알케논 크로마토그램 결과를 나타냄(Fig. 161)
- 모든 시료에서 $C_{37}Me$, $C_{38}Et$ 및 $C_{38}Me$이 검출되었으나 그린란드 해 표층 퇴적물에 비해 스발바르 피오르드 표층 퇴적물에서의 크로마토그램이 상대적으로 baseline이 고르지 못하고 알케논 분리 해상도가 떨어짐. 특히 그린란드 해 표층 퇴적물 중 MOCOSED17 시료에서는 $C_{38}Et$이 detection limt 이하로 검출되어 정확한 정량 값을 얻지 못함. 이를 통해 기존 GC-FID를 활용한 분석 방법으로는 정확한 알케논 정량 값을 획득하기 어려운 것으로 생각됨
- 따라서, 향후 고분해능 2차원 가스크로마토그래피를 이용하여 분석할 경우 기존 GC-FID를 사용했을 때 보다 알케논 피크 분리 해상도가 향상되어 스발바르 피오르드에서 더 정확한 고수온 복원이 가능할 것으로 기대됨
- 스발바르 3개 피오르드(이스피오르드, 콩스피오르드, 및 힌로펜 해협)와 그린란드 해 표층 퇴적물(MOCOSED14, MOCOSED17)에서의 알케논 농도($C_{37:3}Me$, $C_{37:2}Me$, $C_{38:3}Et$, $C_{38:2}Et$, $C_{38:3}Me$, $C_{37:2}Me$) 분석 결과를 나타냄(Fig. 162)
- 그린란드해 정점 중 MOCOSED17에서는 대부분의 알케논이 검출되지 않았으며, MOCOSED14에서는 대부분 알케논 농도가 낮게 나타남. 스발바르 피오르드에서는 피오르드 안쪽으로 갈수록 농도가 낮아지고 바깥쪽으로 갈수록 상대적으로 높아지는 것이 확인됨

KOPRI 극지연구소

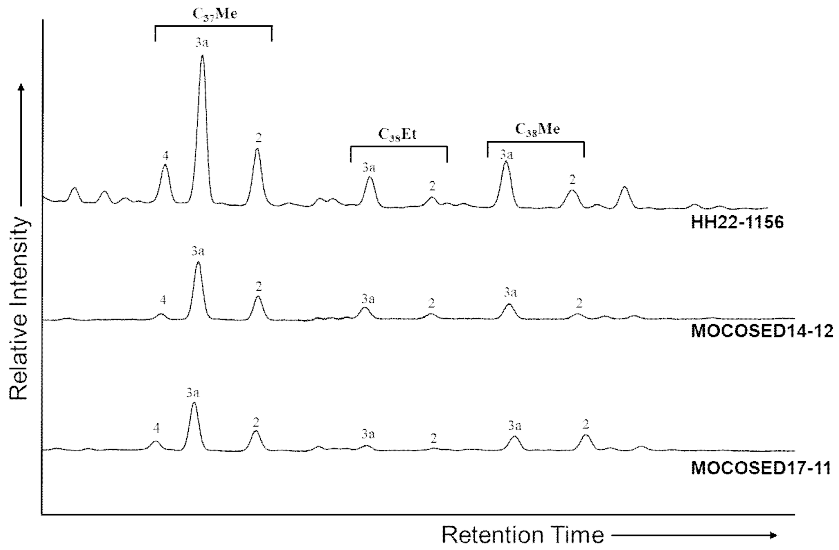


Fig. 161. GC-FID chromatograms of alkenones for surface sediment samples obtained from Svalbard Isfjorden (HH22-1156) and the Greenland Sea (MOCSED14-12 and MOCOSED17-11).

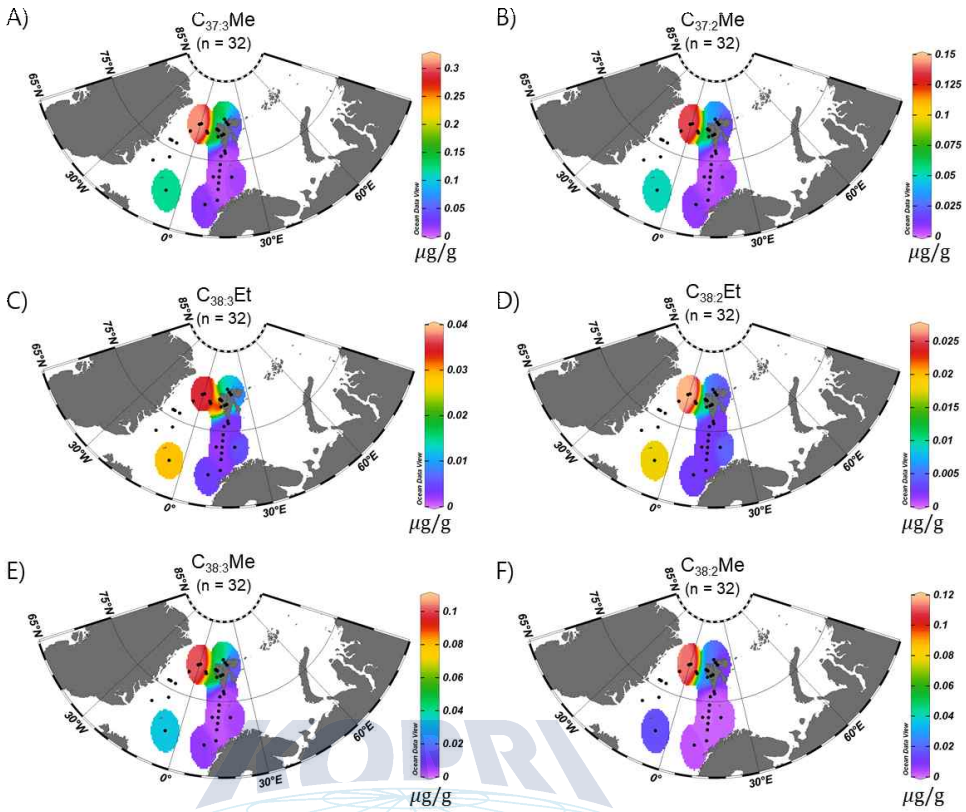


Fig. 162. Distribution of (A) $C_{37:3}$Me, (B) $C_{37:2}$Me, (C) $C_{38:3}$Et, (D) $C_{38:2}$Et, (E) $C_{38:3}$Me, and (F) $C_{38:2}$Me alkenone concentrations for surface sediment samples obtained from Svalbard fjords (Isfjorden, Kongsfjorden, and Hinlopen Strait) and the Greenland Sea (MOCSED14 and MOCOSED17).

- 스발바르 3개 피오르드(이스피오르드, 콩스피오르드 및 힌로펜 해협)와 그린란드해(MOCSED14, MOCOSED17) 표층 퇴적물의 알케논($C_{37:3}$Me, $C_{37:2}$Me, $C_{38:3}$Me, $C_{38:2}$Me)의 peak area를 바탕으로 $U^{K'}_{37Me}$과 $U^{K'}_{38Me}$ 인덱스를 계산함. Muller et al. (1998)과 Joseph novak et al. (2022)을 참고하여 $U^{K'}_{37Me}$과 $U^{K'}_{38Me}$ 지표(index)를 통해 SSTs (Sea Surface Temperatures)를 계산함(Fig. 163)
- $U^{K'}_{37Me}$ 지표(index)로 계산된 SSTs는 스발바르 아래 해역에서 가장 높은 온도 분포를 보이고, 힌로펜 해협에서 가장 낮은 온도 분포를 보임. $U^{K'}_{38Me}$ 지표(index)로 계산된 SSTs는 스발바르 서쪽 해역에서 가장 높은 온도 분포를 보이고, 스발바르 아래 해역에서 가장 낮은 온도 분포를 보임
- 스발바르 피오르드(이스피오르드, 콩스피오르드, 및 힌로펜 해협)와 그린란드 해(MOCSED14, MOCOSED17) 표층 퇴적물 내 HBIs (IP_{25}, HBI VI, 5/6 diene, HBI II, HBI III(Z), HBI III(E), 5/6 Triene, HBI V)의 농도 결과를 나타냄(Fig. 164)

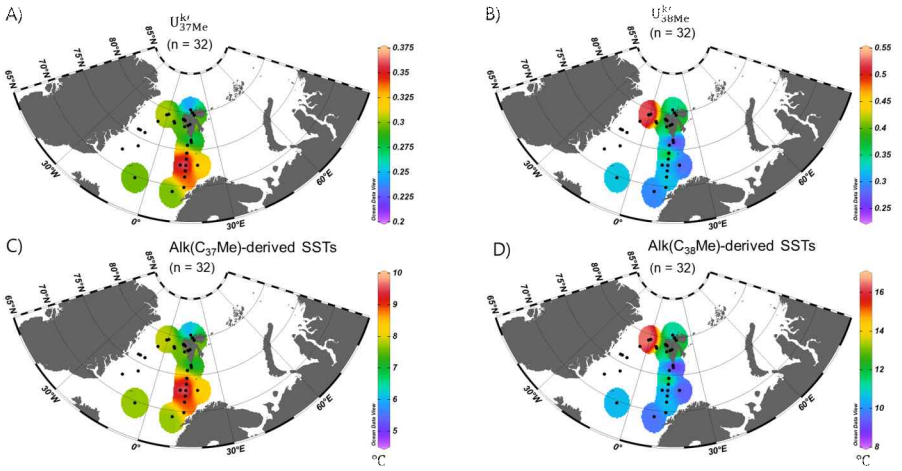


Fig. 163. Distribution of (A) $U^{K'}_{37Me}$ index, (B) $U^{K'}_{38Me}$ index, (C) Alk(C_{37}Me)−derived SSTs, and (D) Alk(C_{38}Me)−derived SSTs for surface sediment samples obtained from Svalbard fjords (Isfjorden, Kongsfjorden, and Hinlopen Strait) and the Greenland Sea (MOCSED14 and MOCOSED17).

KOPRI 극지연구소

- IP_{25}가 가장 높게 검출되고, 그 다음으로는 HBI II가 높게 검출됨. 전반적으로 해양에서 피오르드 안쪽으로 갈수록 상대적으로 농도가 증가하는 분포를 보임
- 스발바르 3개 피오르드 (이스피오르드, 콩스피오르드, 및 힌로펜 해협)와 그린란드해(MOCSED14, MOCOSED17) 표층 퇴적물에서 획득한 sterols (cholesterol, **brassicasterol**, **24- methylenecholesterol**, **campesterol**, **β- sitosterol**, dinosterol) 의 농도 분석 결과를 나타냄(Fig. 165)
- 모든 정점에서 cholesterol, brassicasterol, 24−methylenecholesterol, **campesterol**, **β- sitosterol** 그리고 **dinosterol**이 모두 검출됨. 해양 및 육상 기원 유기물의 영향을 나타내는 sterol 농도 모두 그린란드해 보다 스발바르 피오르드에서 상대적으로 높은 농도로 나타났으며, 피오르드 바깥쪽에서 안쪽으로 갈수록 상대적으로 농도가 높아짐

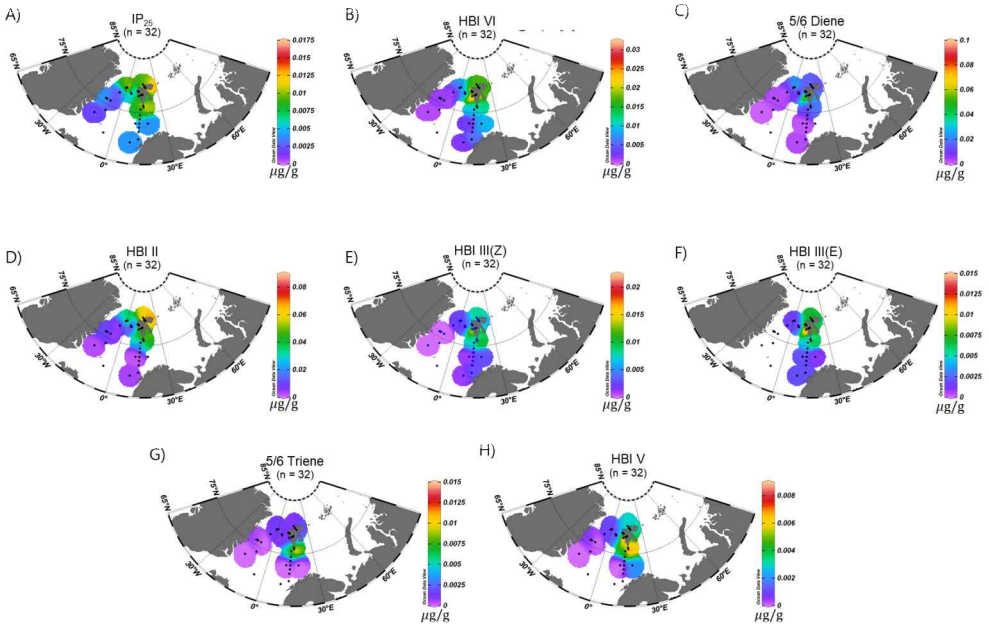


Fig. 164. Distribution of (A) IP_{25}, (B) HBI VI, (C) 5/6 diene, (D) HBI II, (E) HBI III(Z), (F) HBI III(E), (G) 5/6 Triene, and (H) HBI V concentrations for surface sediment samples obtained from Svalbard fjords (Isfjorden, Kongsfjorden, and Hinlopen Strait) and the Greenland Sea (MOCSED14 and MOCOSED17).

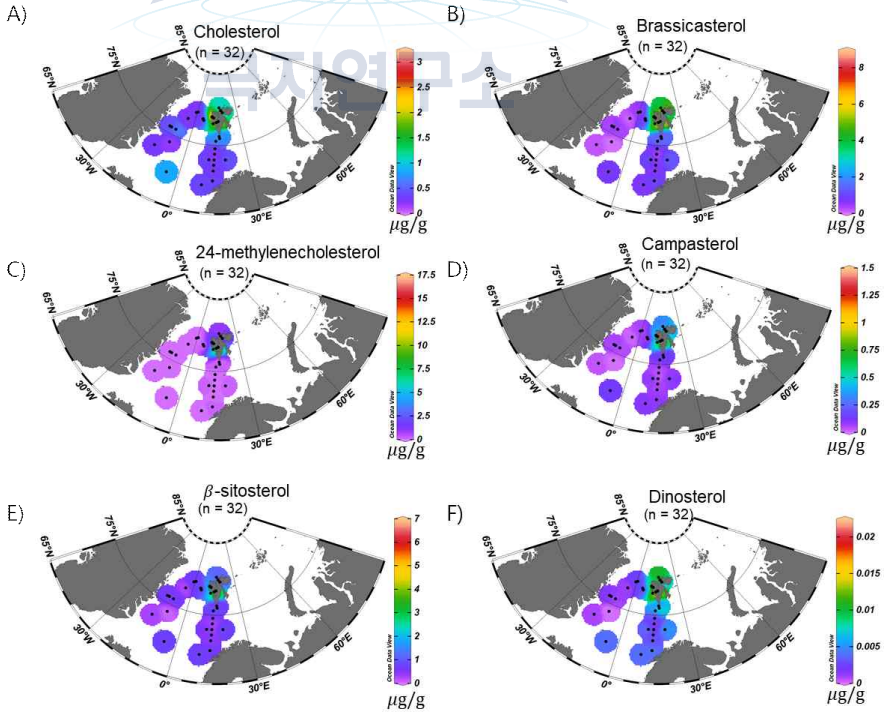


Fig. 165. Distribution of (A) cholesterol, (B) brassicasterol, (C) 24- methylenecholesterol, (D) campesterol, (E) β- sitosterol, and (F) dinosterol concentrations for surface sediment samples obtained from Svalbard fjords (Isfjorden, Kongsfjorden, and Hinlopen Strait) and the Greenland Sea (MOCSED14 and MOCOSED17).

다) 과거 표층수온 복원 가능성 검토를 위한 스발바르 퇴적물 내 aDNA 추출

(1) 연구 목적

- 개별 생물체에서 직접 채취하지 않고 토양, 해수 등 다양한 환경시료로부터 수집한 DNA를 환경 DNA 또는 environmental DNA (eDNA)라고 함. 다양한 유기체들이 환경과 상호작용함에 따라 DNA가 배출되고 이러한 DNA가 환경에 축적되게 됨
- 이 중에서도 환경과 생물 등 다양한 고대 시료에서 분리된 DNA를 ancient DNA (aDNA)라고 일컬으며, aDNA의 분석은 유기체의 과거 역사에 접근할 수 있다는 이점이 있음
- 이를 근거로, 본 연구에서는 스발바르 피오르드 표층퇴적물 내 aDNA를 분석하여 유기체 군집 구조 파악 및 해수면온도 관련 지표종을 선별하고, 이를 통해 과거 스발바르 피오르드 표층수온 복원 가능성을 타진하고자 함

(2) 연구 방법

- aDNA는 오랜 시간에 걸쳐 이미 손상된 상태로 미량만 존재하기 때문에 modern DNA에 의한 오염 및 핵산분해효소에 의한 DNA 분해에 취약하기 때문에, 현장에서 시료 채취 시 사람을 포함한 다른 생물 또는 시료 간의 오염을 방지하고 DNA 분해를 최소화하고자, 다음의 프로토콜을 따라 시료를 획득함: 1) 클로락스를 이용한 코어 라이너 및 시료 채취 환경 소독, 2) 방진복, 마스크, 장갑 필수 착용, 3) 시료 채취 시 멸균 스푼 및 멸균 샘플백 이용, 4) 채취 시료는 즉시 냉동 보관, 5) 아이스박스 및 아이스팩을 활용한 시료 이동 간 온도 유지
- 상기 프로토콜을 활용, 스발바르 3개 피오르드 지역(이스피오르드, 콩스피오르드, Hinlopen Strait)에서 각 3개 사이트 씩, 총 9개의 퇴적물 멀티코어 퇴적물 확보하였으며, 0.5~1cm 간격으로 부시료 채취를 진행함(Table 32, Fig. 166)

Table 32. Sampling site information on HH22 multicores analyzed for aDNA.

No.	Core ID	Latitude(N)	Longitude(E)	Sampling Site	Core length(cm)	Sampling Date
1	HH22-1152-MUC01	78° 24.27'	015° 51.04'	Isfjorden (inner)	9	2022.07.23
2	HH22-1154-MUC01	78° 15.71'	014° 32.48'	Isfjorden (midle)	28	2022.07.23
3	HH22-1156-MUC01	78° 05.00'	012° 26.21'	Isfjorden (outer)	14	2022.07.23
4	HH22-1159-MUC01	79° 02.91'	011° 08.14'	Kongsfjorden (outer)	40	2022.07.24
5	HH22-1161-MUC01	78° 57.26'	011° 57.40'	Kongsfjorden (middle)	45	2022.07.24
6	HH22-1163-MUC01*	78° 53.78'	012° 26.25'	Kongsfjorden (inner)	51	2022.07.24
7	HH22-1176-MUC01	79° 39.08'	018° 48.92'	Hinlopen Strait	48	2022.07.27
8	HH22-1179-MUC01	79° 58.58'	017° 33.45'	Hinlopen Strait	41	2022.07.27
9	HH22-1185-MUC01	80° 21.12'	016° 09.36'	Hinlopen Strait	51	2022.07.28

*HH22-1163-MUC01 core replaced the spilled core for aDNA work on this site

Fig. 166. Photos of sediment core sampling process for aDNA onboard.

(3) 연구 결과 및 토의

- 확보된 총 9개의 코어 시료 내 표층 시료(0-0.5cm)에 대하여, 우선적으로 DNA 추출 키트인 DNeasy PowerSoil Kit (QIAGEN)를 활용하여 DNA를 추출하였으며, 표층퇴적물 시료 준비, 세포 용해(lysis), 컬럼 부착(binding), 세척(washing), DNA 용출(elution)의 과정을 따름(Fig. 167)
- 추출된 DNA의 농도는 NanoPhotometer (IMPLEN) 장비를 통해 측정하였으며, HH22-1163-MUC01 코어 시료의 경우 DNA가 낮은 농도로 추출되어 추가 추출 및 분석을 진행함
- 시료에 따라 DNA의 농도는 최소 0.45ng/㎕에서 최대 21ng/㎕의 범위에서 나타나며, 이는 최소 45ng에서 최대 2100ng의 aDNA를 확보하였음을 의미함 (Table 33)

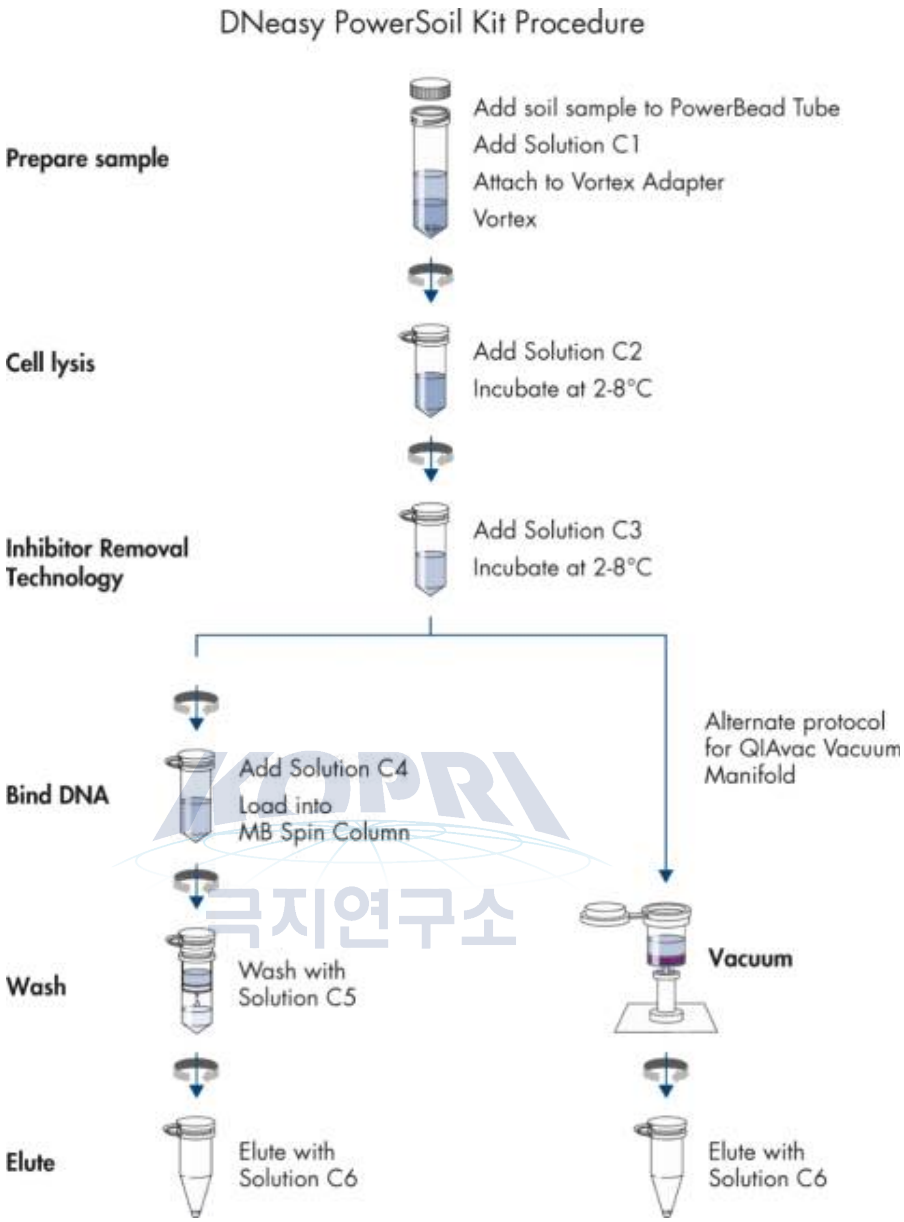
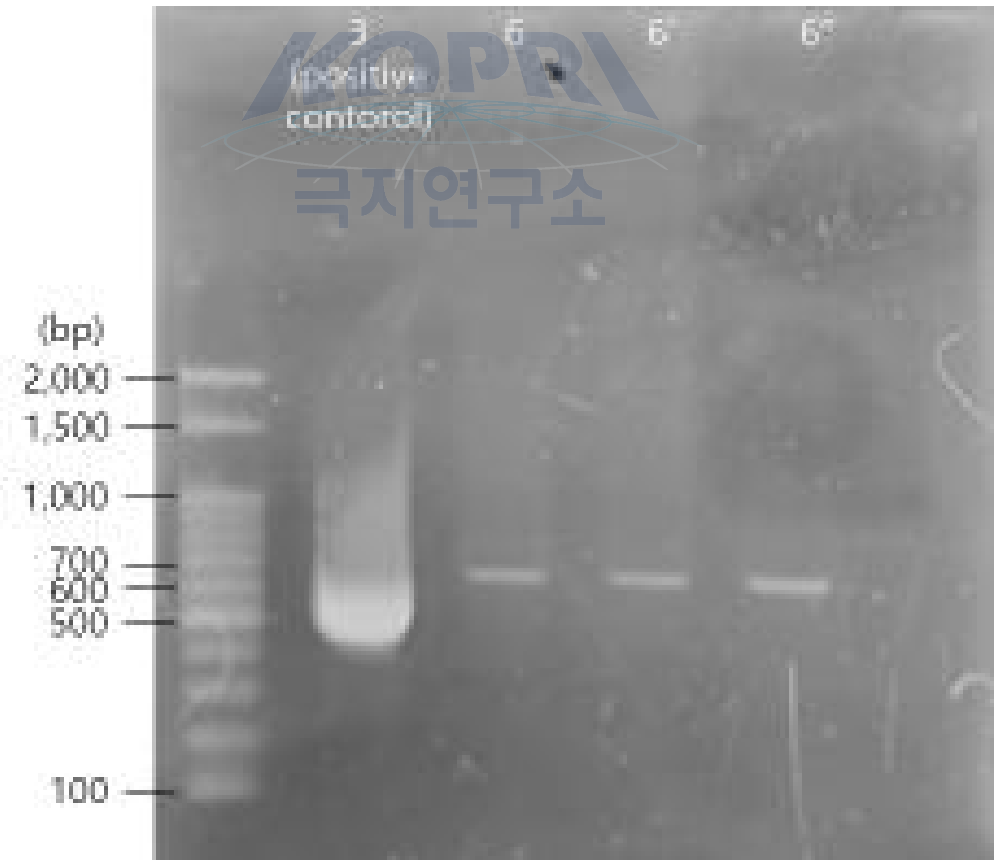


Fig. 167. aDNA extraction procedure from environmental sediment samples.

- 농도가 낮은 HH22-1163-MUC01 시료의 PCR 증폭 가능 여부를 18S primer test PCR을 통해 확인하였고, 시료 내 PCR 증폭 band가 확인되어 메타바코딩 amplicon 시퀀싱(sequencing) 분석이 가능할 것으로 보임(Fig. 168)
- 향후, HH22-1163-MUC01 시료 중 농도가 가장 높은 '6' 시료를 포함한 총 9개의 표층퇴적물 aDNA 시료에 대하여 18S 및 16S amplicon 시퀀싱이 진행될 예정이며, 이들의 생물정보학적 분석 과정을 거쳐 과거 표층수온 복원을 위한 지표종 분석을 진행할 예정임

Table 33. Results of aDNA concentration extracted from surface sediments.

No.	Core ID	Depth(cm)	Method	A260/A280	A260/A230	Conc.(ng/㎕)	Total amount(ng)
1	HH22-1152-MUC01	0-0.5	dsDNA	1.828	1.194	5.85	585
2	HH22-1154-MUC01	0-0.5	dsDNA	1.791	1.680	16.30	1630
3	HH22-1156-MUC01	0-0.5	dsDNA	1.842	1.533	21.00	2100
4	HH22-1159-MUC01	0-0.5	dsDNA	1.646	1.512	9.30	930
5	HH22-1161-MUC01	0-0.5	dsDNA	1.702	1.420	11.15	1115
6	HH22-1163-MUC01	0-0.5	dsDNA	5.000	-5.000	---	---
6'	HH22-1163-MUC01	0-0.5	dsDNA	0.429	0.250	0.45	45
6''	HH22-1163-MUC01	0-0.5	dsDNA	0.667	0.261	0.60	60
7	HH22-1176-MUC01	0-0.5	dsDNA	1.826	0.900	6.30	630
8	HH22-1179-MUC01	0-0.5	dsDNA	1.712	1.554	10.10	1010
9	HH22-1185-MUC01	0-0.5	dsDNA	1.813	1.601	13.05	1305



KOPRI 극지연구소

Fig. 168. Test PCR results of HH22-1163-MUC01 core using a 18S primer set.

3-3) 3차년도

가) 콩스피오르드 퇴적물 내 유기분자생체지표 분석 연구

(1) 연구 목적

- 스발바르는 다양한 방향 및 형태로 피오르드가 형성되어 있으며, 북대서양과 북극해 관문에 위치하고 있음
- 스발바르의 피오르드 중에서 콩스피오르드는 서 스피츠베르겐 해류로 북대서양의 따뜻한 해수가 전달되어 기후 변화에 민감하게 반응하며, 이 지역의 환경변화가 주요 관심사임. 기후 변화의 패턴을 이해하고 해빙의 감소 원인을 규명하기 위해서는 과거 환경 복원 기록이 필요함
- 본 연구에서는 노르웨이 지질연구소(NGU)가 2019년 콩스피오르드에서 획득한 약 15m 길이의 CAGE19-3-KH17-GPC01 (KH17-GPC01) 코어를 대상으로 다양한 유기분자생체지표(알케논, HBIs, sterols, 및 리그닌 페놀)를 분석하고 과거 환경 기록을 복원하고자 하였음(Table 34, Fig. 169)

Table 34. Site information on sediment core CAGE19-3-KH17-GPC01.

Sampling name	Sampling Area	Latitude	Longitude	Sampling year
CAGE19-3-KH17-GPC01	Kongsfjorden	79.0265N	10.7580E	2019

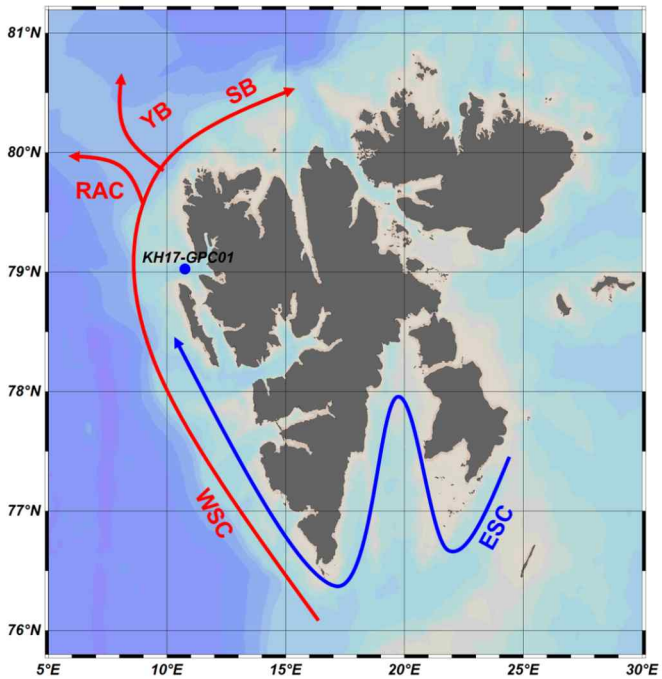


Fig. 169. Map showing the sediment core site of CAGE19-3-KH17-GPC01.

(2) 연구 방법

- 2019년 NGU에서 R/V Kronprins Haakon을 이용하여 획득한 KH17-GPC01 코어를 활용함. KH17-GPC01 코어는 수심 324.80m에서 칼립소 자이언트 피스톤 코어러로 시추 되었으며 총 길이는 1509.5cm임
- 코어 절개 및 부시료 채취 후, 동결건조와 분쇄/균일화 작업이 완료된 퇴적물 시료에 알케논, HBIs 및 sterols의 Internal standard(10- nonadecanone, 9- OHD, 5α - androstane- 3β- ol)를 주입한 후 DCM과 MeOH의 혼합 용액을 이용하여 sonication 으로 유기물을 추출하였음
- 추가 cleaning 과정(saponification)을 거친 후 각 단계마다 극성을 달리하여 Hexane, DCM, 및 MeOH 등 알맞은 용매를 혼합하여 column chromatography를 수행하였음. 알케논은 분석 전에 Internal Standard (Squalane)을 추가 주입함. 최종적으로 추출된 유기분자생체지표 시료는 각 특성에 따라 GC-FID 및 GC-MS를 활용하여 분석함
- 모든 분석은 동일한 조건에서 수행되었으며, 알케논은 GC-FID에 105m 길이의 Rtx-200 컬럼을 장착하여 분석한 후 정량 분석을 수행함. 추가로 Leco Korea에서 보유하고 있는 GCXGC-TOFMS에 비극성의 Rtx-i7ms (길이: 0.1m)와 중간 극성의 VF-200ms (길이: 60m) 컬럼을 사용하여 분석함

KOPRI 극지연구소

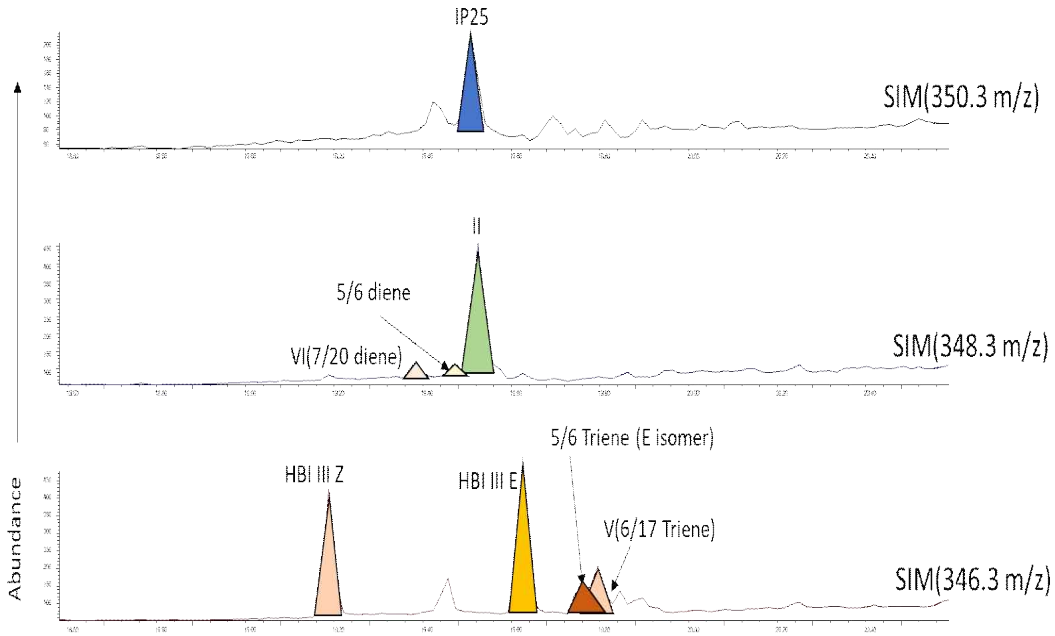


Fig. 170. GC-MS chromatograms of HBIs obtained from core sediment samples of KH17-GPC01.

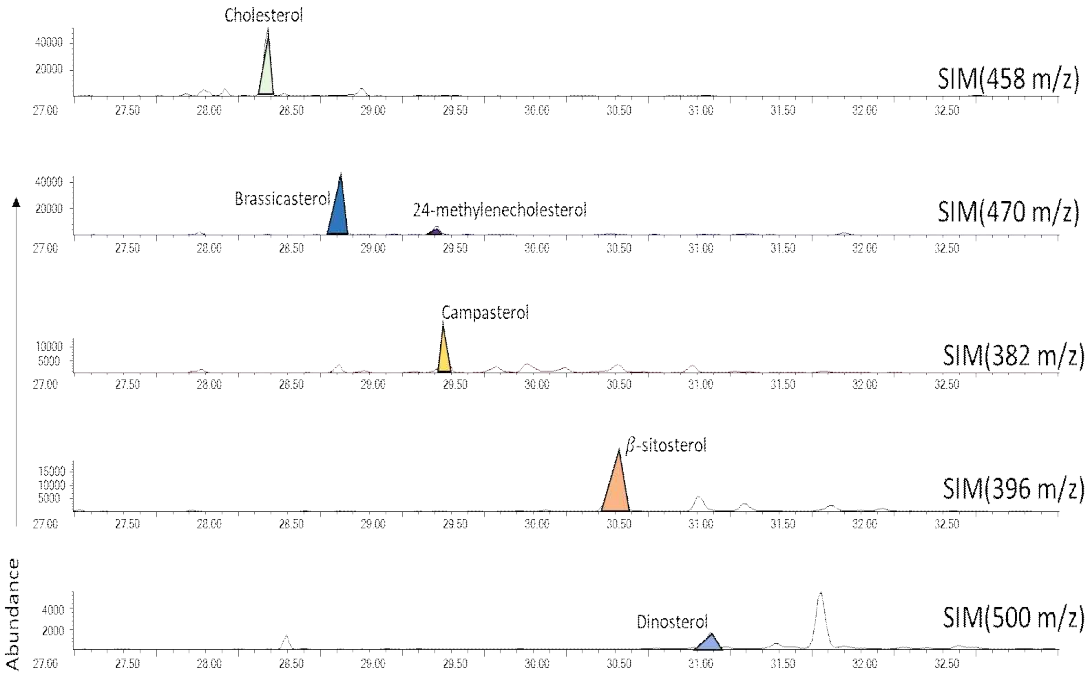


Fig. 171. GC-MS chromatograms of sterols obtained from core sediment samples of KH17-GPC01.

- HBIs 분석은 m/z 50 - m/z 500의 TIC mode로 전체 크로마토그램을 확인한 후, m/z 350.3, m/z 348.3, m/z 346.3의 SIM 모드로 총 8개의 compounds (IP_{25}, HBI VI, 5/6 diene, HBI II, HBI III(z), HBI III(E), 5/6 Triene, HBI V)를 분석하여 identification 및 정량 분석을 수행함(Fig. 170)
- sterols 분석은 m/z 50 - m/z 500의 TIC mode로 전체 크로마토그램을 확인한 후, m/z 458, m/z 470, m/z 382, m/z 396의 SIM 모드로 총 6개의 compounds **(cholesterol, brassicasterol, 24- methylenecholesterol, campasterol, β- sitosterol,** dinosterol)를 분석하여 identification 및 정량 분석을 수행함(Fig. 171)

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 알케논

- 스발바르 콩스피오르드에서 획득한 KH17-GPC01 코어 퇴적물을 대상으로 GC-FID와 GCXGC-TOFMS를 활용하여 분석한 알케논 크로마토그램 결과를 비교함
- GC-FID로 분석한 결과, 345 cm에서 $C_{37}Me$, $C_{38}Et$, $C_{38}Me$ 및 $C_{39}Et$이 모두 검출되었으며, 1067 cm 에서는 C_{37}과 C_{38} alkenones의 대부분이 detection limit 이하로 정확한 정량 값을 얻을 수 없었음(Fig. 172A)
- 반면에, GCXGC-TOFMS로 분석한 결과 345 cm와 1067 cm 모두 $C_{37}Me$, $C_{38}Et$,

$C_{38}Me$ 및 $C_{39}Et$의 피크가 각각 GC-FID로 분석했을 때 보다 더 명확하게 분리된 것을 확인함(Fig. 172B)

- KH17-GPC01 코어는 기존 GC-FID를 이용한 알케논 분석법을 통해서는 상대적으로 정확한 정량 값을 얻기 어려웠으며, 이에 반해 GCXGC-TOFMS를 이용한 분석법이 피크 분리능을 향상시키며, 스발바르 피오르드 퇴적물에 적용 가능하다는 결과를 얻음
- 향후 2차원 가스크로마토그래피를 이용하여 추가적인 KH17-GPC01 코어 퇴적물의 고해상도 알케논 분석을 통해 스발바르 피오르드에서 고수온 복원 가능성을 확인 할 예정임

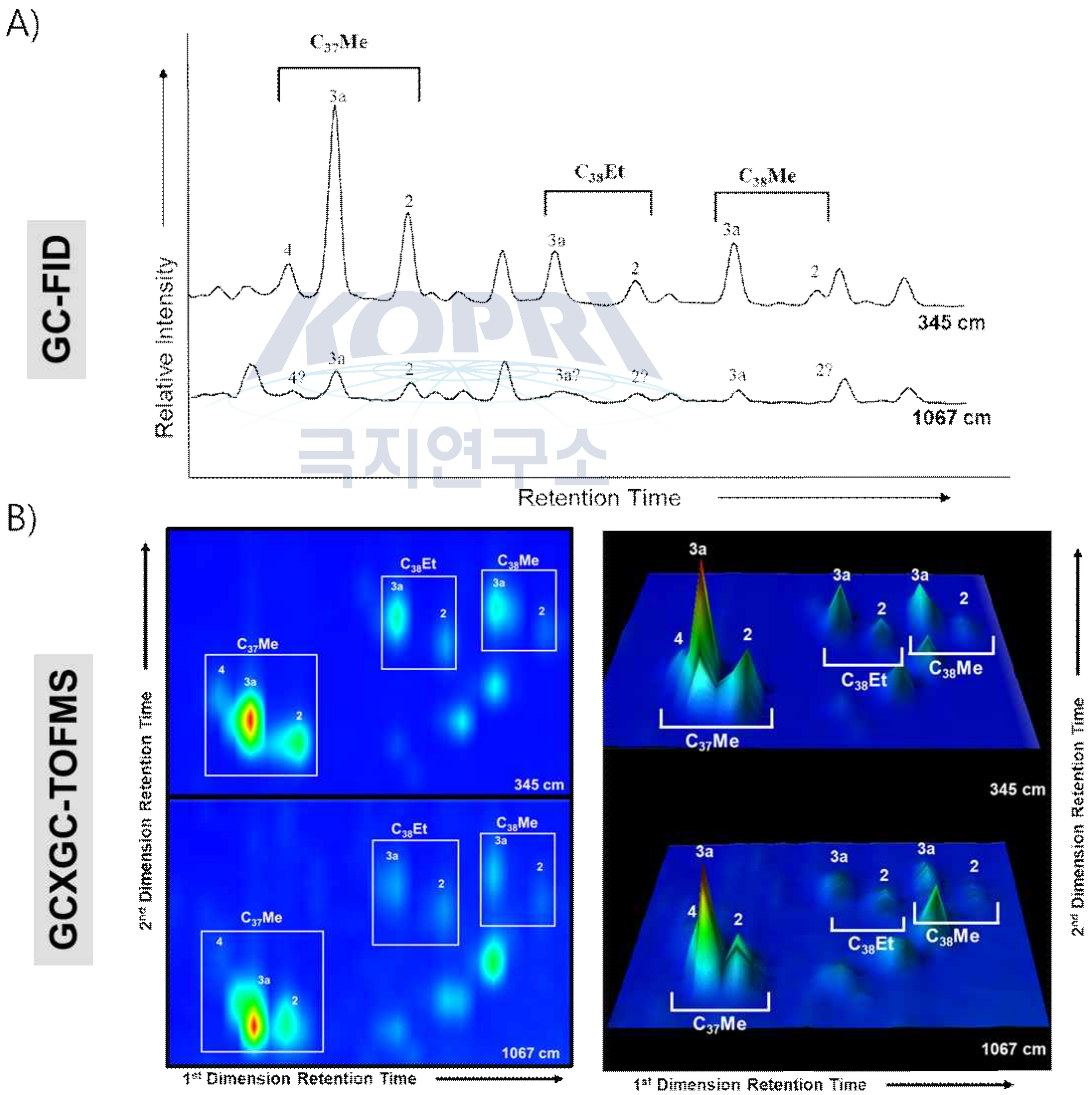


Fig. 172. Comparison of (A) GC-FID and (B) GCXGC-TOFMS chromatograms for alkenones obtained from core sediment samples of KH17-GPC01.

(나) HBIs

- 스발바르 콩스피오르드에서 획득한 KH17-GPC01 코어 퇴적물의 HBIs 분석 결과, IP25, HBI VI, 5/6 diene, HBI II, HBI III(Z), HBI III(E), 5/6 Triene, HBI V가 모두 검출됨
- 스발바르 콩스피오르드 KH17-GPC01 코어 퇴적물 시료의 IP_{25} 농도는 0.0021~0.0925 μg/g 이며, HBI VI 는 0.0042~0.0808 μg/g, 5/6 diene은 0.0008~0.1322 μg/g, HBI III는 0.0125~0.3316 μg/g, HBI III(Z)는 0.0005~0.4149 μg/g, HBI III(E)는 0.0005~0.8146 μg/g, 5/6 Triene은 0.0003~0.0086 μg/g이고 HBI V는 0.0006~0.0136 μg/g 임(Fig. 173)

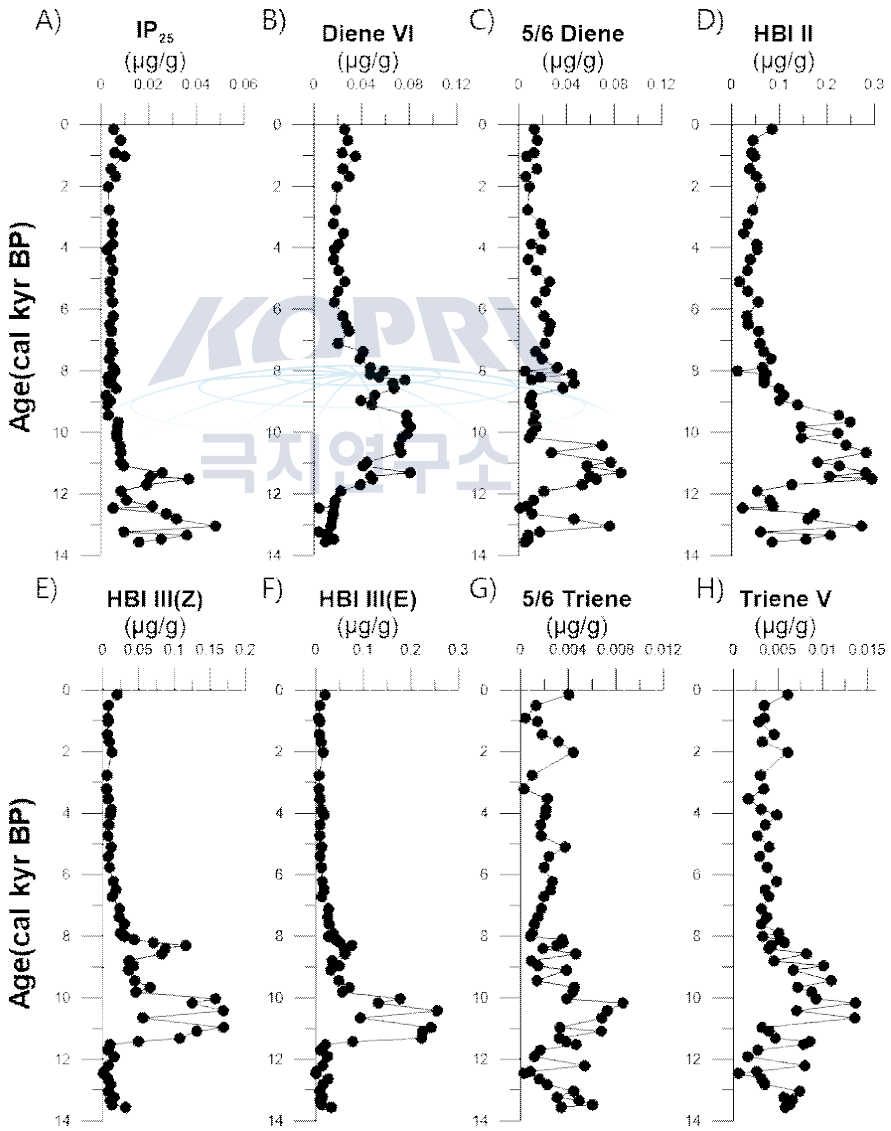


Fig. 173. Variations in (A) IP_{25}, (B) HBI VI, (C) 5/6 dienen, (D) HBI II, (E) HBI III(Z), (F) HBI III(E), (G) 5/6 Triene, and (H) HBI V concentrations in sediment core KH17-GPC01.

- 스발바르 콩스피오르드 KH17-GPC01 코어 퇴적물 시료에서 HBIs의 시간적 변동을 살펴본 결과, 10~14 cal kyr BP 동안 값이 증가 후 감소하는 패턴이 나타나며 0 - 8 cal kyr BP 동안은 농도 값이 상대적으로 낮은 농도 값을 보임

(다) Sterols

- 스발바르 콩스피오르드에서 획득한 KH17-GPC01 코어 퇴적물의 sterols 분석 결과, **cholesterol, brassicasterol, 24- methylenecholesterol, campesterol, β- sitosterol,** dinosterol이 모두 검출됨
- 스발바르 콩스피오르드 KH17-GPC01 코어 퇴적물 시료의 cholesterol 농도는 **0.0414~1.7915μg/g** 이며, **brassicasterol**은 **0.0555~5.7376μg/g, 24- methylenecholesterol**은 **0.0261~0.7188μg/g, campesterol**은 **0.0274~0.5586μg/g, β- sitosterol**은 **0.0549~1.3009μg/g**이고 **dinosterol**은 **0.014~0.0268μg/g**임 (Fig. 175)
- 스발바르 콩스피오르드 KH17-GPC01 코어 퇴적물 시료에서 sterols의 시간적 변동을 살펴본 결과, **cholesterol**과 **β- sitosterol**은 비슷한 변동성을 보여주고 있으며, 상대적으로 다른 compound에 비해 절대적인 농도 값은 낮게 나타남. 그리고 brassicasterol과 24-methylenecholesterol이 비슷한 변동을 보여주고 있으며 3 ~ 10 cal kyr BP 동안 증가 후 감소함. campesterol과 dinosterol이 비슷한 패턴을 보이며 3 ~ 7 cal kyr BP 동안 dinosterol이 비슷한 변동을 보이며 3 ~ 7 cal kyr BP 동안 증가 후 감소함

KOPRI 극지연구소

(라) 유기분자 생체지표(HBIs, sterols)를 활용한 해빙 지표(index) PIP_{25}

- 스발바르 콩스피오르드에서 획득한 KH17-GPC01 코어 퇴적물을 활용하여 북극 해양 환경에서 과거 해빙 분포 변화의 지표로 사용되고 있는 IP_{25}와 식물 플랑크톤 기원의 유기분자생체지표인 HBI III(Z), brassicasterol과 dinosterol을 이용하여 해빙 프록시 Phytoplankton marker-IP_{25} ($PIIIIP_{25}$, $PBIP_{25}$, $PDIP_{25}$)를 계산함. 계산식은 다음과 같음(Fig. 174)

$$P_{III}IP_{25} = \frac{[IP_{25}]}{[IP_{25}] + [(HBI\ III\ (Z)) * c]}$$

$$P_{B}IP_{25} = \frac{[IP_{25}]}{[IP_{25}] + [Brassicasterol * c]}$$

$$P_{D}IP_{25} = \frac{[IP_{25}]}{[IP_{25}] + [Dinosterol * c]}$$

Fig. 174. Equations for calculating $P_{III}IP_{25}$, $P_{B}IP_{25}$ and $P_{D}IP_{25}$.

- 스발바르 콩스피오르드 KH17-GPC01 코어 퇴적물 시료의 식물 플랑크톤 지시자인 HBI III(Z), brassicasterol 및 dinosterol을 사용하였을 때의 보정계수 c 값은 각각 0.25, 0.01, 1.18임

▪ 스발바르 콩스피오르드 KH17-GPC01 코어 퇴적물 시료의 IP_{25}, 식물플랑크톤 지시자(HBI III(Z), brassicasterol 및 dinosterol)의 농도 및 각각의 보정계수 c 값을 이용하여 서로 다른 해빙 프록시인 $PIIIIP_{25}$, $PBIP_{25}$ 그리고 $PDIP_{25}$를 계산하였을 때 각각 0.0944~0.9845, 0.1172~0.9798, 0.1214~0.9385를 나타냄(Fig. 176)

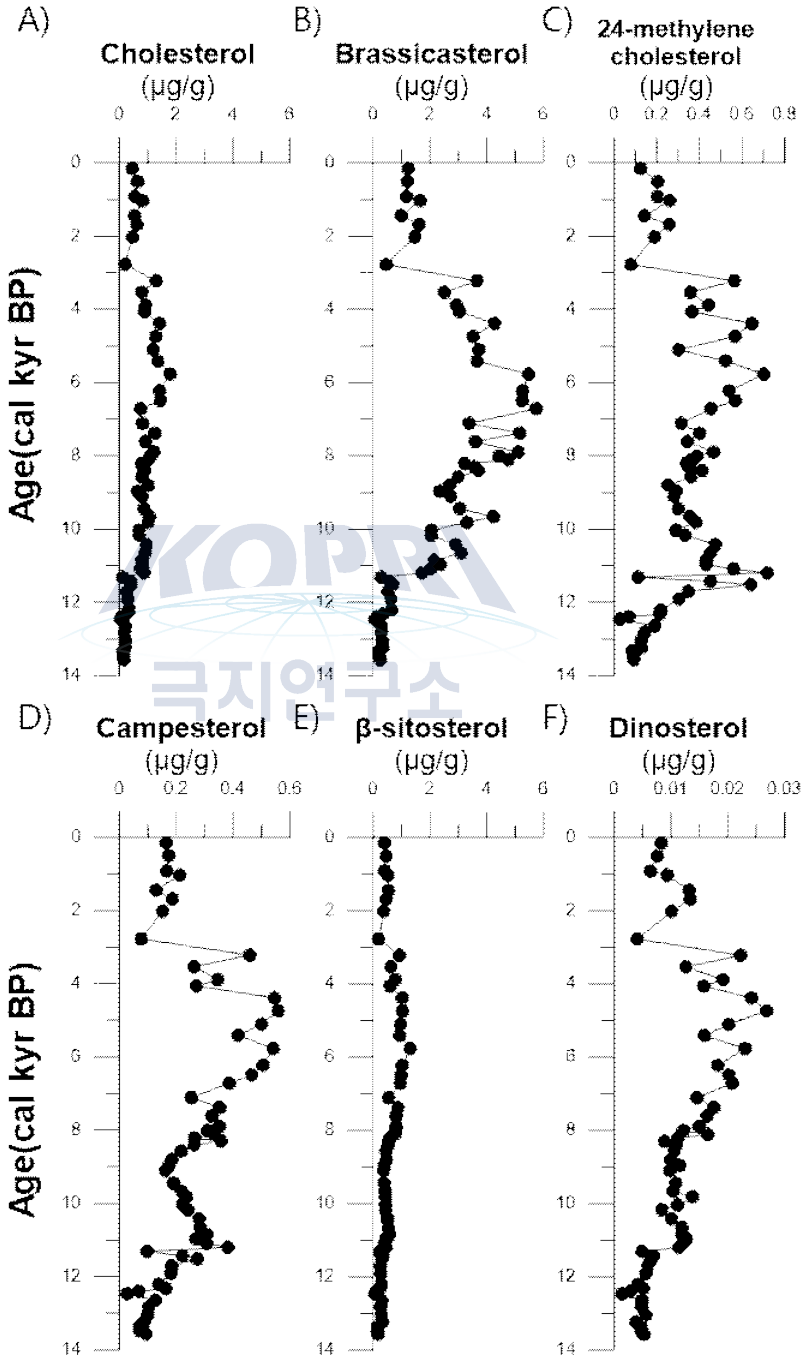


Fig. 175. Variations in (A) cholesterol, (B) brassicasterol, (C) 24- methylenecholesterol, (D) campesterol, (E) β- sitosterol, and (F) dinosterol concentrations in sediment core KH17-GPC01.

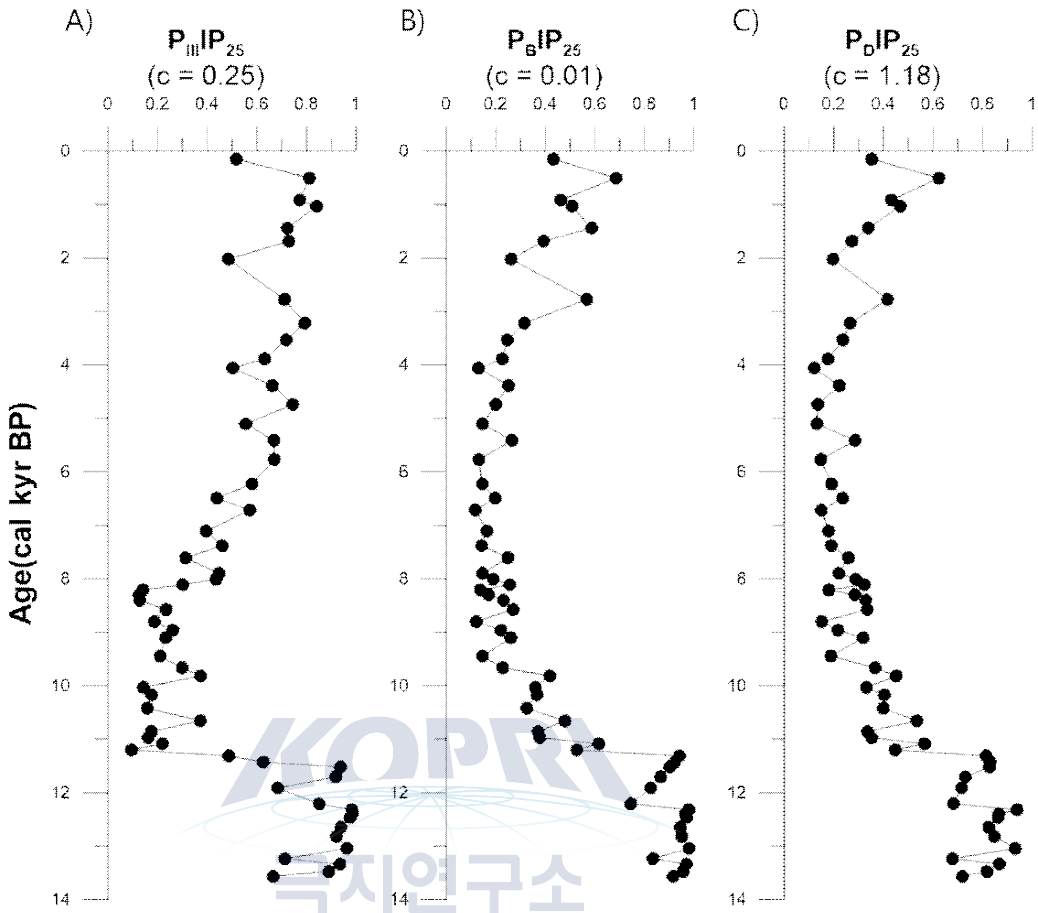


Fig. 176. Variations in (A)$P_{III}IP_{25}$, (B)P_BIP_{25}, and (C)P_DIP_{25} indices in sediment core KH17-GPC01.

- 스발바르 콩스피오르드 KH17-GPC01 코어 퇴적물 시료에서 계산된 $PIIIIP_{25}$, $PBIP_{25}$, $PDIP_{25}$의 시간적 변동을 살펴본 결과, 1.5 ~ 2 cal. kyr BP에서 감소 후 증가하고, 3 ~ 11 cal. kyr BP에서 감소함

(마) 리그닌 페놀

- 스발바르 콩스피오르드에서 획득한 KH17-GPC01 코어 퇴적물 중 5개 section에서 각각 총 47점 퇴적물 시료를 대상으로 리그닌 페놀 분석을 수행함
- 분석 방법은 '항목 다. 리그닌 페놀 분석 인프라 구축' 에서와 동일한 방법으로 수행하였으며, 요약하면, 약 500mg의 코어 퇴적물 시료와 CuO 및 ammonium iron(II) sulfate를 적정량 혼합하여 산소가 차단된 glove box 내에서 NaOH를 주입 한 후, 극지연구소 유기동위원소실험실에 보유하고 있는 마이크로웨이브오븐(Microwave Digestion System, MARS6 microwave, CEM Corporation, USA)에서 1시간 30분 동안 150℃에서 oxidation 반응을 시켜줌

- 산화반응이 완료된 시료는 염산(HCl)과 에틸아세테이트(Ethyl acetate)로 반응 시킨 후, 상층액을 추출함. 불순물 및 수분을 제거 한 뒤, 최종적으로 pyridine으로 dilution 하여 극지연구소 고환경유기지화학실험실에서 보유중인 GC-MS (5977B, Agilent Technologies)를 사용하여 분석함
- 모든 리그닌 페놀 농도는 총유기탄소함량인 TOC (wt. %)로 보정하여 사용함
- 리그닌 페놀 농도 결과는 vanillin (Vn), acetovanillone (Vl), 그리고 vanillic acid (Vd)를 총 합하여 V (Vanillin phenols)로 나타냈으며, syringaldehyde (Sl), acetosyringone (Sn), 그리고 syringic acid (Sd)를 종합하여 S (Syringyl phenols), 그리고 p-coumaric acid와 ferulic acid를 합하여 C (Cinamyl phenols)로 나타냄 (Table 35, Fig. 177)
- **S, V, 그리고 C 총 8개의 리그닌 농도 합을 λ (Lambda)로 나타냈으며, degradation** index의 변화도 살펴보기 위해 추가로 3,5-Dihydroxygenzoic acid의 농도도 함께 나타냄
- S, V, 그리고 C 각각의 비를 이용하여 얻은 S/V, C/V 값으로 KH17-GPC01 코어 퇴적물 시간변화에 따른 리그닌과 관련된 육상기원 유기물의 특성과 식생 분포 및 변화를 살펴보았으며, degradation 정도를 나타내는 Vd/Vl, 및 3,5-Bd/V 도 함께 살펴봄 (Fig. 177)
- S (Syringyl phenols) 농도는 0.002~0.071 mg/g OC (평균 0.028±0.018 mg/g OC)의 분포를 보였으며, V (Vanillin phenols)와 C (Cinamyl phenols)은 각각 0.013~0.182 mg/g OC (평균 0.067±0.035 mg/g OC), 0.007~0.121 mg/g OC (평균 0.061±0.031 mg/g OC) 로 리그닌 세 개의 compound 중에서는 vanillin phenols의 농도가 전반적으로 가장 높은 농도 분포를 보임
- 리그닌 페놀 총 합인 λ의 경우 **0.026~ 0.367 mg/g OC (평균 0.157± 0.080 mg/g** OC)로 리그닌 세 개의 compound (S, V, 및 C)와 동일하게 ~8 cal. kyr BP 까지 증가하는 경향성을 확인 할 수 있음
- 식생 종류 및 특징에 따라 S와 V의 비율로 gymnosperm, 혹은 angiosperm 기원의 영향을 평가해 볼 수 있으며, 마찬가지로 C와 V의 비율로 woody, 혹은 non-woody 인지 확인 해 볼 수 있는데, KH17-GPC01 코어 퇴적물 결과에서 보면 전반적으로 variation이 매우 크게 나타났으며, degradation 정도를 추정 해 볼 수 있는 Vd/Vl, 및 3,5-Bd/V 비 역시 본 연구에서 분석한 시료에 해당하는 연대 기간 동안 큰 변동성을 타내며 이 부분은 현재 진행 중인 KH17-GPC01 코어 퇴적물의 고해상도 분석을 통해 추후 더 정확한 시간에 따른 변동성 여부를 평가할 수 있을 것으로 사료됨

Table 35. Results of lignin phenols obtained from core sediment samples of KH17-GPC01.

No.	Core name	Core section	Sample depth (cm)	S (mg/g OC)	V (mg/g OC)	C (mg/g OC)	Λ (mg/g OC)	S/V	C/V	Vd/Vl	3,5-Bd/V
1	KH-17	3	90-91	0.06	0.14	0.08	0.28	0.46	0.58	1.01	1.51
2	KH-17	4	16-17	0.03	0.07	0.08	0.18	0.46	1.14	1.40	0.86
3	KH-17	4	49-50	0.03	0.09	0.08	0.20	0.32	0.87	2.44	0.64
4	KH-17	4	90-91	0.03	0.06	0.07	0.16	0.51	1.23	0.94	1.33
5	KH-17	5	50-51	0.04	0.08	0.08	0.20	0.46	1.03	1.49	1.32
6	KH-17	5	80-81	0.04	0.08	0.07	0.18	0.45	0.91	1.19	1.45
7	KH-17	6	15-16	0.03	0.06	0.07	0.17	0.51	1.17	1.07	1.45
8	KH-17	6	50-51	0.03	0.06	0.07	0.17	0.50	1.13	1.19	0.98
9	KH-17	6	80-81	0.04	0.07	0.07	0.18	0.56	0.93	1.51	1.24
10	KH-17	7	20-21	0.04	0.09	0.11	0.24	0.46	1.21	0.92	1.33
11	KH-17	7	50-51	0.03	0.08	0.08	0.19	0.38	1.05	1.05	1.12
12	KH-17	7	79-80	0.04	0.11	0.10	0.25	0.40	0.93	1.02	1.39
13	KH-17	8	59-60	0.03	0.06	0.06	0.15	0.53	1.05	0.49	1.85
14	KH-17	8	84-85	0.03	0.06	0.06	0.16	0.52	1.02	0.70	1.69
15	KH-17	9	16-17	0.06	0.11	0.09	0.25	0.52	0.89	0.72	1.65
16	KH-17	9	28-29	0.07	0.12	0.11	0.30	0.61	0.98	0.69	1.26
17	KH-17	9	39-40	0.06	0.18	0.12	0.37	0.35	0.67	0.72	0.80
18	KH-17	9	50-51	0.06	0.12	0.11	0.29	0.51	0.95	0.63	1.10
19	KH-17	9	60-61	0.04	0.08	0.10	0.23	0.52	1.14	0.72	1.17
20	KH-17	9	71-72	0.06	0.11	0.11	0.27	0.53	0.98	0.82	1.53
21	KH-17	9	90-91	0.04	0.07	0.07	0.18	0.51	0.94	0.89	1.29
22	KH-17	10	19-20	0.03	0.07	0.07	0.18	0.47	0.99	0.90	1.44
23	KH-17	10	67-68	0.03	0.09	0.08	0.19	0.33	0.86	3.47	1.73
24	KH-17	11	21-22	0.02	0.06	0.06	0.14	0.44	1.09	0.88	2.72
25	KH-17	11	56-57	0.02	0.08	0.05	0.14	0.27	0.59	2.23	1.90
26	KH-17	11	80-81	0.01	0.08	0.04	0.13	0.18	0.48	2.66	1.71
27	KH-17	12	19-20	0.02	0.04	0.05	0.11	0.44	1.26	1.14	2.34
28	KH-17	12	79-80	0.02	0.08	0.04	0.14	0.25	0.54	3.18	1.86
29	KH-17	13	14-15	0.02	0.05	0.06	0.14	0.44	1.26	1.62	2.96
30	KH-17	13	49-50	0.03	0.05	0.04	0.11	0.53	0.79	1.45	1.90
31	KH-17	13	69-70	0.03	0.08	0.05	0.16	0.31	0.61	3.08	2.00
32	KH-17	13	89-90	0.03	0.07	0.06	0.16	0.42	0.88	2.98	1.83
33	KH-17	14	20-21	0.03	0.05	0.07	0.15	0.54	1.43	1.16	2.43
34	KH-17	14	40-41	0.03	0.08	0.07	0.18	0.33	0.95	2.28	1.44
35	KH-17	14	60-61	0.02	0.07	0.04	0.12	0.24	0.57	2.81	1.03
36	KH-17	14	76-77	0.01	0.02	0.01	0.04	0.26	0.49	0.51	5.05
37	KH-17	15	23-24	0.00	0.01	0.02	0.04	0.27	1.60	1.61	2.86
38	KH-17	15	50-51	0.00	0.02	0.01	0.03	0.10	0.41	1.41	1.99
39	KH-17	15	90-91	0.01	0.01	0.01	0.03	0.40	0.50	1.91	3.05
40	KH-17	15	98-99	0.01	0.02	0.03	0.06	0.54	1.45	1.80	1.75
41	KH-17	16	4-5	0.01	0.03	0.03	0.08	0.37	1.12	1.72	1.55
42	KH-17	16	22-23	0.01	0.06	0.07	0.14	0.24	1.22	2.04	1.99
43	KH-17	16	39-40	0.00	0.02	0.01	0.03	0.15	0.46	1.82	1.94
44	KH-17	16	61-62	0.01	0.03	0.03	0.07	0.30	0.97	1.86	2.27
45	KH-17	16	90-61	0.01	0.02	0.03	0.05	0.52	1.70	2.44	5.16
46	KH-17	17	3-4	0.01	0.06	0.03	0.10	0.09	0.59	2.02	1.18
47	KH-17	17	12-13	0.01	0.01	0.01	0.03	0.51	0.97	1.90	4.66

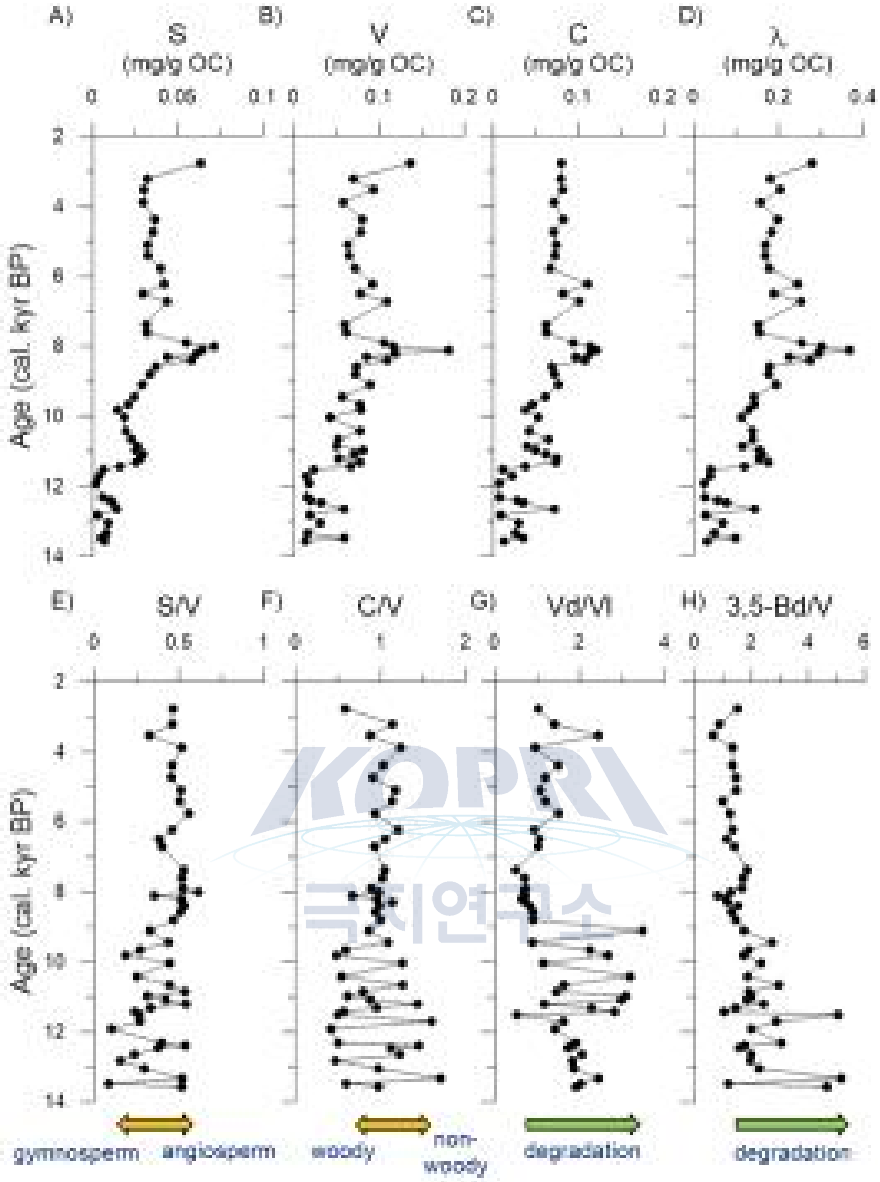


Fig. 177. Variation in lignin phenol concentrations of (A) S (mg/g OC), (B) V (mg/g OC), (C) C (mg/g OC), and (D) lambda (λ, mg/g OC), and lignin phenol-derived indices of (E) S/V ratio, (F) C/V ratio, (G) Vd/Vl ratio, and (H) 3,5-Bd/V obtained from core sediment samples of KH17-GPC01.

나) 스발바르 피오르드 퇴적물 내 DNA 분석을 통한 해빙 지표종 확인

(1) 연구 목적

- 유기체들은 환경과 상호작용함에 따라 DNA를 배출하고 이러한 DNA가 환경에 축적됨. 개별 유기체에서 직접 채취하지 않고 토양이나 해수 등 다양한 환경 시료에서 수집한 DNA를 환경 DNA 또는 environmental DNA (eDNA)라고 함
- 이 중에서도 고환경 또는 고생물 시료에서 분리된 DNA를 ancient DNA (aDNA)라고 일컬으며, aDNA 분석은 유기체의 과거 역사에 접근할 수 있는 이점이 있음
- 따라서 본 연구에서는 스발바르 피오르드 퇴적물 시료에 보존되어 있는 고환경 DNA를 활용하여 유기체 군집구조 및 해수면 온도 관련 지표종 분석을 진행하고, 이를 통해 스발바르 피오르드의 과거 해빙 및 표층수온 복원을 위한 기초자료를 확보하고자 함

(2) 연구 방법

(가) DNA 추출

- 2022년 제4차 국제공동탐사를 통해 확보된 9개 퇴적물 코어에 대하여 코어 퇴적물 깊이 0-2 cm는 0.5 cm 간격으로, 2-5 cm 깊이는 1 cm 간격으로, 5 cm 이하에서는 10 cm 간격으로 총 123개 퇴적물 부시료를 채취하여 DNA를 추출하였음(Table 36). DNA 추출에는 토양 시료 전용 DNA 추출 키트인 DNeasy PowerSoil Pro Kit (QIAGEN)를 사용함

(나) 메타바코딩 서열 분석

- Illumina MiSeq 장비를 활용하여 박테리아 16S rRNA V4-V5 지역(515FB: GTGYCAGCMGCCGCGGTAA/ 926R: CCGYCAATTYMTTTRAGTTT) 및 진핵생물 18S rRNA V7 지역(1183mod: AATTTGACTCAACRCGGG/ R1443mod: GRGCATCACAGACCTG)을 타겟으로 하는 메타바코딩 서열 분석을 진행하였음

Table 36. Information on samples used for the aDNA study.

Core ID	Sampling site	Depth(cm)	No. of Samples
HH22-1152-MUC01	Isfjorden (inner)	0-9	8
HH22-1154-MUC01	Isfjorden (middle)	0-28	12
HH22-1156-MUC01	Isfjorden (outer)	0-14	9
HH22-1159-MUC01	Kongsfjorden (inner)	0-40	14
HH22-1161-MUC01	Kongsfjorden (middle)	0-45	15
HH22-1163-MUC01	Kongsfjorden (outer)	0-51	17
HH22-1176-MUC01	Hinlopen Strait	0-48	16
HH22-1179-MUC01	Hinlopen Strait	0-41	15
HH22-1185-MUC01	Hinlopen Strait	0-51	17

KOPRI 극지연구소

(다) 생물정보학적 분석

- 우선 데이터가 확보된 이스피오르드 코어 시료(HH22-1152, 1154, 1156MUC)에 대하여 Qiime2 파이프라인을 통해 raw data의 denoising, OTU clustering, taxonomic classification을 진행하고, 군집구조 분석 및 해빙 관련 지표종 분석을 수행하였음. Taxonomic classification에는 SILVA, PR2 및 자체 제작한 지표종 database를 사용함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 박테리아 군집 구조

- SILVA DB를 이용하여 박테리아 군집구조 확인 결과 세 개 코어 대부분의 core depth에서 Proteobacteria가 높은 비율을 차지하고 있으며, Desulfobacterota 및 Cyanobacteria도 많은 비율을 차지하고 있음(Fig. 178)

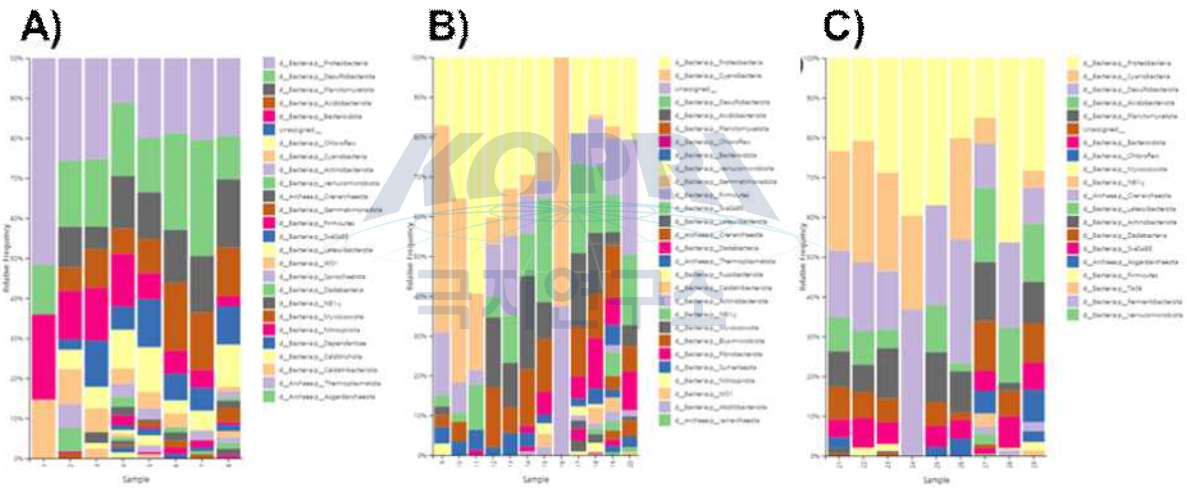


Fig. 178. Bacterial community analysis for each sediment core from Isfjorden: (A) HH22-1152-MUC01, (B) HH22-1154-MUC01, and (C) HH22-1156-MUC01.

(나) 진핵생물 군집 구조

- PR2 DB를 이용하여 진핵생물 군집구조 확인 결과 세 개 코어 전반적으로 Rhizaria, Stramenopiles, Alveolata가 대다수의 비율을 차지하고 있음(Fig. 179)

(다) 해빙 지표종

- 자체 제작한 DB를 이용하여 해빙 관련 지표종을 분석해본 결과 일부 core depth에서 와편모조류인 *Polarella glacialis*, *Islandinium minutum*와 규조류인 *Haslea spicula* 3개의 해빙 지표종이 확인됨(Fig. 180)

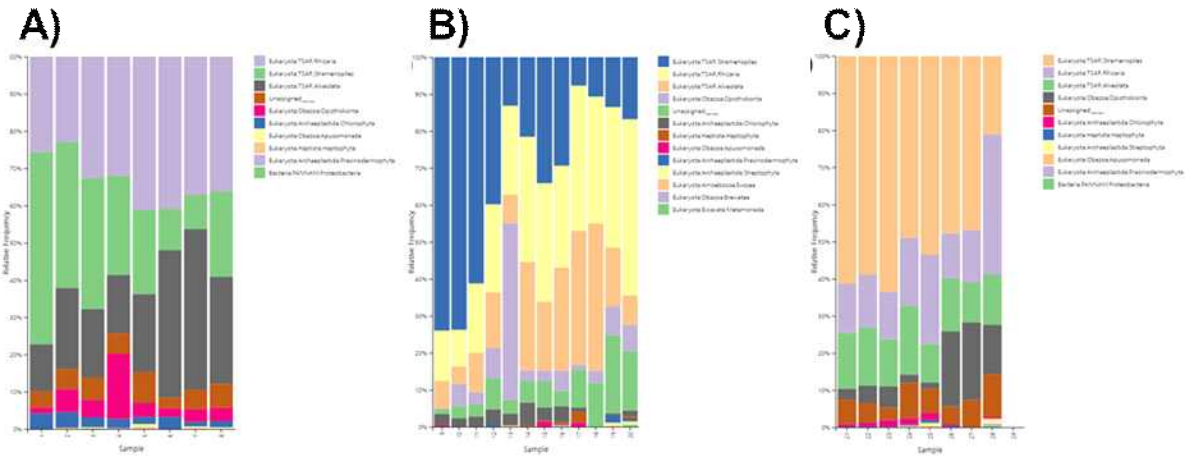


Fig. 179. Eukaryotic community analysis for each sediment core from Isfjorden: (A) HH22-1152-MUC01, (B) HH22-1154-MUC01, and (C) HH22-1156-MUC01.

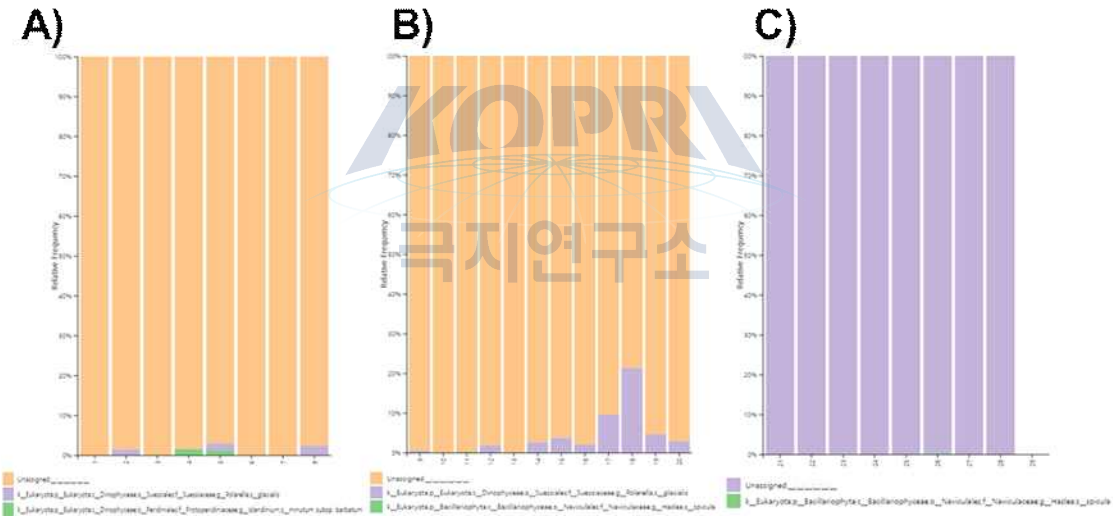


Fig. 180. Eukaryotic community analysis for each sediment core from Isfjorden: (A) HH22-1152-MUC01, (B) HH22-1154-MUC01, and (C) HH22-1156-MUC01.

(라) DNA 분석을 통한 기후환경 복원 프록시

- 스발바르 피오르드의 퇴적 코어를 이용한 고환경 DNA 분석 결과는 과거의 퇴적 환경에 서식하던 생물군의 군집구조 및 특정 지표종을 현시점에서 확인할 수 있다는 점에서 기후환경 복원 프록시로서 능성이 있음. 특히, 본 이스피오르드 퇴적 코어 분석 결과에서 확인된 3종의 해빙 연관 지표종 관련하여 유기분자생체지표(IP25) 등 다른 해빙 프록시 결과와 비교하여 해석해 볼 필요가 있음. 또한 콩스피오르드 및 힌로펜 해협에서 확보한 퇴적 코어에서도 이와 같은 DNA 분석을 추진할 예정임(항목 '나. 스발바르 피오르드 표층퇴적물의 DNA 분석을 통한 진핵생물 다양성 비교 연구' 참조)

3-4) 4차년도

가) 멀티코어 퇴적물의 유기분자생체지표 분석을 통한 최근 콩스피오르드 환경 변화 복원 연구

(1) 연구 목적

- 북극은 최근 급격한 기후 변화를 겪고 있으며 1979년 이후 지구 평균보다 약 4배 빠르게 기온이 상승하고 있음 Rantanen et al., 2022). 스발바르는 북극 관문인 프람해협 근처에 위치하고 있어 기온상승이 북극 평균보다도 더 빠른 지역으로 기후변화에 매우 민감한 지역으로 알려져 있음
- 피오르드는 육상과 해양 생태계 사이의 중요한 경계 역할을 수행하고 있으며 육상으로부터 유입되는 유기탄소(Organic Carbon; OC) 및 해양환경에서 생성되는 유기탄소는 북극 생지화학적 순환 및 탄소 순환에 중요한 역할을 하고 있음(Bianchi et al., 2020; Nuwer & Keil, 2005; Bianchi et al., 2018)
- 따라서 피오르드 내 퇴적 유기 탄소(OC)의 기원, 분포 및 거동을 이해하는 것이 북극 환경 변화 이해에 필수적이라고 할 수 있음
- 콩스피오르드(Kongsfjorden)는 스발바르 제도 북서부에 위치하고 있으며 서스피츠베르겐해류(West Spitsbergen Current; WSC)이 운반하는 따뜻한 대서양 해수(Atlantic Water; AW)의 영향으로 최근 대서양화(Atlantification)가 진행되며 북극해로의 따뜻한 해수 유입이 증가하고 있음
- 이로 인해 스발바르 주변 해역의 여름철 해빙이 감소하고 빙하가 빠르게 후퇴하며 연안 침식과 담수 유입량 증가 등으로 인해 피오르드 생태계에도 큰 영향을 미치고 있음
- 콩스피오르드는 폭 4~10 m, 피오르드 전체 길이 길이 약 27km, 총 부피 약 29.4km^2 의 특징을 나타냄(Ito and Kudoh, 1997; Brogi et al., 2019)
- 5개의 주요 빙하 Kongsvegen, Kronebreen, Kongsbreen, Conwaybreen, Blomstrandbreen)에서 유입된 빙하 용수, 빙산의 calving, Bayelva 강에서의 직접적인 담수 유입(~29 x 10^6 m^3)으로 퇴적 환경이 형성됨(Zhu et al., 2016; McGovern et al., 2022)
- AW 유입과 다양한 유기 탄소 기원의 혼합으로 복잡한 퇴적 환경이 형성되며 이러한 과정의 상호작용은 북극 피오르드 퇴적물에서 유기 탄소의 축적 및 보존 메커니즘에 대한 중요한 정보를 제공함
- 이전 연구에서는 콩스피오르드를 포함한 스발바르 피오르드에서 빙하 작용이 퇴적 환경에 미치는 중요성을 강조함(Zaborska et al., 2006; D' Angelo et al., 2018). 특히, 빙하로부터 운반된 쇄설성 입자(ice-rafted debris, IRD)과 석탄 유래 물질의 높은 유입이 특징임(Ćmiel et al., 2004; Kim et al., 2011). 1990년대 중반 이후 진행된 대서양화(Atlantification)로 빙하 융해와 퇴적물 유입이 가속화됨

(Tsubouchi et al., 2021)에 따라 피오르드 환경 내 퇴적 유기물의 조성과 최근 기후 변화에 따른 상호작용을 파악하는 것이 매우 주요함

- 콩스피오르드에서 유기 탄소의 분자적 수준에서 유기물의 기원을 연구한 사례는 적으며, 육상 및 해양 기원의 유기 탄소 기여도에 대한 명확한 규명은 부족하기 때문에 본 연구에서는, 콩스피오르드에서 채취한 3개의 멀티코어 퇴적물을 활용하여 퇴적 유기탄소의 기원을 규명하고 상대적인 기여도를 추정하였음. 또한 최근 가소화된 온난화에 따른 퇴적 유기물의 특성 변화에 대해서도 다양한 분석 기법들을 활용하여 조사함

(2) 연구 방법

(가) 시료 채취

- 2022년과 2023년 한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사를 통해 노르웨이 북극대학교(UiT)의 연구선 헬머 한센(Helmer Hanssen)을 활용하여 콩스피오르드 내측, 중간, 외측 3개 정점에서 멀티코어 퇴적물을 채취함. 정점 위치를 Fig. 181에 나타냄. 내측 수심 81 m에서 채취한 HH23-1058MUC의 코어 길이는 45 cm, 중간 정점의 수심 339 m에서 채취한 HH22-1161MUC 코어의 길이는 44 cm, 그리고 가장 외측 정점의 수심 323 m에서 채취한 코어의 길이는 40 cm로 헬머 한센호에 장착된 멀티코어러를 사용하여 채취하였으며, 즉시 1cm 간격으로 부시료를 채취하여 -20℃에서 보관. 실험실로 운반한 뒤 동결건조 처리를 진행함

KOPRI 극지연구소

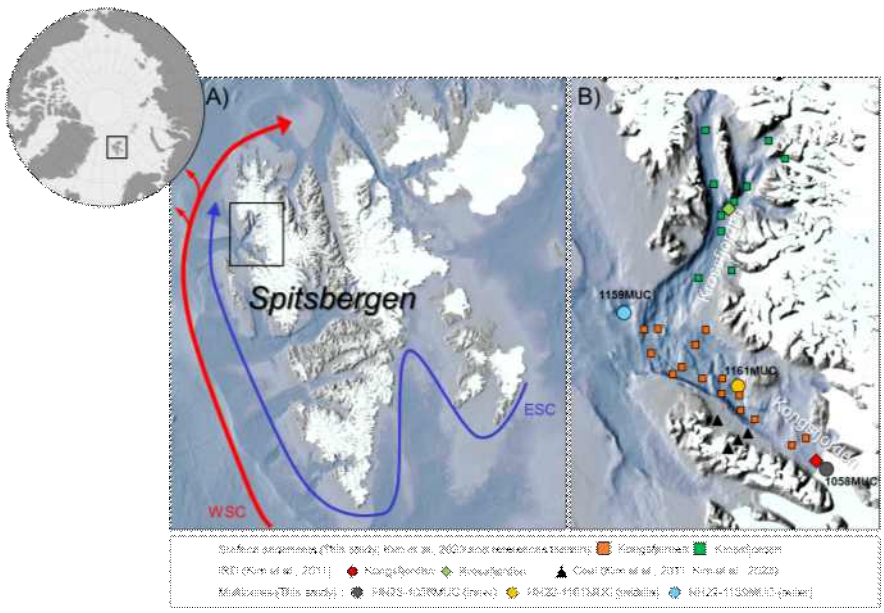


Fig. 181. Map showing the general view of (A) the study area and (B) a more detailed map of the Krossfjorden and Kongsfjorden system with sample locations.

(나) 퇴적학적 분석

- 수분 함량(Water contents): 동결건조 전 · 후의 시료 무게를 측정하여 계산함
- 밀도(Dry bulk density): 균질화된 미량의 퇴적물 시료를 극지연구소에서 보유하고 있는 AccuPyc II 1345 pycnometer (Micromeritics, Georgia, USA)를 이용해 측정함. 평균값(3회 측정)을 사용해 밀도를 계산했으며, 측정 오차는 0.0032cm^3 미만으로 확인됨
- 입자 크기 분포(Grain size distribution): 약 30 mg의 동결건조된 미분쇄(bulk) 시료에 5mL의 35% H_2O_2 를 주입하여 유기물을 산화 처리함. 63μm 이하 입자는 극지연구소에서 보유하고 있는 Mastersizer 3000 (Malvern Panalytical, UK)를 이용해 KOPRI에서 분석함. 분석 정밀도는 다음과 같음: (D(10): 37.5± 0.3μm; D(50): 71.4± 0.2μm; D(90): 104.0± 0.0μm)
- 비표면적(Surface area; SA): 동결건조된 시료를 오븐에서 12시간 동안 태워주며 유기물을 제거한 후 12시간에 걸쳐 서서히 실온에서 식혀줌. 분석 전에 샘플을 질소 기체 흐름에서 2시간 동안 200℃로 반응시킴. 분석은 한국기초과학지원연구원(KBSI 전주 센터에 의뢰함. 분석 정밀도는 ±9% 이내로 확인됨

(다) 방사성 동위원소 분석

- 동결건조 및 분쇄된 약 5g의 시료를 한국기초과학지원연구원 오창센터에 의뢰하여 HPGe 검출기를 이용해 감마 분광 분석을 수행함. ^{210}Pb 및 ^{226}Ra 의 농도를 통해 계산함. 평균 분석 오차는 각각, ^{210}Pb: 9.8±2.2 mBq/g, ^{226}Ra: 2.3±0.5 mBq/g 으로 나타남
- 퇴적율(Sedimentation rate; cm/yr)은 CRS (Constant Rate of Supply) 모델 (Appley & Oldfield, 1978)을 통해 계산됨

(라) 원소 함량 및 탄소안정동위원소비 분석

- 총 유기탄소(Total organic carbon; TOC) 함량 분석를 제거함
- 총 유기 탄소, 총 질소 함량 및 탄소안정동위원소비($\delta^{13}C_{org}$)은 극지연구소에서 보유하고 있는 EA- IRMS (Elemental Analyzer-Isotope ratio mass spectrometry, ThermoFisher) 장비를 사용해 분석함

(마) 리그닌 페놀 분석

- 약 400mg의 균질화된 시료에 CuO와 $(NH_4)2Fe(SO_4)2 \cdot 6H_2O$를 사용해 알칼리성 CuO 산화 반응을 진행함. 150℃에서 90분 동안 MARS6 마이크로웨이브 오븐에서 반응 시킨 후 생성물을 가스크로마토그래피-질량분석기(GC-MS; Gas chromatography-mass spectrometry)를 이용해 분석함. 컬럼은 DB1-MS 모세관 컬럼(30m x 0.25mm, 0.25μm)을 사용함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 퇴적물 특성

- 콩스피오르드에서 획득한 세 점의 멀티코어 퇴적물(HH23-1058MUC, HH22-1161MUC, HH22-1159MUC)의 수분 함량, 밀도, 입도 분포, 평균 입자 크기, 비표면적(SA)의 값을 Tables 37-39과 Fig. 182에 나타냄
- 세 멀티코어 퇴적물은 주로 Silt로 구성 되었으며, 입자 크기 분포는 모든 코어에서 비교적 일정하게 유지되었으나, HH22-1161MUC 코어에서는 상부로 갈수록 점진적으로 입자 크기가 증가하는 경향이 나타남
- 코어별 수분 함량 범위는 HH23-1058MUC는 19.7%~32.6% (평균 27.9 ± 2.3%), HH22-1161MUC는 31.7%~42.2% (평균 35.3 ± 2.2%), 그리고 HH22-1159MUC는 30.3%~47.5% (평균 38.5 ± 3.2%)의 분포를 보임
- 밀도 범위는 HH23-1058MUC 코어에서는 2.75 g/cm^3~2.82 g/cm^3 (평균 2.8 ± 0.08 g/cm^3), HH22-1161MUC 코어에서는 2.68 g/cm^3~2.80 g/cm^3 (평균 2.72 ± 0.03 g/cm^3), 그리고 HH22-1159MUC 코어에서는 2.60 g/cm^3~2.69 g/cm^3 (평균 2.63 ± 0.03 g/cm^3)의 값을 보임
- 모든 코어에서 실트 함량이 우세하며, 86%~92% 범위를 나타냄. HH23-1058MUC 코어에서 가장 높은 평균 값인 90 ± 2% 관찰 되었으며 평균 입자 크기는 HH23- 1058MUC에서 8.8 μm~13.3 μm (평균 10.0 μm), HH22- 1161MUC에서 7.9 μm~13.0 μm, 그리고 HH22- 1159MUC에서 8.3 μm~11.0 μm의 범위를 나타냄
- 비표면적 값은 HH23-1058MUC 코어에서 10.0 m^2/g~16.5 m^2/g (평균 13.3 ± 1.7 m^2/g), HH22-1161MUC 코어에서 8.6 m^2/g~13.9 m^2/g (평균 11.6 ± 1.3 m^2/g), 그리고 HH22-1159MUC 코어에서 8.3 m^2/g~11.0 m^2/g (평균 9.7 ± 0.7 m^2/g)의 값을 보임

KOPRI 극지연구소

Table 37. Sedimentological results for multicore HH23-1058MUC.

Top depth (cm)	Water contents (%)	Dry bulk density (g/cc)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Mean grain size (um)	Surface area (m^2/g)
0	25.3	-	7.8	86.4	5.8	9.9	10.0
1	25.3	-	7.5	90.7	1.8	9.5	12.2
2	28.6	-	7.3	89.0	3.7	9.7	12.5
3	27.9	-	7.0	87.8	5.2	10.1	11.6
4	29.9	-	6.8	88.7	4.5	10.2	13.8
5	30.0	-	6.9	90.1	3.0	9.8	12.8
6	26.8	2.8	6.8	89.8	3.5	10.0	-
7	25.2	-	6.9	89.0	4.1	10.1	12.7
8	32.6	-	7.1	87.1	5.8	10.1	-
9	26.0	2.8	7.3	91.2	1.6	9.8	14.0
10	27.7	-	6.7	91.6	1.7	11.1	10.6
11	27.4	-	5.7	92.4	2.0	12.2	-
12	26.9	-	6.8	91.7	1.4	10.4	15.4
13	27.4	-	7.2	90.4	2.4	10.2	-
14	25.9	2.8	7.2	90.1	2.7	9.5	-
15	25.9	-	7.8	89.7	2.4	9.2	15.1
16	26.3	-	7.7	89.6	2.7	9.4	-
17	20.9	-	7.1	90.0	2.9	10.3	15.0
18	25.9	-	7.9	89.7	2.4	9.5	-
19	29.1	2.8	7.9	87.3	4.8	9.7	-
20	29.8	-	8.1	88.3	3.6	9.3	14.9
21	29.9	-	7.1	91.0	1.9	9.6	-
22	26.5	-	6.6	90.8	2.6	10.8	12.4
23	29.1	-	7.2	90.5	2.4	10.1	-
24	27.9	2.8	6.7	91.6	1.7	10.6	-
25	19.7	-	5.3	91.6	3.1	13.3	10.8
26	28.4	-	6.4	90.8	2.8	11.6	-
27	30.8	-	7.8	89.8	2.4	9.7	14.1
28	29.9	-	7.8	89.2	3.0	9.5	-
29	28.3	2.8	7.2	89.3	3.6	10.2	-
30	28.8	-	7.6	89.4	3.0	10.0	13.4
31	28.2	-	7.0	85.5	7.5	11.1	-
32	27.8	-	8.1	86.8	5.1	9.8	16.5
33	27.8	-	8.0	86.7	5.3	10.0	-
34	31.3	2.8	7.6	89.4	3.1	9.6	-
35	30.0	-	8.4	88.5	3.1	9.1	15.0
36	30.0	-	8.8	88.0	3.2	8.8	-
37	27.4	-	-	-	-	-	-
38	28.4	-	6.1	90.3	3.6	11.6	-
39	28.3	2.8	6.7	91.2	2.1	10.8	-
40	29.7	-	8.3	90.7	1.1	8.8	13.7
41	30.1	-	8.2	89.6	2.2	9.0	-
42	29.7	-	8.0	89.5	2.5	9.4	-
43	28.5	-	8.8	89.1	2.2	8.9	-
44	28.4	2.8	8.0	90.1	2.0	9.3	-
45	27.2	-	7.9	88.5	3.6	9.5	13.4

KOPRI 극지연구소

Table 38. Sedimentological results for multicore HH22-1161MUC.

Top depth (cm)	Water contents (%)	Dry bulk density (g/cc)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Mean grain size (um)	Surface area (m^2/g)
0	37.2	–	–	–	–	–	11.0
1	42.2	2.7	6.9	80.0	13.0	13.0	–
2	37.9	2.7	7.1	82.8	10.2	11.7	9.3
3	37.1	2.7	6.7	81.0	12.3	12.7	10.3
4	38.0	2.7	7.5	86.1	6.4	10.4	12.1
5	36.1	2.7	7.9	85.9	6.2	10.2	13.4
6	32.2	2.7	7.5	83.5	9.1	10.8	–
7	35.4	2.7	8.0	85.7	6.3	9.7	12.4
8	33.2	2.7	8.3	87.5	4.2	9.0	–
9	32.1	2.7	8.0	84.0	8.0	10.1	12.9
10	31.7	2.8	8.7	85.9	5.4	9.2	13.9
11	32.9	2.8	8.7	87.3	4.0	8.8	–
12	35.7	2.7	8.3	84.8	6.9	9.8	11.4
13	34.0	2.7	8.1	86.2	5.8	9.1	–
14	31.7	2.8	9.0	86.4	4.7	8.6	–
15	33.7	2.8	8.5	83.7	7.8	9.4	11.9
16	34.8	2.8	7.9	84.0	8.1	9.7	–
17	35.0	2.8	7.8	82.1	10.2	10.5	11.6
18	33.7	2.7	7.6	79.8	12.7	11.6	–
19	34.4	2.7	7.5	80.4	12.2	11.4	–
20	34.0	2.7	8.4	85.0	6.7	9.6	8.6
21	33.6	2.7	8.5	86.3	5.2	9.2	–
22	33.3	2.7	9.0	86.3	4.7	8.6	11.6
23	33.6	2.7	8.3	85.5	6.3	9.4	–
24	33.0	2.7	9.3	90.0	0.7	7.9	–
25	35.1	2.8	8.7	87.4	3.9	8.6	12.9
26	35.6	2.7	6.9	86.1	7.0	10.2	–
27	35.7	2.7	8.2	84.2	7.6	9.7	11.7
28	35.3	2.7	8.1	84.0	7.9	9.6	–
29	35.7	2.7	7.6	85.0	7.3	10.0	–
30	36.8	2.7	7.9	86.2	5.9	9.4	11.5
31	34.8	2.8	8.2	87.4	4.4	8.9	–
32	36.0	2.7	8.2	87.0	4.8	9.0	12.3
33	36.7	2.7	7.1	86.5	6.5	10.0	–
34	36.0	2.7	8.3	87.1	4.6	9.0	–
35	36.4	2.7	8.3	87.2	4.5	9.0	11.2
36	36.9	2.7	7.6	86.4	6.0	9.5	–
37	37.1	2.7	7.7	85.2	7.1	9.9	–
38	32.5	2.7	8.4	87.3	4.3	8.9	–
39	37.6	2.8	8.3	87.4	4.3	9.1	–
40	38.2	2.8	8.0	87.7	4.3	9.1	11.1
41	39.1	2.7	8.5	86.9	4.5	8.9	–
42	36.7	2.7	7.8	85.5	6.6	9.7	–
43	33.4	2.7	8.1	86.9	5.0	9.4	–
44	37.6	2.7	8.1	87.1	4.8	9.2	–

KIOST 극지연구소

Table 39. Sedimentological results for multicore HH22-1159MUC.

Top depth (cm)	Water contents (%)	Dry bulk density (g/cc)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	Mean grain size (um)	Surface area (m^2/g)
0	40.4	-	6.6	86.2	7.2	9.7	13.9
1	44.1	2.6	7.2	84.0	8.8	10.5	-
2	47.4	2.6	7.4	85.2	7.4	10.3	10.8
3	39.8	2.6	7.0	86.2	6.9	9.8	11.2
4	39.2	2.7	6.9	85.7	7.4	10.1	12.4
5	47.5	2.6	8.6	85.5	5.9	9.1	11.5
6	33.0	2.6	7.7	86.4	6.0	9.6	-
7	42.1	2.6	7.4	85.5	7.1	9.9	11.8
8	41.3	2.6	7.4	85.4	7.3	10.1	-
9	38.5	2.6	7.2	84.9	7.9	10.4	11.4
10	38.4	2.6	7.5	84.9	7.6	10.2	10.0
11	39.5	2.7	8.9	85.2	5.9	8.7	-
12	38.0	2.7	7.8	84.9	7.3	10.1	12.1
13	39.3	2.6	7.4	85.0	7.6	10.4	-
14	38.8	2.6	8.5	84.0	7.6	9.3	-
15	39.0	2.6	7.8	87.8	4.4	9.2	11.8
16	42.5	2.6	7.2	84.8	8.0	10.3	-
17	38.5	2.6	8.1	83.9	8.0	9.9	11.6
18	38.6	2.7	8.1	88.5	3.5	9.0	-
19	37.4	2.6	9.0	84.7	6.3	8.3	-
20	36.4	2.6	7.4	85.2	7.4	10.0	-
21	34.3	2.6	8.7	81.4	9.9	9.4	-
22	36.1	2.6	7.1	85.1	7.9	10.7	12.2
23	39.0	2.6	8.5	84.9	6.6	9.1	-
24	35.0	2.6	7.8	85.0	7.2	10.0	-
25	37.2	2.6	7.6	86.4	6.0	9.9	11.9
26	37.5	2.6	6.9	84.2	8.9	11.0	-
27	37.6	2.6	7.2	85.3	7.6	10.5	10.2
28	38.2	2.6	8.0	85.0	7.0	9.6	-
29	36.8	2.7	7.2	85.2	7.6	10.3	-
30	38.4	2.7	8.5	86.3	5.3	8.9	7.7
31	40.6	2.7	9.1	84.6	6.4	8.9	-
32	40.7	2.7	7.4	84.4	8.2	10.3	13.1
33	38.6	2.6	8.3	84.6	7.1	9.7	-
34	38.1	2.6	8.6	86.2	5.2	8.8	-
35	38.1	2.6	9.1	84.0	7.0	9.0	12.9
36	30.3	-	9.2	84.0	6.8	8.9	-
37	35.5	2.6	8.7	84.2	7.1	9.1	-
38	35.1	2.6	9.6	83.8	6.6	8.5	-
39	36.0	2.6	8.2	86.6	5.2	9.6	-
40	36.6	2.6	9.3	84.4	6.3	9.2	12.9

KIOST 극지연구소

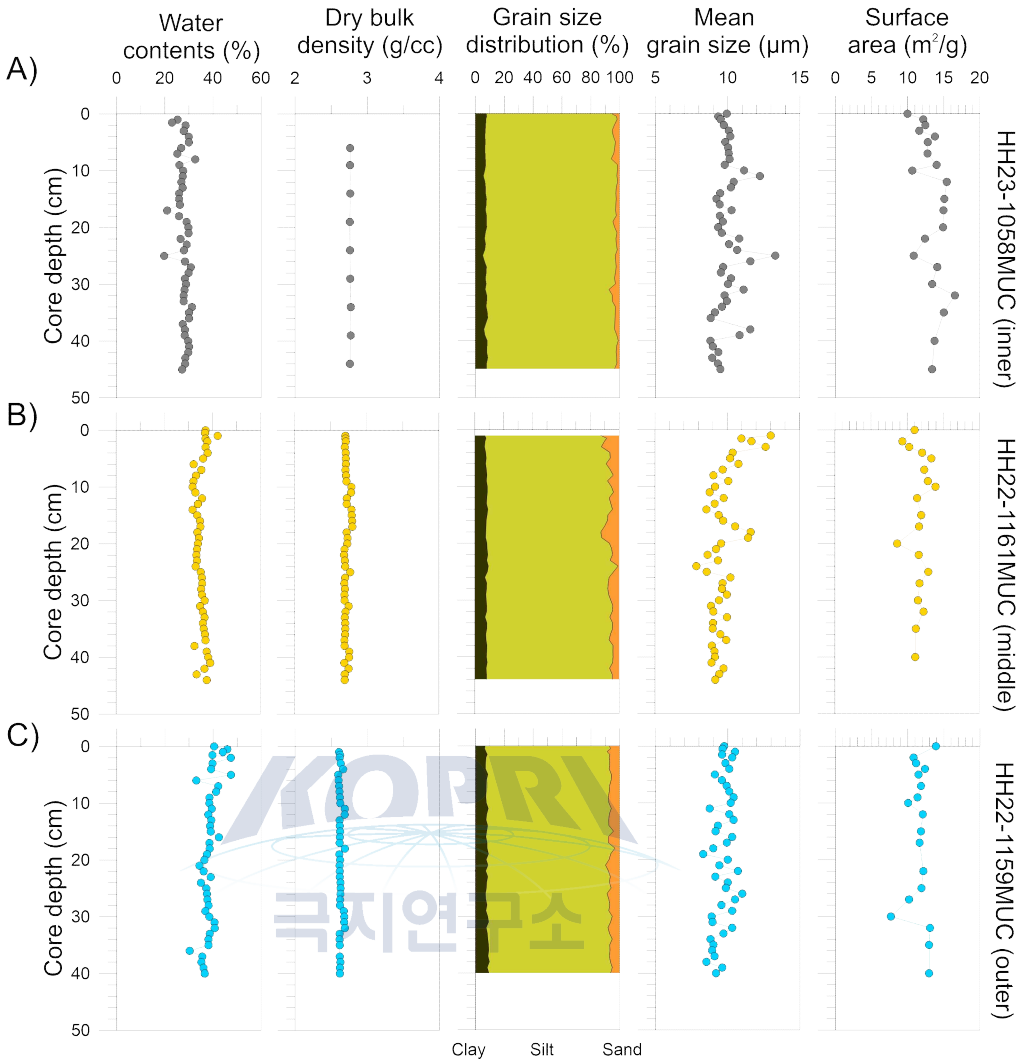


Fig. 182. Depth profiles of sedimentological parameters for multicores (A) HH23-1058MUC, (B) HH22-1161MUC, and (C) HH22-1159MUC.

(나) 연대 모델

- Total ^{210}Pb ($^{210}Pb_{tot}$), ^{226}Ra 및 excess ^{210}Pb ($^{210}Pb_{ex}$) 농도를 Table 40 및 Fig. 183에 나타냄
- $^{210}Pb_{tot}$ 값은 HH22-1161MUC은 89.3 mBq/g~233.0 mBq/g (평균 144.0 ± 55.3 mBq/g), HH22-1159MUC은 22.1 mBq/g~246.6 mBq/g (평균 83.3 ± 86.5 mBq/g)의 범위를 나타냄
- $^{210}Pb_{ex}$ 값은 HH22-1161MUC 코어에서 59.6 mBq/g~207.2 mBq/g (평균 114.8 ± 56.2 mBq/g), HH22-1159MUC 코어에서 9.3 mBq/g~216.0 mBq/g (평균 76.3 ± 89.7 mBq/g)의 값을 보임
- 이를 기반으로 계산한 결과, HH22-1161MUC의 퇴적율은 0.36 cm/yr, 그리고 HH22-1159MUC의 퇴적율 0.12 cm/yr 으로 나타남

Table 40. Results of ^{210}Pb and ^{226}Ra for multicores HH22-1161MUC and HH22-1159MUC.

Core name	Top depth (cm)	^{210}Pb (mBq/g)	^{210}Pb-STD (mBq/g)	^{226}Ra (mBq/g)	^{226}Ra-STD (mBq/g)
HH22-1161 MUC	1	233	11	25.8	1.8
	3	219	11	29.5	1.7
	6	228	13	27.5	1.9
	9	152.5	9.8	30.7	1.8
	12	90	9.6	29.5	2
	15	90	7.7	28.4	1.7
	18	99	8.4	33.2	1.9
	23	89.3	8.1	29.7	1.7
	28	112.7	8.8	30.2	1.8
	33	113	11	28.4	1.9
	38	148	10	28.6	1.9
	43	154	10	29.9	2
HH22-1159 MUC	2	246.6	13.4	30.6	21
	5	194.3	13.8	30.8	2.1
	10	54.3	8.9	26.4	2
	15	24.9	6.7	27.4	1.7
	20	33.3	8.3	24	2.2
	25	22.1	7.9	30.6	1.9
	30	49.7	7.4	24.4	1.8
	35	138	11	28.9	1.8
	40	41.5	8.8	25.8	1.6

(다) 원소 함량 및 탄소안정동위원소비/방사성 탄소동위원소

- 멀티코어 퇴적물의 총유기탄소 함량, 총질소 및 유기질소 함량, 탄소안정동위원소비 및 방사성탄소동위원소 결과를 Table 41-44 및 Fig. 184에 나타냄
- 총 유기 탄소(TOC) 함량은 HH23-1058MUC 코어에서 0.2~0.4 wt.% (평균 0.3 ± 0.0 wt.%), HH22-1161MUC 코어에서 0.9~1.5 wt.% (평균 1.2 ± 0.1 wt.%), 그리고 HH22-1159MUC 코어에서 1.9~2.5 wt.% (평균 2.2 ± 0.2 wt.%) 값을 나타냈으며, 총 질소(N_{tot}) 함량은 HH23-1058MUC 코어에서 0.01~0.05 wt.% (평균 0.02 ± 0.01 wt.%), HH22-1161MUC 코어에서 0.08~0.13 wt.% (평균 0.10 ± 0.01 wt.%), HH22-1159MUC 코어에서 0.22~0.26 wt.% (평균 0.23 ± 0.01 wt.%)의 값을 보임

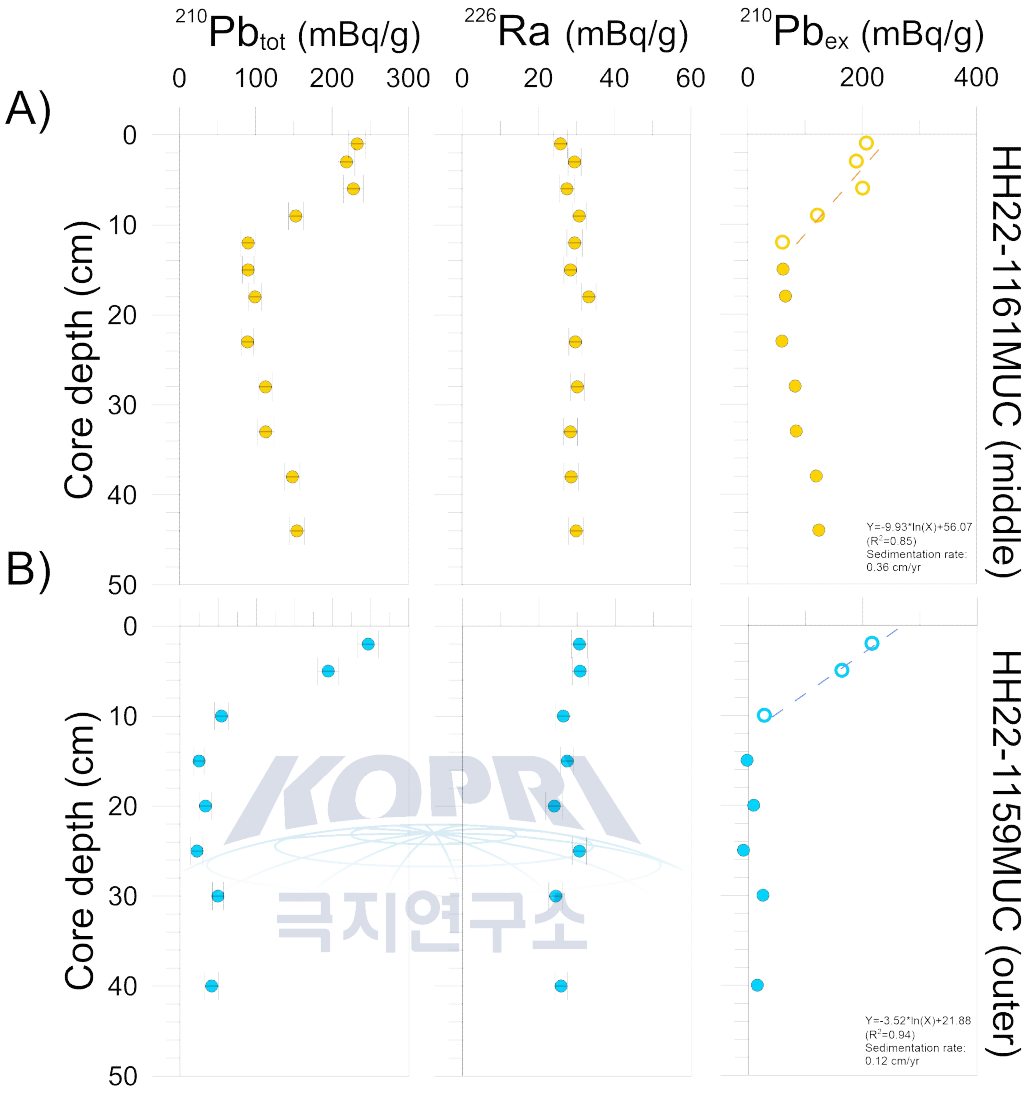


Fig. 183. Depth profiles of $^{210}Pb_{tot}$, ^{226}Ra, and $^{210}Pb_{ex}$ for multicores (A) HH22-1161MUC and (B) HH22-1159MUC.

- 유기 질소(N_{org}) 함량은 기존 스발바르 8개 피오르드의 표층 퇴적물과 콩스피오르드와 크로스피오르드 표층 퇴적물의 총 질소와 유기질소 간의 상관관계식(Fig. 185)을 통해 추정하였음. 그 결과 HH23-1058MUC 코어 에서는 0.01~0.03 wt.% (평균 0.01 ± 0.00 wt. %) 의 범위를 나타냈으며, HH22-1161MUC 코어에서는 0.05 ~ 0.09 wt.% (평균 0.07 ± 0.01 wt. %)의 범위를, 그리고 HH22-1159MUC 의 코어에서는 0.14~0.17 wt. % (평균 0.15 ± 0.01 wt.%)의 범위를 보였음
- 총유기탄소와 질소 함량의 비를 활용하여 유기물의 기원을 해양기원과 육상기원으로 구분지어 확인 할 수 있는데, 본 연구에서 사용한 멀티코어 퇴적물의 질소-탄소 몰비(molar N_{tot}/TOC)는 HH23-1058MUC 코어에서 0.04~0.12 (평균 0.06 ± 0.02), HH22-1161MUC 코어에서 0.06~0.11 (평균 0.07 ± 0.01), 그리고 HH22-1159MUC 코어에서 0.08~0.11 (평균 0.09 ± 0.01)의 값을 보였음

Table 41. Results of bulk parameters for multicore HH23-1058MUC.

Top depth (cm)	TOC (wt. %)	N_{tot} (wt. %)	N_{org} (wt. %)	N_{tot}/TOC ratio	N_{org}/TOC ratio	$\delta^{13}C_{org}$ (‰VPDB)
0	0.36	0.05	0.03	0.11	0.07	-23.4
1	0.31	0.03	0.02	0.09	0.04	-23.0
2	0.29	0.04	0.02	0.12	0.06	-22.6
3	0.28	0.03	0.02	0.10	0.05	-22.5
4	0.30	0.02	0.00	0.05	0.01	-24.0
5	0.28	0.02	0.00	0.05	0.01	-23.8
6	0.27	0.01	0.00	0.05	0.01	-23.6
7	0.28	0.01	0.00	0.05	0.01	-23.8
8	0.20	0.01	0.00	0.06	0.01	-23.0
9	0.23	0.01	0.00	0.04	0.00	-24.2
10	0.26	0.01	0.00	0.04	0.00	-24.6
11	0.22	0.01	0.00	0.06	0.00	-23.2
12	0.24	0.02	0.00	0.06	0.01	-23.9
13	0.27	0.02	0.00	0.05	0.01	-23.5
14	0.29	0.02	0.01	0.06	0.02	-23.8
15	0.27	0.02	0.00	0.06	0.02	-23.2
16	0.23	0.02	0.00	0.06	0.01	-23.7
17	0.20	0.02	0.00	0.07	0.01	-22.5
18	0.22	0.02	0.01	0.08	0.02	-22.9
19	0.24	0.02	0.01	0.07	0.02	-23.0
20	0.30	0.01	0.00	0.04	0.00	-23.4
21	0.32	0.02	0.00	0.04	0.01	-23.4
22	0.26	0.02	0.00	0.05	0.01	-23.8
23	0.28	0.01	0.00	0.04	0.00	-23.9
24	0.22	0.01	0.00	0.04	0.00	-23.9
25	0.22	0.01	0.00	0.04	0.00	-23.7
26	0.22	0.01	0.00	0.06	0.01	-23.7
27	0.25	0.01	0.00	0.05	0.01	-23.5
28	0.25	0.01	0.00	0.05	0.01	-23.7
29	0.24	0.01	0.00	0.04	0.00	-23.1
30	0.21	0.01	0.00	0.05	0.00	-23.1
31	0.27	0.02	0.00	0.05	0.01	-23.5
32	0.25	0.02	0.00	0.06	0.01	-23.3
33	0.24	0.02	0.00	0.06	0.01	-23.2
34	0.25	0.02	0.00	0.06	0.01	-23.4
35	0.24	0.02	0.00	0.06	0.01	-23.1
36	0.22	0.02	0.00	0.06	0.01	-23.1
37	0.23	0.01	0.00	0.05	0.01	-23.7
38	0.25	0.01	0.00	0.05	0.00	-23.9
39	0.23	0.02	0.00	0.06	0.01	-23.4
40	0.27	0.02	0.00	0.05	0.01	-23.5
41	0.29	0.02	0.00	0.05	0.01	-24.0
42	0.25	0.02	0.00	0.06	0.01	-23.4
43	0.25	0.02	0.01	0.07	0.02	-23.8
44	0.29	0.02	0.00	0.05	0.01	-24.5
45	0.24	0.02	0.00	0.05	0.01	-23.9

KOPRI 극지연구소

Table 42. Results of bulk parameters for multicore HH22-1161MUC.

Top depth (cm)	TOC (wt. %)	N_{tot} (wt. %)	N_{org} (wt. %)	N_{tot}/TOC ratio	N_{org}/TOC ratio	$\delta^{13}C_{org}$ (‰VPDB)
0	1.14	0.12	0.09	0.09	0.07	−22.6
1	1.22	0.13	0.10	0.09	0.07	−22.6
2	1.37	0.12	0.08	0.07	0.05	−22.3
3	1.27	0.12	0.09	0.08	0.06	−22.3
4	1.30	0.12	0.08	0.08	0.05	−22.5
5	1.34	0.10	0.07	0.07	0.05	−23.6
6	1.14	0.10	0.07	0.08	0.05	−23.4
7	1.02	0.10	0.07	0.09	0.06	−23.2
8	1.42	0.10	0.07	0.06	0.04	−23.2
9	1.29	0.11	0.07	0.07	0.05	−23.4
10	1.07	0.10	0.07	0.08	0.05	−23.2
11	1.14	0.11	0.07	0.08	0.06	−23.0
12	1.23	0.10	0.07	0.07	0.05	−23.0
13	1.33	0.10	0.07	0.06	0.04	−23.3
14	1.21	0.09	0.06	0.07	0.05	−23.4
15	1.32	0.10	0.07	0.06	0.04	−23.4
16	1.01	0.10	0.07	0.08	0.06	−23.4
17	1.11	0.09	0.06	0.07	0.05	−23.3
18	0.96	0.09	0.06	0.08	0.05	−23.0
19	1.22	0.10	0.07	0.07	0.05	−23.3
20	0.94	0.10	0.07	0.09	0.07	−23.4
21	0.96	0.11	0.07	0.09	0.07	−23.0
22	1.48	0.10	0.07	0.06	0.04	−23.2
23	0.91	0.11	0.08	0.11	0.07	−22.8
24	1.20	0.11	0.07	0.08	0.05	−22.9
25	1.16	0.11	0.08	0.08	0.06	−23.4
26	1.20	0.11	0.08	0.08	0.06	−23.4
27	1.07	0.13	0.09	0.11	0.08	−23.2
28	1.18	0.09	0.06	0.07	0.05	−23.2
29	1.14	0.09	0.06	0.07	0.05	−23.2
30	1.17	0.09	0.06	0.07	0.05	−23.0
31	1.17	0.09	0.06	0.07	0.05	−22.7
32	1.26	0.10	0.07	0.06	0.04	−23.0
33	1.30	0.09	0.06	0.06	0.04	−23.0
34	1.29	0.09	0.06	0.06	0.04	−23.1
35	1.30	0.09	0.06	0.06	0.04	−22.9
36	1.08	0.09	0.06	0.07	0.05	−23.1
37	1.19	0.09	0.06	0.07	0.04	−23.5
38	1.03	0.08	0.05	0.07	0.04	−23.6
39	1.08	0.08	0.06	0.07	0.04	−23.7
40	1.12	0.09	0.06	0.07	0.04	−23.4
41	0.87	0.09	0.06	0.09	0.06	−23.6
42	1.08	0.10	0.07	0.08	0.05	−23.5
43	1.20	0.10	0.07	0.07	0.05	−23.6
44	1.19	0.09	0.06	0.07	0.05	−23.9

KOPRI 극지연구소

Table 43. Results of bulk parameters for multicore HH22-1159MUC.

Top depth (cm)	TOC (wt. %)	N_{tot} (wt. %)	N_{org} (wt. %)	N_{tot}/TOC ratio	N_{org}/TOC ratio	$\delta^{13}C_{org}$ (‰VPDB)
0	2.34	0.23	0.17	0.08	0.06	−22.8
1	2.42	0.23	0.17	0.08	0.06	−22.5
2	1.95	0.22	0.17	0.10	0.07	−22.6
3	2.31	0.23	0.17	0.08	0.06	−22.5
4	2.49	0.22	0.16	0.08	0.06	−22.4
5	2.44	0.22	0.17	0.08	0.06	−22.6
6	2.20	0.22	0.17	0.09	0.06	−22.4
7	2.16	0.22	0.16	0.09	0.07	−22.5
8	2.15	0.22	0.16	0.09	0.06	−22.5
9	1.89	0.23	0.17	0.10	0.08	−22.4
10	2.50	0.22	0.16	0.08	0.06	−22.6
11	2.03	0.25	0.19	0.10	0.08	−22.5
12	2.09	0.22	0.17	0.09	0.07	−22.6
13	2.12	0.22	0.16	0.09	0.07	−22.5
14	2.18	0.23	0.17	0.09	0.07	−22.4
15	2.38	0.23	0.17	0.08	0.06	−22.5
16	1.98	0.23	0.17	0.10	0.07	−22.5
17	2.33	0.22	0.17	0.08	0.06	−22.4
18	1.99	0.22	0.17	0.10	0.07	−22.7
19	1.93	0.25	0.19	0.11	0.08	−22.5
20	2.29	0.23	0.17	0.08	0.06	−22.6
21	2.34	0.23	0.17	0.08	0.06	−22.6
22	2.30	0.23	0.17	0.09	0.06	−22.7
23	1.87	0.23	0.17	0.10	0.08	−22.7
24	2.22	0.23	0.17	0.09	0.07	−22.7
25	2.28	0.23	0.17	0.08	0.06	−22.9
26	2.22	0.22	0.17	0.09	0.06	−22.8
27	2.24	0.22	0.17	0.09	0.06	−22.9
28	1.99	0.23	0.17	0.10	0.07	−22.7
29	2.26	0.23	0.17	0.09	0.06	−23.5
30	1.88	0.23	0.17	0.11	0.08	−22.8
31	2.05	0.23	0.17	0.10	0.07	−22.8
32	2.05	0.23	0.17	0.10	0.07	−23.1
33	1.89	0.23	0.17	0.10	0.08	−23.0
34	2.46	0.24	0.18	0.08	0.06	−23.1
35	2.03	0.23	0.17	0.10	0.07	−23.0
36	2.10	0.23	0.17	0.10	0.07	−22.8
37	2.06	0.24	0.18	0.10	0.08	−23.2
38	2.26	0.25	0.19	0.09	0.07	−23.1
39	2.19	0.26	0.19	0.10	0.07	−22.9
40	2.26	0.25	0.19	0.09	0.07	−23.1

KOPRI 극지연구소

Table 44. Results of radiocarbon isotopes for multicores HH23-1058MUC, HH22-1161MUC, and HH22-1159MUC.

HH23-1058MUC top depth (cm)	$\Delta^{14}C_{org}$ (‰)	HH23-1058MUC top depth (cm)	$\Delta^{14}C_{org}$ (‰)	HH23-1058MUC top depth (cm)	$\Delta^{14}C_{org}$ (‰)
0	−749.8	0	−405.7	0	−410.1
2	−743.5	2	−438.1	5	−428.9
5	−760.8	5	−479.2	10	−433.9
7	−819.2	7	−488.2	15	−469.3
10	−839.2	10	−477.9	20	−449.1
15	−790.9	15	−488.8	25	−448.5
20	−771.3	20	−555.9	30	−439.5
25	−815.1	25	−513.0	35	−425.3
30	−806.7	30	−546.4	40	−396.7
35	−818.8	35	−522.6		
40	−819.0	40	−533.8		
45	−792.9	44	−525.6		

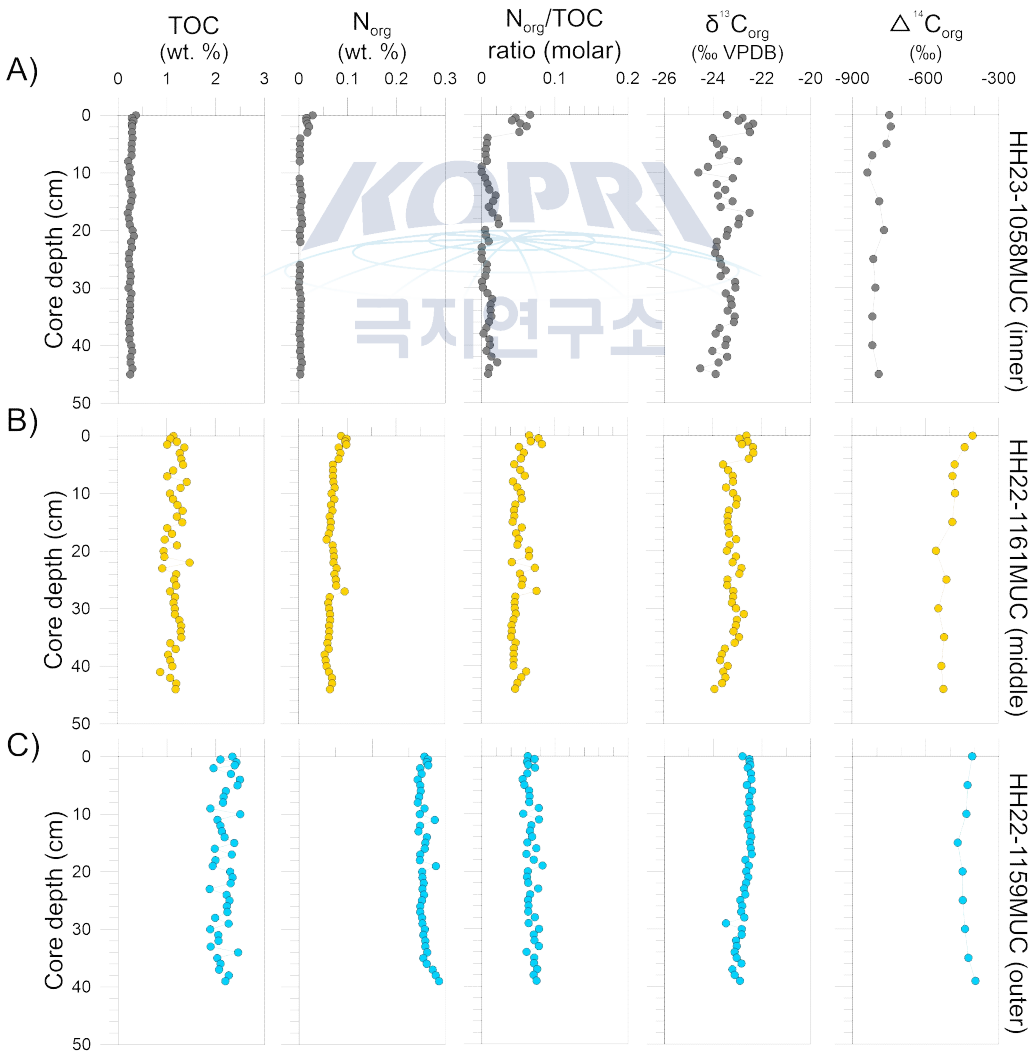


Fig. 184. Depth profiles of bulk parameters for multicores (A) HH23-1058MUC, (B) HH22-1161MUC, and (C) HH22-1159MUC.

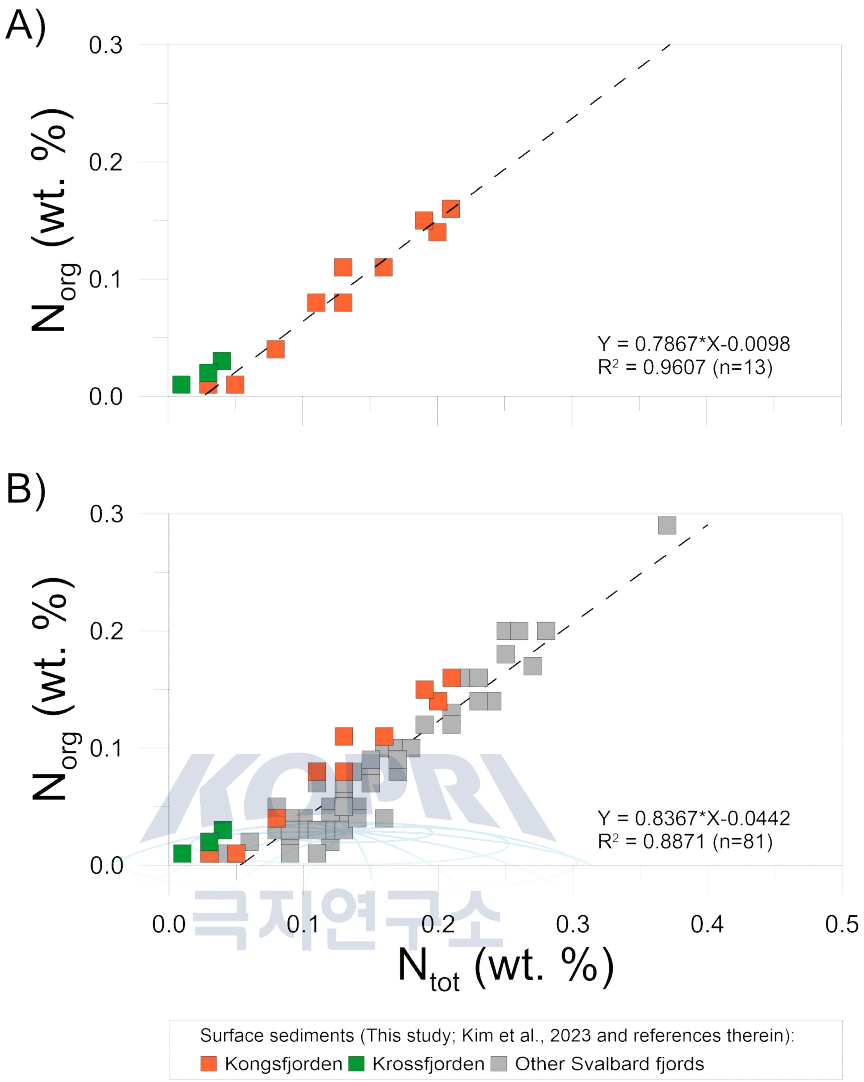


Fig. 185. Scatter plots of N_{tot} vs. N_{org} for surface sediments collected from (A) the Kongsfjorden and Krossfjorden system and (B) other Svalbard fjords.

- $\delta^{13}C_{org}$ 값은 HH23-1058MUC 코어에서 -24.6‰~-22.5‰ (평균 -23.5 ± 0.5‰)의 범위를 보이며 세 개 멀티코어 퇴적물 중에서 평균 가장 가벼운 값을 보였으며, HH22-1161MUC 코어에서 -23.9‰~-22.3‰ (평균 -23.2 ± 0.3‰), HH22-1159MUC 코어에서 -23.5‰~-22.4‰ (평균 -22.7 ± 0.3‰)의 값을 보이며 피오르드 내측에서 외측으로 갈수록 값이 무거워지는 경향을 나타냄
- $\triangle^{14}C_{org}$ 값은 HH23-1058MUC 코어에서 -839.2‰~-743.5‰ (평균 -793.9 ± 31.1‰)의 값으로 가장 낮은 값을 보였으며, HH22-1161MUC 코어에서 -555.9‰~-405.7‰ (평균 -504.9 ± 44.0‰), HH22-1159MUC 코어에서 -469.3‰~-396.7‰ (평균 -433.5 ± 21.7‰)의 값을 보이며 외측으로 갈수록 $\triangle^{14}C_{org}$ 값이 증가하는 경향을 나타냄

(라) 리그닌 페놀

- 알칼리성 CuO 산화 반응으로 생성된 리그닌 페놀 농도 및 여러 가지 인덱스 결과를 Table 45와 Fig. 186에 나타냄
- TOC 값으로 보정한 리그닌 페놀 총 농도는 HH23-1058MUC 코어에서 0.24 mg/gTOC~0.66 mg/gTOC (평균 0.40 ± 0.12 mg/gTOC)의 값을 보였으며, HH22-1161MUC 코어에서는 0.07 mg/gTOC~0.19 mg/gTOC (평균 0.14 ± 0.04 mg/gTOC), 그리고 HH22-1159MUC 코어에서는 0.06 mg/gTOC~0.22 mg/gTOC (평균 0.12 ± 0.04 mg/gTOC)의 범위를 보였음

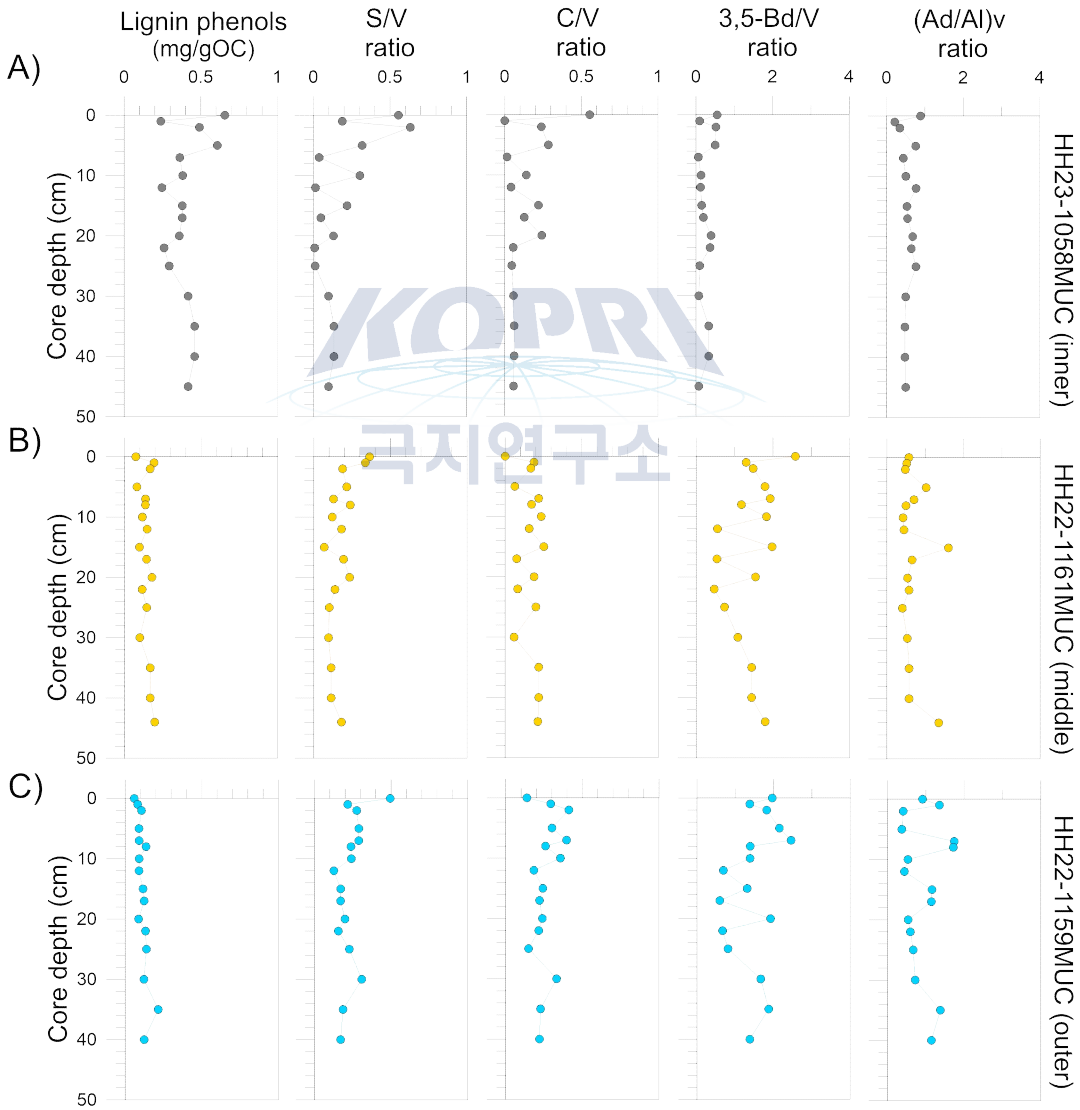


Fig. 186. Depth profiles of lignin phenol parameters for multicores (A) HH23-1058MUC, (B) HH22-1161MUC, and (C) HH22-1159MUC.

Table 45. Results of lignin phenol parameters for multicores HH23-1058MUC, HH22-1161MUC, and HH22-1159MUC.

Core name	Top depth (cm)	Lignin phenols (mg/gOC)	S/V ratio	C/V ratio	3,5-Bd/V ratio	(Ad/Al)v ratio
HH23-1058MUC	0	0.66	0.55	0.55	0.55	0.89
	1	0.24	0.19	0.00	0.09	0.22
	2	0.49	0.63	0.24	0.52	0.35
	5	0.61	0.32	0.28	0.50	0.76
	7	0.36	0.04	0.01	0.06	0.44
	10	0.38	0.30	0.14	0.13	0.50
	12	0.25	0.01	0.04	0.12	0.77
	15	0.38	0.22	0.22	0.15	0.53
	17	0.38	0.05	0.13	0.19	0.55
	20	0.36	0.13	0.24	0.39	0.68
	22	0.26	0.01	0.05	0.37	0.65
	25	0.29	0.01	0.05	0.10	0.77
	30	0.42	0.10	0.06	0.07	0.50
	35	0.46	0.13	0.06	0.33	0.48
	40	0.46	0.13	0.06	0.33	0.48
	45	0.42	0.10	0.06	0.07	0.50
HH22-1161MUC	0	0.07	0.36	0.00	2.59	0.57
	1	0.19	0.34	0.19	1.30	0.52
	2	0.17	0.19	0.17	1.48	0.48
	5	0.08	0.21	0.06	1.79	1.02
	7	0.14	0.13	0.22	1.93	0.71
	8	0.14	0.24	0.17	1.18	0.50
	10	0.12	0.12	0.24	1.83	0.42
	12	0.15	0.18	0.16	0.55	0.44
	15	0.10	0.07	0.25	1.98	1.60
	17	0.14	0.19	0.08	0.54	0.66
	20	0.18	0.23	0.19	1.54	0.54
	22	0.11	0.14	0.08	0.47	0.58
	25	0.14	0.10	0.20	0.73	0.40
	30	0.10	0.10	0.06	1.08	0.53
	35	0.17	0.11	0.22	1.44	0.58
	40	0.17	0.11	0.22	1.44	0.58
	44	0.17	0.11	0.22	1.44	0.58
HH22-1159MUC	0	0.06	0.49	0.14	1.96	0.91
	1	0.08	0.22	0.29	1.38	1.35
	2	0.11	0.28	0.41	1.82	0.41
	5	0.09	0.29	0.30	2.15	0.37
	7	0.09	0.29	0.40	2.46	1.74
	8	0.14	0.24	0.26	1.39	1.71
	10	0.09	0.24	0.36	1.39	0.53
	12	0.09	0.13	0.18	0.69	0.44
	15	0.12	0.17	0.24	1.31	1.16
	17	0.12	0.17	0.22	0.59	1.14
	20	0.09	0.20	0.24	1.92	0.54
	22	0.13	0.16	0.21	0.67	0.59
	25	0.14	0.23	0.15	0.81	0.67
	30	0.12	0.31	0.33	1.66	0.72
	35	0.22	0.19	0.23	1.87	1.38
	40	0.12	0.17	0.22	1.38	1.14

KOPRI 극지연구소

- S/V 및 C/V 비율은 HH23-1058MUC 코어에서 각각 평균 0.18±0.19, 0.14±0.14, HH22-1161MUC 코어에서 각각 평균 0.18±0.09, 0.16±0.08, 그리고 HH22-1159MUC 코어에서 각각 평균 0.23±0.09, 0.26 ± 0.08 의 값을 보임
- (Ad/Al)v 비율은 HH23-1058MUC 코어에서 0.22~0.89 (평균 0.57±0.18), HH22-1161MUC 코어에서 0.40~1.60 (평균 0.63±0.30), 그리고 HH22-1159MUC 코어에서 0.37~1.74 (평균 0.95±0.46)의 값을 보임

(마) 유기물, 유기분자생체지표 및 입도 변화 비교

- 콩스피오르드에서 채취한 세 가지 퇴적물 코어의 총 유기탄소(TOC) 값은 공간적 변화를 보임. 가장 안쪽 코어(HH23-1058MUC)는 평균 TOC 함량이 0.26 wt.%로 가장 낮았으며 가장 바깥쪽 코어(HH22-1159MUC)는 2.2 wt.%로 가장 높은 TOC 함량을 기록함. 또한 TOC/SA 비율은 퇴적물 입자 표면과 결합된 유기탄소(OC)의 양을 나타내며, 해양 및 육상 환경에서 유기물 공급 및 분해 과정을 평가하는 데 중요한 지표(Keil et al., 1997)로 사용되는데 안쪽 코어(HH23-1058MUC)는 가장 높은 비표면적(13.3±1.7 m^2/g)과 가장 높은 평균 입자 크기(10.01± 0.9 μm)를 보임
- 이는 이 지역이 육상 환경에서 유래한 광물의 퇴적이 지배적임을 나타내며, 유기물 함량이 희석됨을 시사함
- D' Angelo et al. (2018)은 역시 콩스피오르드에서 해양 계류장치를 이용해 수집한 퇴적 입자 흐름 중 쇄설성(lithogenic) 물질이 64%에서 78%에 달하는 주요 구성 성분임을 보고하였으며 Svendsen et al. (2002) 역시 콩스피오르드 안쪽 지역이 막대한 양의 광물 물질이 퇴적되는 곳이라고 발표함
- 또한 이 코어의 점토 함량도 세 코어 중 가장 낮으며, 해양에서 기인한 미세 입자가 아닌 육상 기원의 유기물 유입이 지배적임을 뒷받침 한다고 볼 수 있음
- 선행 연구(Kim et al., 2023)에서는 스발바르 피오르드의 퇴적 유기탄소(OC) 중 ^{14}C가 고갈된 유기물의 기원을 식별하기 위해 Petrogenic OC와 Biogenic OC 두 가지 OC 성분을 정의함
- 콩스피오르드 퇴적물에서 OC 기원의 기여도를 더 잘 이해하기 위해 알칼리성 CuO 산화 과정을 통해 얻은 리그닌 페놀을 조사함. 리그닌 페놀은 육상 고등 식물에 의해 독특하게 합성되므로 중요한 육상 생물지표로 널리 사용됨(Hedges and Mann, 1979; Goni et al., 2005).
- S/V 및 C/V 비율은 리그닌의 기원을 나타내며, 고등 관다발 식물에 의해 독특하게 합성됨. 콩스피요르덴 퇴적물 코어의 리그닌 페놀 분석 결과, S/V와 C/V 비율의 범위를 바탕으로, 코어 퇴적물은 대부분 비목질 체와 침엽수 목질 조직의 혼합물로 구성됨.이는 피요르드 표면 퇴적물에서 혼합된 OC 신호를 나타낸 이전 연구와 일치함
- 리그닌 페놀 농도는 안쪽 코어(HH23-1058MUC)에서 가장 높았으며, 다른 두 코어보다 높았음
- 3,5-Bd/V 비율은 복잡한 육상 유기 혼합물의 분해 상태를 나타내며, 수계 환경에서

토양 유래 OC와 관다발 식물 유래 OC의 상대적 기여도를 평가하는 지표로 사용되며 안쪽 코어(HH23-1058MUC)의 3,5-Bd/V 값이 가장 낮았음

- (Ad/Al)v 비율은 리그닌의 산화 분해 상태를 나타내며, 0.3 미만은 상대적으로 신선한 관다발 식물의 잔해를, 0.5 초과는 상당히 degradation 과정이 많이 진행된 토양과 관련됨(Hedges and Ertel, 1982; Goñi and Hedges, 1992). 콩스피오르드 코어의 대부분의 샘플은 (Ad/Al)v 비율이 0.5 이상으로 나타남
- 생물 기원 OC는 최근 고정된 육상 및 해양 생물질뿐만 아니라 토양에서 유래된 오래된 OC도 포함하며, 이는 빙하 침식 및/또는 융해수 배출을 통해 피오르드로 유입될 수 있음(Kim et al., 2023).
- 식물유래, 토양 유래, 해양 유래 OC와 같은 생물 기원 OC 출처의 (Ad/Al)v 비율과 리그닌 페놀 농도, 그리고 탄소안정동위원소비 값을 함께 Fig. 187에 나타냄. 멀티코어 퇴적물 샘플의 (Ad/Al)v와 리그닌 페놀 농도는 토양 시료보다 평균적으로 낮았지만, 모든 토양 시료의 (Ad/Al)v와 리그닌 페놀 농도 범위는 코어 퇴적물 시료의 대부분을 포괄함

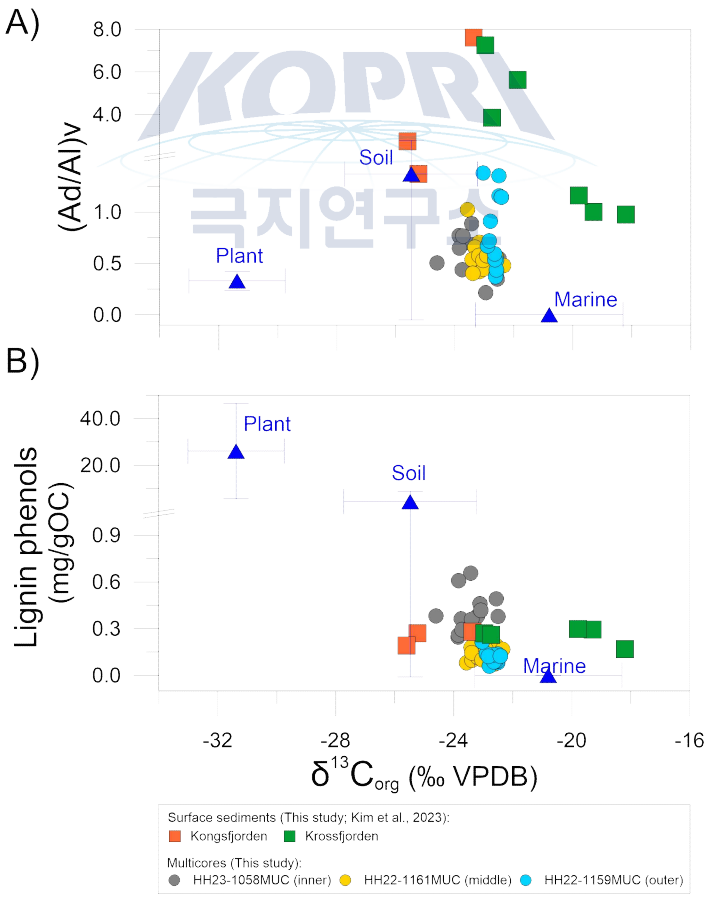


Fig. 187. Scatter plots of (A) $\delta^{13}C_{org}$ vs. (Ad/Al)v and (B) $\delta^{13}C_{org}$ vs. lignin phenols.

- 따라서 본 연구에서는 퇴적 유기 탄소(OC) 기원에 대해 네 가지 OC 기원을 정의

함. petrogenic OC, 토양 기원(soil-derived), 식물 기원(plant-derived), 해양 기원(marine OC)으로 구분함. 그리고 콩스피오르드 퇴적물 내 OC의 상대적인 비율을 추정하기 위해 $\triangle^{14}C_{org}$, $\delta^{13}C_{org}$ 및 리그닌 페놀 농)를 기반으로 한 네 가지 OC 기원에 대해 Monte Carlo (MC) 분석을 적용함. 각각의 OC 기원에 대한 end-member 값은 이 지역의 식생, 토양, 그리고 coal 시료 등에 대한 유기물 분석 결과를 바탕으로 한 Kim et al. (2023)에 보고된 값을 사용하고, 그 결과를 Fig. 188에 나타냄

- Petrogenic OC 비율은 가장 안쪽 코어 HH23-1058MUC에서 가장 높았으며, 그다음으로 코어 HH22-1161MUC와 HH22-1159MUC 순으로 나타남. 반면, 해양 기원 OC 비율은 가장 바깥쪽 코어 HH22-1159MUC에서 가장 높았으며, 그다음으로 HH22-1161MUC와 HH23-1058MUC 순으로 나타남. 식물 기원 OC 비율은 다른 주요 OC 기원인 암석 기원과 해양 기원에 비해 유의미하지 않은 비율로 나타남. 그러나 토양 기원 OC는 주로 코어 HH22-1161MUC와 HH22-1159MUC에서 분포하여 피오르드 중간 지역 주변에 토양 기원 OC의 특정 유입원이 존재함을 시사함. 이는 강 유출이나 기타 육지 기원의 유입이 이 지역으로 토양 물질을 운반한 결과로 해석됨
- 이를 뒷받침하기 위해, Ahn et al. (2024)의 접근법을 따라 토양 기원의 OC 유입과 관련된 입자 크기 분포 변화를 식별하기 위해 입자 크기를 활용한 End-member (EM) 모델링을 추가로 활용함. 세 개의 퇴적물 코어에서 입자 크기 분포 패턴을 분석하여 네 가지 EM 그룹을 식별함. 이를 위해 q 값($R2 > 0.6$)을 도출하고, q 값에 따른 입자 크기 분포를 비교함. 최종적으로, 세 개 코어의 q 값과 q 값에 따른 입자 크기 분포를 Fig. 189에 제시함
- EM1a와 EM1b는 비교적 미세한 입자로 구성되었으며, EM2는 거친 입자가 대부분을 차지하였음. EM3은 광범위한 입자 크기 분포와 가장 거친 입자를 특징으로 함. EM 결과에 따르면, EM1a와 EM1b는 주로 가장 미세한 입자로 구성되어 있으며, 세 개 코어 모두에서 분포함. 일반적으로 미세한 입자는 수층 부유물이나 탁류 흐름에 의한 퇴적을 나타냄(Zaborska et al., 2006). 이는 주로 외해 환경에서 기원한 미세 입자의 영향이 피오르드 안쪽까지 미치는 것을 시사함. 실제로 따뜻하고 염분이 높은 대서양 해수가 Kongsfjorden 전체에 직접 영향을 미친다는 보고가 있음(D'Angelo et al., 2018)

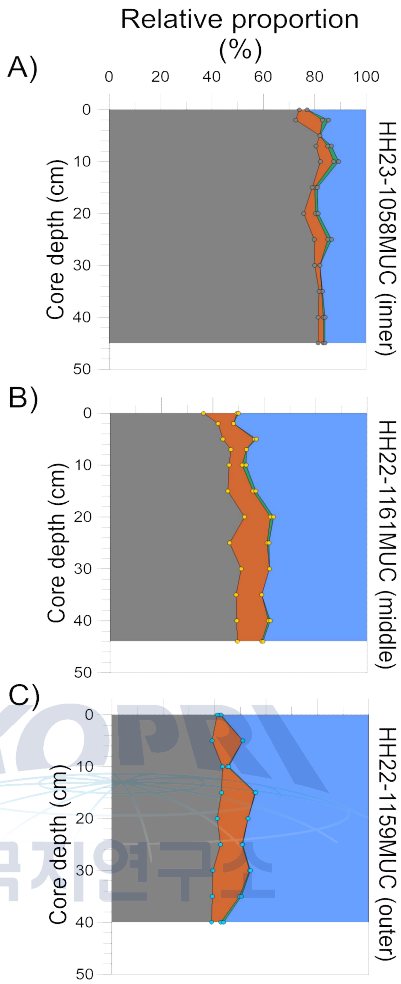


Fig. 188. Depth profiles of the relative proportions of four OC sources for multicores (A) HH23-1058MUC, (B) HH22-1161MUC, and (C) HH22-1159MUC: gray (petrogenic OC), brown (soil-derived OC), green (plant-derived OC), and blue (marine OC).

- 반면, 거친 입자로 구성된 EM2는 가장 안쪽 코어 HH23-1058MUC에서만 나타났으며, 가장 거친 입자로 특징지어진 EM3은 콩스피오르드 중 중간 지역에 위치한 코어 HH22-1161MUC에서만 나타남. 실제로 콩스피오르드에는 여러 강과 하천이 있으며, 주로 피오르드 안쪽과 중간 지역에 집중되어 있음. Bayelva 강과 같은 빙하와 연결된 가장 큰 하천 시스템으로, 육상기원 유기물의 유입에 중요한 역할을 함 (D'Angelo et al., 2018; Husum et al., 2019). 일반적으로, 콩스피오르드 퇴적물에서 상대적으로 높은 비율의 coarse한 입자의 물질은 이 지역에서 녹는 빙하에 의해 주로 발생하며, 이는 거친 입자가 외해로 운반될 수 있는 주요 메커니즘이라고 할 수 있음

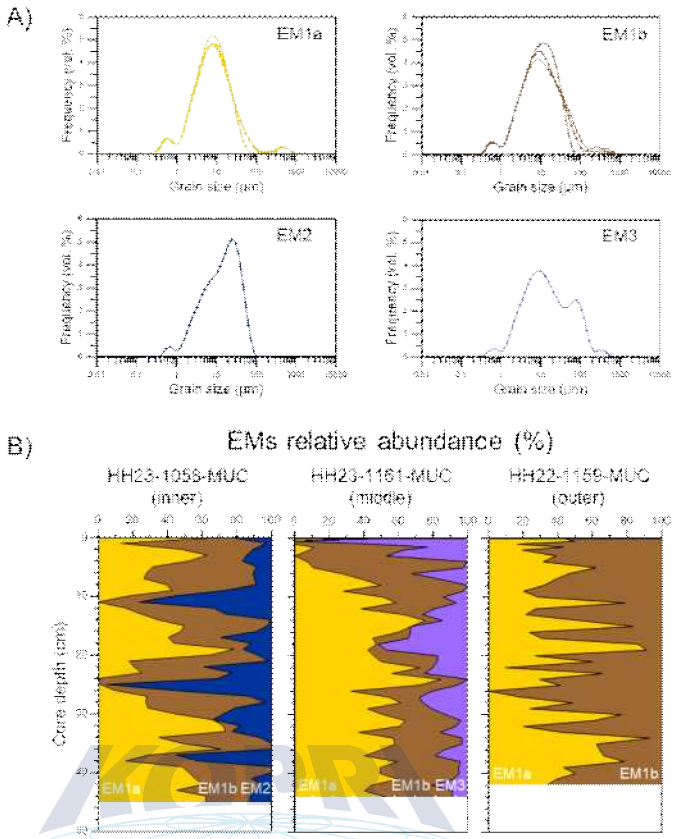


Fig. 189. Depth profiles of (A) grain-size distributions and (B) relative abundances of EMs for multicores HH23-1058MUC, HH22-1161MUC, and HH22-1159MUC.

- 최근 시간 척도에서 육상 유기탄소(OC) 플럭스를 조사하기 위해, 각 OC 의 축적률(Accumulation rate; AR)을 계산함. AR은 퇴적률(SR), 밀도(WBD), 공극률(PO)을 기반으로 결정됨(Gealy, 1971). WBD와 PO는 샘플의 수분 함량 및 건조 된 시료의 밀도를 사용하여 계산됨(Hamilton, 1971). $^{210}Pb_{tot}$ 값을 사용하여 코어 HH22-1161MUC 및 HH22-1159MUC의 연대 모델을 기반으로 AR을 계산함. HH22-1161MUC의 퇴적률은 0.36 cm/yr, HH22-1159MUC의 퇴적률은 0.12 cm/yr로 나타났으며, 이는 콩스피오르드의 다른 퇴적물 코어에서 관찰된 0.15 cm/yr와 유사함(Zaborska et al., 2006)
- 일반적으로 빙하와 가까운 피오르드 내 지역에서는 빙하 활동으로 인한 융해수 및 퇴적물 유입 증가로 인해 퇴적률이 더 높을 수 있다는 보고가 있음(Zaborska et al., 2006)
- 총 유기탄소의 accumulation 값은 은 HH22-1161MUC에서 0.47±0.06 g/cm^2/yr, HH22-1159MUC에서 0.26±0.03 g/cm^2/yr로 나타남
- OC 기원에 따른 accumulation rate 결과를 Fig. 190에 나타냄

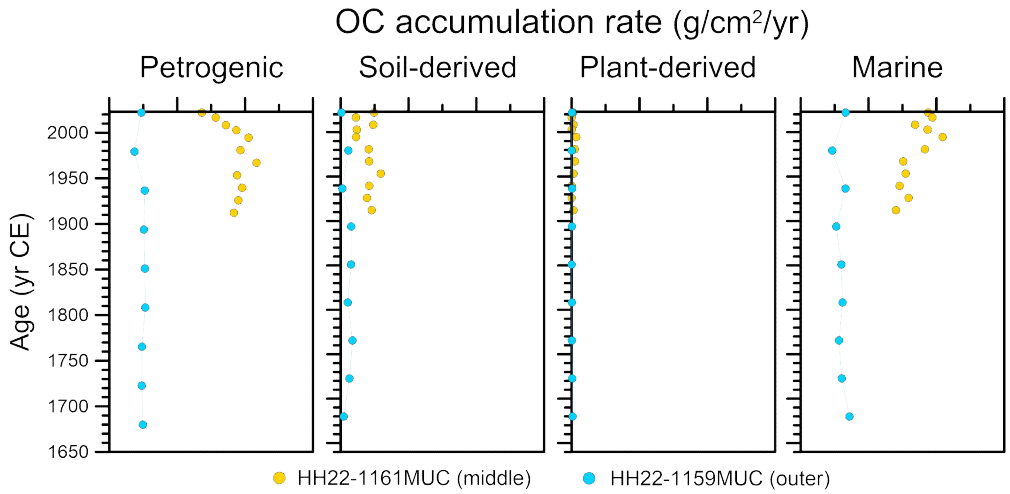


Fig. 190. OC accumulation rates of four OC sources: (A) petrogenic, (B) soil-derived, (C) plant-derived, and (D) marine OC for multicores HH22-1161MUC, and HH22-1159MUC, plotted against age.

- HH22-1161MUC에서 petrogenic OC의 accumulation rate은 0.18 ± 0.02 g/cm^2/yr, biogenic OC 에서는 marine OC가 가장 높은 AR을 보였으며(0.17 ± 0.03 g/cm^2/yr), 이는 토양 유래 OC보다 24배, 식물유래 OC보다 100배 이상 높았음
- HH22-1159MUC의 petrogenic OC의 accumulation rate은 Method 2에서 0.05 ± 0.01 g/cm^2/yr로 나타남. biogenic OC 중 마찬가지로 해양기원 OC가 가장 높은 AR을 보였으며(0.06 ± 0.01 g/cm^2/yr) 모든 petrogenic 및 biogenic OC에서 HH22-1161MUC 코어가 HH22-1159MUC 코어보다 더 높은 AR 값을 보임
- 최근 수십 년 동안(약 1900년대부터) HH22-1161MUC의 해양 OC의 AR은 증가하는 경향을 보인 반면, petrogenic OC는 감소하는 경향을 보임
- HH22-1159MUC에서는 petrogenic 및 해양 OC AR이 HH22-1161MUC에 비해 뚜렷한 변화를 보이진 않음. 1900년 이후 콩스피오르드내로 대서양 해수 유입 및 생산성이 증가했다고 보고된 바 있으며(Husum et al., 2019)
- 호수 퇴적물에서 유래한 여름 기온 연구에서도 1900년 이후 급격한 기온 증가를 보여줌(D' Andrea et al., 2012). 니알슨 기지 주변에서 연평균 기온이 1975~2014년 동안 전지구 평균보다 4배 이상 빠르게 증가했다고 보고됨(Wei et al., 2016)
- 이러한 급격한 변화에 따라 콩스피오르드는 스발바르 지역에서 가장 후퇴한 지역 중 하나이며(Blaszcyk et al., 2013), 시간적 변화와 유기물의 축적률은 최근 기후 변화, 특히 Atlantic 유입 증가 및 빙하 후퇴가 퇴적 유기물의 플럭스에 미친 영향을 반영한다고 볼 수 있으며, 급격한 기후 환경 변화에 콩스피오르드 내의 생지화학적 순환 및 지역적 탄소순환에 매우 큰 영향을 미치고 있다고 볼 수 있음
- 본 연구 내용을 바탕으로 콩스피오르드 멀티코어 퇴적물의 리그닌 바이오마커 분석을 통한 최근 수백 년간의 유기물 기원 거동 파악 연구에 대한 논문을 국제할술지(SCI)에 투고(2월) 및 게재(8월)

나) 스발바르 피오르드 표층퇴적물의 DNA 분석을 통한 진핵생물 다양성 비교 연구

(1) 연구 목적

- 지난 2022년 한-노 국제공동탐사를 통해 9개 퇴적물 코어를 확보함(Fig. 191, Table 46). 4차 년도에는 이 중 0-5cm 표층 퇴적물에 대한 총 63개 시료를 대상으로 하여 진핵생물의 종 다양성 및 환경과의 관계를 분석함

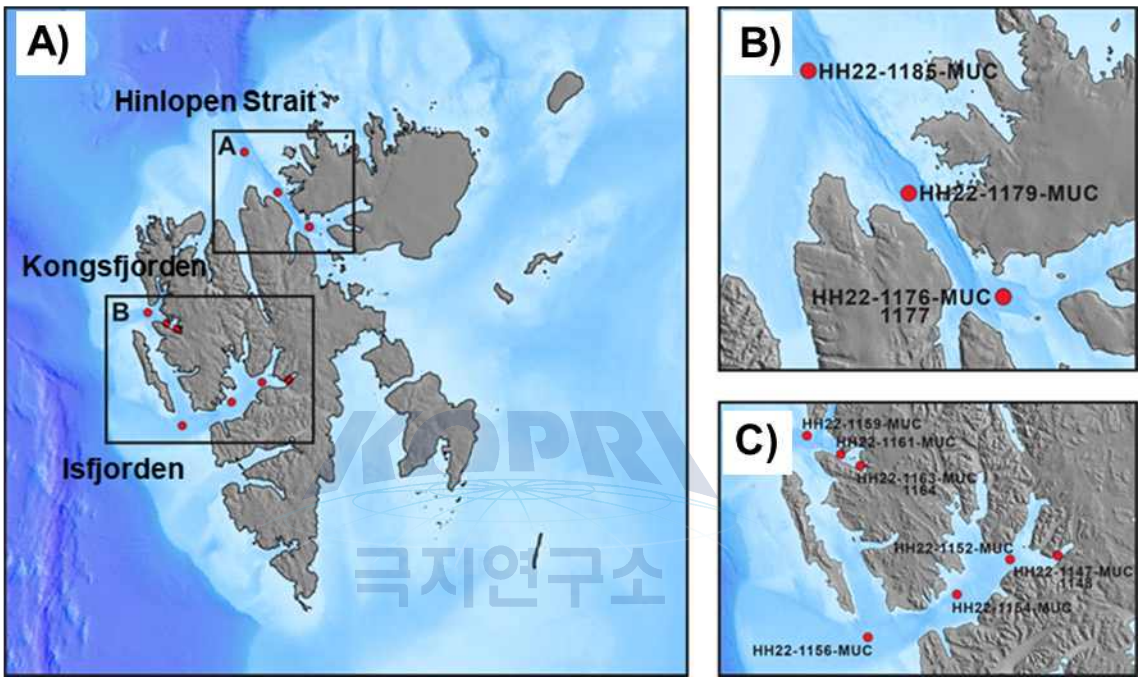


Fig. 191. Map showing the sampling sites in (A) Svalbard fjords, (B) Hinlopen Strait, and (C) the Kongsfjrden and Isfjorden system.

Table 46. Information on sampling sites investigated in this study.

No.	Station	Latitude(N)	Longitude(E)	Sampling Site	Sampling Date
1	HH22-1152-MUC	78° 24.27'	015° 51.04'	Isfjorden (inner)	2022.07.23
2	HH22-1154-MUC	78° 15.71'	014° 32.48'	Isfjorden (midle)	2022.07.23
3	HH22-1156-MUC	78° 05.00'	012° 26.21'	Isfjorden (outer)	2022.07.23
4	HH22-1159-MUC	79° 02.91'	011° 08.14'	Kongsfjorden (outer)	2022.07.24
5	HH22-1161-MUC	78° 57.26'	011° 57.40'	Kongsfjorden (middle)	2022.07.24
6	HH22-1163-MUC	78° 53.78'	012° 26.25'	Kongsfjorden (inner)	2022.07.24
7	HH22-1176-MUC	79° 39.08'	018° 48.92'	Hinlopen Strait	2022.07.27
8	HH22-1179-MUC	79° 58.58'	017° 33.45'	Hinlopen Strait	2022.07.27
9	HH22-1185-MUC	80° 21.12'	016° 09.36'	Hinlopen Strait	2022.07.28

(2) 연구 방법

(가) 생물정보 분석

- 분류군 할당과 알파 및 베타 다양성 분석은 Qimme2-2020.2 파이프라인을 이용하여 진행되었으며, 통계 분석 및 시각화는 RStudio (2022.12.0+353) 프로그램을 이용하여 수행함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 진핵생물 분류군

- 진핵생물에 대한 분류학적 분석 결과, Stramenopiles (부등편모조류 —규조류 등), Alveolata (피하낭류 —섬모충류, 와편모조류 등), Rhizaria (리자리아 —아메바편모충류)가 전반적으로 높은 비율 차지하였음(Fig. 192)
- 단, 콩스피오르드의 안쪽에 위치한 1163 코어에서는 SAR 분류군이 거의 나타나지 않는 등 나머지 코어에서와 다른 양상을 보이고 있음

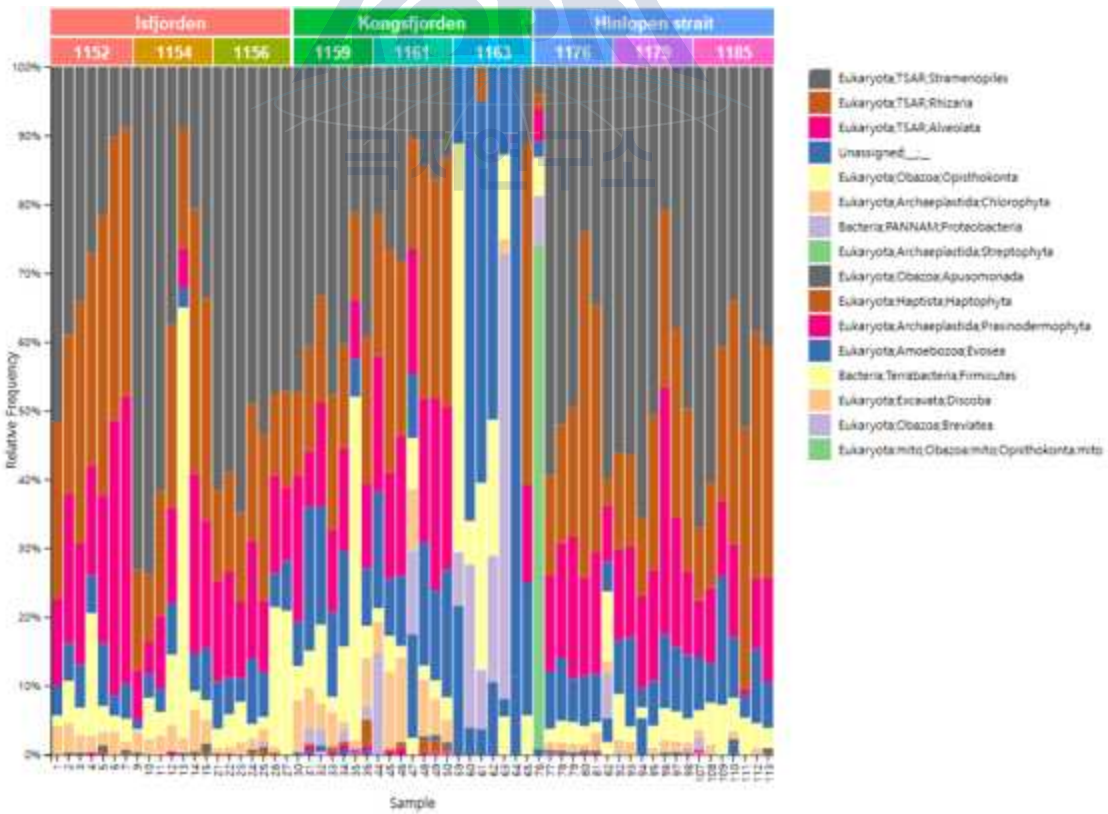


Fig. 192. Taxonomy plot for eukaryotes at each core depth.

(나) 알파 다양성

- 알파 다양성 분석 결과, 종의 풍부도(Observed OTUs, Chao1, Faith PD)는 힌로펜 해협의 남쪽 1176 코어에서 가장 높고, 이스피오르드 및 콩스피오르드의 안쪽 1152 및 1159 코어에서 낮게 나타났으며, 종의 균등도(Shannon, Simpson)는 콩스피오르드 중간지점인 1161 코어에서 가장 높고, 이스피오르드의 중간지점인 1154 코어에서 가장 낮았음(Fig. 193)
- 각 샘플 깊이별 종 풍부도는 Fig. 194에서 확인할 수 있음

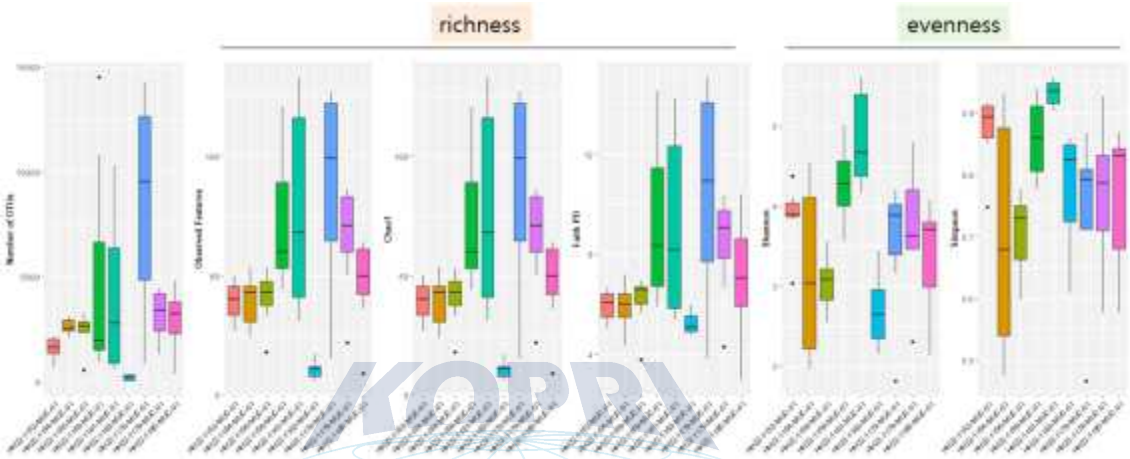


Fig. 3. Comparison of alpha diversity between nine cores investigated.

KOPRI
극지연구소

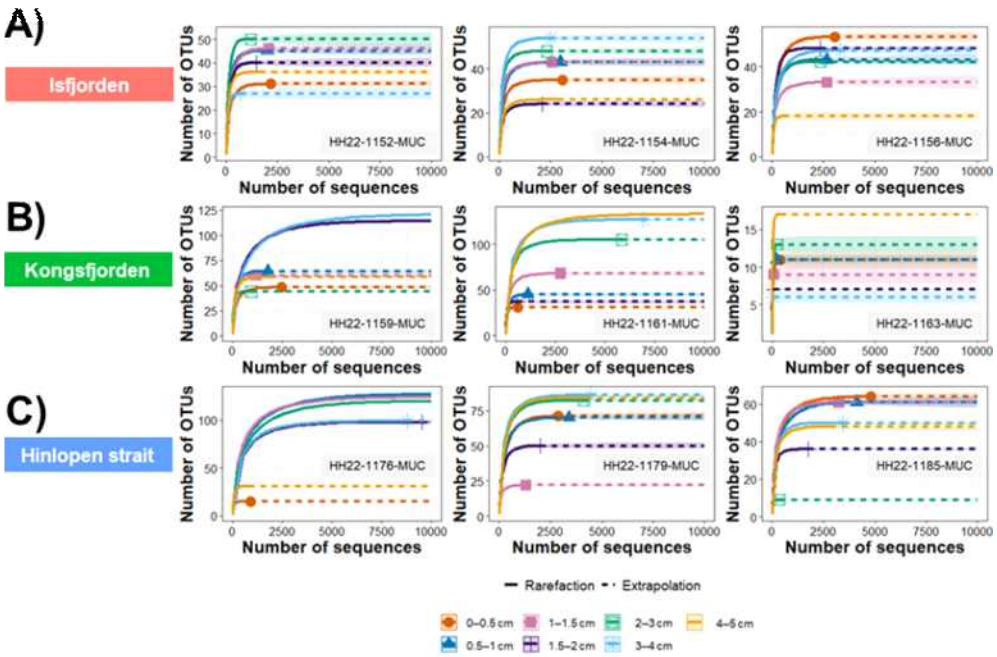


Fig. 4. Rarefaction curves showing numbers of OTUs in each sample for (A) Isfjorden, (B) Kongsfjorden, and (C) Hinlopen Strait.

(다) 베타 다양성

- 베타 다양성 분석 결과, 힌로펜해협 및 이스피오르드는 상대적으로 유사한 군집구조를 가지는 것으로 보이며, 콩스피오르드는 다른 군집구조를 가지는 것으로 보임(Fig. 195)
- OTU 개수는 힌로펜해협(379개)에서 가장 많았으며, 이어서 콩스피오르드(342개), 이스피오르드(173개) 순서였음. 힌로펜해협과 콩스피오르드 사이에는 공통으로 나타나는 OTU가 많았으며, 고유하게 나타나는 OTU도 많았음. 특히, 힌로펜해협의 남쪽 1176 코어와 콩스피오르드의 바깥쪽 1159 코어에서 고유하게 나타나는 OTU가 많았음(Fig. 196)
- 마지막으로, nMDS 분석을 통해 샘플들간의 유사성과 환경변수와의 관계를 확인해 보았음(Fig. 197). 분석 결과, 콩스피오르드 안쪽의 1163 코어는 다른 코어의 샘플들과 유사성이 낮으며, d13C와 유의한 상관관계를 가지고 있음을 확인하였음($p<0.05$). 해당 코어가 피오르드와 근접하게 위치하여 빙하 융빙수와 육상 기원 유기물질 유입의 영향을 받았을 것으로 해석할 수 있음

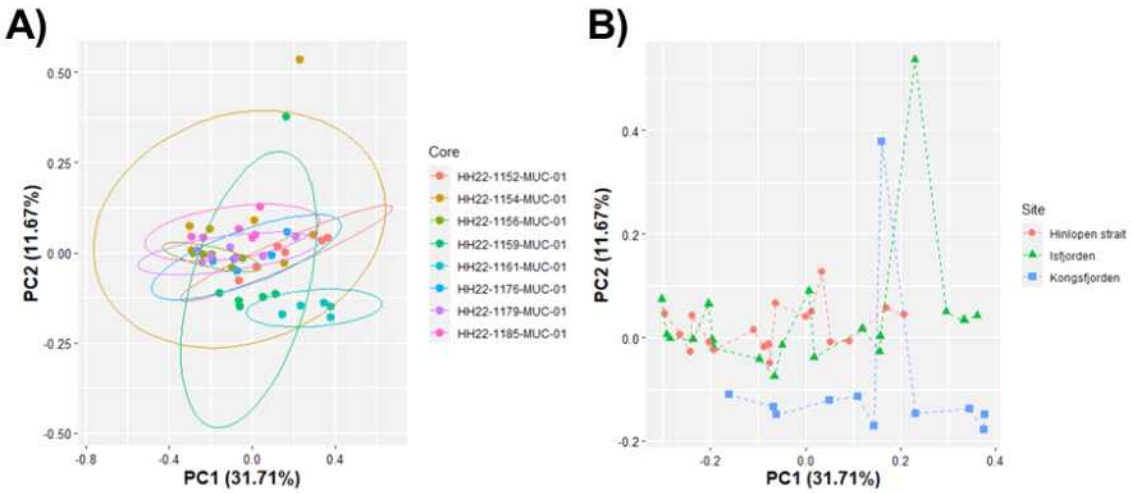


Fig. 195. PCoA plots based on the Bray–Curtis dissimilarity matrix between (A) cores and (B) sites.

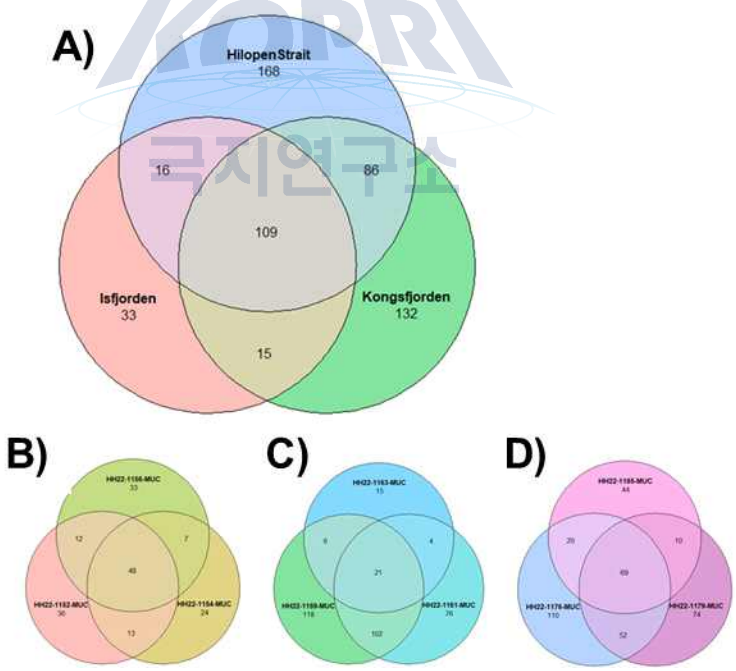


Fig. 196. Venn diagrams representing the number of OTUs among (A) three study areas and (B), (C), and (D) multicores in each study area.

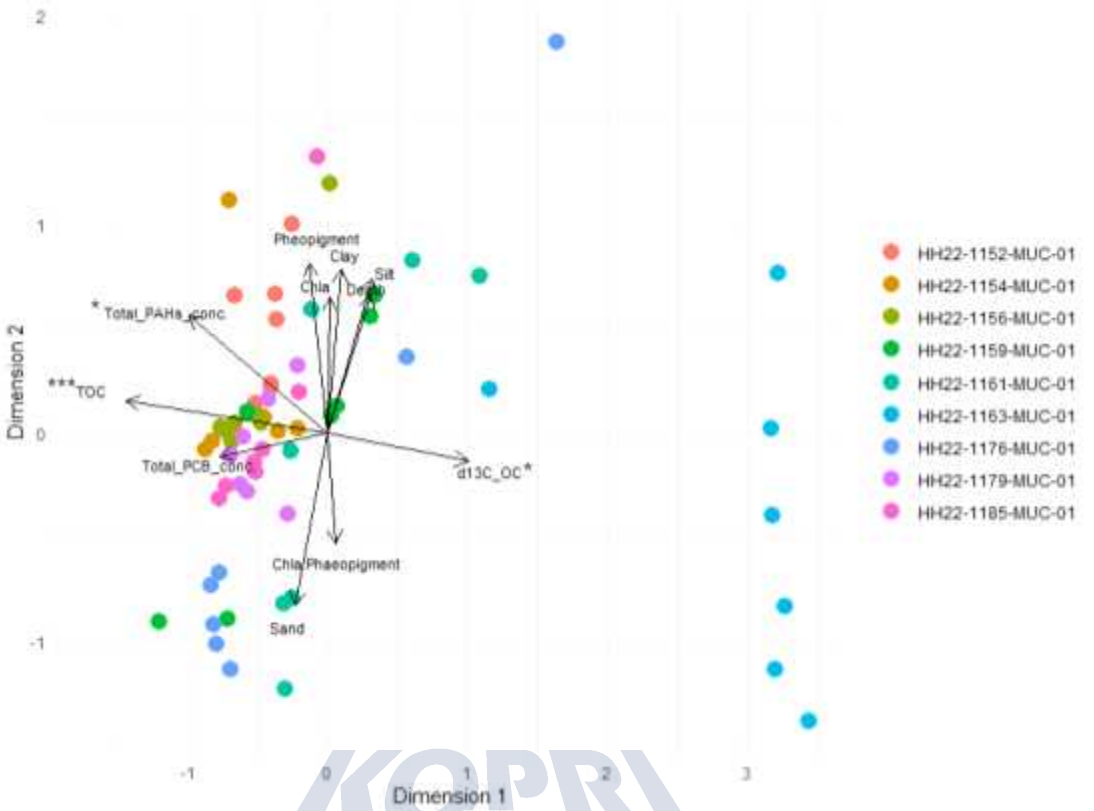


Fig. 197. nMDS plot with environmental vectors.

KOPRI 극지연구소

다) 스발바르 저서성 유공충 분포 연구

(1) 연구 목적

- 스발바르의 이스피오르덴, 콩스피오르덴, 힌로펜 해협에서의 살아있는 저서 유공충의 분포 파악(Fig 198)

(2) 연구 방법

- 2022년 8월 RV Helmer Hanssen 크루즈 동안, 멀티코어러 장비를 이용해 총 9개의 정점에서 멀티코어를 획득함(Fig 198)
- 총 9개 정점에서 살아있는 저서성 유공충은 퇴적물의 조립질 퇴적물(>125 μmm)과 세립질 퇴적물(63- 125 μm) 구간으로 나누어 연구를 진행함

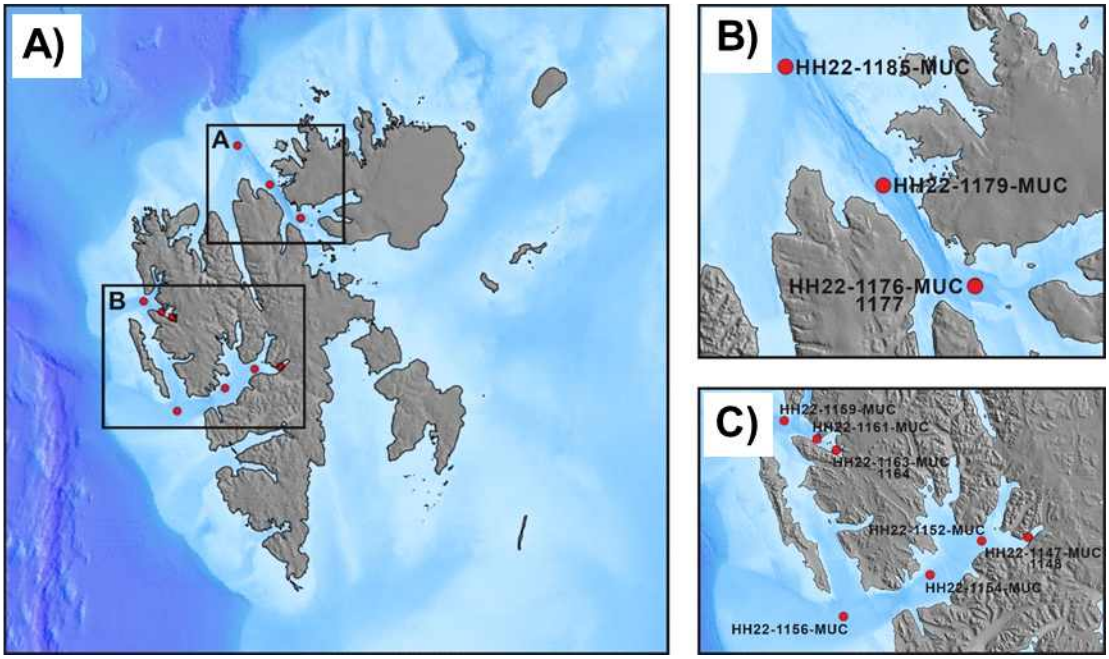


Fig. 198. (A) General map showing the study areas with location of the stations investigated in Svalbard dduring the HH22 cruise, and more detailed maps for (B) Hinlopen Strait, and (C) Kongsfjorden and Isfjorden.

KOPRI 극지연구소

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 조립질 퇴적물 내 저서성 유공충의 총 개체 밀도(TSS)와 주요 종분포

- 상층 5 cm 퇴적물의 거친 입자에서 관찰된 살아있는 저서성 유공충의 총 개체 밀도(Total Standing Stock, TSS)는 정점별, 그리고 피오르별로 매우 상이하게 나타남(Fig. 199)
- 이스피오르드는 TSS가 내측 정점(St. 1152, 1687 indiv. cm^{-2})에서 외측 정점(St. 1156, 8091 indiv. cm^{-2})으로 갈수록 명확히 증가
- 콩스피오르드 역시 내측 정점(St. 1163)에서 피오르와 바다가 만나는 외측 정점(St. 1159)으로 갈수록 TSS가 증가하지만, 최대 TSS는 중간 정점(St. 1154)에서 관찰됨
- 힌로펜 해협은 북쪽 정점(St. 1185, 7521 indiv. cm^{-2})에서 남쪽 정점(St. 1177, 11389 indiv. cm^{-2})으로 TSS가 증가함

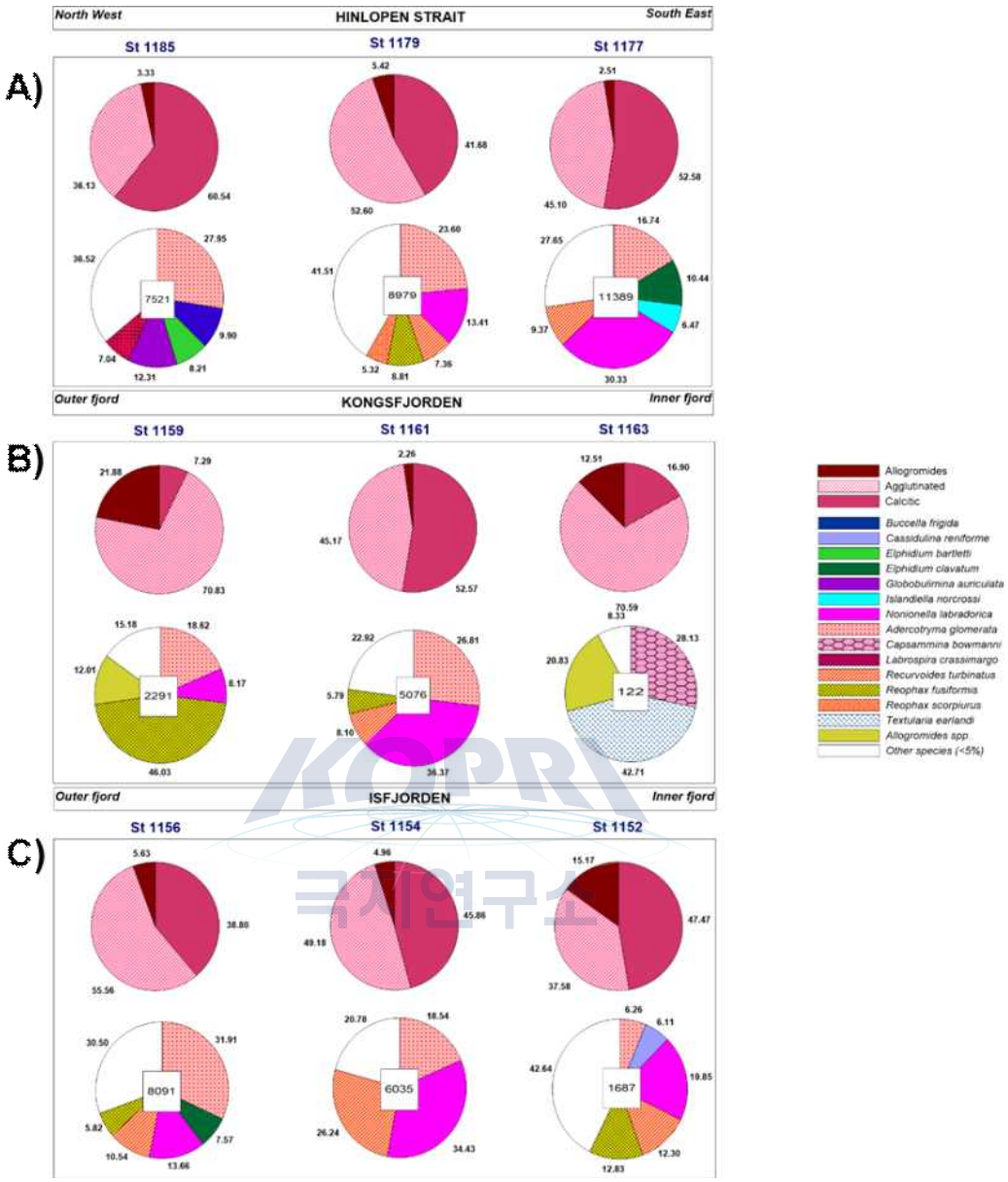


Fig. 199. Distribution of the major taxa (>7% in at least one sample of (A) Hinlopen Strait, (B) Kongsfjorden, and (C) Isfjorden and the proportion of the agglutinated, calcitic species and allogromids taxa. The numbers in the center of the pie charts corresponds to the total standing stock for the whole in number of individuals for a surface area of 100 cm^2 .

- 응결형(agglutinated)과 석회형(calcitic) 저서 유공충의 비율은 피오르드마다 상이함
- 이스피오르드는 석회형 종의 비율이 피오르드 외측으로 갈수록 감소함
- 콩스피오르드는 내측과 외측 정점에서 응결형 종이 70%로 우세한 반면, 중부 정점(St. 1154)에서 석회형 종이 52% 이상을 차지함
- 힌로펜 해협은 남쪽(52%)과 북쪽(60%) 정점에서 석회형 종이 우세한 반면, 해협 중부에서 응결형 종이 52% 이상을 차지함

- 조립질 퇴적물 내에서 일부 연질벽(allogromid) 유공충도 관찰/채집되었으며, 이들의 분포 역시 상당히 다양하게 나타남: 1) 힌로펜 해협은 비율이 5% 이하로 매우 적었으며, 2) 콩스피오르드는 St. 1159에서 최대 21%까지 비교적 많은 반면, St. 1161에서 2%로 낮음, 3) 이스피오르드는 St. 1152에서 전체 개체군의 15%를 차지하는 반면, St. 1154와 St. 1156에서는 약 5%로 감소
- 콩스피오르드는 St. 1163에서 응결형 유공충(*Textularia earlandi, Capsammina bowmanni*)과 연질벽 유공충이 지배적이며 독특한 개체군 구성을 보임
- St. 1161에서는 *Nonionellina labradorica*와 *Adercotryma glomerata*가 지배적인 반면, St. 1159에서는 *Reophax fusiformis*와 *A. glomerata*가 우세
- 이스피오르드는 *N. labradorica* 모든 정점에서 풍부하며, St. 1154에서는 최대 34%를 차지함. *Adercotryma glomerata*도 이스피오르드에서 풍부한 편이며 St. 1156에서 거의 32%를 차지. *Recurvoides turbinatus*도 비교적 풍부한 편으로, St. 1154에서 최대 26%를 차지
- 힌로펜 해협은 *N. labradorica*와 *A. glomerata*가 우세하지만, St. 1185에서는 *N. labradorica*가 나타나지 않음. 그러나, 일반적으로 부영양 환경을 지시하는 종인 *Globobulimina auriculata*와 대서양 해수의 영향을 지시하는 종인 *Bucella frigida*가 확인됨

(나) 퇴적물 코어 상부 5 cm 조립질 퇴적물 내 주요 종분포

- Fig. 200은 퇴적물 코어 상부 5 cm에서 살아있는 저서성 유공충 주요 종의 수직 분포를 보여줌. 일반적으로 밀도는 표층에서 하층으로 갈수록 감소하며, 약 1 cm 깊이에서 최대 밀도를 보이는 경향을 보임. 퇴적물 코어 5 cm 하부로 가면서 산소가 감소하고 유기물 분해가 이루어지는 환경으로 인해 밀도가 매우 낮아짐
- 다음과 같은 종들은 퇴적물 코어 상부 2 cm에 제한적으로 분포: *Recurvoides turbinatus, Reophax fusiformis, Reophax scorpiurus, Cassidulina reniforme, Globobulimina auriculata, Elphidium bartletti, Islandiella norcrossi.*
- 이는 산소가 풍부하고 상대적으로 신선하며 분해되지 않은 유기물을 선호함을 보여줌
- 다른 종인 *Nonionellina labradorica*는 최대 밀도가 2-3 cm 구간에서 관찰되지만, 4 cm 깊이까지도 발견됨
- 마지막으로 *Adercotryma glomerata*와 같이 퇴적물 하부까지 분포하면서 명확한 수직 분포 양상이 없는 몇몇 종도 확인됨

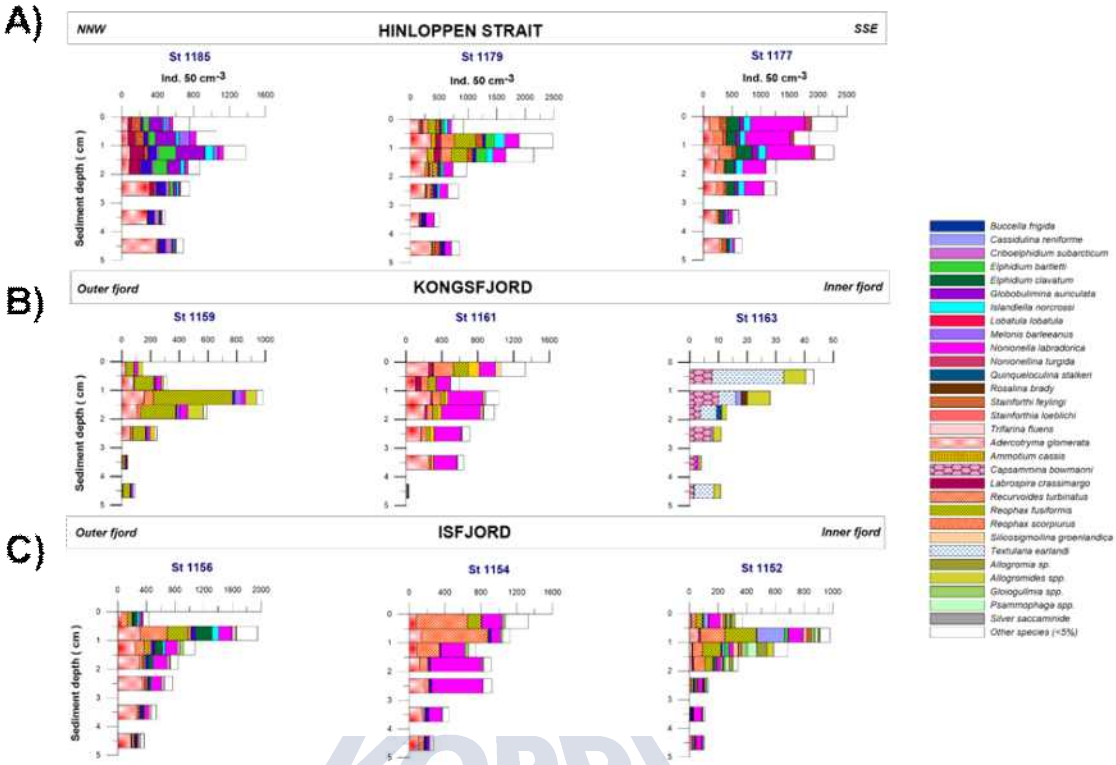


Fig. 200. Vertical distribution of the major taxa (>7% in at least one sample of (A) Hinlopen Strait, (B) Kongsfjorden, and (C) Isfjorden. Density is given by the number of individual for 50 cm^3.

(다) 세립질 퇴적물 내 저서성 유공충의 총 개체 밀도(TSS)와 주요 종분포

- 세립질 퇴적물 내 TSS(Fig. 201)는 조립질 퇴적물에서 관찰된 경향과 거의 동일하지만, 밀도가 더 높음
- 이는 세립질 퇴적물 내 유공충이 더 작고, 작은 부피의 퇴적물에서 더 풍부할 수 있기 때문임. 힌로펜 해협의 TSS는 평균적으로 조립질 퇴적물에 비해 세립질 퇴적물에서 3배에 달함. 콩스피오르드는 외측 및 중부 정점에서 TSS가 약 8배 높고, 내측 정점에서 40배 더 높음. 내측 정점에서 조립질 퇴적물 내 살아있는 유공충이 거의 발견되지 않음. 이스피오르드는 TSS가 일반적으로 조립질 퇴적물보다 3배 더 높지만, 중부 정점(St. 1154)에서는 조립질 퇴적물에서 TSS가 더 높음
- 주요 종들은 조립질 퇴적물 에서 발견된 종들과 대부분 다르게 나타남. 힌로펜 해협은 *Adercotryma glomerata*가 지배적이며, 이는 조립질 퇴적물 내에서도 주요 군으로 나타남. *Elphidium clavatum*은 힌로펜 해협 3 정점 모두에서 관찰되지만, 상대적으로 적은 양으로 남쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 보임. 북부 정점 St. 1185는 또한 *Textularia torquata*가 지배적이며, St. 1179에서 이 종은 상대적으로 낮은 비율로 발견됨. 남부 정점 St. 1177에서는 전혀 발견되지 않음. *Bolivina pseudopunctata*는 중부 및 남부 정점에서만 관찰되었으며, St. 1177 정점에서는 *Stainforthia feylingi*와

*Nonionellina labradorica*가 상대적으로 큰 비율을 차지함

- 콩스피오르드는 외측 및 중부 정점에서 *Stainforthia feylingi*와 *Adercotryma glomerata*가 지배적이며, *Bolivina pseudopunctata*는 중부 정점 St. 1161에서 거의 19%를 차지하지만, 외측 정점 St. 1159에서는 5%에 불과함. 내측 정점 St. 1163에서는 응결형 종인 *Textularia earlandi*(70%)와 S*piroplectammina biformis* (15%)가 대부분을 차지
- 이스피오르드는 일반적으로 *S. feylingi*가 우세하며, 외측 정점 St. 1156에서는 A. glomerata와 *T. torquata*가 각각 20%와 14%를 차지함. 중부 정점 St. 1154에서는 *N. labradorica* (13%)와 *S. biformis* (10%)도 주요 종에 해당함. 마지막으로 내측 정점 St. 1152에서는 *S. biformis* (23%)와 *T. earlandi* (9%)가 잘 관찰됨
- 조립질 퇴적물 내 응결형 대 석회형 저서성 유공충의 비율이 피오르드 별로 상이함 (Fig. 202). 이스피오르드는 모든 3개의 정점에서 석회형 종의 비율이 거의 같고, 피오르드 밖으로 갈수록 감소함. 콩스피오르드는 내측 정점 St. 1163에서 응결형 종이 우세하며 (90%), 중부 정점 St. 1161에서는 최소 (35%)로 나타남. 외측 정점 St. 1159에서는 석회형과 응결형 유공충이 거의 동일함
- 힌로펜 해협은 북부 정점 St. 1185에서 석회형 종이 우세하며 (65%), 중부 및 남부 정점에서는 응결형 종이 우세함 (각 60%와 61%)

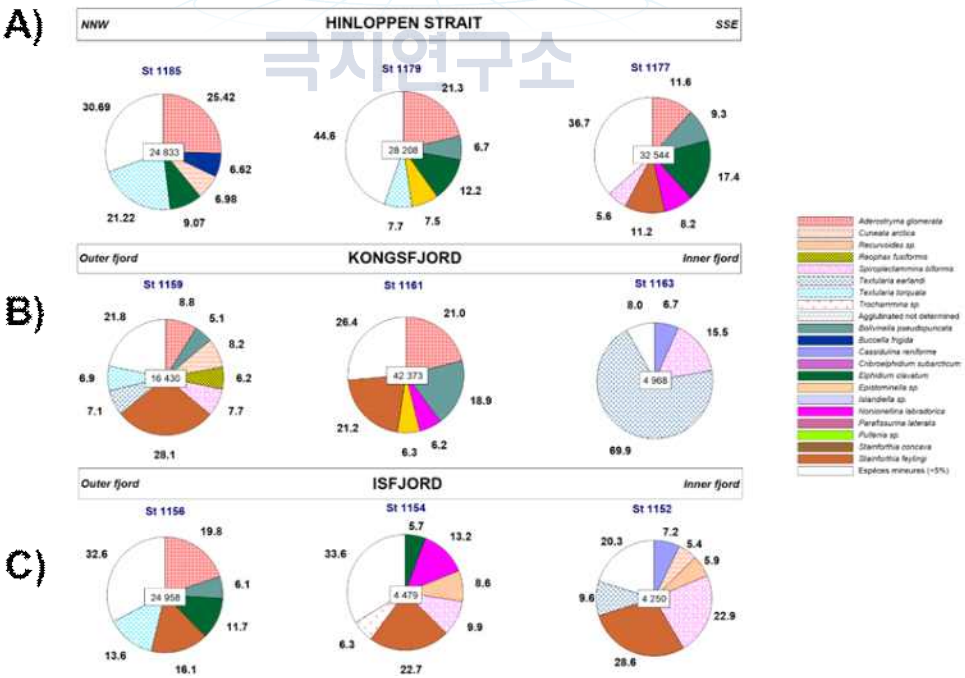


Fig. 201. Distribution of the major taxa (>7% in at least one sample of (A) Hinlopen Strait, (B) Kongsfjorden, and (C) Isfjorden. The numbers in the center of the pie charts corresponds to the total standing stock for the whole in number of individuals for a surface area of 100 cm^2 .

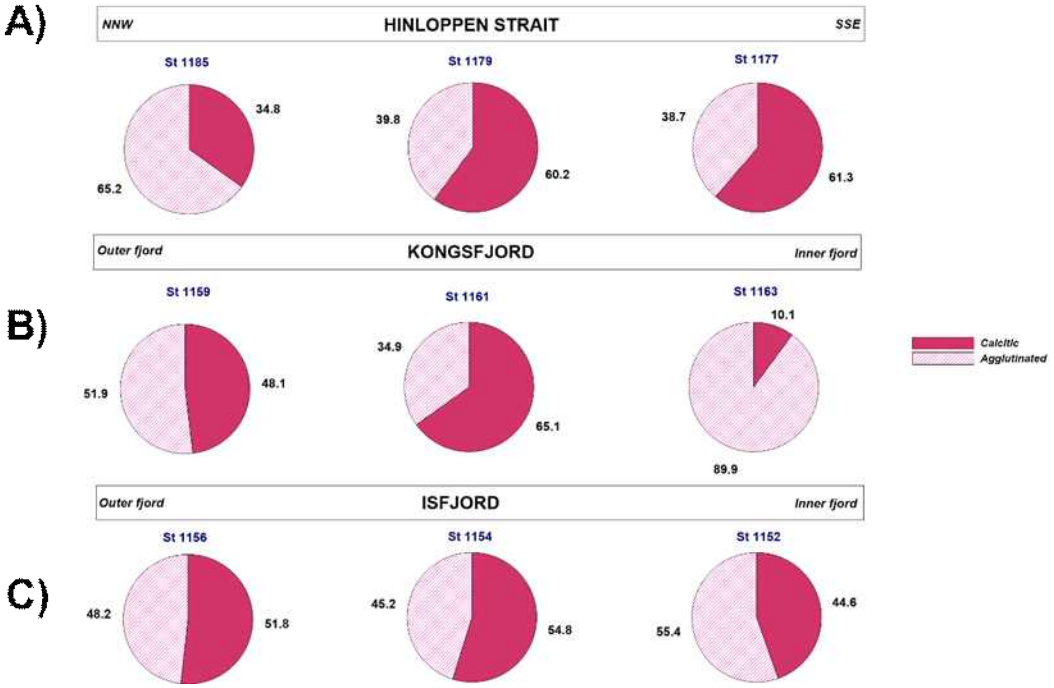


Fig. 202. Proportion of the agglutinated vs calcitic species in the >63 μm fraction of (A) Hinlopen Strait, (B) Kongsfjorden, and (C) Isfjorden.

KOPRI 극지연구소

(라) 퇴적물 코어 상부 5 cm 세립질 퇴적물 내 주요 종분포

- Fig. 203은 코어 퇴적물 상부 5 cm에서 세립질 퇴적물 내 주요 살아있는 종들의 수직 분포를 보여줌. 일반적으로 밀도는 표층에서 퇴적물 코어의 하부로 갈수록 감소하며, 1 cm 깊이에서 표층 아래 최대 값을 보임(Sts. 1152, 1154, 1177)
- 그러나 이 경향은 조립질 퇴적물 내에서 관찰된 것(Fig. 200)보다는 다소 명확하지 않음. 놀랍게도 힌로펜 해협 북부의 St. 1185 정점에서는 퇴적물 코어 하부에서 매우 높은 밀도를 보이며, *A. glomerata*와 *T. torquata*의 기여도가 크며, *Adercotryma glomerata*는 다른 정점들 Sts. 1179, 1161)에서도 더 심부층에서 발견됨

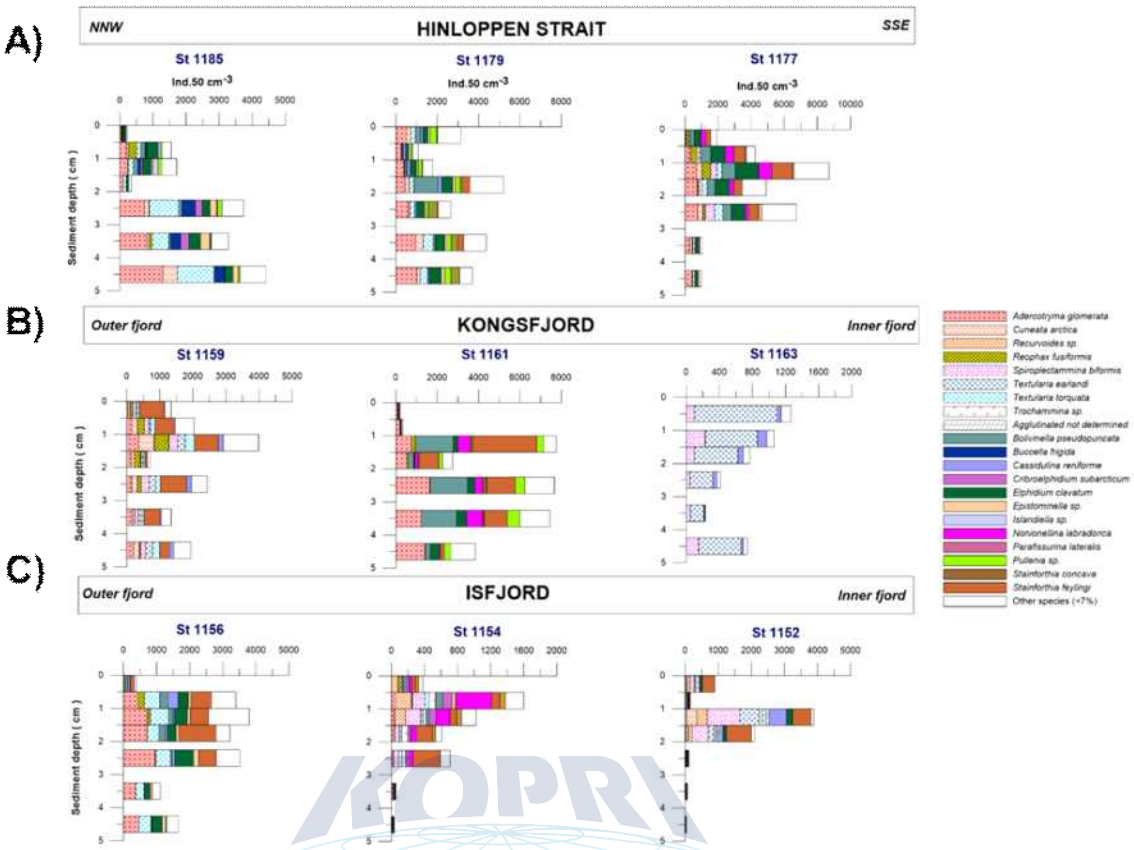


Fig. 203. Vertical distribution of the major taxa (>7% in at least one sample of the sediment core) of the > 63 □m fraction of (A) Hinlopen Strait, (B) Kongsfjorden, and (C) Isfjorden. Density is given by the number of individual for 50 cm^3.

라) 다중 프록시 활용 홀로세 후기 호른준트 환경변화 정밀 복원

(1) 연구 목적

- 최근 지구 온난화는 기후 및 환경 조건에 전례 없는 변화가 일어나고 있으며, 이에 따라 북극 스발바르는 최근 1980년~2010년 동안 최대 7%의 빙하 면적 감소가 일어나고 있음(Nuth et al., 2013). 이러한 빙하량 감소는 점차 가속화되고 있으며, 이는 스발바르 내 많은 해양 종착 빙하(marine-terminating glaciers)가 가까운 미래에 육지 종착 빙하(land-terminating glaciers)로 변화할 수 있음을 시사함. 실제, 남부 스발바르의 호른준드(Hornsund) 피오르드는 최근 수십 년 및 심지어 수세기 동안 극심한 빙하 후퇴의 영향을 받고 있으며(Błaszczy et al., 2019; Pälli et al., 2003), 이러한 추세가 계속되는 경우, 호른준드 동부 스피츠베르겐과 Sørkapp Land를 연결하는 빙하 해협 glaciated strait)이 가까운 미래에 완전히 사라지며 새로운 섬을 형성할 것으로 예측되고 있음(Fig. 204) (Grabiec et al., 2018)

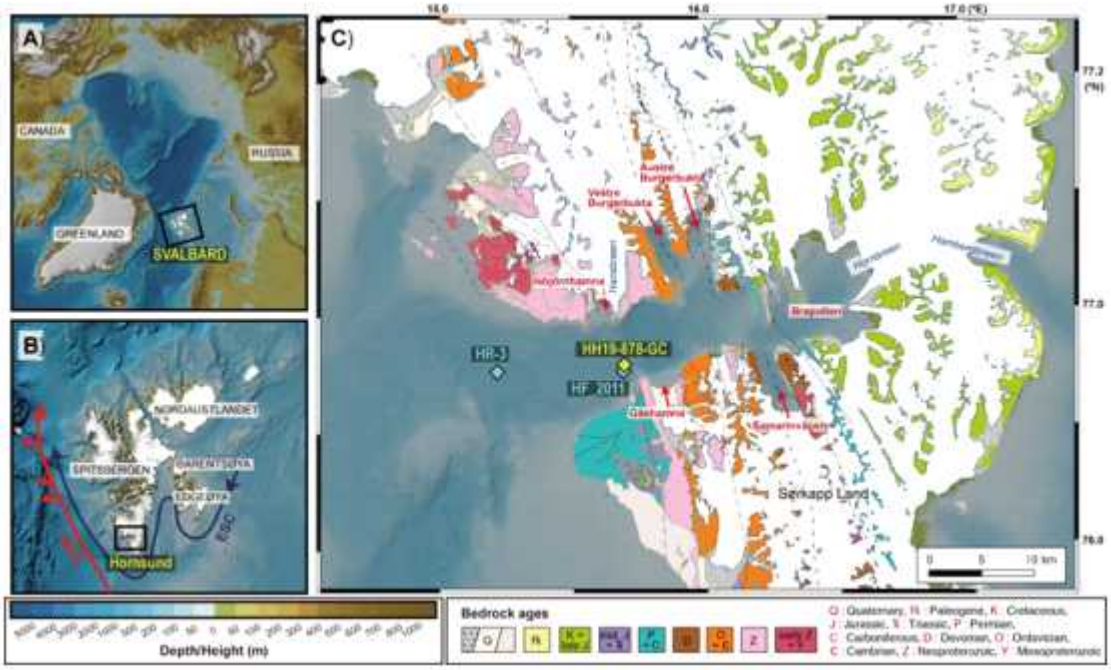


Fig. 204. Map of (A) the Arctic Ocean, (B) Svalbard, and (C) Hornsund. The sampling site is marked with a yellow diamond, while comparative sites are indicated with greenish blue diamonds. Various bedrock ages around Hornsund are represented by different colors (Dallman and Elvevold, 2015). The bathymetric information is based on IBCAO 4.0 bathymetric grid (Jakobsson et al., 2020). Basemap datasets © Norwegian Polar Institute (https://geodata.npolar.no/).

- 이처럼 오늘날 인류가 직면한 지구 온난화는 급격한 환경 변화를 초래할 수 있기에, 정확한 예측에 기반한 효과적인 대응이 반드시 필요함. 정교한 미래 예측을 위해서는 광대한 데이터 기반 연구가 요구되며, 때문에 최근 백여 년 동안으로 국한된 짧은 관측 자료를 보완할 수 있는, 프록시 기반 긴 시간 범위의 과거 환경 복원 자료 생산이 필수적임
- 스발바르는 홀로세 동안 다변적인 빙하 활동의 영향을 받아서(Forwick et al., 2009), 홀로세 동안의 고해상도 퇴적 기록을 복원하는 것은 우리가 직면할 수 있는 미래 환경에 대한 중요한 참고자료로 활용할 수 있음. 예를 들어, 스발바르는 홀로세 초기 및 중기 동안 빙하가 후퇴하여 최소 범위(minimum extent)에 도달했으며, 이후 신빙기(Neoglacial) 동안 빙하가 재성장하여 최대 범위에 도달했음(Fanthworth et al., 2020). 즉, 고해상도의 홀로세 스발바르 과거 복원 연구는 해양 종착 빙하와 육지 종착 빙하 등으로 대표되는 다양한 빙하 환경에 대한 고환경적 통찰을 얻을 수 있는 수단임
- 본 연구에서는 퇴적물 내 네오디뮴 동위원소 비와 광물 조성 변화를 활용하여, 지난 4,900년 동안의 호른준드 지역 고(古)환경 변화 복원을 수행함. Jang et al. (2020)에

서 수행한 호른준드 표층 퇴적물 내 네오디뮴 동위원소 비와 광물 조성 자료를 기반으로 호른준드에 유입될 수 있는 퇴적물 기원지를 식별하였고, 코어 퇴적물 내 자료 변화를 통해 시기별 호른준드로 유입된 퇴적물 기원지 변화 및 관련된 주변 빙하 양상 변화를 추적하였음. 또한, 퇴적물의 자생성분의 희토류 원소(REEs) 분석을 통해, 빙하 환경에서의 풍화 양상 변화에 대해 고찰하였음

(2) 연구 방법

(가) 고찰시료 채취 및 기초 스캐닝 자료 획득

- 2019년 한국-노르웨이 국제공동 스발바르 탐사 동안 스발바르 남부 호른준드 서부 지역에서 획득한 중력코어 퇴적물 HH19-878-GC (76° 57.543’ N, 15° 41.886’ E, 수심 125m, 길이 405cm)이 채취됨(Fig. 204). 노르웨이 트롬소 대학 (UiT)의 GEOTEK Multi-Sensor Core Logger를 사용하여 코어 퇴적물의 습윤 밀도(wet bulk density)와 자화율(MS)이 1cm 간격으로 측정되었고, GEOTEK Standard X-ray CT System와 Avaatech X-ray fluorescence core scanner를 사용하여 x-radiograph와 linescan images를 획득함. 코어 절개면에서 부시료가 1cm 간격으로 확보되었으며, 확보된 부시료는 동결 건조됨

(나) 입도 분석

- 입도 분석은 극지연구소의 Malvern Mastersizer 3000 laser diffraction particle size analyzer를 사용하여 5cm 간격으로 수행됨. 분석 전에 약 130 mg의 퇴적물을 35% 과산화수소로 24시간 동안 처리하여 유기물을 제거함. 평균 입도는 Folk와 Ward (1957)의 방법에 따라 GRADISTAT v 8.0을 사용하여 계산되었음(Blott and Pye, 2001). 1 mm보다 큰 입자는 x-radiograph를 이용하여 5cm 간격으로 육안 계수함. 끝으로, 63 μm 이상의 입자 비율이 습식 체질 후 계량을 통해 10cm 간격으로 측정됨

(다) 연대 모델

- 중력코어 퇴적물 4-5 cm, 54-55 cm, 59-60 cm, 79-80 cm, 104-105 cm, 114-115 cm, 139-140 cm, 149-150 cm, 179-180 cm, 214-215 cm, 249-250 cm, 309-310 cm, 359-360 cm, 389-390 cm, 399-400 cm 깊이에서 획득한 패각과 저서성 유공충을 획득함(n = 15). 획득한 시료들은 미국 마이애미의 BETA 분석 연구소 혹은 독일 알프레드 베게너 연구소에서 AMS ^{14}C 연대 분석됨(Table 47). 측정된 ^{14}C 연대는 BACON v. 3.2.0 (Blaaw and Christen, 2011)의 Bayesian age-depth 모델을 바탕으로 최종 연대 모델 설정에 활용됨. 모델 내에서 ^{14}C 연대는 calendar age로 변환되었는데, 그 과정에서 Marine20 calibration curve (Heaton et al., 2020)와 △R = 61 ± 37 값(Pieńkowski et al., 2017)이 활용됨

Table 47. Measured radiocarbon ages from sediment core HH19-878-GC.

Lab ID	Material	Core depth (cm)	AMS ^{14}Cage(yrBP)	Reservoir age
Beta-546265	Mollusk	4.5	101.25 pMC ± 0.38	Marine20 data set ΔR=-61±37
AWI 5425.1.2	Mollusk	54.5	413 ± 64	Marine20 data set ΔR=-61±37
AWI 12360.1.1	Mixed benthic foram.	59.5	1,021 ± 55	Marine20 data set ΔR=-61±37
AWI 12361.1.1	Mixed benthic foram.	79.5	1,114 ± 54	Marine20 data set ΔR=-61±37
Beta-546267	Mollusk	104.5	930 ± 30	Marine20 data set ΔR=-61±37
Beta-546268	Mollusk	114.5	1,370 ± 30	Marine20 data set ΔR=-61±37
Beta-546269	Mollusk	139.5	8,790 ± 30	Marine20 data set ΔR=-61±37
AWI 12362.1.1	Mixed benthic foram.	149.5	1,232 ± 62	Marine20 data set ΔR=-61±37
AWI 5426.1.2	Mollusk	179.5	3,807 ± 75	Marine20 data set ΔR=-61±37
Beta-546270	Mollusk	214.5	1,520 ± 30	Marine20 data set ΔR=-61±37
AWI 12363.1.1	Mixed benthic foram.	249.5	2,034 ± 58	Marine20 data set ΔR=-61±37
AWI 5427.1.2	Mollusk	309.5	2,322 ± 72	Marine20 data set ΔR=-61±37
AWI 12364.1.1	Mixed benthic foram.	359.5	3,747 ± 89	Marine20 data set ΔR=-61±37
AWI 12365.1.1	Mixed benthic foram.	389.5	5,142 ± 69	Marine20 data set ΔR=-61±37
AWI 5428.1.2	Mollusk	399.5	4,659 ± 78	Marine20 data set ΔR=-61±37

KOPRI 극지연구소

(라) 희토류 농도 및 네오디뮴 동위원소 비

- 희토류 원소(REE) 농도와 네오디뮴 동위원소 조성(143Nd/144Nd; 이후 εNd)은 퇴적물 내 두 가지 다른 성분, “자생성” 및 “쇄설성”에서 5~50 cm 간격으로 측정됨. 자생성분은 퇴적물로부터 0.02M 하이드록실아민 염산과 25% 아세트산 혼합 용액을 가미하여 추출되었고(Jang et al., 2017), 쇄설성분은 자생성분을 완전히 제거한 뒤 남은 성분으로 약 650℃의 furnace에서 과산화나트륨과 수산화나트륨 혼합물과 함께 반응(Bayon et al., 2009)시켜 완전히 용해됨. 확보된 자생성분 및 쇄설성분의 REE 농도는 Pôle Spectrommtrie Ocean의 ICP-MS를 사용하여 분석됨(precision <5%, accuracy <13%). 반면, 네오디뮴 동위원소 분석 전에는 TRU (50- 100 μm, Eichrom) 및 Ln resin (50- 100μm, Eichrom)를 사용하여 Nd 순화 과정을 거침 (Pin and Zalduegui, 1997). 이후 극지연구소의 열이온화 질량분석기(TIMS)를 이용하여 동위원소 분석함. 표준 시료(JNdi- 1) 분석 결과 오차는 εNd 단위 기준 0.2 수준이며, BHVO-1 등 표준 인증 물질 분석을 통한 accuracy는 문헌 값과 오차 범위 내에서 일치함

(마) IRMS 분석

- 퇴적물 내 총 유기 탄소(TOC) 함량과 유기탄소 동위원소 비($\delta^{13}C_{org}$)가 극지연구소 IRMS 장비를 사용하여 측정됨. 5 cm 간격으로 채취된 부시료는 분말화된 뒤 2M 염산을 활용하여 무기 탄소를 완전히 제거함. 분석된 TOC와 $\delta^{13}C_{org}$는 각각 0.2% 및 0.15‰ 이하의 precision을 보임. 유기 질소(Norg) 함량 분석을 위해 두 번의 과정을 거쳤는데, 첫 번째는 벌크 퇴적물을 활용하여 총 질소 함량을 결정하는 데 사용되었고, 두 번째 시료는 KOBr-KOH 용액을 사용하여 퇴적물 내 유기 질소를 완전히 제거한 후 무기 질소 함량을 측정하는 데 사용됨(Silva and Bremner, 1966). 동일한 장비가 활용되었으며, N_{org} 분석 재현성은 0.2% 이하임

(바) 광물 조성

- 퇴적물 내 광물조성 분석이 독일 브레멘 대학교 Philips X' Pert Pro multipurpose diffractometer를 사용하여 수행됨(n=82). Philips software X' Pert HighScore™가 주요 광물군을 식별하는 데 사용되었으며, Apple MacIntosh X-ray diffraction interpretation software MacDiff 4.25가 판상형 규산염 광물을 분석하는 데 사용됨(Petschik et al., 1996). 정량화는 참조 물질 데이터베이스를 기반으로 한 QUAX full-pattern method 을 사용하여 수행됨(Vogt et al., 2002). 이중, 본 연구에서는 석영, 백운모, 방해석, 백운석 및 철산화광물 함량에 중점을 둠. 분석 오차는 석영과 방해석과 같은 결정 광물의 경우 1-3% 이하, 철산화광물의 경우 10% 이하로 확인됨

극지연구소

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 암층서

- 코어 HH19-878-GC는 주로 갈색의 모래 진흙으로 구성되어 있고, 퇴적물 색상과 구조 측면에서 유의미한 변화는 관찰되지 않음(Fig. 205). 생물교란이 전체 코어에 걸쳐 다양한 정도와 형태로 나타남. 습윤 밀도는 1.62에서 1.86 g/cc 사이에서 변하며(평균 1.73±0.05, 1 SD, n=398), 자화율은 8.14에서 16.0×10^{-5} 사이의 범위를 보임(평균 $10.0\pm0.78\times10^{-5}$, 1 SD, n=376) (Fig. 2). 평균입도는 7.0에서 16.5 μm 사이에서 관찰되며, 코어 하부로 갈수록 조립해지는 경향을 보임(Fig. 205). X-radiograph에서 자갈과 암석을 포함한 1 mm 이상의 입자가 간헐적으로 관찰됨(Fig. 205)

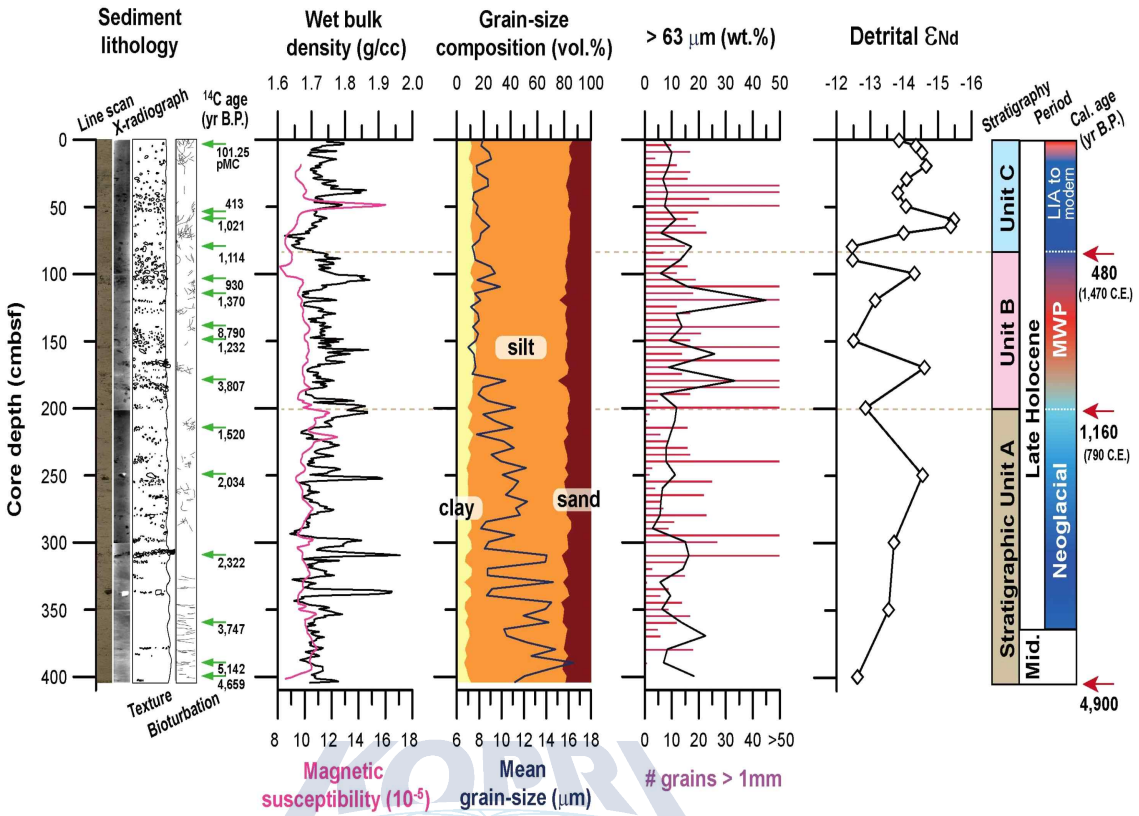


Fig. 205. Three stratigraphic units of core HH19-878-GC defined based on lithological and geochemical characteristics, and age. Linescan image, x-radiograph, lithological log, AMS ^{14}C ages, wet bulk density, magnetic susceptibility, grain-size composition, mean grain size, sand fraction (> 63 mm), the number of grains greater than 1 mm, detrital εNd values and time period are shown for comparison. Note that the horizontal axis is reversed for detrital εNd.

(나) 연대

- 측정된 방사성 탄소 연대는 Table 1과 Fig. 2에 표기됨. 연대 역전은 분석에 사용된 materials에 관계없이 59-60 cm, 79-80 cm, 114-115 cm, 139-140 cm, 179-180 cm, 389-390 cm 깊이에서 발생되었으며, 이는 퇴적물 재분배에 따른 결과로 해석됨(Flink et al., 2018). 코어 HH19-878-GC의 최하부 연대는 과거 4,900년 전으로 추정되며, 평균 퇴적 속도는 약 0.08 cm/년임(Fig. 206)

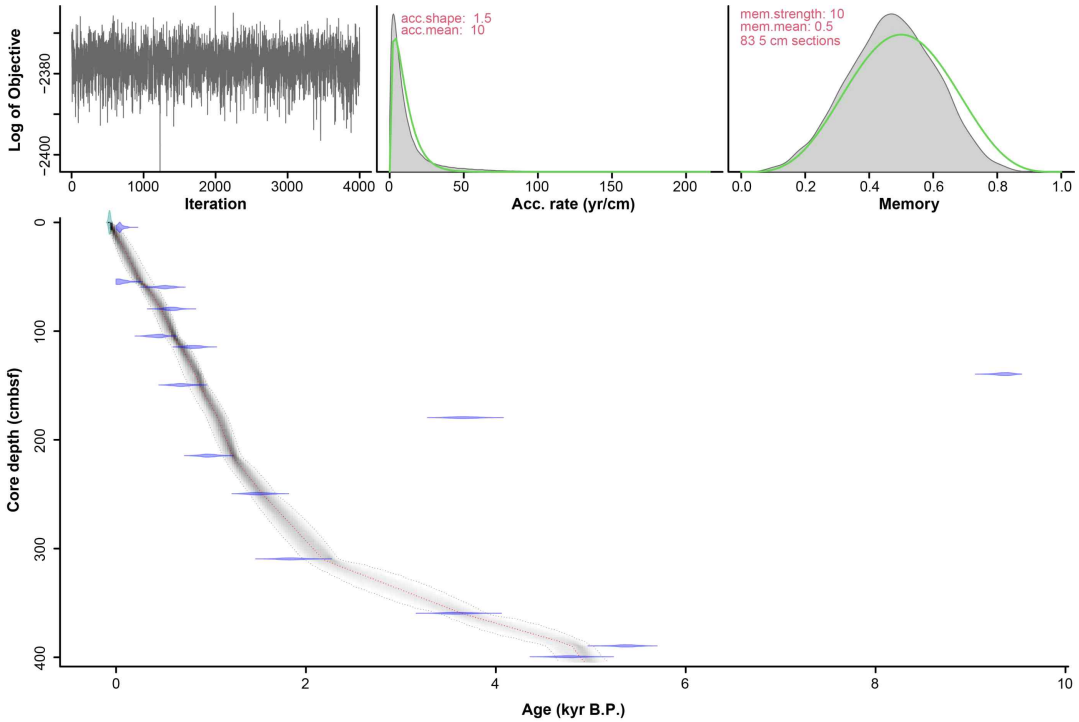


Fig. 206. Bayesian age−depth model constructed using Bacon v. 3.2.0 at site HH19−878−GC. Top−left panel displays Markov Chain Monte Carlo iterations (n=4,000; left), while middle and right panels at the top represent the prior (green) and posterior (gray) distributions for accumulation mean and memory properties, respectively. In the bottom panel, blue symbols indicate the calibrated ^{14}C ages, and the red dotted line illustrates the weighted mean age along with the uncertainty at the 95% confidence level (gray bands).

(다) 네오디뮴 동위원소 비

- 쇄설성분과 자생성분 내 εNd 값은 유의미한 상관관계를 보이지 않음(r= - 0.13, n= 21) (Fig. 207). 쇄설성 εNd 값은 - 15.5에서 - 12.5 사이에서 변동하며(- 13.9± 0.9, 1 SD, n=21), 약 500년에서 1600년 사이에 톱니 모양 패턴으로 크게 변화함. 반면, 자생성 εNd 값은 - 10.6에서 - 9.6 사이의 좁은 범위에서 변화함(- 10.2 ± 0.2, 1 SD, n= 21) (Fig. 207). 이러한 εNd 값은 서부 스발바르 지역에서 채취한 해수에서 측정된 εNd 값보다 약간 높지만(즉, Sø rkapp 해류, - 11.6 < εNd <- 10.6)(Laukert et al., 2017), 혼르준드의 가장 안쪽에 위치한 Brepollen에서 확보한 표층 퇴적물의 자생성 εNd 값과 비슷하거나 낮음(- 10.4 < εNd < - 9.0)(Jang et al., 2020). 전반적으로, 코어 878의 자생성 εNd 값은 뚜렷한 시간적 변화가 관찰되지 않음

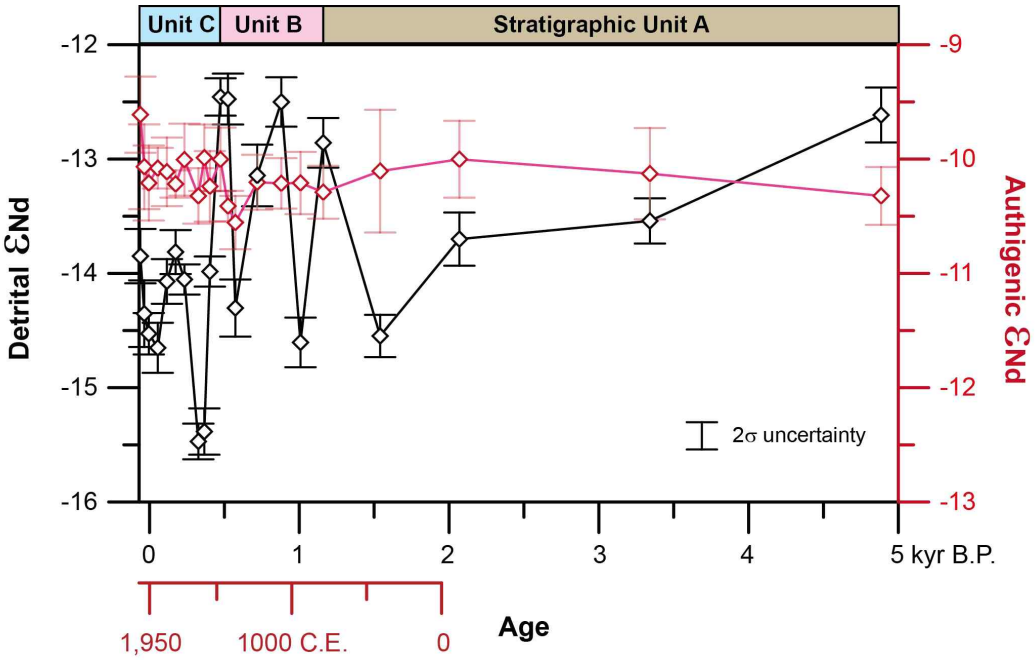


Fig. 207. Detrital (black) and authigenic εNd records (red) at site HH19- 878- GC in Hornsund. Error bars indicate ± 2σ uncertainties.

KOPRI 극지연구소

(라) 희토류 농도

- 코어 HH19-878-GC의 퇴적물 내 REE 농도는, 쇄설성분이 자생성분에 비해 약 두 배 높은 농도를 보임. 예를 들어, 쇄설성분에서의 란타늄(La) 농도는 19.7에서 54.5 g/g 범위에 있는 반면, 자생성분에서는 0.37에서 0.66 g/g 범위에서 변함. 마찬가지로, 쇄설성분의 가돌리늄(Gd)과 이터븀(Yb) 농도는 각각 2.45-5.56 g/g 및 1.32-3.10 g/g 범위에 있으나, 자생성 분에서는 훨씬 낮은 농도(각각 0.25-0.42 g/g 및 0.05-0.09 g/g)를 보임. 코어의 쇄설성분 REE 농도를 world river average silt (WRAS)(Bayon et al., 2015) 값에 정규화(normalize)하면 평탄한 패턴을 나타내는 반면, 자가성분의 WRAS-정규화된 REE 패턴은 middle REE (MREE)가 강하게 농축된 것을 볼 수 있음(Fig. 208). 실제 MREE 농축 정도는 "concavity index (CI) = GdN/(La6N × Yb7N)1/13"를 사용하여 정량화(Bayon et al., 2020)할 수 있는데, 쇄설성분의 CI 값은 0.9-1.0인 반면 자생성분의 CI 값은 3.0-4.6의 분포를 보임

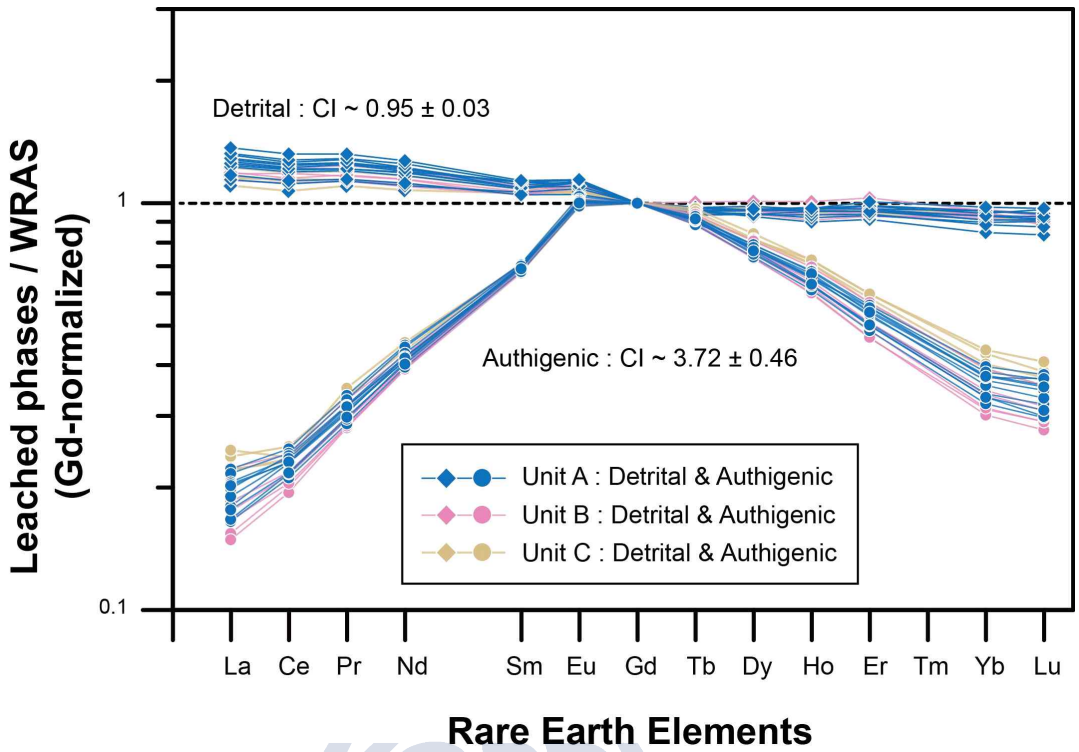


Fig. 208. WRAS-normalized REE patterns for the authigenic and detrital phases of core HH19-878-GC. While general flat patterns are prevalent in detrital phases (average CI ~ 1), strong MREE enrichments are prominent in authigenic phases (average CI ~ 3.7). The degree of MREE enrichments in authigenic sediments varies depending on stratigraphic units. Note that the REE data were also normalized by GdWRAS for clarity.

(마) 벌크 유기물 특성

- TOC와 N_{org}의 평균 함량은 각각 1.54±0.08 wt.% (1 SD, n=81)와 0.22±0.08 wt.% (1 SD, n=42)임(Fig. 209). TOC/N_{org}은 12에서 43 사이에서 큰 변동을 보이는데, 이 비율은 일반적으로 위쪽으로 갈수록 증가하여 1900년에 최대에 도달한 후 다시 22로 감소함. 반면, $\delta^{13}C_{org}$ 값은 일반적으로 위쪽으로 갈수록 감소하지만, −25.0에서 −23.6 사이의 비교적 좁은 범위에서 변동함

(바) 광물 조성

- XRD로 측정된 방해석 함량은 2.5에서 11.3 wt.% (평균 6.9±2.5 wt.%, 1 SD, n=82) 범위로, 코어 하부에서 더 높고 위쪽으로 갈수록 점차 감소함(Fig. 209). 백운석 함량은 0에서 10.9 wt.% 사이에서 변동하며, 평균 함량은 3.0 ± 2.1 wt.% (1 SD, n=82)임. 백운석도 코어 하부에서 상부보다 더 풍부하지만 방해석보다 덜 뚜렷함. 평균 석영 함량은 25.2±3.8 wt.% (1 SD, n=82)로, 19.1에서 33.9 wt.% 사이에

서 변동함(Fig. 209). 석영/탄산염(방해석+백운석) 비율은 호르준드의 규산염-탄산염 광물 비율을 나타내며, 일반적으로 위쪽으로 증가하는 경향을 보임. 철산화광물의 함량은 평균 0.3±1.0 wt.% (1 SD, n=82)으로 0에서 5.98 wt.% 사이에서 변동함. 코어에서 거의 존재하지 않으나, 1750년경, 1200년경, 910년경에 세 개의 뚜렷한 피크가 관찰됨(Fig. 209)

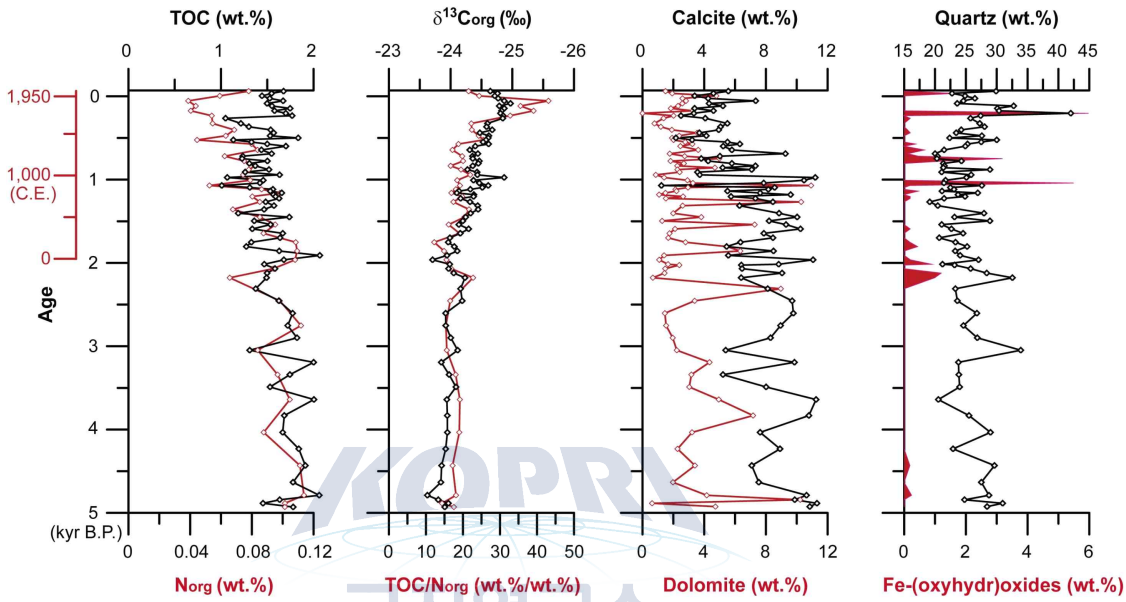


Fig. 209. Records of organic chemistry and bulk mineralogy at site HH19-878-GC in Hornsund. The contents of total organic carbon (TOC) and organic nitrogen (N_{org}), $\delta^{13}C_{org}$ values, TOC/N_{org} ratios, the contents of calcite, dolomite, quartz and Fe-(oxyhydr)oxides are shown. Note that the horizontal axis is reversed for $\delta^{13}C_{org}$.

(사) 층서 단위 분류

- Unit A (코어 최하부~200 cm): 약 4.9천 년 전부터 약 790년까지 퇴적된 층으로, 중기 홀로세의 마지막 단계부터 후기 홀로세 초기 단계까지의 기간의 기록을 포함함. 이 Unit은 쇄설성 εNd 값의 전반적인 상승이 특징적이며, 주로 수평적인 생물 교란 흔적이 발달한 sandy mud로 구성됨. 평균 입도는 3개의 층서 중 가장 크며(평균 11.2± 2.2 μm, 1 SD, n=41), 상부로 갈수록 그 값이 감소하는 경향이 있음. IRD는 코어 최하부에서는 거의 발견되지 않지만, 상부에서는 산발적으로 coarse 입자와 IRD 층(예: ~310 cm)이 관찰됨
- Unit B (200~80 cm): ~790년에서 1470년에 쌓인 층으로, 주로 중세 온난기(MWP)에 해당함. 이 Unit에서는 약 3차례의 쇄설성 εNd 피크가 관찰되며, 이때의 값은 -

12.5까지 도달함(Fig. 205). 주로 얇은 수직관을 가지는 생물 교란 흔적이 관찰되는 사질 니로 구성됨. Unit B는 주로 더 높은 점토 함량으로 인해 Unit A에 비해 평균 입도가 낮음(평균 8.2± 1.1 μm, 1 SD, n= 24). 모래 함량이 5.8에서 44.8 wt.% 사이에서 크게 변동하며(평균 16.7±12.0 wt.%, 1 SD, n=12), 두 개의 뚜렷한 피크가 관찰됨. Unit B에서는 많은 coarse 입자, 특히 IRD 층이 자주 확인됨

- Unit C (80 cm~코어 최상부): 1470년 이후에 퇴적된 층으로, 주로 소빙기(Little Ice Age) 동안 및 이후를 반영함(Fig. 2). 쇄설성 εNd 값이 다른 Units에 비해 일반적으로 낮게 나타나며, -15.5의 최저 값을 보임. Unit C는 수직관과 같은 생물 교란 흔적이 관찰되는 sandy mud로 구성됨. 평균 입도는 7.4에서 8.2 μm (평균 8.2± 0.6, 1 SD, n=17) 사이를 보임. Coarse 입자가 산발적으로 확인되며, 상단으로 갈수록 그 수가 일반적으로 감소함

(아) 퇴적물의 잠재적인 기원지

- 본 연구에서는 기존에 출판된 호른준드 표층 퇴적물의 쇄설성 εNd 값(Jang et al., 2020; Kim et al., 2023)과 광물 조성(Jang et al., 2023; Görlich et al., 1986)을 바탕으로(Fig. 210), 사이트 HH19-878-GC에 유입된 퇴적물의 잠재적인 기원지를 Group A, B, C & D로 구분함
- Group A (피오르드 내부): 호른준드 최내부에서 유입되는 퇴적물로 높은 쇄설성 εNd 값(최대 −10)이 특징적. 이러한 특징은 호른준드 내부 Brepollen 지역의 표층 퇴적물의 분석값에 잘 나타남(Fig. 210A). Brepollen 주변의 노두에서 중생대 및 신생대 퇴적암들이 이러한 지화학 및 광물학적인 특징을 부여한 것으로 추정되며, 이러한 추정은 거의 동일한 암석으로 둘러싸인 Storfjorden의 표층 퇴적물에서도 유사한 쇄설성 εNd 값이 관찰되는 것으로 증명됨.
- Group B (피오르드 중앙): Group B는 주로 Samarinvågen, Austre Burgerbukta, Vestre Burgerbukta 지역과 같은 호른준드 중앙부를 포함하며, 낮은 쇄설성 εNd 값이 특징적임. Vestre Burgerbukta 빙하 주변부의 표층퇴적물에서 분석된 쇄설성 εNd 값은 -24.9까지 낮게 나타나지만(Fig. 210A), Austre Burgerbukta의 빙하 주변부의 표층 퇴적물에서는 상대적으로 높은 εNd 값(- 12.8)을 보임. 그러나, Austre와 Vestre Burgerbukta에서 유입된 퇴적물이 합쳐지는 지역의 표층 퇴적물의 쇄설성 εNd 값은 −23.7에서 −20.7 사이로 현저히 낮게 관찰되는 것을 볼 때, Austre Burgerbukta의 퇴적물 기여도는 상대적으로 적은 것으로 판단됨 - 따라서, Group B는 상대적으로 낮은 εNd 값으로 특징지어질 수 있음. 주변부의 기반암을 고려할 때, 그룹 B 퇴적물은 주로 캄브리아기 및 오르도비스기 탄산염암을 포함한 고생대 퇴적암의 침식에서 유래했을 가능성이 큼
- Group C (피오르드 외부): 호른준드 피오르드 외부에서 유입되는 퇴적물로, 상대적으로 높은 쇄설성 εNd 값이 특징. 호른준드 피오르드 중앙 분지에서 외부 방향으로 갈수록 표층 퇴적물의 εNd 증가하는 것으로 그 기원을 추론할 수 있음. 실제, 호른준드 외

곽에서 채취한 표층 퇴적물의 쇄설성 εNd 값은 본 연구 사이트인 HH19- 878- GC의 최상단 퇴적물에서 분석된 값보다 2만큼 높음(Fig. 210A). 코리올리 힘에 의해 호른준드로 유입되는 해류가 남부 해안을 따라 동쪽으로 흐르는 것을 고려할 때(Jakacki et al., 2017; Pawłowska et al., 2017), 높은 쇄설성 퇴적 εNd 값을 가진 퇴적물이 해류에 의해 호른준드 외부에서 주요 분지 지역으로 의해 운반될 가능성이 있음. Group C의 기원암은 불확실하나, 해안선을 따라 흐르는 해류를 고려할 때, 호른준드 남서부 지역의 후기 고생대에서 중생대 퇴적암이 가능성이 있음

- Group D (Local) : Isbjörnhamna 지역도 호른준드 퇴적물의 잠재적 기원지로 작용할 수 있음. Isbjörnhamna 지역 표층 퇴적물의 광물 조성을 보면, 상대적으로 낮은 탄산염 함량이 특징적임. 실제, Isbjörnhamna 내부의 표층 퇴적물의 석영 대 탄산염 비율(6.8 ± 2.6, 1 SD, n = 4)은 Samarinvagen(1.7 ± 0.4, 1 SD, n = 4), Vestre Burgerbukta(1.8 ± 0.3, 1 SD, n = 4) 및 외부 피오르드(3.6 ± 2.4, 1 SD, n = 2)보다 높은 경향이 있음 (그림 210B)
- 추가로, 퇴적물에서 분석된 광물 조성은 높은 εNd 값으로 특징지어지는 Group A와 C 사이의 영향력을 구별하는 데 활용될 수 있음. 예를 들어, Brepollen의 표층 퇴적물은 약 14에서 327 사이의 높은 석영 대 탄산염 비율을 보이는데, 이는 외부 피오르드의 비율(약 1.9에서 5.3)에 비해 매우 높음
- 요약하면, 호른준드 퇴적물의 잠재적인 기원지는 총 4가지로 추정됨. 먼저, Brepollen 지역이 상대적으로 높은 쇄설성 εNd 값(최대 - 10.1)과 석영 대 탄산염 비율(최대 327; Fig. 211)을 가진 피오르드 내부 기원지(Group A)로 구분됨. 둘째로, Vestre Burgerbukta와 Samarinvågen 지역이 중앙 기원지(Group B)에 해당하며, 낮은 쇄설성 εNd 값(최저 - 24.9)과 낮은 석영 대 탄산염 비율(최저 약 1; Fig. 211)을 가진 퇴적물을 공급함. 셋째, 호른준드 퇴적물은 피오르드 외부로부터 해양 흐름에 의해 유입될 수 있음(Group C). 이 기원지는 상대적으로 높은 쇄설성 εNd 값(- 11.9)과 낮은 중간 석영 대 탄산염 비율(3.6 ± 2.4, 1 SD, n = 2)로 특징지어짐(Fig. 211). 마지막으로, Isbjörnhamna 유역은 탄산염이 결핍된 퇴적물과 관련된 기원지(Group D)으로, Group B와 C에 비해 상대적으로 높은 석영 대 탄산염 비율을 가짐(Fig. 211)

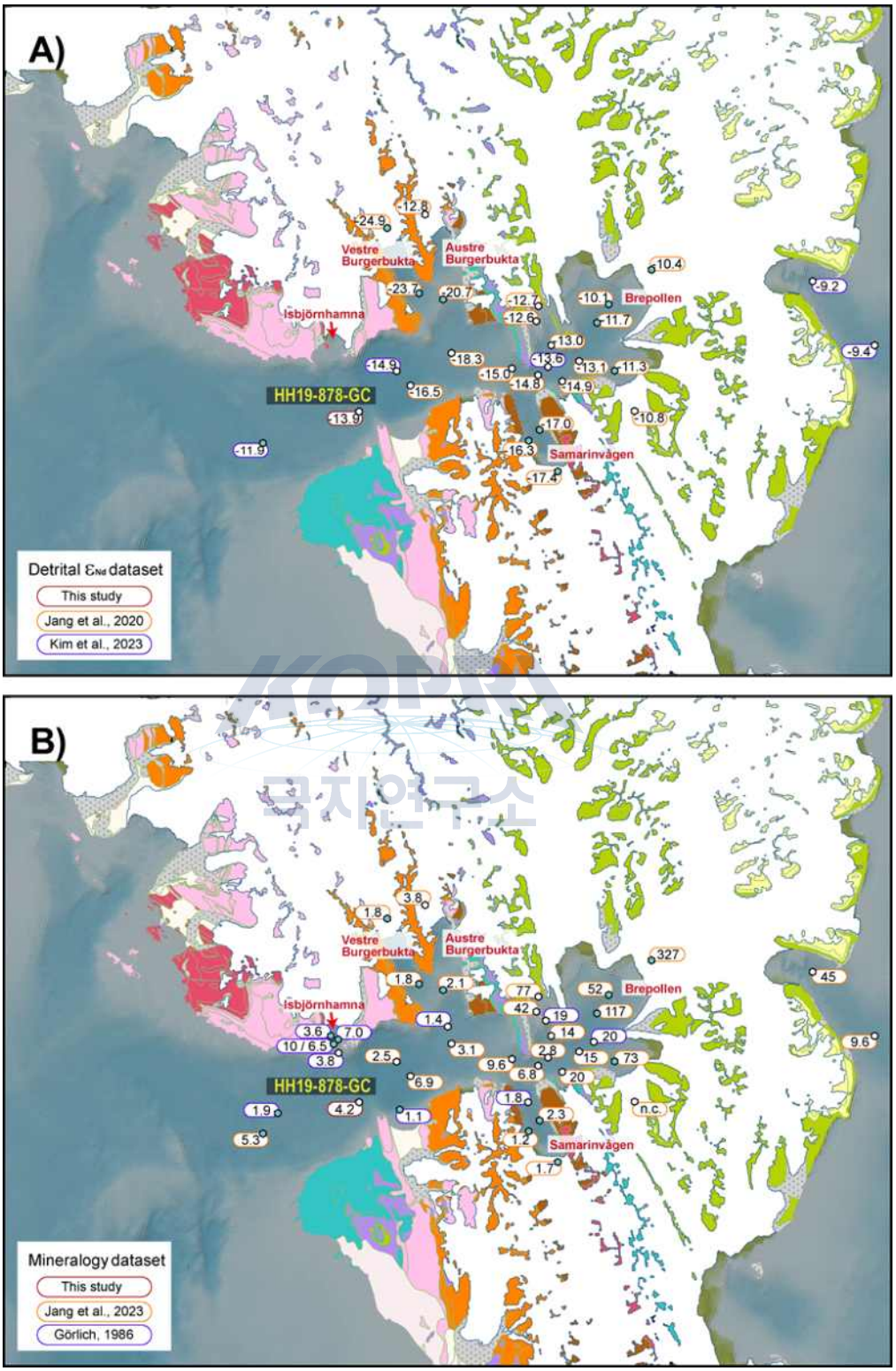


Fig. 210. Spatial variability in (A) the measured detrital εNd values and (B) quartz-to-carbonate ratios (wt.%/wt.%) of surface sediments collected from Hornsund. Data marked with blue symbols serve as the representative values for each source, as described in Figure 211.

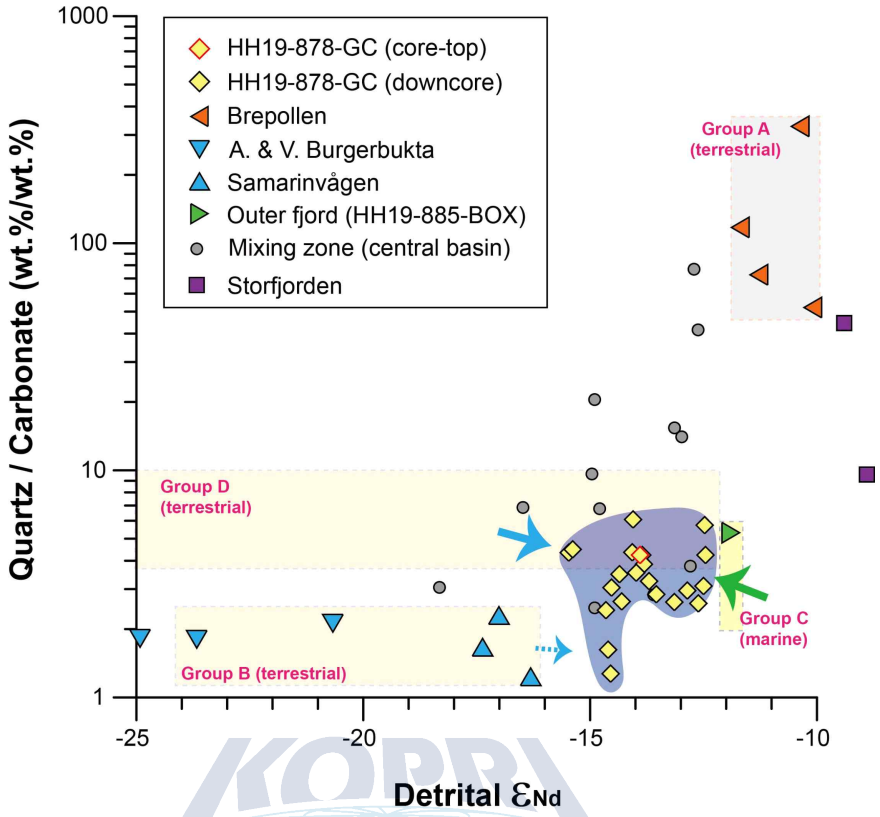


Fig. 211. Potential sources for Hornsund sediments and their geochemical (detrital εNd) and mineralogical characteristics (quartz-to-carbonate ratios). The plot suggests that sediment deposition at site HH19-878-GC appears to have been influenced by both internal meltwater discharge (blue arrows) and external oceanic inflow (green arrows). Terrestrial inputs likely originate from the Isbjørnhamna regions (Group D), with additional contributions from areas around Burgerbukta and Samarinvagen (Group B).

(자) 과거 4900년 동안의 호른준드 퇴적물 기원지 변화

- 쇄설성 εNd 값과 석영 대 탄산염 비율을 활용하여, 코어 HH19- 878- GC에 퇴적된 퇴적물의 기원을 추론함(Fig. 212)
- 먼저, 높은 석영 대 탄산염 비율을 가진 가장 안쪽 지역(Group A)은 사이트 HH19-878-GC에서 잠재적 퇴적물 원천으로 제외될 수 있음. 코어 HH19-878-GC의 석영 대 탄산염 비율은 주로 1.0에서 6.1 범위에 있으며(평균 3.0±1.6, 1 SD, n=82), 이는 Brepollen 표층 퇴적물에서 관찰되는 값에 비해 한 자릿수 이상 낮기 때문(Fig. 211). Brepollen 주변의 빙하가 지난 수십 년 또는 수세기 동안 빠르게 후퇴했음에도 불구하고, 빙하로부터 유출되는 퇴적물이 빙하 주변부에 대부분 퇴적되기 때문에, 상대적으로 원거리에 위치한 사이트 HH19-878-GC에는 도달하지 못한 것으로 추정

- HH19-878-GC의 퇴적물은 주로 외부(Group C) 및 Isbjörnhamna (Group D)로부터 유입된 것으로 사료됨. 이는 코어퇴적물에서의 쇄설성 εNd값이 코어 상부로 갈수록 감소하는 반면, 석영 대 탄산염 비율은 증가하는 것으로 추정될 수 있음. 즉, HH19- 878- GC 퇴적물은 각각 높은 εNd 값과 낮은 석영 대 탄산염 비율을 갖는 기원지와 그 반대의 특징을 갖는 기원지들의 혼합으로 해석될 수 있음. 이 시나리오에서 Group C가 쇄설성 εNd의 증가와 석영 대 탄산염 비율의 감소에 기여할 수 있음. 반면, 낮은 εNd 값과 석영 대 탄산염 비율로 특징지어지는 Group B는 HH19- 878- GC의 퇴적 과정에 덜 영향을 미치는 것으로 보임. 대신, Isbjörnhamna 지역(Group D)이 유일하게 남은 후보로서 잠재적인 기원지로 작용했을 것으로 짐작됨. Group D가 실제 Group C에 비해 높은 석영 대 탄산염 비율로 특징지어지며, 상대적으로 낮은 쇄설성 εNd 값을 가질 가능성이 있기 때문
- 종합적으로, 사이트 HH19- 878- GC에서의 전반적인 쇄설성 εNd의 감소 양상은 지난 4.9천 년 동안 호른준드 퇴적물 기원지가 주로 해양에서 육상으로의 이동하였음을 내포함. 이러한 해석은 사이트 HH19- 878- GC에서의 TOC/Norg의 상승과 $\delta^{13}C_{org}$의 동시 감소에 의해 뒷받침됨(Fig. 212). 해당 자료를 통해 호른준드 내 육상 유기물의 유입이 점차 증가하는 것으로 해석되기 때문(Knies and Martinez, 2009). 이러한 증거는, 중기 홀로세 이후 호른준드로 유입되는 육상 융빙수 배출이 강화되었음을 시사함

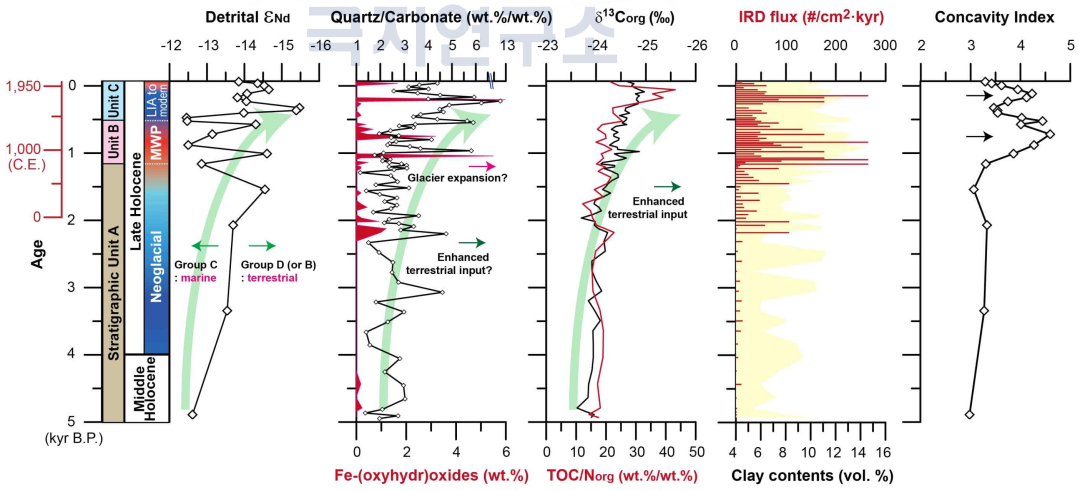


Fig. 212. Downcore variability in proxy records at site HH19-878-GC. The records include detrital εNd, quartz- to- carbonate ratio, Fe- (oxyhydr)oxide contents, $\delta^{13}C_{org}$ values, TOC/N_{org} ratios, IRD flux (number of grains greater than 1mm per cm2 · kyr), clay contents, and concavity index. Note that the horizontal axis is reversed for detrital εNd and $\delta^{13}C_{org}$.

(차) 시기별 호른준드 고환경 변화

- 홀로세 중기(4000천 년 전) – 사이트 HH19-878-GC에서의 퇴적물 기원의 시간적 변동성은 중기 홀로세 이후 호른준드의 전반적인 환경 변화를 반영함. 중기 홀로세의 마지막 단계 동안의 환경 조건에 대한 초기 단서는 IRD가 적은 퇴적학적 특징으로부터 얻을 수 있음. 이는 낮은 빙하 활동을 가리키며(Baeten et al., 2010), 동시에 중기 홀로세 동안 nearly open 해양 환경이었음을 시사함. 이 시기는 전 세계적으로 홀로세 열 최대기(Kaufman and Broadman, 2023)로 인식될 뿐만 아니라, 스발바르 빙하가 최소 범위에 도달하거나 심지어 사라진 시기로도 인식됨(Fanthworth et al., 2020). 실제, 해당 시기 호르준드 Hansbreen 동쪽에 위치한 Bogstranda 지역의 해변 발달 증거(Linder and Marks, 1993)는, 중기 홀로세 동안 빙하 후퇴와 관련된 해양환경으로 전환 해석을 지지함. Hansbreen을 포함한 호른준드의 빙하가 육지 쪽으로 후퇴하면서 중기 홀로세 동안 해안이 얼음이 없는 상태로 유지되면서, 육상 지역으로부터의 부유성 침전물 및 IRD 유입이 제한되었을 것으로 추정됨(Fig. 9). 결과적으로, 피오르드 외부에서부터 해류로부터 유입되는 퇴적물이 육상 기원의 퇴적물 유입을 압도하여, 중기 홀로세 동안 사이트 **HH19- 878- GC**에서 높은 쇄설성 **εNd** 값과 낮은 석영 대 탄산염 비율이 관찰되는 것으로 보임(Fig. 212).
- 신빙기(Neoglacial, 4000천년 전 ~ 서기 790년) – 약 4천 년 전 이후, Unit A에서 IRD 빈도는 코어 상부로 갈수록 현저히 증가되는데, 이는 빙산(iceberg)에 의한 퇴적을 반영하는 것으로, 후기 홀로세 초기 단계 동안 빙하 활동이 점차적으로 증가하는 환경 변화를 시사함. 해빙 IRD 운반의 잠재적 영향을 배제할 수는 없지만(Joo et al., 2019), 코어에서 관찰되는 최대 5cm의 큰 입자는 빙산의 개입을 적극 지지함(Gilbert, 1990). 이러한 맥락에서, 약 2.2천년 전 관찰되는 IRD 층은 해양 종착 빙하의 붕괴로 해석(Elliot et al., 2001)될 수 있음(Figs 204, 208). 즉, 호른준드의 빙하는 후기 홀로세 초기 단계 동안 성장하고 해양 방향으로 확장되기 시작했던 것으로 추론됨. 실제 이 시기는 스발바르에서 빙하 활동이 증가한 시기와 대체로 일치함(Fanthworth et al., 2020). 신빙기 동안의 빙하 성장과 전진은 Linnévatnet (Svendsen and Mangerud, 1997)과 Hajeren 호수(Bilt et al., 2015)의 유역 지역뿐만 아니라 Billefjorden (Baeten et al., 2010)과 Tempelfjorden (Forwick et al., 2010)에서도 관찰된 바 있으며, 호른준드 지역에서도 보고된 바 있음(Lindner and Marks, 1993). HH19-878-GC에서 기원전 2.2천 년경 관찰되는 철산화광물 피크도 이러한 해석을 지지함(Fig. 211). 빙하에서 유래한 철은 주로 융빙수와 해수의 경계에서 축적되므로(Raiswell et al., 2018), 철산화광물의 증가는 중기 홀로세 이후부터 기원전 2.2천 년까지 빙하가 연구 지역에 점차 가까워졌음을 반영할 수 있음. 즉, 신빙기 동안 호른준드 지역의 빙하 활동은 강화되었으며, 이 과정에서 해당 지역의 빙하들이 육상 종착 빙하에서 해양 종착 빙하로 발달되었을 것으로 추정됨. 이러한 전환은 육상 융빙수 배출의 기여를 증가시켜, 쇄설성 **εNd** 값과 $\delta^{13}C_{org}$의 전반적인 감소에 기여한 것으로 해석됨(Fig. 211)
- 중세 온난기(Medieval Warm Period, 서기 790년 ~ 1470년) – 중세온난기 (이하

MWP)는 일반적으로 950년에서 1200년 사이로 지정되지만(Mann et al., 2009), 호른준드 지역에서는 대체로 1000년에서 1600년 사이로 간주됨(Pawlowska et al., 2016). MWP는 전 세계적인 기후 사건으로 인정되지 않지만(Broecker, 2001), 서부 스발바르드의 아이스 코어 기록은 1200년 이전 스발바르가 서기 1990년대 후반과 유사하게 따뜻했음을 시사함(Divine et al., 2011). 특히, 연체동물 껍질과 모레인 암석의 연대 조사 결과는 이러한 온난화가 호른준드 내륙의 빙하 후퇴에 기여하며, 약 1.3천 년 전(서기 650년)부터 약 0.7천 년 전(서기 1250년) 이전까지 Brepollen의 빙하 해협이 다시 열렸음을 가리킴(Osika et al., 2022). 마찬가지로, 코어 HH19-878-GC의 Unit B에서 여러 차례 관찰되는 쇄설성 εNd 상승 피크들은 서기 790년에서 1470년 사이 호른준드 내륙의 빙하 후퇴 양상를 가리킴. 반면, 쇄설성 εNd 값은 그 기간 동안 두 차례 최소 값에 도달했는데(Fig. 211), 이는 해당 시기 빙하 활동이 급격히 변화하였음을 나타냄. 특히, 코어 HH19-878-GC의 Unit B는 coarse 입자가 풍부하고 IRD 층들이 자주 관찰되는 데, 이를 통해 서기 790년에서 1470년 사이 호른준드 지역에서 해양 종착 빙하의 반복적인 전진과 후퇴를 강하게 시사함. 두 개의 뚜렷한 철산화광물 피크는 쇄설성 εNd 의 최소 값보다 약간 앞서 발생하는데(Fig. 211), 이는 790년에서 1470년 사이 Hansbreen과 같은 지역 빙하의 간헐적인 진격으로 인한 것일 수 있음. 결과적으로, 호른준드에서 MWP는 이전에 정의된 것보다 짧은 기간 동안 발생되었거나, MWP 동안 온난화가 빙하 후퇴를 유발하지 않았을 수 있음. 정리하면, MWP 동안 호른준드 지역의 빙하는 전반적으로 후퇴했지만, MWP의 최대 온난화 동안에도 최소 두 번 이상 전진한 것으로 해석됨. 이러한 역동적인 변화는 코어의 전반적으로 낮은 $\delta^{13}C_{org}$ 값과 높은 점토 함량에 나타나듯, 육상 유입의 영향을 강화했을 가능성이 큼(Fig. 211)

- 소빙기 및 현대(Little Ice Age, 서기 1470년 이후) – Unit C는 지난 600년 동안 퇴적되었으며, 소빙기(이하 LIA)와 현대를 포괄함. Unit C는 Unit B와 유사한 특성을 보이나, IRD가 주로 분산되어 있다는 차별점이 있음(Fig. 204). 분산된 IRD는 주변 Hansbreen의 영향력을 시사함. LIA 극초기 높은 쇄설성 εNd 값은 MWP 직후 호른준드 지역에서 제한된 빙하 활동으로 인해 육상 퇴적물 공급이 감소했음을 나타냄(Fig. 211). 이후 쇄설성 εNd 값은 급격히 감소하여 1580-1620년경에 -15.5까지 도달하는데(Fig. 211), 이는 Isbjörnhamna 주변 유역에서의 퇴적물 공급 증가를 나타내며, 당시 빙하 활동이 절정에 달했음을 시사함. Hansbreen과 같은 빙하는 해양 환경까지 확장되었을 가능성이 있으며, 이는 코어 HH19-878-GC의 철산화광물 상승과 일치함(Fig. 211). 쇄설성 εNd 값 변화는 소빙기 말기인 1900년경에 빙하가 재차 전진했음을 가리킴. 이러한 발견은 소빙기 동안 다른 스발바르드 지역에서 기록된 다단계 빙하 진격과 일치함(Rothe et al., 2015)

(카) 빙하 환경 변화에 따른 Fe-S 사이클 변화

- 최근 Jang et al. (2024)은 자생성 희토류 원소 분석으로 계산된 높은 CI 값이 빙하 침식에 촉발된 황철석 산화 과정에 따른 결과로 해석한 것을 토대로, 코어 HH19-878-GC의 CI값 변화 양상을 살펴보고자 함. 호른준드 코어HH19-878-GC에서 자생성 퇴적물의 CI 값은 3.0에서 4.6 사이로 변동하는 데(Fig. 211), 이 범위는 전 세계 자생성 퇴적물에서 관찰된 값들을 크게 초과하는 것임. Jang et al. (2024)에서 논의된 것과 같이, 2.5를 초과하는 이러한 높은 CI 값은 강렬한 황화물 풍화가 지배적인 유역에서 유래한 퇴적물의 용출 분획에서만 관찰되기에, 코어 HH19-878-GC는 황철석 산화 양상에 크게 영향을 받은 것으로 해석될 수 있음
- 호른준드에서 가장 두드러진 CI 값의 피크는 MWP와 LIA 동안 발생함(Fig. 211). MWP 이후 쇄설성 εNd와 CI 값은 양의 상관관계($r = 0.48$, $n = 17$)를 보이는데, 이는 CI 값의 증가가 기원지 변화로 유래할 수 있음을 시사함. 그러나 MWP 이전에는 쇄설성 εNd 값 변동에도 불구하고 CI 값은 비교적 안정적으로 유지된다는 것을 볼 때, MWP와 LIA 동안 관찰된 CI 증가가 기원지 변화보다는 강해진 빙하 침식에 의한 황철석 산화 가속화와 관련이 있는 것으로 해석됨. 이 시나리오에서 빠른 빙하 전진이, 암석 표면을 침식하며 황철석 산화를 포함한 차별적 풍화 양상을 촉발했을 것으로 추정됨
- 지난 수십 년 동안 스발바르 빙하는 상당히 후퇴하고 있으며, 이러한 빙하 후퇴 가속화는 스발바르의 많은 해양 종착 빙하가 결국 육지 종착 빙하가 될 것임을 시사함. 호르준드 지역에서 해양 종착 빙하가 대부분 사라졌던 중기 홀로세 동안 CI 값이 감소한 것과 유사하게, 가까운 미래에 예견되는 해양에서 육지 종착 빙하로의 전환은 빙하 침식과 관련된 황화물 산화 양상을 약화시키며 해양 생태계에 부정적인 피드백을 초래할 수 있음(Jorgensen et al., 2021). 이러한 환경 변화가 아북극 해양 생태계 및 생지화학적 과정에 미치는 영향을 완전히 이해하기 위해 추가 연구가 필요함

4) 유기 · 무기 오염물질 유입량 변화 추적 및 생태 영향력 평가

4-1) 1차년도

가) 표층 퇴적물 내 유기독성물질의 분포 및 조성 특성 파악

(1) 연구 목적

- 스발바르 군도는 60% 이상의 육지가 영구 동토로 덮여 있으며 다수의 빙하 피오르드가 존재하는 독특한 지형을 가지고 있음(Hanssen-Bauer et al., 2019)
- 북극 지역은 일반적으로 오염원으로부터 멀리 떨어져 있어 전 세계에서 가장 깨끗한 지역 중 하나로 간주하지만, 장거리 대기 이동 및 해류를 통해 외부 오염물질이 지속적으로 유입될 수 있음(Armitage et al., 2011)
- 최근에는 기후변화로 인해 영구 동토가 해빙되고 빙하가 융해되며, 이에 따라 토양 및 퇴적물에 갇혀 있던 오염물질이 이동하여 북극 해양 환경에 영향을 미치는 새로운 환경적 위협이 되고 있음(Wong et al., 2021)
- 지속성 유기독성물질(Persistent toxic substances, PTSs)은 발암성, 유전독성, 발달독성과 같은 부정적인 영향을 유발하며, 환경에서 높은 지속성과 생물축적 가능성을 지닌 물질임(Brienza et al., 2016)
- 대표적인 PTSs는 폴리염화비페닐(Polychlorinated biphenyls, PCBs), 다환방향족탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), 알킬 PAHs (alkyl-PAHs) 등을 포함함
- PCBs는 1929년부터 활발하게 사용된 물질로, 화합물 특유의 절연성과 난연성으로 인해, 변압기, 차단기의 절연유, 전자기기 등 다양한 용도로 사용되어 왔으나, 환경 내 지속성, 독성, 생물축적성으로 인해 스톡홀름 협약에서 지속성 유기오염물질로 지정되어 1970년대 이후 생산 및 사용이 규제되었음(Breivik et al., 2007)
- PAHs는 석탄의 불완전한 연소, 원유, 자동차 배출가스, 쓰레기 소각, 식품 조리, 금속 제련 등과 같은 기원으로부터 생성되어, 다양한 경로를 통해 수 환경으로 유입됨(Cha et al., 2021)
- Alkyl-PAHs는 석탄 오염을 지시하는 물질로 스발바르의 니알슨, 롱이어비엔, 피라미덴 등 지역은 과거 탄광 사업이 활발하게 진행되었음(Buell et al., 2021)
- 표층 퇴적물은 환경 내 오염물질의 축적과 분포를 반영하는 중요한 매질로, 스발바르 지역의 표층 퇴적물은 낮은 온도로 인해 오염물질이 보존되고 축적되기 쉬운 특성이 있음(Lee et al., 2023)
- 빙하 융해 및 강수 패턴의 변화는 육상 환경 내 PTSs를 해양 환경으로 이동시키며, 이는 수 생태계와 환경 건강에 잠재적인 위협을 제공할 수 있음
- 특히, 스발바르 지역은 석탄 산업의 영향을 받은 지역으로, 석탄 잔재물이 주요 오염원으로 작용할 수 있음
- 본 연구과제의 1단계 1차년도의 목표는 스발바르와 주변 지역의 표층 퇴적물 내

PTSs의 분포와 잠재적 오염원을 조사하고, 이들 물질이 북극 생태계에 미치는 잠재적 생태 위해성을 평가하고자 함

(2) 연구 방법

(가) 시료 채취 및 전처리

- 표층 퇴적물은 2015년 Krossfjorden (n=3), Hornsund (n=18) 정점에서 2019년에 Isfjorden (n=2), Van Mijenfjorden (n=4), Van Keulenfjorden (n=2), Hornsund (n=3), Storfjorden (n=3)에서 각각 채취하였음(Fig. 213)
- 채취한 표층 퇴적물은 - 20 ℃에 보관 후 동결건조 후 2 mm 체로 여과하여 분석 진행하였음
- 동결건조 된 퇴적물 10 g은 고속용매추출법(Accelerated solvent extraction, ASE)을 이용하여 유기 추출하였음
- 유기 추출에는 디클로로메탄(Dichloromethane, DCM)을 이용하였으며, 120 ℃에서 10분간 추출 후 질소 가스를 이용하여 농축하였음
- 유기 추출액 내 황을 제거하기 위해 활성 구리를 추가 처리하였음
- 퇴적물 유기 추출액은 실리카겔 컬럼 크로마토그래피를 이용하여 극성 기반으로 2개의 분액으로 분리하였음(F1: 비극성, F2: 중극성 분액)
- 표층 퇴적물 유기 추출액 내 유기독성물질(32종 PCBs, 15종 t-PAHs, 11종 e-PAHs, 20종 alkyl-PAHs)의 농도는 가스크로마토그래피 질량분석기(Gas chromatography-mass selective detector, GC-MSD)를 이용하여 정량하였음

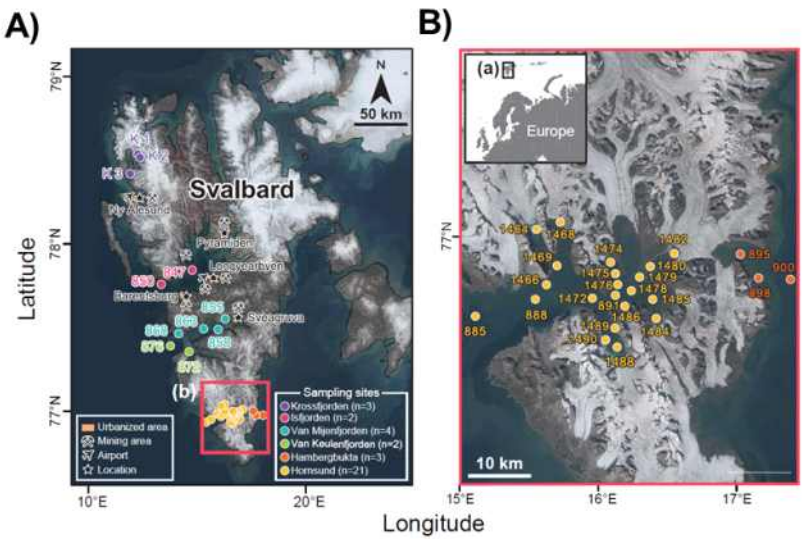


Fig. 213. Map showing the sampling sites in (A) Arctic Svalbard and (B) a zoomed-in map of sampling sites in Hambergbukta and Hornsund. Glacimarine sediments were collected between September 2015 and August 2019. Previously collected and archived samples were used to analyze PTSs.

(나) PTSs의 잠재적 오염원 추정

- 스발바르 퇴적물 내 PCBs의 잠재적 오염원을 추정하기 위해 SPSS 24.0을 이용하여 주성분 분석(Principal component analysis, PCA)를 수행하였음
- 퇴적물 내 PCBs의 제품 기원으로는 Aroclor 5종, Kaneclor 5종, Clophen A 2종, Sovol 1종을 이용하였고, 연소 기원으로는 목재 연소, 음식물 폐기물 연소, 가연성 물질 연소 등 11가지 잠재적 오염원의 조성을 이용하여 주성분 분석을 수행하였음(Pedersen et al., 2015)
- 퇴적물 내 PAHs의 잠재적 오염원 추정은 EPA PMF (Positive matrix factorization) 모델(버전 5.0)을 이용하였음
- PMF 모델링은 15종 t-PAHs와 35개 정점 데이터를 기반으로 수행 하였고, 세 가지 오염원 요인을 도출하였음
- PMF 모델 결과는 각 오염원의 기여도를 정량화하여 PAHs의 잠재적 오염원을 명확히 구분할 수 있도록 하였음

(다) PTSs의 잠재적 생태 위해성 평가

- 퇴적물 내 PCBs와 PAHs의 생태 위해성을 평가하기 위해 위해성 지수(Hazard Quotient, HQ)를 계산하였음
- HQ는 measured environmental concentrations (MEC)를 predicted no-effect concentration (PNEC)로 나누어 계산하였으며, PNEC는 ECOSAR 모델을 통해 96시간 급성 독성(EC50) 값을 기준으로 계산하였음
- 이를 통해 PTSs가 북극 생태계에 미칠 수 있는 잠재적 위험 수준을 평가하였고, 고위험 지역을 확인하였음

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 표층 퇴적물 내 PTSs의 농도 분포

- 스발바르와 주변 지역 표층 퇴적물 내 PCBs의 농도는 검출 한계 미만부터 최대 20 ng g^{-1} dw까지의 범위를 보였으며, 평균 농도는 3.1 ng g^{-1} dw로 나타남(Fig. 214A)
- Van Mijenfjorden 지역에서 평균 PCBs의 농도는 6.1 ng g^{-1} dw로 다른 피오르드 지역에 비해 상대적으로 높게 나타남
- 또한, Hornsund 지역의 일부 정점(site 1472=19 ng g^{-1} dw & site 891=18 ng g^{-1} dw)에서도 상대적으로 높은 PCBs 농도가 관찰됨
- 표층 퇴적물 내 t-PAHs의 농도는 21-3,600 ng g^{-1} dw의 범위로 평균적으로 1,200 ng g^{-1} dw으로 검출됨(Fig. 214B)
- Van Mijenfjorden의 site 855에서 t-PAHs의 농도는 3,600 ng g^{-1} dw로 가장 높은 것으로 관찰됨

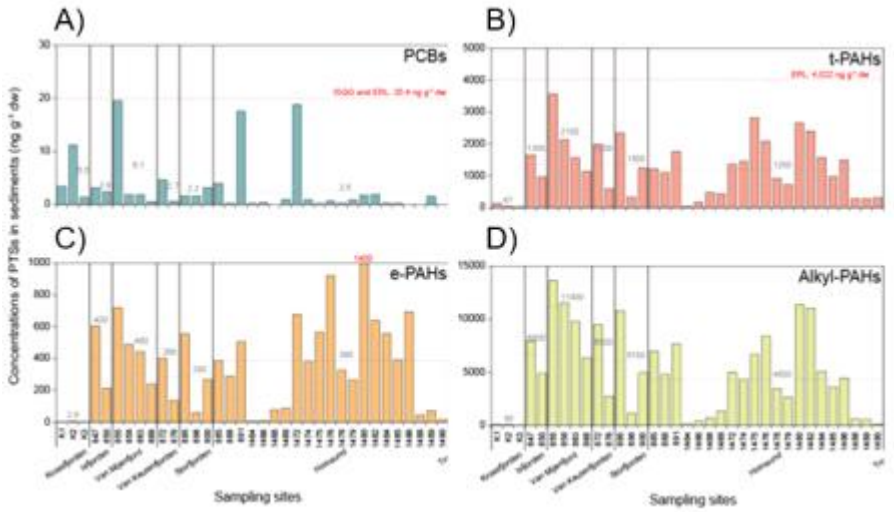


Fig. 214. Concentrations of (A) PCBs, (B) traditional PAHs (t-PAHs), (C) emerging PAHs (e-PAHs), and (D) alkyl-PAHs in the glacimarine sediments of Svalbard. The dotted line represents the regional mean concentration of PTSs.

KOPRI 극지연구소

- 또한, Hornsund site 1475 (2,800 ng g^{-1} dw)와 site 1480 (2,700 ng g^{-1} dw)에서도 상대적으로 높은 농도로 관찰되었음
- 스발바르 퇴적물 내 PCBs와 t-PAHs의 농도는 퇴적물 환경 기준을 초과하지 않았음
- 스발바르 퇴적물 내 e-PAHs의 농도는 1.0-1,400 ng g^{-1} dw의 범위를 보였으며, 평균 농도는 340 ng g^{-1} dw로 나타났음(Fig. 214C)
- Hornsund site 1480 (1,400 ng g^{-1} dw) 내 e-PAHs의 농도는 가장 높았으며, site 1476(900 ng g^{-1} dw)과 Van Mijenfjorden site 855 (700 ng g^{-1} dw)가 뒤따랐음
- Isfjorden, Van Mijenfjorden, Van Keulenfjorden 지역에서는 피오르드 내부에서 외부로 갈수록 t-PAHs와 e-PAHs의 농도가 감소하는 경향이 관찰됨
- 전체적으로, 퇴적물 내 t-PAHs, e-PAHs, alkyl-PAHs의 분포 양상은 서로 유사한 것으로 확인되어, 극지 환경 내 PAHs류의 거동은 유사할 것으로 추측됨
- 스발바르 퇴적물 내 alkyl-PAHs의 농도는 31-15,000 ng g^{-1} dw의 범위를 보였으며, 평균 농도는 5,300 ng g^{-1} dw로 나타남(Fig. 214D)
- Van Mijenfjorden 지역에서 가장 높은 alkyl-PAHs 농도가 관찰되었으며, 특히 site 855 (5,000 ng g^{-1} dw)와 site 858 (12,300 ng g^{-1} dw)에서 두드러짐

(나) 표층 퇴적물 내 PTSs의 잠재적 오염원

- 퇴적물 내 PCBs의 조성은 di-, tri-, tetra-와 같은 low-chlorinated biphenyls가 우세한 것으로 확인되어, 장거리 이동을 통한 유입 가능성을 시사함(Fig. 215A)
- 퇴적물 내 PCBs는 주로 연소 기원으로부터 기인하였을 것으로 추정(Fig. 215B)

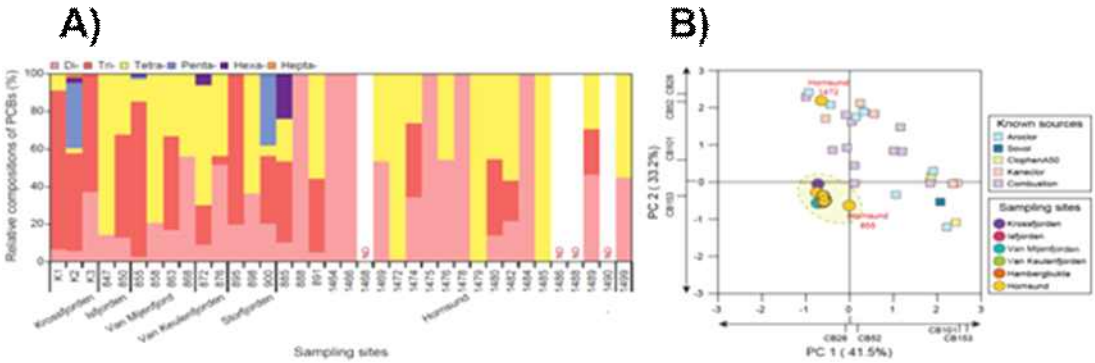


Fig. 215. (A) Relative compositions of individual PCBs and (B) PCA results of PCBs in surface sediments from Arctic Svalbard.

- PMF 모델 분석 결과, 표층 퇴적물 내 PAHs는 이동 수단 및 석유 연소, 석탄, 석탄 연소로 나타남(Fig. 216A)
- 특히, 과거 탄광 활동이 있었던 지역인 Isfjodren와 Van Mijenfjorden은 석탄 연소 기원, 다른 지역은 이동 수단 및 석탄 연소 기원이 우세한 것으로 나타남(Fig. 216B)
- 퇴적물 내 alkyl-PAHs의 조성 분석 결과 Krossfjorden (K1) 정점을 제외하고 나머지 지역의 PAHs는 모두 'bell-shaped' 의 분포를 보였으며, 이는 석탄 및 석유 기원과 관련 있는 것으로 확인됨(Fig. 217)

KOPRI 극지연구소

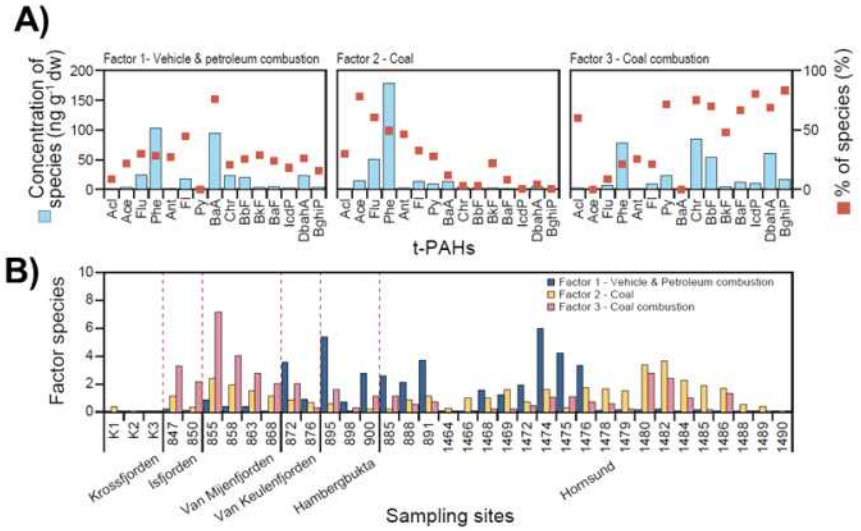


Fig. 216. Results of the positive matrix factorization (PMF) model estimating the sources of PAHs in the glacimarine sediments of Svalbard. (A) Source factors (Factor 1: vehicle & petroleum combustion, Factor 2: coal, and Factor 3: coal combustion) in the PMF model, and (B) contributions of each PAH source.

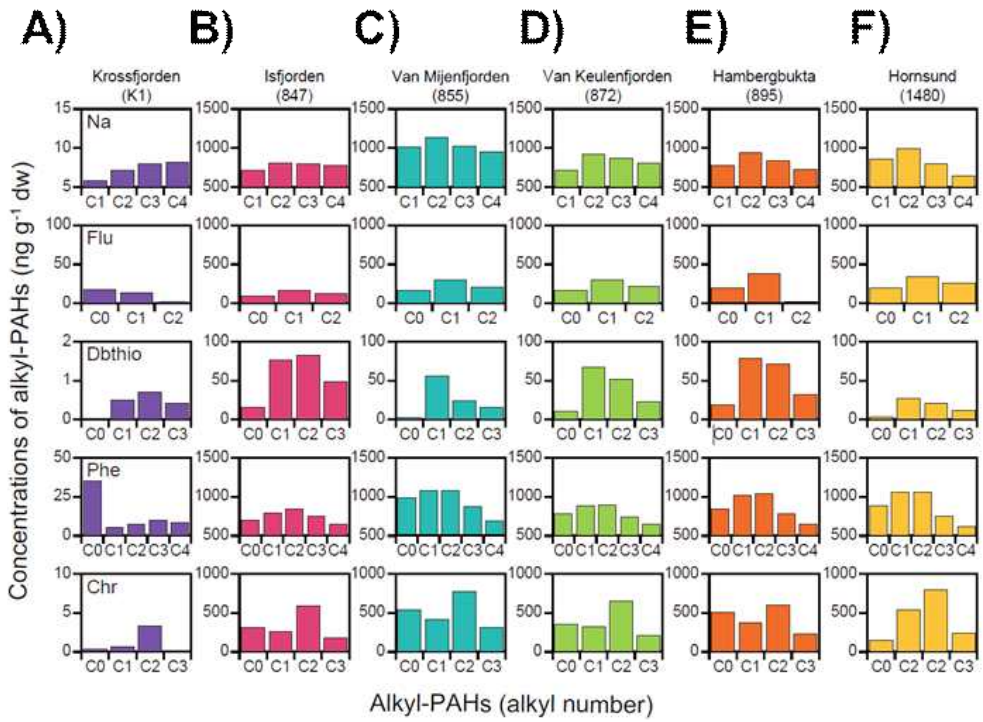


Fig. 217. Relative composition of alkyl-PAHs in the glacimarine sediments of (A) Krossfjorden, (B) Isfjorden, (C) Van Mijenfjorden, (D) Van Keulenfjorden, (E) Hambergbukta, and (F) Hornsund.

KOPRI 극지연구소

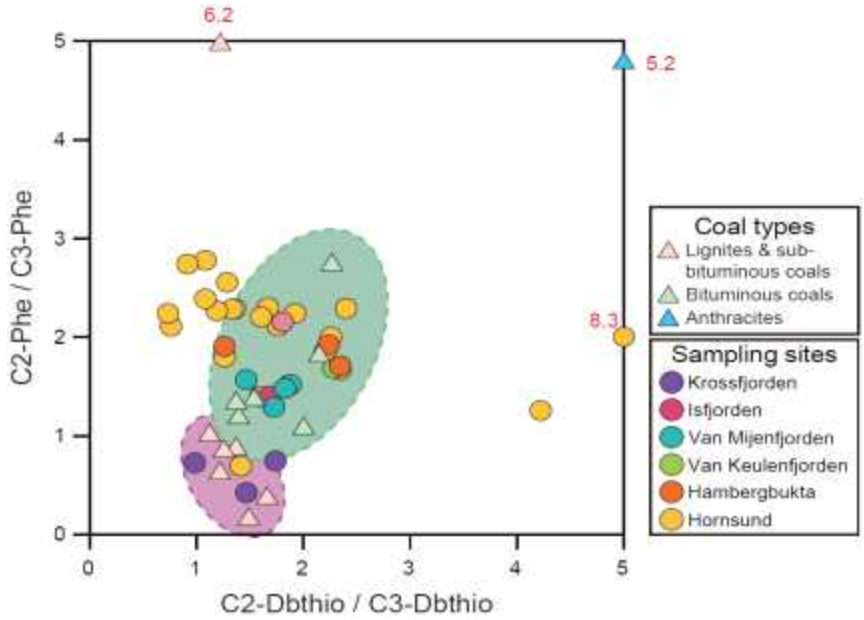


Fig. 218. Diagnostic double ratios (C2-Phe/C3-Phe and C2-Dbthio/C3-Dbthio) in the glacimarine sediments of Svalbard obtained from this study.

- C0-C4 분포는 알킬 그룹의 증가에 따라 C0 > C1 > C2 > C3 > C4 순으로 감소하는 경향을 보였으며, 이는 연소 기원의 특징으로 해석됨
- 이전에 보고된 석탄의 화합물 조성과 비교한 결과, 스발바르 지역 퇴적물의 PAHs는 대부분 bituminous coals (역청탄)과 유사하였고, K1은 lignite (갈탄)으로 추정됨(Fig. 218)

(다) 표층 퇴적물 내 PTSs의 잠재적 생태 위해성

- ECOSAR로 예측된 PNEC를 이용하여 스발바르 퇴적물 내 PCBs, t-PAHs, e-PAHs, alkyl-PAHs의 생태 위해성을 평가하였음
- 퇴적물 내 HQ index는 0.06-33 HQ의 범위로(평균=10 HQ)로 Horsund site 1480 (33 HQ)와 Van Mijenfjorden (31 HQ)에서 상대적으로 높은 생태 위해성이 관찰됨(Fig. 219A), 분석 대상 PTSs 중, t-PAHs (평균=61%)의 기여도가 가장 높은 것으로 확인되었고, 뒤따라 e-PAHs (21%), alkyl-PAHs (13%), PCBs (5%) 순으로 높은 것으로 확인되었음(Fig. 219B)
- 호른준드는 주요 오염원과 멀리 떨어져 있음에도 높은 PTSs 농도와 HQ 값을 보여주며, 이는 영구 동토 해빙으로 인한 PTSs의 재유입과 관련될 가능성이 높음
- 또한, 반 미엔 피오르드는 석탄 기원의 PAHs가 주요 기여 요인으로 작용하는 것으로 관찰됨
- HQ 값은 피오르드 내부에서 외부로 갈수록 감소하는 경향을 보였으며, 이는 유기독성물질이 피오르드 내부에서 유비되고 있음을 시사함(예. 석탄 등)

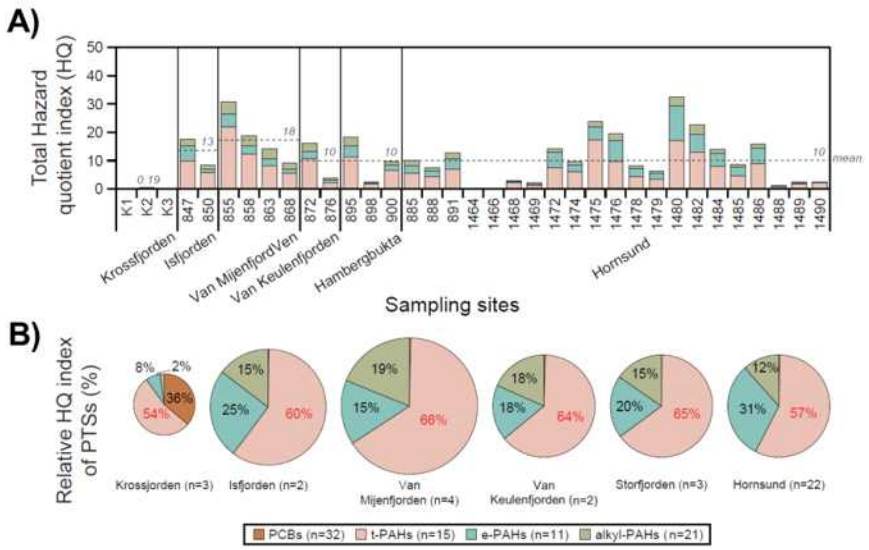


Fig. 219. (A) Hazard quotient (HQ) values for PTSs in the glacimarine sediments of Svalbard. HQ values of each compound group were calculated and summed using the ECOSAR model and measured concentrations. (B) Relative contribution of PTSs to total HQ.

나) 스발바르 피오르드 퇴적물 코어 시료 확보 및 수은 농도 분석

(1) 연구 목적

- 인위적 활동을 통해 배출된 수은은 대기를 통해 장거리 거동되어 극지에 침적되는 것으로 보고되고 있음(Global Mercury Assessment 2018). 또한 북극 스발바르는 따뜻한 북대서양 표층수가 북극해로 유입되는 북극해 관문에 위치하고 있기 때문에 (Farnsworth et al., 2020) 기후변화에 가장 민감한 지역으로 환경적 변화가 가장 빠르게 일어나고 있는 지역임
- 과거 홀로세 기간 동안에도 스발바르는 다양한 기후환경변화를 겪었으며, 홀로세 기후최적기(Holocene Thermal Maximum), 중세 온난기(Medieval Warm Period), 북극 영구해빙형성(Permanent sea-ice cover), 지역적 한냉기(Regional cooling) 등 다양한 기후변화의 영향으로 (Farnsworth et al., 2020) 스발바르 지역 수은 유입원과 유입 경로에 영향을 주었을 것으로 추측됨
- 이에 본 연구는 극지연구소 북극 탐사를 통해 스발바르 서로 다른 피오르드에서 수은 유입원과 유입 경로 변동을 확인하기 위하여 (1) 딕슨피오르드(Dicksonfjorden), (2) 우드피오르드(Woodfjorden), (3) 스토르피오르드(Storfjorden)에서 이미 확보된 3개의 퇴적물 코어를 우선 분석하고, (4) 콩스피오르드(Kongsfjorden) 탐사를 통해 노르웨이 지질조사소(NGU)가 2019년 획득한 퇴적물 코어 시료를 확보할 경우 분석 진행 예정임(2차년도 '항목 다. 스발바르 피오르드 퇴적물 코어 시료 수은 안정동위원소 분석' 참조)
- 딕슨피오르드 퇴적물 코어는 약 299cm 깊이로 시추되었으며, 1m 간격으로 절개되어 밀봉된 후 4℃ 온도에서 보관됨. 약 2cm 간격으로 부시료(subsample)을 채취하여, 수은 농도 분석 전 동결건조 처리 후 시료를 막자사발을 이용하여 균질화하여 딕슨피오르드의 퇴적물 코어 시료 총 30개 분석을 수행하였음
- 우드피오르드 퇴적물 코어는 약 334cm 깊이로 시추되었으며, 딕슨피오르드 퇴적물 코어와 동일한 조건으로 보관됨. 약 5cm 간격으로 부시료(subsample) 채취하여 균질화한 후 우드피오르드 퇴적물 코어 시료 총 20개를 분석함
- 스토르피오르드 퇴적물 코어는 약 240cm 깊이로 시추되었으며, 우드피오르드 퇴적물 코어와 동일한 조건으로 보관되고 부시료가 채취됨. 스토르피오르드 퇴적물 코어 시료 총 20개를 분석함
- 시추 예정인 콩스피오르드 퇴적물 코어 시료 약 20개 분석 예정임
- 이에 본 연구는 스발바르 피오르드에서 획득된 퇴적물 코어 시료 총 90개를 확보하여 수은 농도를 분석하고 시료를 확보 할 경우 계속적으로 분석을 추진 할 예정임.
- 퇴적물 코어 시료의 수은 농도는 포항공과대학교 환경보건평가연구실에서 보유하고 있는 Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) 및 Cold Vapour Atomic Fluorescence Spectroscopy (CV-AFS) 장비를 이용하여 분석함
- 동일 시료의 총유기탄소는 포항공과대학교 지구환경연구실에서 보유하고 있는 총유기

극지연구소

탄소분석기를 이용하여 분석함

- 총유기탄소는 수은과 강하게 결합하여 피오르드 퇴적물에 축적되는 것으로 알려져 있음. 최근 연구에 따르면 융빙으로 인해 얼어있던 육상 토양과 과거 빙하에 축적되어 있던 유기물이 수은과 결합하여 피오르드의 해수로 유입되며 퇴적물에 축적되는 것으로 밝혀졌음 (Kim et al., 2020). 총유기탄소를 분석함으로써 총수은 농도와의 비율을 산정하여 자연적 또는 인위적 오염원의 영향을 파악할 수 있음 (Xue and Kwon et al., 2019)

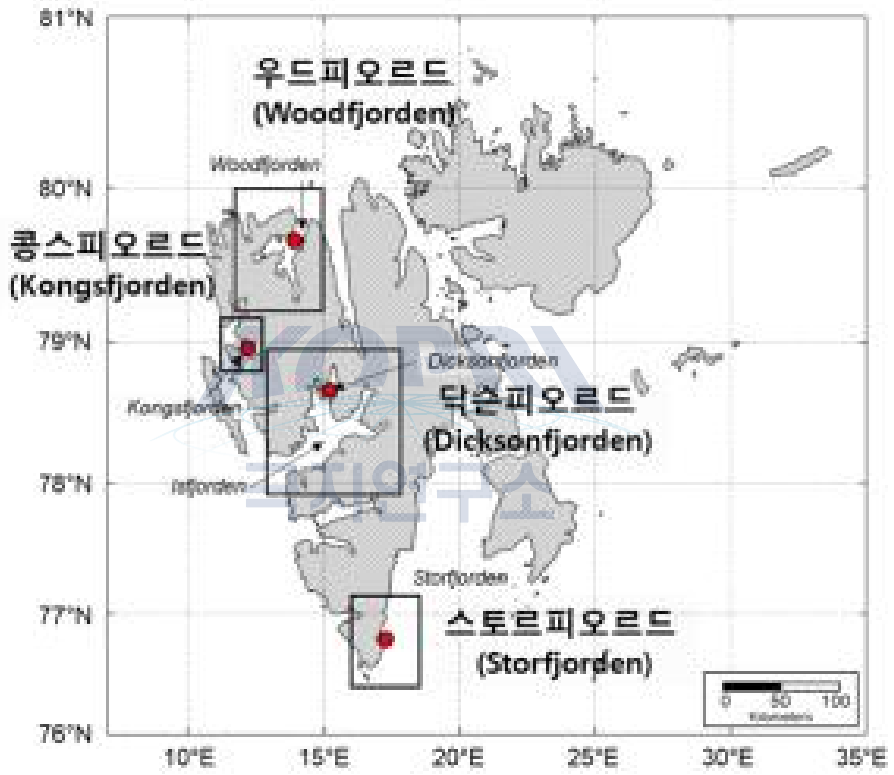


Fig. 220. Map of sampling locations in Svalbard fjords.

(2) 연구 방법

(가) 퇴적물 수은 농도 및 안정동위원소 분석: 딕슨피오르드 및 우드피오르드

- 총 수은 농도(THg)는 Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS; 원자흡수분광기) 및 Cold Vapour Atomic Fluorescence Spectroscopy (CV-AFS; 냉증기원자형광법)을 이용하여 분석하였으며, 수은 안정동위원소는 Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (MC-ICP-MS; 다중검출유도결합플라즈마질량분석기)를 이용하여 분석하였음

- 스발바르 딕슨피오르드(Dicksonfjorden; JM05) 퇴적물 코어 총 33개 및 우드피오르드(Woodfjorden; HH12) 퇴적물 코어 총 20개의 수은 농도와 안정동위원소를 분석 완료하였음

(나) 퇴적물 수은 농도: 스토르피오르드 및 호른준드

- 당초 극지연구소에서 기확보한 딕슨피오르드, 우드피오르드 및 스토르피오르드 퇴적물 시료 외 추가적으로 노르웨이지질조사소(NGU)가 2019년 획득한 콩스피오르드(Kongsfjorden) 퇴적물 코어 시료를 확보하여 분석을 진행할 계획이었으나, 코로나19 상황에 따라 극지연구소에서 이미 확보된 스발바르 호른준드 퇴적물 코어를 우선적으로 분석하여 수은 농도 데이터를 구축함
- 스토르피오르드(Storfjorden; HH19-905GC) 퇴적물 코어 총 15개 및 호른준드(Hornsund; HH19-878GC) 퇴적물 코어 총 25개의 수은 농도 분석 완료함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 딕슨피오르드 및 우드피오르드

- 딕슨피오르드 퇴적물 코어의 총 수은 농도는 15.5 ~ 30.3 ng/g (Fig. 221A), 우드피오르드 퇴적물 코어의 총 수은 농도는 10.3 ~ 39.9 ng/g (Fig. 221E) 사이로 측정됨. 이는 여러 타 연구 논문에서 보고된 산업화 이전 해양 퇴적물 코어의 총 수은 농도 범위와 일치함
- 우드피오르드 퇴적물 코어의 최상부 퇴적물(~1950AD; 0cm depth)에서 가장 높은 총 수은 농도를 보였으며, 최하부 퇴적물(~9.9ka BP; baseline) 대비 3.7배 증가한 값임. 이는 여러 타 연구 논문에서 보고한 인간활동으로 인한 호저 퇴적물 수은 증가세(3-5배)와 일치함. 딕슨피오르드 퇴적물 코어는 ~4.3ka BP에서 가장 높은 총 수은 농도를 보였으며, 이는 최하부 퇴적물(~9.5ka BP; baseline) 대비 1.7배 증가한 값임
- 딕슨피오르드 퇴적물 코어의 수은 안정동위원소 분석 결과, δ^{202}Hg는 -1.72 ~ -0.80‰ (Fig. 221A), Δ^{199}Hg는 -0.13 ~ -0.02‰ (Fig. 221B), Δ^{200}Hg는 -0.03 ~ 0.05‰ (Fig. 221C)로 측정됨. 우드피오르드 퇴적물 코어의 수은 안정동위원소비는 δ^{202}Hg -1.32 ~ -0.61‰ (Fig. 221E), Δ^{199}Hg -0.21 ~ -0.09‰ (Fig. 221F), Δ^{200}Hg -0.03 ~ 0.02‰ (Fig. 221G)로 측정됨. 딕슨피오르드와 우드피오르드 퇴적물 코어의 수은 안정동위원소비는 여러 타 연구 논문에서 보고된 북극 홀로세 해양 퇴적물 코어와 북극 토탄층(peat) 및 기반암의 수은 안정동위원소비와 매우 유사함
- 딕슨피오르드 퇴적물 코어에서는 약 4,300년 전 시료의 δ^{202}Hg에서 통계적으로 유의한 음의 값 (by 0.46‰, >2SD)이 계측되었음 (Fig. 221A). 이는 약 4,300년 전 스발바르 전역의 지역적 냉절기(regional cooling)에 의한 빙하 증가가 일시적인 기반암 침식 증가로 이어지는 추세를 나타냄
- 약 2,000년 전부터 현재(modern- day) 사이에서는 딕슨피오르드 퇴적물 코어의 δ^{202}Hg에서 양의 경향성을 보임(by 0.20‰)(Fig. 221A). 이는 약 2,000년 전

permanent ice cover 증가로 인한 수은 유입원이 변동한 현상과 일치함

- 추가적으로 딕슨피오르트 퇴적물 코어의 $\triangle^{200}$Hg를 살펴본 결과, 약 1,000년 전 통계적으로 유의한 양의 경향성을 보임(by 0.05‰, >2SD) (Fig. 221C). 이는 약 1,000년 전 중세 온난기(Medieval Warm Period) 동안 따뜻한 대서양 해수가 스발바르 연안으로 유입되면서 일차 생산성이 증가한 결과인 것으로 확인됨
- 우드피오르드 퇴적물 코어의 δ202Hg에서는 약 10,000년 전부터 2,000년 전 사이 통계적으로 유의한 음의 경향성을 발견하였으며(by 0.31‰), $\triangle^{199}$Hg와 $\triangle^{200}$Hg에서는 약간의 양의 경향성을 확인하였음. 약 2,000년 전부터 현재 사이에서는 우드피오르드 퇴적물 코어의 δ^{202}Hg (by 0.16‰)와 $\triangle^{199}$Hg (by 0.09‰)에서 통계적으로 유의한 양의 경향성을 발견하였음
- 우드피오르드 퇴적물 코어에서는 딕슨피오르드에 비해 전반적으로 점진적인 수은 안정동위원소의 변화를 보임. 이는 홀로세 전-중기 동안 우드피오르드가 위치한 북쪽 스발바르 지역의 빙하 생성이 상대적으로 현저히 느려지면서 발생한 차이로 추정됨
- 딕슨피오르드와 우드피오르트 퇴적물 코어의 최상부 시료에서는 인위적인 대기 수은 배출 영향이 증가하는 것을 볼 수 있음. 딕슨피오르드의 δ^{202}Hg (−1.04 ~ −0.80‰, n= 3), $\triangle^{199}$Hg (−0.11 ~ −0.06‰, n = 3), △200Hg (0.01 ~ 0.02‰, n = 3)로 측정되었으며, 우드피오르드의 δ^{202}Hg (−1.11 ~ −0.65‰, n= 3), △199Hg (−0.13 ~ −0.09‰, n = 3), $\triangle^{200}$Hg (−0.03 ~ 0.00‰, n = 3)로 측정되었음. 이는 현재까지 보고된 근대 산업화 이전(pre-1850)의 인간 활동(채광, 삼림벌채, 바이오매스 연소 등)에서 배출된 대기 수은의 안정동위원소비와 일치함

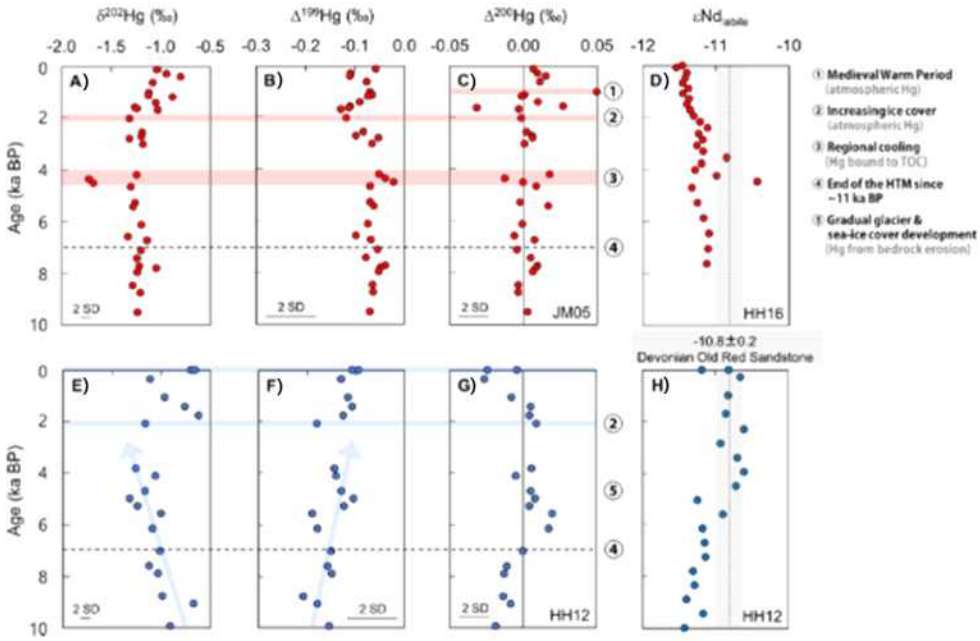


Fig. 221. Temporal variations of ^{202}Hg, ^{199}Hg and ^{200}Hg in Dicksonfjorden A)–C); JM05) and Woodfjorden, E)–G); HH12) sediment cores measured in this study and labile εNd D); gravity core collected from Dicksonfjorden in 2016, H); HH12) reported in Jang et al. (2020).

KOPRI 극지연구소

(나) 스토르피오르드 및 호른준드

- 스토르피오르드 퇴적물 코어의 총 수은 농도는 39.8 ~ 50.8 ng/g, 호른준드 퇴적물 코어의 총 수은 농도는 36.9 ~ 48.4 ng/g (Fig. 222)로 측정됨. 이는 앞서 보고한 딕슨피오르드와 우드피오르드의 퇴적물 총 수은 농도보다 상대적으로 높은 값을 보임
- 스토르피오르드 퇴적물 코어의 총 수은 농도는 시간적 변동 폭이 작은 것으로 보이는 반면 호른준드 퇴적물 코어의 총 수은 농도는 유의미한 증가와 감소 추세를 보임. 호른준드는 스발바르 서남쪽에 위치하여 따뜻한 대서양 해수(West Spitsbergen Current)와 차가운 북극 해수(Sørkapp Current)의 영향을 받는 지역임. 홀로세 기간 동안의 기후 변화로 인해 상대적으로 빙하와 해빙의 형성과 소멸의 변동 폭이 컸을 것으로 추정됨(Zaborska et al., 2017)
- 반면 스토르피오르드는 스발바르 동쪽에 위치하고 있고 주로 차가운 북극 해수(Sørkapp Current)의 영향을 받는 지역임. 최근 보고된 근대(1890~2015) 스토르피오르드의 퇴적물 축적률(0.07cm $year^{-1}$)도 호른준드(0.66cm year−1)와 비교하였을 때 현저히 낮은 것으로 밝혀짐(Zaborska et al., 2017). 따라서 홀로세 기간 동안 스토르피오르드의 수은 유입 및 거동의 변동 폭도 상대적으로 제한적이었을 것으로 추정됨

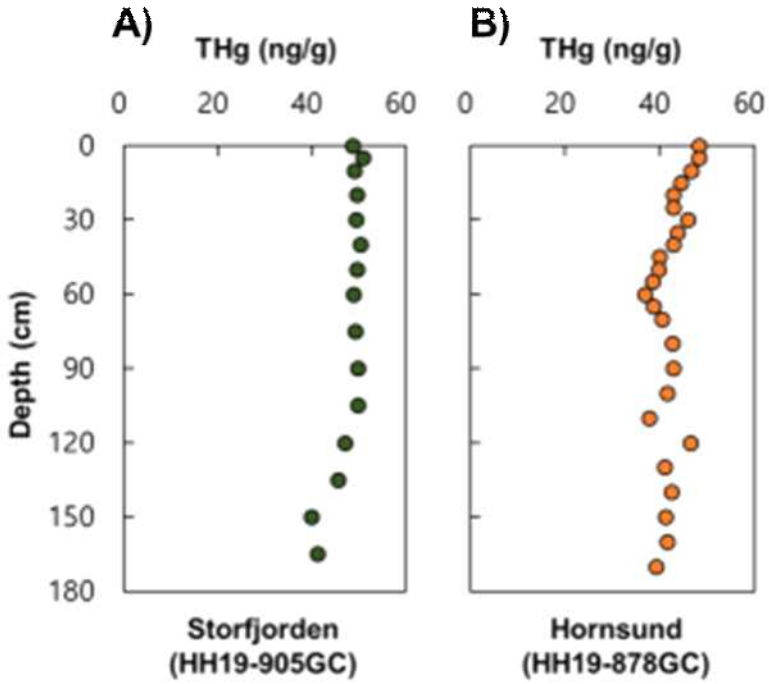


Fig. 222. Map of new sampling locations in Svalbard fjords and total mercury concentrations of (A) Storfjorden (HH19-905GC; in green) and (B) Hornsund (HH19-878GC; in yellow) sediment cores measured in this study.

KOPRI
극지연구소

4-2) 2차년도

가) 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 내 유기독성물질의 분포 특성

(1) 연구 목적

- 전 지구적 기후 변화는 대기 중 이산화탄소의 농도의 상승으로 인해 지구 평균 온도가 지속적으로 상승하는 현상을 특징으로 하며, 이는 가뭄, 홍수, 이상 저온, 사막화, 생태계 교란과 같은 다양한 기후 현상을 초래하고 있음(Schellnhuber et al., 2016)
- 북극 지역은 이러한 기후변화의 영향을 가장 심각하게 받는 지역 중 하나로, 지난 50여년 동안 북극의 평균 기온은 전 세계 평균보다 약 네 배 더 빠르게 상승하였음(Rantanen et al., 2022)
- 이로 인해 빙하 후퇴, 영구동토 해빙, 해빙 감소와 같은 급격한 환경 변화가 발생하고 있으며, 이는 북극 생태계와 환경 시스템에 심각한 영향을 미칠 수 있음(Venkatachalam et al., 2021)
- 이러한 변화는 북극 지역에 축적된 PTSs이 다시 활성화되고 이동하게 하며, 북극 생태계와 환경 건강에 새로운 위협을 가할 수 있음
- 스발바르 군도의 중앙로벤 빙하후퇴지역은 북극 지역의 환경 변화 연구에 있어 중요한

연구 지역으로 간주됨(Ai et al., 2019)

- 특히, 중앙로벤 빙하후퇴지역은 최근의 빙하 후퇴로 인해 대기 환경에 새롭게 노출되었으며, 이는 시간이 지남에 따라 유기물 및 오염 물질의 변화 과정을 관찰하기에 이상적인 장소로 평가됨(Eichel et al., 2015)
- 이 지역의 빙하 유출수(Glacio-fluvial runoff)는 토양의 생지화학적 특성과 오염물질 분포에 영향을 미치며, 이러한 환경 변화는 오염물질의 이동 및 축적 메커니즘을 연구하는 데 중요한 역할을 함(Kim et al., 2022)
- 빙하 후퇴로 새롭게 대기 중에 노출된 토양은 시간이 흐름에 따라 유기물질의 변화를 기록하며, 이는 기후변화가 물질 순환에 미치는 영향을 이해할 수 있음
- 토양은 대기 중 노출된 오염물질의 주요 저장소 역할을 하며, 전체 환경 부하의 90% 이상을 차지하는 중요한 환경 매질임(Aichner et al., 2015)
- 북극의 토양은 연중 대부분이 동결 상태로 유지되어 화학 반응과 영양분의 이동이 느려지고, 유기물 분해도 제한적임(Wild et al., 2014)
- 이러한 특성으로 인해 북극 토양은 유기독성물질의 장기적 저장소로 기능하며, 특히 PAHs와 같은 PTSs의 축적과 분포를 이해하는 데 핵심적인 역할을 함
- 최근 연구에 따르면, 기후변화와 빙하 후퇴로 인해 북극 토양에 축적된 PTSs가 대기로 방출되거나 이동 경로를 따라 재분포 될 가능성이 높아지고 있음(Cabrerizo et al., 2018)
- 본 연구과제의 1단계 2차년도의 첫 번째 목표는 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 내 PTSs의 연대별 분포와 잠재적 오염원을 파악하고자 함

KOPRI 극지연구소

(2) 연구 방법

(가) PTSs 분석

- 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양은 2014년 7월 빙하의 융해로 대기 중에 노출된 시료를 연대별로 채취하였음(Fig. 223)
- 토양 시료의 연대는 80−100년(n=7), 60−80년(n=12), 40−60년(n=16), 20−40년(n=7), <20 년(n=3)을 포함
- 또한, 토양은 빙하 융빙수의 영향을 받는 정점(Runoff, n=13)과 영향을 받지 않는 정점(No−runoff, n=32)으로 나누어 분석하였음
- 동결건조 된 토양 5 g은 DCM을 이용하여 약 20분 동안 고속용매추출 하였음
- 토양 유기 추출액은 회전 증발 농축기와 질소 농축기를 이용하여 1.0 mL (~5 g sediment equivalent (SEq) mL^{-1})로 농축하였음
- 토양 유기 추출액 내 황을 제거하기 위해 활성 구리를 추가하여 제거하였음
- 퇴적물 유기 추출액은 실리카겔 컬럼 크로마토그래피를 이용하여 극성 기반으로 2개의 분액으로 분리하였음
- 표층 퇴적물 유기 추출액 내 유기독성물질(32종 PCBs, 29종 PAHs, 20종 alkyl−PAHs)의 농도는 GC−MSD를 이용하여 정량하였음

(나) PTSs의 잠재적 오염원 추정

- 토양 내 PCBs의 잠재적 오염원을 추정하기 위해 IBM SPSS Statistics 26을 이용하여 PCA를 수행하였음
- Bartlett’s 테스트와 Kaiser−Meyer−Olkin(KMO) 테스트를 통해 통계 분석 데이터의 적합성을 평가하였으며, KMO 값이 기준치(0.6)를 초과하여 분석에 적합한 데이터 세트임을 확인하였음
- PCA는 7가지 PCB 동족체의 상대적 조성 비율을 기반으로 하여, 제품 기원 및 연소 기원을 포함한 주요 오염원을 식별하였음
- PAHs의 주요 오염원을 분석하기 위해 EPA PMF 모델 버전 5.0을 이용하였음
- PMF 모델은 PAHs 데이터를 활용하여 오염원의 기여도를 정량화하며, 본 연구에서는 15개의 EPA PAHs 데이터를 입력값으로 이용하였음
- PMF 모델은 총 100번의 반복을 통해 네 가지 주요 오염원을 확인하였으며, 분석 결과는 선형 회귀 분석에서 높은 적합도를 보였음

KOPRI 극지연구소

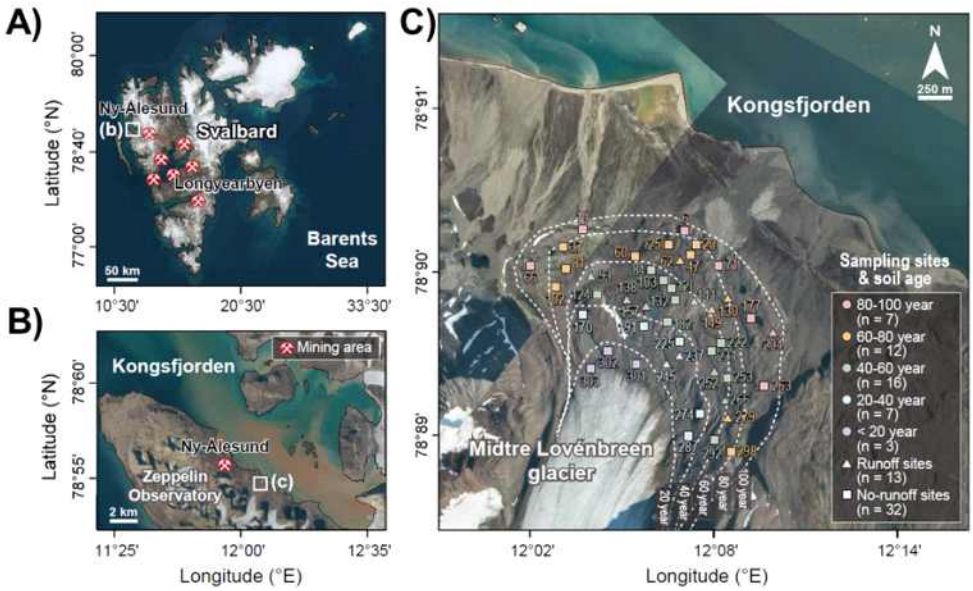


Fig. 223. Map showing the sampling sites in (A) the Arctic Svalbard, (B) Ny-Ålesund, and (C) Midtre Lovenbreen. Forty-five soil samples (0-5 cm) were collected from the foreland of the Midtre Lovenbreen glacier in July 2014. The white lines indicate the glacier retreat timeline as of 2014. Triangles and squares represent sites affected and unaffected by glacio-fluvial runoff, respectively.

KOPRI 극지연구소

(다) PTSs의 축적률 및 플럭스 계산

- 각 토양 연대 그룹의 평균 연령을 기준으로 PTSs의 농도를 나누어 축적률을 계산하였음
- 예를 들어, 80-100년 그룹의 평균 연령은 84년으로 계산하였으며, 이를 이용하여 농도별 축적률을 도출하였음
- 축적 플럭스는 연대별 PTSs 농도 차이를 이용하여 계산하였음
- 예를 들어, 1926-1934년 동안의 축적 플럭스는 80-100년 연대와 60-80년 연대의 PTSs의 농도 차이를 기반으로 산출하였음

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 토양 내 유기탄소, 총 질소 및 입도 분포

- 토양 내 유기탄소 함량은 0.07%-0.96%의 범위로 , 평균 0.37%로 관찰(Fig. 224A)
- 유기탄소 함량은 토양 연대와 비례하여 증가하는 경향을 보였으며, 이는 빙하 후퇴, 토양 노출, 식생 확산 및 유기물 축적 등의 과정과 연관 있을 것으로 예상
- No-runoff 지역의 유기탄소 함량은 Runoff 지역에 비해 약 1.7배 높았으며, ML120

(0.96%), ML71 (0.87%), ML102 (0.83%)에서 높은 유기탄소 함량 값이 관찰됨

- 토양 내 총 질소 함량은 토양 연대와 함께 증가하는 경향을 보이며, 이는 식물성 유기 잔재물과 남세균의 영향으로 설명됨
- 토양 내 C/N 비율은 9.3–23의 범위를 보이며, 평균 값은 14로 확인(Fig. 224B)
- 이 지역의 토양 유기물은 광물화 또는 평형 상태로 확인되었으며, 북극 지역의 낮은 온도로 인해 광물화 과정이 느리게 진행되고 있는 것으로 추정
- 토양의 평균 입도 구성은 70% 모래, 25% 실트, 5% 점토로 나타났음(Fig. 224C)
- Runoff 지역의 토양은 상대적으로 높은 모래 함량을 보였으며, 이는 glacio–fluvial runoff에 의해 가벼운 실트와 점토 입자가 유실되었기 때문으로 추정

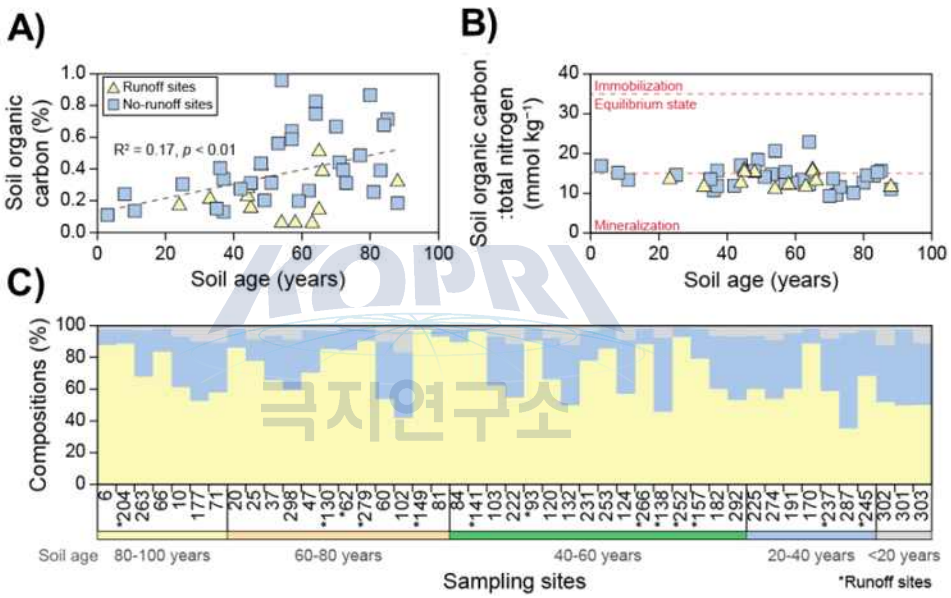


Fig. 224. (A) Correlation between soil organic carbon content (%) and soil age, (B) the ratio of soil organic carbon to total nitrogen associated with soil age, and (C) the relative composition of sand, silt, and clay in soils from the glacier foreland of Midtre Lovenbreen, Svalbard. Data for soil organic carbon, total nitrogen, and grain size were reported in a previous study (Kim et al., 2022).

(나) 토양 내 PTSs의 농도 분포

- 스발바르 토양 내 32 PCBs의 농도는 연대별로 0.29–0.74의 범위로 나타났음(Fig. 225A)
- 80–100년 연대 토양은 20–40년 및 20년 미만 연대 토양과 비교해 유의미한 농도 차이를 보이며, 이는 1970년대 이후 PCBs 사용 규제의 영향을 반영함
- Runoff 지역(0.5 ng g^{-1} dw)과 no–runoff 지역(0.6 ng g^{-1} dw) 간 PCBs 농도는 큰 차이가 없었으며, 이는 PCBs가 토양에 강하게 흡착되는 소수성 특성을 가지기

때문인 것으로 판단(Fig. 225B)

- PCBs의 농도는 ML204 (1.1 ng g^{-1} dw), ML102 (1.1 ng g^{-1} dw), ML6 (0.97 ng g^{-1} dw)에서 높은 것으로 관찰(Fig. 226A)
- 토양 내 28종 PAHs의 농도는 21–80 ng g^{-1} dw로 연대별 변화를 보였으나, 연대 간 유의미한 차이는 관찰되지 않음
- PAHs는 유기탄소 함량과 양의 상관관계를 보이며, 특히 no–runoff 지역에서 runoff 지역보다 약 2.5배 높은 농도를 보였음
- PAHs의 농도는 ML102 (570 ng g^{-1} dw)와 ML222 (200 ng g^{-1} dw)에서 상대적으로 높은 것으로 관찰(Fig. 226B)
- Phenanthrene는 석탄 기원 오염을 나타내는 지표로, 니알슨 폐광 지역에서 채취된 석탄 시료에서도 높은 농도를 보인 것으로 보고됨
- 토양 내 perylene의 농도는 2.9–62 ng g^{-1} dw의 범위로 나타났으며, 연대 및 runoff/no–runoff 지역 간 유의미한 차이는 관찰되지 않음
- Perylene의 농도는 ML102 (670 ng g^{-1} dw)와 ML177 (110 ng g^{-1} dw)에서 상대적으로 높은 것으로 관찰(Fig. 226C)
- Perylene은 저온 환경에서 자연적으로 형성되거나 식물 및 곰팡이에서 생성된 리그닌 유래 화합물과 관련된 것으로 추정

KOPRI
극지연구소

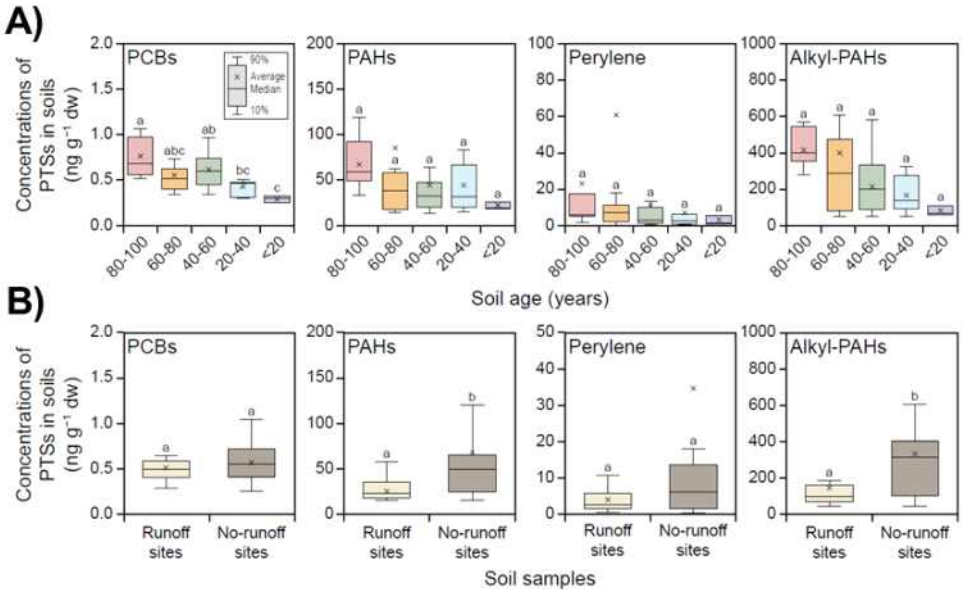


Fig. 225. (A) Concentrations of PCBs, PAHs, perylene, and alkyl-PAHs in soil samples categorized by soil age. Different letters based on the Kruskal-Wallis test indicate significant differences ($p < 0.05$) in the concentrations of PTSs between soil ages. (B) Concentrations of PTSs in soils of runoff sites and no-runoff sites from the glacier foreland of Midtre Lovenbreen, Svalbard. The asterisk (*) indicates statistically significant differences in the concentrations of PTSs between the soil samples ($p < 0.05$, Welch's t-test).

KOPRI 극지연구소

- 토양 내 20 alkyl-PAHs의 농도는 73-420 ng g^{-1} dw의 범위로 나타났으며, 연대 간 유의한 차이는 관찰되지 않음
- 토양 내 alkyl-PAHs의 농도는 no-runoff 지역이 runoff 지역에 비해 약 2.5배 높은 것으로 관찰
- Alkyl-PAHs의 농도는 ML102 (2000 ng g^{-1} dw), ML47 (600 ng g^{-1} dw), ML222 (580 ng g^{-1} dw)에서 상대적으로 높은 것으로 관찰(Fig. 226D)
- 특히, ML102는 높은 점토 함량(17%)과 유기탄소 함량(0.83%)을 특징으로 하며, 이는 PAHs와 alkyl-PAHs의 농도 증가에 기여한 것으로 추정

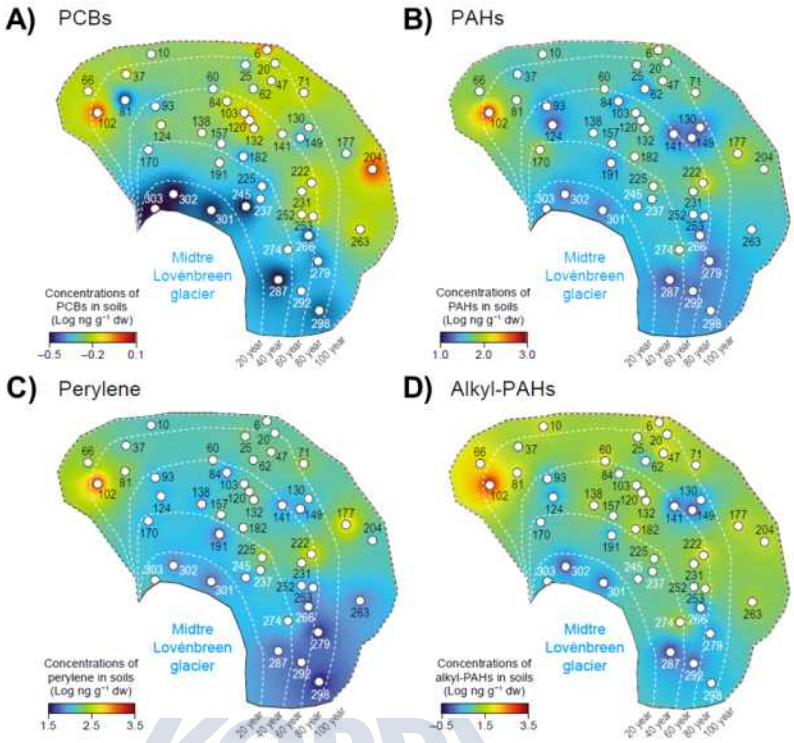


Fig. 226. Spatial distribution of (A) PCBs, (B) PAHs, (C) perylene, and (D) alkyl-PAHs in soil samples from the glacier foreland of Midtre Lovenbreen, Svalbard. The spatial distribution of PTSs in soils was estimated using qGIS software. Concentrations of detected compounds were represented on a logarithmic scale.

(다) 토양 내 PTSs의 잠재적 오염원

- 토양 내 PCBs는 대부분 tetra-CBs로 구성되고, 이는 장거리 수송의 영향을 반영함
- Tetrac-CBs는 높은 휘발성과 소수성을 가지며, 북극과 같은 추운 지역으로의 장거리 이동에 적합함
- 반면, di-CBs와 tri-CBs의 조성은 낮게 나타났으며, 이는 샘플링 당시 기온의 영향을 받은 결과로 보임
- PCA 분석 결과, PCBs는 주로 제품기원(Aroclor, Clophen A, Kanechlor)으로부터 유래된 것으로 나타남(Fig. 227A)
- 이는 이전 연구에서도 북극 지역에서 사용된 폐기 장비와 같은 제품 기원이 주요 오염원임을 시사함
- 특히, PCB52는 주요 상업 물질에서 흔히 발견되며, 대기 환경에서 가장 널리 퍼진 PCB 동족체로 확인되었음
- 반면, 저염소화 PCBs (PCB28)은 기체 상태로 북극에 도달하며, 온도가 상승하면 재휘발되어 대기로 방출될 가능성이 높음

- 토양 내 PAHs는 대부분 저분자량 PAHs(3 ring)로 구성되며, 이는 장거리 수송 및 지역적 오염원의 영향을 받은 결과임
- PMF 모델링 결과, PAHs의 주요 기원은 다음과 같이 1) 디젤 연소, 2) 석유 연소, 3) 석탄 연소, 4) 석탄으로 추정(Fig. 227B)
- 토양 내 PAHs의 잠재적 오염원은 연대별로 주요 기원이 서로 다른 것으로 관찰; 80–100년: 디젤 연소, 60–80년: 석유 연소와 디젤 연소, 40–60년: 석탄과 석유 연소, 20–40년 및 20년 미만: 석탄

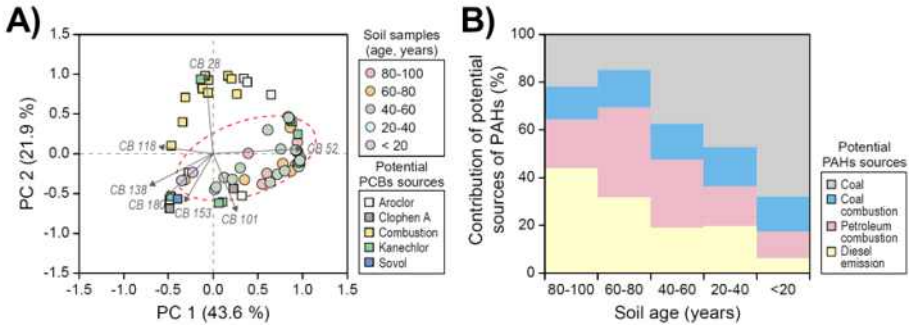


Fig. 227. (A) Source identification of PCBs using principal component analysis (PCA) . (B) The contribution of potential sources of PAHs, such as diesel emissions, petroleum combustion, coal combustion, and coal, estimated using the PMF model in soils from the glacier foreland of Midtre Lovenbreen, Svalbard. Data from the ML170 site in the soil were excluded due to their influence on result interpretation.

- 토양 내 alkyl–PAHs는 연대별로 차이를 보였으며, 주로 석탄 기원 화합물로 나타났고 역청탄과 유사한 조성으로 관찰(Fig. 228A)
- Alkyl–PAHs는 주요 지표 물질인 methyl–Na는 석탄 기원 외에도 먼 거리에서 유입된 산불 기원의 영향을 받을 가능성이 있음
- 연대별 Alkyl–PAHs의 조성은 화학적 성질 차이에 따라 분포가 달라질 수 있음
- Alkyl–PAHs는 연대가 오래된 토양일수록 더 많은 풍화 과정을 거쳤으며, 이는 석탄 이용의 역사적 흔적을 보여줌(Fig. 228B)

(라) 토양 내 PTSs의 축적률 및 플럭스

- 토양 내 PCBs의 축적률은 연대가 어릴수록 점진적으로 증가하는 경향을 보이며, 이는 빙하 후퇴 이후 공기 및 에어로졸에서 PCBs가 퇴적되어 토양 표면층에 남아있는 영향을 반영함(Fig. 229A)
- PCBs의 축적 플럭스는 시간이 지남에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보였으며, 이는 1990년대 중반 이후 스발바르 지역 환경 시료에서 PCBs 농도가 감소한 추세와 일치함

- 높은 염소화 PCBs는 특히 연대가 어린 토양에서 상대적으로 높은 비율로 발견되었으며, 이는 PCBs가 빙하 물에 유실되기보다는 토양에 직접 흡착한 결과
- 토양 내 PAHs의 축적률은 연대가 어린 토양에서 증가하였으며, 이는 빙하 후퇴 후 토양 표면에 남아있는 빙하 하부 물질의 영향을 받았을 가능성이 있음(Fig. 229B)

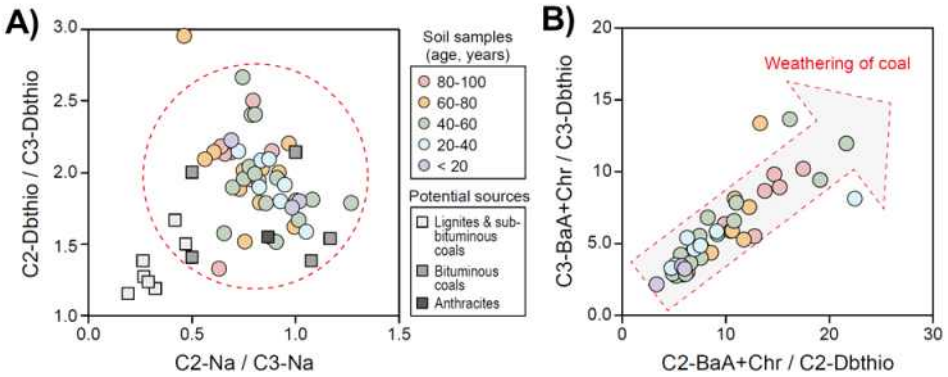


Fig. 228. (A) Diagnostic double ratios (C2-Na/C3-Na and C2-Dbthio/C3-Dbthio) in soil samples from this study and coals reported in previous studies. (B) Diagnostic double ratios for weathering characteristics between C2-BaA + Chr/C2-Dbthio and C3-BaA + Chr/C3-Dbthio in soil samples from the glacier foreland of Midtre Lovenbreen, Svalbard.

KOPRI 극지연구소

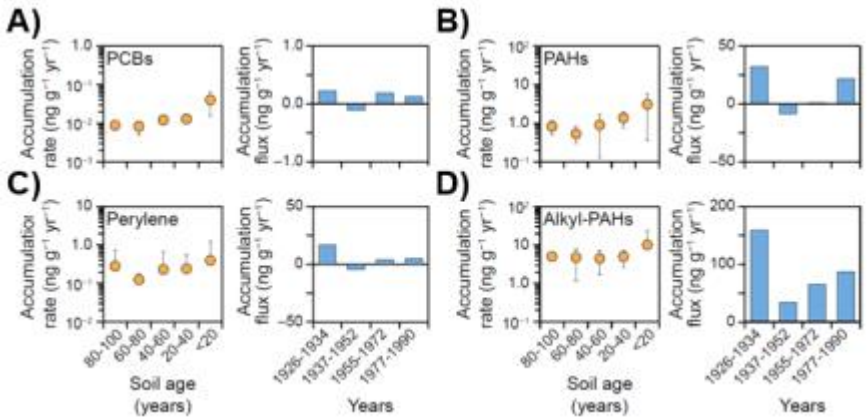


Fig. 229. Accumulation rate and flux of (A) PCBs, (B) PAHs, (C) perylene, and (D) alkyl-PAHs in soil samples from the glacier foreland of Midtre Lovenbreen, Svalbard. Data from the ML102 site were excluded.

- PAHs의 축적 플럭스는 1926-1934년과 1977-1990년에 두드러지게 높게 나타나씅ㅁ
- 1922-1934년은 스발바르 석탄 채굴이 시작된 직후로, 채굴 사업의 활발한 진행이 영향을 미친 것으로 예상
- 1977-1980년의 플럭스 증가는 산업 활동의 영향을 반영한 결과로 해석

- 최근 인간 활동으로 인해 PAHs의 축적 플럭스를 예측하기는 어렵지만, 1990년대 중반 이후 전 세계적으로 PAHs 배출이 감소하면서 스발바르 지역 공기 시료에서도 농도가 감소한 것으로 나타났음
- 토양 내 perylene의 축적률 및 플럭스는 PAHs와 유사한 경향을 보였으나, 1977-1990년대와 20년대 미만 연대 사이에서 약간의 차이를 보였음(Fig. 229c)
- Perylene의 분포는 시간에 따른 증가나 감소보다는 지역적 특성과 시료 채취 지역에 따른 차이를 보이는 것으로 나타남
- 자연적으로 발생하는 perylene은 이 물질의 기원과 함께 북극 지역 환경 시료에서 PAHs의 잠재적 기원을 추가로 조사할 필요성이 있음
- 토양 내 alkyl-PAHs의 축적률은 모든 토양 연대 그룹에서 일정한 패턴 관찰(Fig. 229d)
- Alkyl-PAHs의 축적 플럭스는 연대에 관계 없이 꾸준히 높은 수준으로 유지했으며, 이는 스발바르 전역에 걸쳐 석탄 유래 alkyl-PAHs가 주요 오염원임을 보여줌
- Alkyl-PAHs는 여전히 높은 농도로 관찰되었으며, 이는 버려진 석탄 광산, 인간 활동, 자연적으로 매장된 석탄 기원의 영향을 반영함

(마) 이전 연구와의 비교

- 본 연구 지역의 PCBs 농도는 동일 지역의 Ny-Ålesund 및 London Island에서 보고된 농도보다 약 3배 낮았으며, Pyramiden 및 Bjornoya 지역보다는 낮지만 Longyearbyen 지역보다는 높은 수준으로 관찰(Table 48)
- 본 연구 지역의 PCBs 농도는 캐나다 북극권 지역에 비해 전반적으로 낮은 경향
- PAHs 농도는 Ny-Ålesund, Billefjorden, Pyramiden 지역에서 보고된 농도보다 낮았음
- 러시아 북극권과 비교했을 때, 본 연구 지역의 PAHs 농도는 대부분 낮은 수준으로 나타났으나, Vilkitsky Island와 비교했을 때는 유사한 수준으로 관찰
- 전반적으로, 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 내 PTSs 총 농도는 다른 북극 지역의 토양보다 전반적으로 낮은 수준으로 관찰

Table 48. Concentrations of PCBs and PAHs in soils of Arctic regions obtained from this study and previous studies.

Compounds and country	Region	# of sites	# of targets	Concentrations (ng g^{-1} dw)
PCBs				
Norway	Ny-Ålesund (Midtre Lovenbreen)	45	32	0.57 (This study)
	Ny-Ålesund and London Island	7	25	1.4
	Pyramiden	31	7	1.1
	Longyearbyen	30	7	0.01
	Bjørnøya	-	27	-
Canada	Distant Early Warning Line	21	-	4.6
	Melville Island	28	70	0.12
	Cornwallis Island	8	70	0.51
PAHs				
Norway	Ny-Ålesund (Midtre Lovenbreen)	45	28	56
	Ny-Ålesund	12	16	160
	Billefjorden	3	15	250
	Pyramiden	8	16	2780
Russia	Island Vilkitsky	2	14	40
	Islands Izvestii TslK	2	14	1400
	Cape Chelyuskin	2	14	630
	Island Belyi	2	14	170
	Cape Sterligov	2	14	150
	Yamal-Nenets autonomous region	41	16	99

KOPRI 극지연구소

나) 스발바르 니알슨 주변 다매체 환경 내 유기독성물질의 분포 특성

(1) 연구 목적

- 스발바르 군도의 스피츠베르겐에 위치한 니알슨은 세계에서 가장 북쪽에 위치한 거주지 중 하나임(Dowdall et al., 2004)
- 이 지역은 다양한 식물(예: 이끼)과 동물(예: 북극곰, 순록) 뿐만 아니라 석탄과 같은 광물 자원이 존재하는 독특한 생태 환경을 제공함(Dowdall et al., 2004)
- 니알슨은 북극 환경에 영향을 미치는 PTSs의 오염역사가 존재하며, 이러한 PTSs는 대기 및 해류를 통한 장거리 이동으로 유입과 과거 석탄 채굴, 연구 활동, 관광 등 지역적 오염원 또한 이 지역의 오염에 기여하였음(Jiao et al., 2009)
- 특히, 니알슨은 20세기 초중반 석탄 채굴 사업이 활발하게 진행되었으나, 채굴 작업 중 폭발 사고로 인해 광산 운영이 완전히 중단되었으며, 이로 인해 장비와 석탄 잔존물이 여전히 이 지역에 남아있음(Dowdall et al., 2004)
- 오늘날 니알슨은 국제적 북극 환경 연구의 중심 기지로 활용되고 있으나, 인간 활동으로 인한 지역적 오염은 여전히 지속되고 있음(Jiao et al., 2009)
- 이에 따라, 니알슨(콩스피오르드)에서 채취된 PTSs의 농도는 다른 피오르드 지역에 비해 상대적으로 높은 수준을 나타냄(Lin et al., 2022)

- PTSs는 퇴적물, 물, 토양과 같은 여러 환경 매질에 분포하며, 각 매질은 PTSs의 이동, 분포 그리고 생태 위해성을 이해하는 데 중요한 역할을 할 수 있음
- 퇴적물은 PTSs가 장기적으로 저장되며, 과거 오염원을 추적하거나 생태계로의 재유입 가능성을 평가할 수 있는 매질임
- 물 내 PTSs는 지속적인 오염원과 서식 생물로의 전달 가능성을 평가하는 데 중요한 지표 역할을 함
- 토양은 PTSs가 장기간 보존될 수 있는 매질로, 광물질과 유기탄소 함량에 따라 오염물질의 분포가 달라질 수 있음
- 이러한 환경 다매체 분석은 PTSs 오염의 분포 패턴, 주요 오염원, 그리고 생태 위해성을 종합적으로 평가하는 데 필수적임
- 특히, 니알슨과 같은 북극 지역에서는 과거 석탄 채굴, 연구 활동, 관광 등 다양한 인위적 요인이 PTSs의 다매체 분포에 영향을 미칠 가능성이 크기 때문에, 다매체 분석은 오염의 범위와 심각성을 파악하는 데 중요한 역할을 함
- 본 연구과제의 1단계 2차년도의 두 번째 목표는 스발바르 니알슨(다산과학기지) 인근 환경 다매체 시료(퇴적물, 물, 토양, 석탄) 내 PTSs의 분포를 파악하고자 함

(2) 연구 방법

(가) 니알슨 환경 다매체 시료 채취 지역

- 스발바르 니알슨 다산과학기지 주변 12개 정점에서 퇴적물, 물, 토양, 석탄과 같은 환경 다매체 시료 채취(Fig. 230)
- 스발바르 지역의 퇴적물, 물, 토양, 물 시료는 빙하의 melting water가 흐르는 지역에서 채취하였음
- 석탄 시료는 과거 탄광 활동의 흔적이 남아있는 정점에서 채취

(나) 퇴적물, 토양 및 석탄 내 PTSs 분석

- 동결건조 된 퇴적물, 토양, 석탄 시료 10 g은 DCM을 이용하여 약 20분 동안 고속용매추출 하였음
- 퇴적물, 토양, 석탄 유기 추출액은 회전 증발 농축기와 질소 농축기를 이용하여 1.0 mL로 농축하였음
- 유기 추출액 내 황을 제거하기 위해 활성 구리를 추가 처리하였음
- 다매체 시료의 유기 추출액은 실리카겔 컬럼 크로마토그래피를 이용하여 극성 기반으로 2개의 분액으로 분리하였음(F1: 비극성, F2: 중극성 분액)
- 유기 추출액 내 PTSs는 GC-MSD를 이용하여 농도 정량 하였음
- 분석 대상 PTSs는 다음과 같음: 32종 PCBs, 15종 t-PAHs, 14종 e-PAHs, 20종 alkyl-PAHs, 10종 styrene oligomers (SOs), 6종 alkyl-phenols (APs), 총 97종

Fig. 230. Map showing the sampling sites of environmental multimedia samples in Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

(다) 물 내 PTSs 분석

- ENVI-DISK에 포집된 물 시료는 20 mL의 아세토니트릴을 이용하여 약 15분 동안 소니케이션 추출 하였음
- 소니케이션 추출 한 물 시료는 원심 분리기를 이용하여 10분 동안 원심 분리(2500 rpm) 한 후 상등액을 분취하였음
- 상등액은 hexane으로 용매 치환 후 GC-MSD를 이용하여 총 97종 PTSs를 분석하였음

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 퇴적물 내 PTSs 분포

- 퇴적물 내 PCBs의 농도는 St.3 (8.1 ng g^{-1} dw)과 St.4-1(3.8 ng g^{-1} dw)에서 상대적으로 높은 결과를 보였음(Fig. 231)
- 퇴적물 내 PAHs는 기지 주변 및 탄광 지역인 St.3, St.4-1, St.4-2에서 상대적으로 높았으며, 기지로부터 먼 지역에 비해 약 100배 이상 높은 농도를 보임
- SOs와 APs는 St.3과 St.4 기지 주변에서 상대적으로 높았고, 주변 지역에 비해 약 20-30배 높은 수준을 보임

(나) 표층수 내 PTSs 분포

- 스발바르 표층수 내 PCBs의 농도는 평균 0.78 ng L^{-1}의 농도를 보였고, St.13 (1.7 ng L^{-1})에서 가장 높게 관찰됨(Fig. 232)

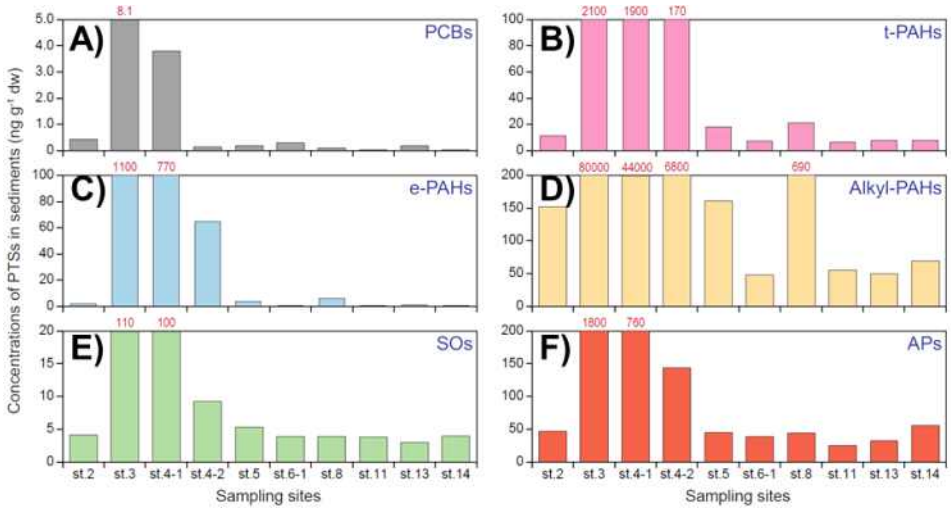


Fig. 231. Distribution of (A) PCBs, (B) t-PAHs, (C) e-PAHs, (D) Alkyl-PAHs, (E) SOs, and (F) APs in surface sediments from Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

- 표층수 내 t-PAHs의 농도는 평균 67 ng L^{-1}의 농도로 e-PAHs (7.2 ng L^{-1})에 비해 상대적으로 높은 것으로 확인되었고, 모두 St.13에서 높게 나타남
- Alkyl-PAHs의 농도는 33-66 ng L^{-1}의 범위를 보였고, 정점 간 서로 유사한 결과를 보임

KOPRI
극지연구소

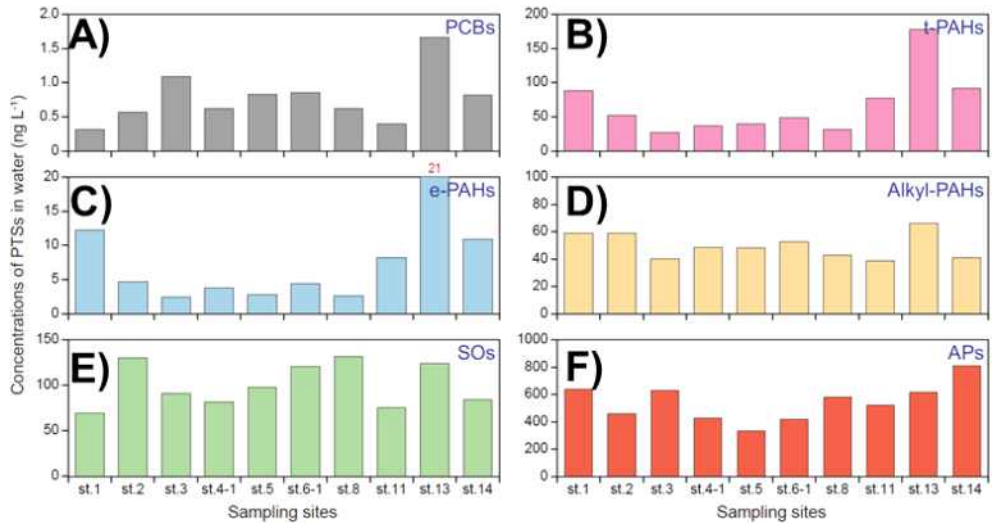


Fig. 232. Distribution of (A) PCBs, (B) t-PAHs, (C) e-PAHs, (D) Alkyl-PAHs, (E) SOs, and (F) APs in surface water from Kongfjorden, Arctic Svalbard.

(다) 토양 내 PTSs 분포

- 표층수 내 SOs (100 ng L^{-1})와 APs (540 ng L^{-1})는 다른 화합물에 비해 상대적으로 높은 농도로 관찰되었고, 퇴적물 내 PTSs의 분포 경향과는 서로 상이함
- 스발바르 토양 내 PTSs의 농도는 St.4에서 상대적으로 높은 것으로 나타남(Fig. 233)
- 토양 내 높은 농도의 alkyl-PAHs가 축적된 것으로 확인되며, 이는 탄광 활동의 영향을 받은 것으로 판단됨

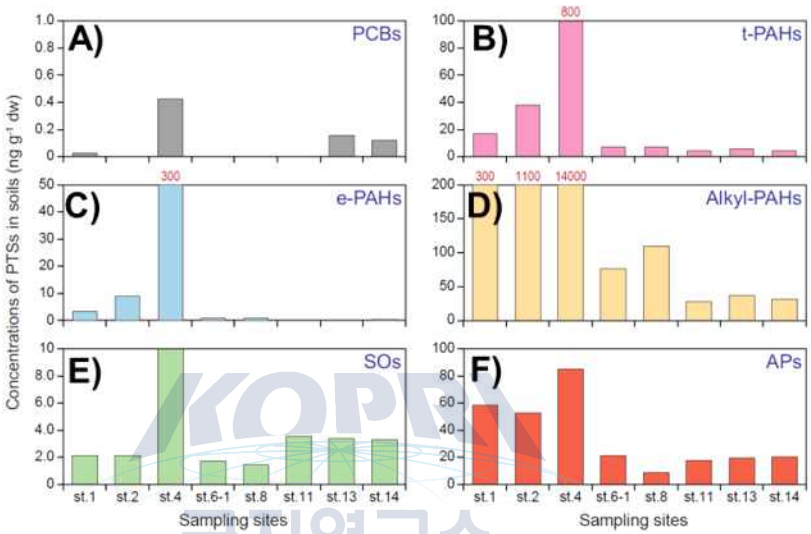


Fig. 233. Distribution of (A) PCBs, (B) t-PAHs, (C) e-PAHs, (D) Alkyl-PAHs, (E) SOs, and (F) APs in soils from the Kongfjorden region, Arctic Svalbard.

(라) 석탄 내 PTSs 분포

- 스발바르 석탄 시료 내 t-PAHs, e-PAHs, alkyl-PAHs의 농도는 다른 환경 시료와 비교하여 상대적으로 높은 것으로 관찰(Fig. 234)

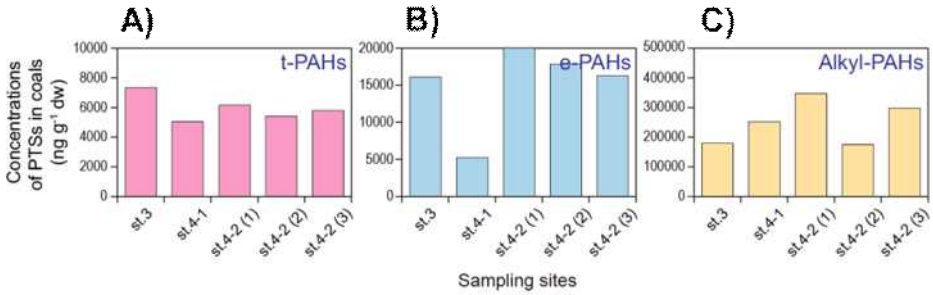


Fig. 234. Distribution of (A) t-PAHs, (B) e-PAHs, and (C) Alkyl-PAHs in coal residues from the Kongfjorden region, Arctic Svalbard.

다) 스발바르 피오르드 퇴적물 코어 시료 수은 안정동위원소 분석

(1) 연구 목적

- 스발바르는 북대서양 표층수가 유입되는 곳에 위치하고 있기 때문에 기후변화에 민감하여 과거 홀로세 동안 스발바르는 다양한 기후환경변화를 겪었음. 그 영향으로 스발바르 지역 수은 유입원과 유입 경로에 영향을 주었을 것으로 추측됨
- 수은은 총 7개의 안정동위원소(196Hg, 198Hg, 199Hg, 200Hg, 201Hg, 202Hg, 204Hg)를 가지고 있음. 각 환경 시료 및 수은 오염원은 특정 수은 안정동위원소 비를 (δ202Hg/△199Hg) 가지고 있으며, 수은 안정동위원소 분별작용(fractionation)을 통해 매체간 이동경로 및 생지화학적 특성에 대한 정보를 얻을 수 있는 장점을 갖고 있음(Kwon et al., 2020; Kwon and Selin, 2016)
- 과거 기후환경변화에 따른 수은 농도 및 안정동위원소 복원을 통해 현재와 미래 기후변화에 따른 환경변화가 수은의 유입원과 유입 경로에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고 예측할 수 있음
- 이에 본 연구에서는 스발바르 국제공동탐사를 통해 획득된 (1)스토르피오르드(Storfjorden), (2)콩스피오르드(Kongsfjorden) 및 (3)호른준드 피오르드 퇴적물 시료를 활용하여(Fig. 235) 수은 농도 및 안정동위원소 비를 분석하고 스발바르 기반암의 수은 농도를 분석하여, 과거 홀로세 기후환경 변화에 따른 수은 유입원과 유입 경로를 추적하고자 함

KOPRI 극지연구소

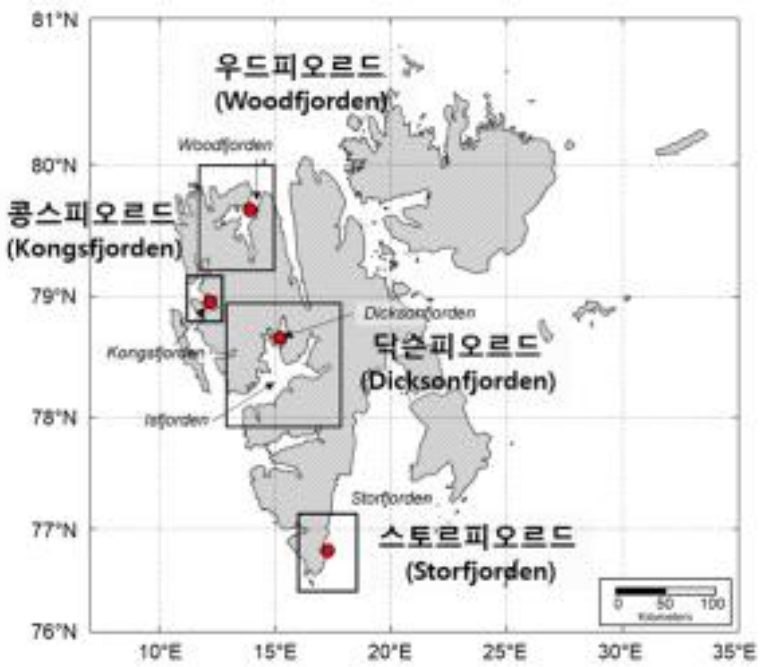


Fig. 235. Map showing the locations of Arctic Svalbard sediment samples.

(2) 연구 방법

- 총수은 농도는 포항공과대학교 환경보건평가연구실에 있는 NIC 사의 수은분석기(NIC-Mercury Analyzer 3000, NIC-MA3000)와 냉증기원자형광분석기(Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometer, CV-AFS)를 분석하였음. NIC-MA3000과 CV-AFS로 분석된 수은 농도를 비교해 분석결과의 정확성을 확인하였으며 수은 회수율은 평균 회수율은 107%로 확인되었음
- 수은 안정동위원소는 Blum et al. (2007)에 제안된 방법을 바탕으로 다검출기 유도결합 플라즈마 질량 분석기(Multi-collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, MC-ICP-MS)를 사용하여 분석하였음. 분석 값의 정밀도 및 정확성은 3종류의 수은 안정동위원소 표준물질 NIST SRM-3133, NIST RM-8610 (UM-Almaden), TORT-3을 이용하여 평가하였음

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 스토르피오르드 및 콩스피오르드 퇴적물 수은 농도

- 스토르피오르드(Storfjorden; HH19-905GC) 퇴적물 코어 총 15개 및 콩스피오르드(Kongsfjorden; KH17) 총 49개의 수은 농도 분석 완료함
- 스토르피오르드 퇴적물 코어의 총 수은 농도는 39.8 ~ 50.8 ng/g, 콩스피오르드 퇴적물 코어의 총 수은 농도는 18.8 ~ 56.5 ng/g (Fig. 236)로 측정됨. 앞서 보고한 딕슨피오르드와 우드피오르드의 퇴적물 총 수은 농도보다 상대적으로 높은 값을 보임

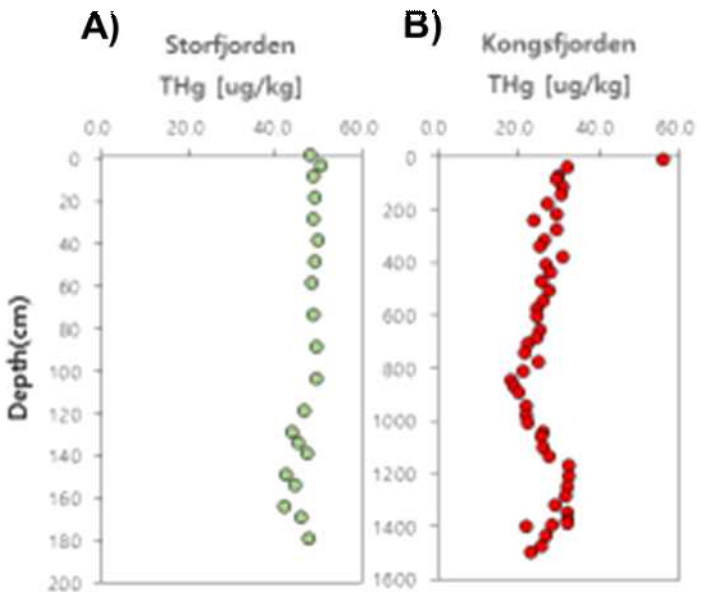


Fig. 236. Temporal variations in total mercury concentration (THg) of (A) Storfjorden and (B) Kongsfjorden sediment cores measured in this study.

(나) 호른준드 퇴적물 수은 농도 및 안정동위원소

- 호른준드(Hornsund; HH19-878GC) 퇴적물 코어 총 25개의 수은 농도 분석 완료함. 호른준드 퇴적물 코어의 총 수은 농도는 36.9 ~ 48.4 ng/g로 측정됨
- 호르준드 퇴적물 코어의 수은 안정동위원소 분석 결과(총 12개), δ202Hg는 -1.44 ~ -0.83‰ (Fig. 110), △199Hg는 -0.16 ~ -0.09‰ (Fig. 237), △200Hg는 -0.03 ~ 0.02‰ (Fig. 110)로 측정됨. 호르준드 퇴적물 코어의 수은 안정동위원소비는 앞서 보고한 딕슨피오르드, 우드피오르드에서 확인된 수은 안정동위원소비와 유사함

(다) 스발바르 기반암 수은 농도

- 스발바르 피오르드 퇴적물 코어의 수은 안정동위원소 end member를 확인하여 수은 유입원 변동에 대한 더욱 구체적인 정보를 도출하기 위해 극지연구소에서 기 획득한 스발바르 기반암 시료를 확보함. 총 8개의 기반암 시료 수은 농도 분석을 완료함. 총 수은 농도는 3.2 ~ 22.8 ng/g 로 측정됨

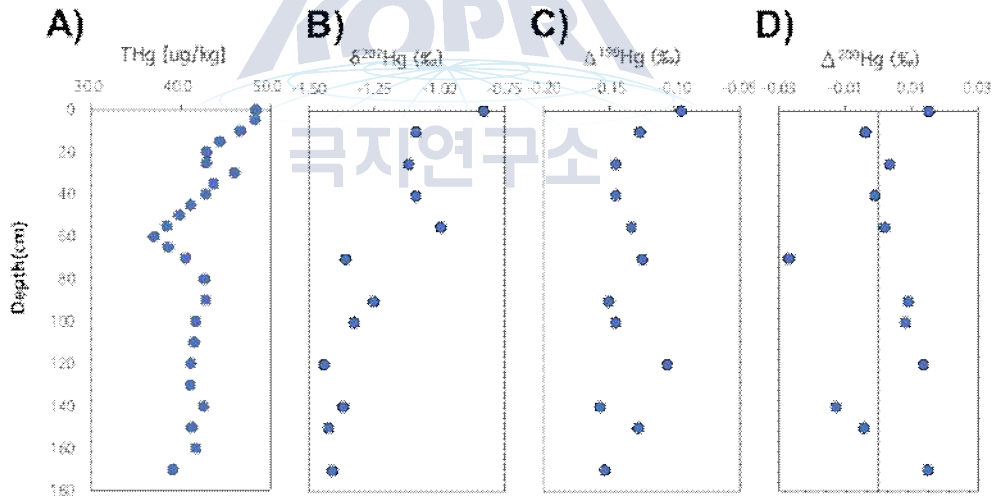


Fig. 237. Temporal variations of (A) THg, (B)δ^{202}Hg, (C) Δ^{199}Hg, and (D) Δ^{200}Hg in Hornsund sediment cores measured in this study.

4-3) 3차년도

가) 스발바르 피오르드 유기독성물질의 오염역사 및 침전 플럭스 규명

(1) 연구 목적

- 유기독성물질은 환경 내에서 잘 분해되지 않고, 오랫동안 잔류하는 특성이 있으며, 독성을 가지고, 생물 체내에 축적되며, 대기 또는 해류를 따라 먼 거리까지 이동하는 특성을 보이며(Holoubek et al., 2011), 일반적으로 높은 친화성을 가지고 있어 수괴 환경에서 물보다는 입자 및 퇴적물에 흡착되는 특성을 보이며, 건식 또는 습식 침전을 통해 해양환경으로 유입될 수 있음(Ross and Birnbaum, 2003)
- 본 연구과제의 2차 년도에서는 콩스피오르드의 환경 다매체 시료 내 축적된 유기독성물질의 전반적인 오염패턴을 확인하였음
- 현재까지, 스발바르 지역의 표층 퇴적물 내 축적된 유기독성물질의 분포를 밝힌 연구는 일부 수행되어 왔으나, 시추 퇴적물을 이용한 연구는 다소 제한적임
- 유기독성물질은 높은 지속성으로 인해 환경 내에서 잘 분해가 되지 않으며 오염역사의 기록이 시추 퇴적물에 보존되고, 유기독성물질의 유입과 침전은 계절적인 변화가 나타날 수 있으며, 수년-수십 년 규모에서 장기적인 변동이 존재할 수 있음
- 특히, 유기독성물질은 대부분 인간 활동에 의해 인위적으로 합성된 물질로 자연 배경농도는 없어, 짧은 시추 퇴적물을 세밀하게 분석하는 것이 유용함
- PCBs는 1929년부터 활발하게 사용된 물질로, 화합물 특유의 절연성과 난연성으로 인해 변압기, 차단기의 절연유, 전자기기 등 다양한 용도로 사용되어 왔으나, 환경 내 지속성, 독성, 생물축적성으로 인해 스톡홀름 협약에서 지속성 유기오염물질로 지정되어 1970년대 이후 생산 및 사용이 규제됨(Muir et al., 2003)
- PAHs는 석탄의 불완전한 연소, 원유, 자동차 배출가스, 쓰레기 소각, 식품 조리, 금속 제련 등과 같은 기원으로부터 생성되어, 다양한 경로를 통해 수 환경으로 유입됨(Gong et al., 2018)
- Alkyl-PAHs는 석탄 오염을 지시하는 물질로 니알슨 지역(콩스피오르드)은 지난 1910년부터 1960년까지 탄광 사업이 활발하게 진행되었음
- 본 연구에서는 스발바르 콩스피오르드의 시추 퇴적물 내 축적된 유기독성물질의 농도, 조성 및 잠재적 오염원을 확인하고자 하며, 분석한 유기독성물질은 폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyls, PCBs), 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), 그리고 알킬 PAHs (alkyl-PAHs)를 포함함

(2) 연구 방법

(가) 시추 퇴적물 내 유기독성물질 전처리 및 농도 분석법

- 2022년 7월 스발바르 콩스피오르드 지역의 외측(HH22-1159), 중간(HH22-1161), 및 내측(HH22-1163) 정점에서 채취된 시추 퇴적물 시료(총 80개)를 이용하였음(Fig. 238)
- 콩스피오르드 시추 퇴적물 시료의 상부 2.0 cm는 0.5 cm 간격, 2.0-10 cm는 1.0 cm 간격, 10-40 cm는 2.0 cm 간격으로 분석
- 동결건조 된 퇴적물 시료는 디클로로메탄을 이용하여 약 20분 동안 고속용매추출 후 질소 농축기를 이용하여 농축하였음
- 유기 추출액은 황을 제거하기 위해, 활성화된 구리를 넣어 약 1시간을 반응시켰음
- 퇴적물 유기 추출액은 실리카겔 컬럼 크로마토그래피를 이용하여 극성 기반으로 2개의 분액으로 분리하였음(F1: 비극성 및 F2: 중극성)
- 최종적으로, 콩스피오르드 시추 퇴적물 유기 추출액 내 유기독성물질(32종 PCBs, 27종 PAHs, 17종 alkyl-PAHs)의 농도는 가스크로마토그래피 질량분석기를 이용하여 정량하였음(Table 49)
- 분석 대상 유기독성물질의 약어, 정량 이온, 확인 이온 및 방법검출한계는 Table 50에 제시하였음

KOPRI 극지연구소

Fig. 238. Map showing the sampling sites of multicores taken in Kongsfjorden from Arctic Svalbard in 2022.

Table 49. Instrumental conditions of GC-MSD for PCBs, PAHs, and alkyl-PAHs analyses.

Instrument	GC: Agilent Technologies 7890B, MSD: Agilent Technologies 5977B	
Analytical column	DB-5MS (30 m × 0.25 mm i.d. × 0.25 μm film)	
Carrier gas	Helium	
Injection volume	1.0 μL	
Flow rate	1.0 mL min^{-1}	
Mass range	50-600 *m/z*	
Ion source temperature	230 ℃	
Ionization mode	EI mode (70 eV)	
Oven temperature	PCBs	60 ℃ (hold 1 min) → 5 ℃ min^{-1} to 140 ℃ (hold 1 min) → 30 ℃ min^{-1} to 200 ℃ (hold 1 min) → 4 ℃ min^{-1} to 250 ℃ (hold 5 min) → 10 ℃ min^{-1} to 300 ℃ (hold 1 min)
	PAHs	60 ℃ (hold 2 min) → 6 ℃ min^{-1} to 300 ℃ (hold 13 min)
	Alkyl-PAHs	60 ℃ (hold 2 min) → 6 ℃ min^{-1} to 162 ℃ (hold 0 min) → 2 ℃ min^{-1} to 168 ℃ (hold 0 min) → 6 ℃ min^{-1} to 300 ℃ (hold 13 min)

Table 50. Quantification ion, confirmation ion, and method detection limit of compounds.

Targeted compounds	Abbreviation	Quantification ion	Confirmation ion	Method detection limit (ng g^{-1} dm)
Polychlorinated biphenlys (PCBs)				
2,4'-Dichlorobiphenyl	CB8	222	224	0.01
2,4,4'-Trichlorobiphenyl	CB28	256	258	0.03
2,2',5,5'-Tetrachlorobiphenyl	CB52	292	290	0.02
2,2',4,5'-Tetrachlorobiphenyl	CB49	292	290	0.02
2,2',3,5'-Tetrachlorobiphenyl	CB44	292	290	0.03
3,4,4'-Trichlorobiphenyl	CB37	256	258	0.02
2,4,4',5-Tetrachlorobiphenyl	CB74	292	290	0.02
2,3',4',5-Tetrachlorobiphenyl	CB70	292	290	0.01
2,3',4,4'-Tetrachlorobiphenyl	CB66	292	290	0.03
2,3,4,4'-Tetrachlorobiphenyl	CB60	292	290	0.03
2,2',4,5,5'-Pentachlorobiphenyl	CB101	326	324	0.02
2,2',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	CB99	326	328	0.02
2,2',3,4,5'-Pentachlorobiphenyl	CB87	292	290	0.02
3,3',4,4'-Tetrachlorobiphenyl	CB77	326	256	0.01
2,2',3,3',4-Pentachlorobiphenyl	CB82	338	340	0.03
2,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	CB118	326	328	0.03
2,3,4,4',5-Pentachlorobiphenyl	CB114	326	328	0.02
2,2',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	CB153	360	362	0.02
2,3,3',4,4'-Pentachlorobiphenyl	CB105	326	324	0.02
2,2',3,3',5,6,6'-Heptachlorobiphenyl	CB179	396	398	0.03
2,2',3,4,4',5'-Hexachlorobiphenyl	CB138	360	362	0.02
2,3,3',4,4',6-Hexachlorobiphenyl	CB158	326	328	0.03

KOPRI 극지연구소

3,3',4,4',5-Pentachlorobiphenyl	CB126	360	362	0.02
2,3,4,4',5,6-Hexachlorobiphenyl	CB166	394	396	0.02
2,2',3,4',5,5',6-Heptachlorobiphenyl	CB187	394	396	0.02
2,2',3,4,4',5',6-Heptachlorobiphenyl	CB183	360	362	0.02
2,2',3,3',4,4'-Hexachlorobiphenyl	CB128	440	442	0.02
2,3,3',4,4',5-Hexachlorobiphenyl	CB156	360	362	0.02
2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	CB180	394	396	0.03
3,3',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	CB169	360	362	0.03
2,2',3,3',4,4',5-Heptachlorobiphenyl	CB170	394	396	0.03
2,3,3',4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	CB189	476	478	0.03
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)				
Acenaphthylene	Acl	152	151	0.06
Acenaphthene	Ace	153	154	0.12
Fluorene	Flu	166	165	0.15
Phenanthrene	Phe	178	176	0.06
Anthracene	Ant	178	176	0.07
Fluoranthene	Fl	202	200	0.09
Pyrene	Py	202	200	0.12
11H-benzo[*a*]fluorene	11BaF	216	215	0.04
11H-Benzo[*b*]fluorene	11BbF	216	215	0.04
Benzo[*b*]naphtho[*2,3-d*]furan	BBNF	218	189	0.32
Benzo[*a*]anthracene	BaA	228	226	0.06
Chrysene	Chr	228	226	0.03
Benzo[*b*]naphtho[*2,1-d*]thiophene	BBNT	234	235	0.12
4,5-Methanochrysene	4,5MC	239	240	2.0
5-Methylbenzo[*a*]anthracene	5MBA	242	241	0.20
1-Methylchrysene	1MC	242	241	0.14
7-Methylbenz[*a*]anthracene	7MbA	242	241	0.09
Benzo[*b*]fluoranthene	BbF	252	253	0.08
Benzo[*k*]fluoranthene	BkF	252	253	0.20
Benzo[*a*]pyrene	BaP	252	253	0.09
Perylene	Pery	252	264	0.23
7,12-Dimethylbenz[*a*]anthracene	7,12DbA	256	241	0.05
10-Methylbenzo[*a*]pyrene	10MbA	266	256	0.32
20-Methylcholanthrene	20MC	268	252	0.12
Indeno[*1,2,3-cd*]pyrene	IcdP	276	138	0.09
Benzo[*g,h,i*]perylene	BghiP	276	138	0.12
Dibenz[*a,h*]anthracene	DbahA	278	276	0.07
Alkylated PAHs (alkyl-PAHs)				
1-Methylnaphthalene	1-Na	142	141	
2-Methylnaphthalene	2-Na	142	141	
1,3-Dimethylnaphthalene	1,3-Na	156	141	
1,4,5-Trimethylnaphthalene	1,4,5-Na	170	155	
1,2,5,6-Tetramethylnaphthalene	1,2,5,6-Na	184	169	
1-Methylfluorene	1-Flu	180	165	
9-Methylfluorene	9-Flu	180	165	
Dibenzothiophene	Dbthio	184	185	
2-Methyldibenzothiophene	2-Dbthio	198	197	
2,4-Dimethyldibenzothiophene	2,4-Dbthio	212	197	
2,4,7-Trimethyldibenzothiophene	2,4,7-Dbthio	226	211	
3-Methylphenanthrene	3-Phe	192	191	
2-Methylphenanthrene	2-Phe	192	191	
1,6-Dimethylphenanthrene	1,6-Phe	206	191	
1,2-Dimethylphenanthrene	1,2-Phe	206	191	

KOPRA 국립해양생물자원관 연구소

1,2,9-Trimethylphenanthrene	1,2,9-Phe	220	-
1,2,6,9-Tetramethylphenanthrene	1,2,6,9-Phe	234	219
3-Methylchrysene	3-Chr	242	239
6-Ethylchrysene	6-Ethyl-Chr	256	241
1,3,6-Trimethylchrysene	1,3,6-Chr	252	264
Internal standard			
2-Fluorobiphenyl	IS	172	171

(나) 시추 퇴적물 내 유기독성물질의 잠재적 오염원 추정

- 스발바르 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 PAHs의 기원은 PMF (positive matrix factorization) 모델 분석을 이용하여 잠재적 오염원을 추정하였음
- PMF 모델은 유해물질의 기원 추적에서 활발하게 이용되고 있는 인자분석의 한 종류임 (Moon et al., 2008)
- 시추 퇴적물 시료 내 alkyl-PAHs의 기원은 개별 화합물의 이중 비를 이용하여 확인하였고, 이전 문헌에서 보고된 갈탄, 역청탄 및 무연탄의 조성과 본 연구진이 2022년 니알슨에서 채취한 버려진 석탄의 조성을 이용하였음(Lee et al., 2023)

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 스발바르 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 PCBs의 농도 및 조성

- 스발바르 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 PCBs의 평균 농도는 HH22-1159 정점에서 4.4 ng g-1 dm, HH22-1161 정점에서 2.0 ng g-1 dm, HH22-1163 정점에서 0.81 ng g-1 dm으로 확인(Fig. 239)
- 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 PCBs의 농도는 외측 정점이 중간 및 내측 정점에 비해 각각 약 2-4배 높은 것으로 관찰
- PCBs는 HH22-1159 정점 시추 퇴적물의 표층(0-1.0 cm, 20 ng g-1 dm)에서 가장 높은 농도를 보였으나, 전체적으로 5.0 cm 이하의 깊이부터 농도가 감소하는 경향을 보임
- 본 연구에서 검출된 PCBs 농도는 미국의 국립해양대기국(NOAA)에서 제안한 퇴적물 기준인 ERL (effective range low, 10% 이상의 저서생물에게 악영향을 미칠 수 있는 농도) 및 ERM (effective range median, 50% 이상의 저서생물에게 악영향을 미칠 수 있는 농도)을 초과하지 않은 것으로 확인되어, 이 화합물로 인한 생태 위해성은 크지 않을 것으로 보임, 모든 정점에서 상대적으로 가벼운 분자량의 tetra-CBs의 조성 (HH22-1159: 47%, HH22-1161: 64%, HH22-1163: 62%)이 가장 우세한 것으로 관찰되었고 이는 한국 주변 해역과 유사한 결과를 보여줌(Kim et al., 2021)

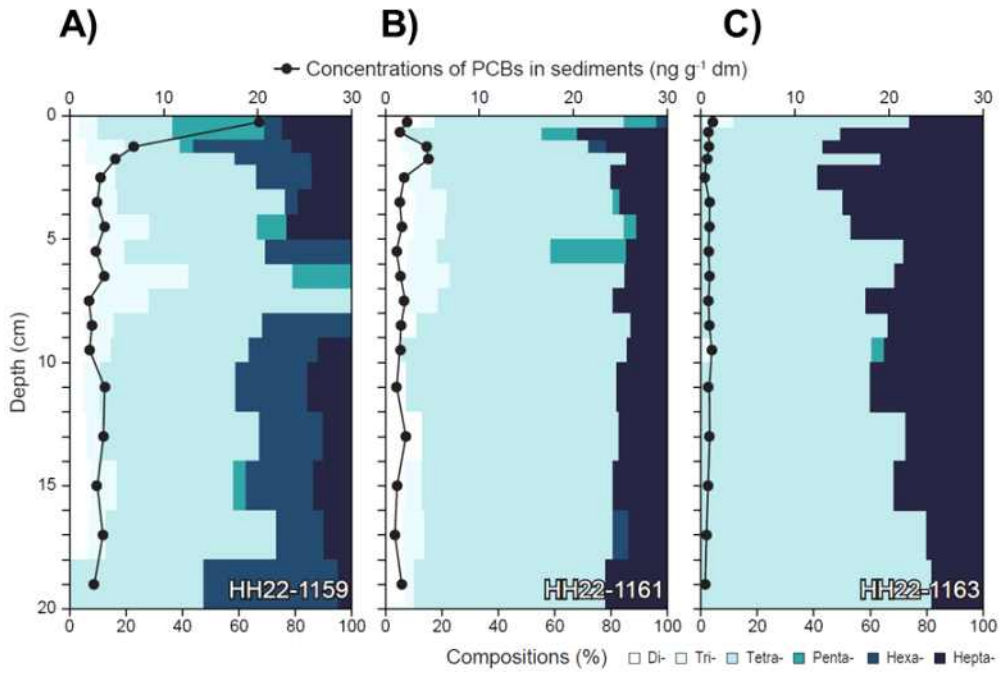


Fig. 239. Concentrations of PCBs in the sediments (0–20 cm) of multicore (A) HH22–1159MUC, (B) HH22–1161MUC, and (C) HH22–1163MUC collected from Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

- 일반적으로, PCBs는 저염소 치환제(di–, tri–, tetra–CBs)가 고염소 치환제(penta–, hexa–, hepta–CBs)보다 대기를 통해 더 먼 지역까지 이동하는 것으로 알려져 있으며, 본 연구 지역의 퇴적물 시료 내 PCBs의 유입은 대기를 통한 장거리 수송을 지시할 수 있음(Beyer and Biziuk, 2009)
- 분석 대상 tetra–CBs 중, 모든 정점에서 CB52의 조성이 가장 우세한 것으로 관찰되었으며, 이는 이전 북극 다매체 환경에서 보고된 연구 결과와 유사한 경향을 보여줌(Ubl et al., 2017)
- 스발바르 내 PCBs의 주요 오염원은 폐기물 소각장, 원전 폐로장, PCBs가 포함된 오래가 장비될 수 있는 것으로 알려져 있으나(Aslam et al., 2019), 본 연구 지역의 퇴적물 내 검출된 PCB congener의 종류가 많지 않아 기원 파악에는 다소 어려움이 존재

(나) 스발바르 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 PAHs의 농도 및 조성

- 스발바르 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 PAHs의 평균 농도는 HH22–1159 정점에서 85 ng g–1 dm, HH22–1161 정점에서 42 ng g–1 dm, HH22–1163 정점에서 17 ng g–1 dm으로 확인(Fig. 240)
- HH22–1159 정점의 퇴적물 내 PAHs의 농도는 HH22–1161 및 HH22–1163 정점에 비해 약 2–5 배 높게 나타남
- 콩스피오르드 지역의 PAHs는 광산의 석탄 잔재물이 주요 오염원으로 보이고 이는 니

알슨 기지 주변으로부터 유래할 것으로 예상되며, 안쪽에는 이러한 오염원이 없고 물의 흐름이 안쪽에서 바깥쪽으로 흘러 퇴적되는 것을 고려하면, HH22-1163 정점은 광산의 영향을 받지 않아 농도가 낮은 것으로 보임

- HH22-1163 정점의 퇴적물 내 PAHs의 농도는 7.0 cm 이후 감소하는 경향을 보였으나, HH22-1159와 HH22-1161 정점에서는 깊이가 깊어질수록 농도 감소 경향이 관찰되지 않음
- 모든 정점의 퇴적물에서 3개의 고리를 갖는 PAHs의 조성이 상대적으로 큰 것으로 확인되었고, phenanthrene의 조성이 가장 우세하였음
- 니알슨 인근 광산의 석탄 시료 내 phenanthrene의 조성을 통해 석탄으로 인한 PAHs 오염의 증거를 확인(Steenhuisen and van den Heuvel-Greve, 2021)
- 이에 따라, 본 연구지역인 콩스피오르드 퇴적물 또한 버려진 석탄 더미로 인한 오염 가능성이 존재
- 콩스피오르드의 내측에서 외측 정점(HH22-1163→HH22-1161→HH22-1159)으로 갈수록 상대적으로 고분자량 PAHs의 조성이 높아지는 것으로 관찰됨
- 그러나, 퇴적물 깊이가 증가함에 따라 PAHs 조성 변화는 뚜렷하게 관찰되지 않음

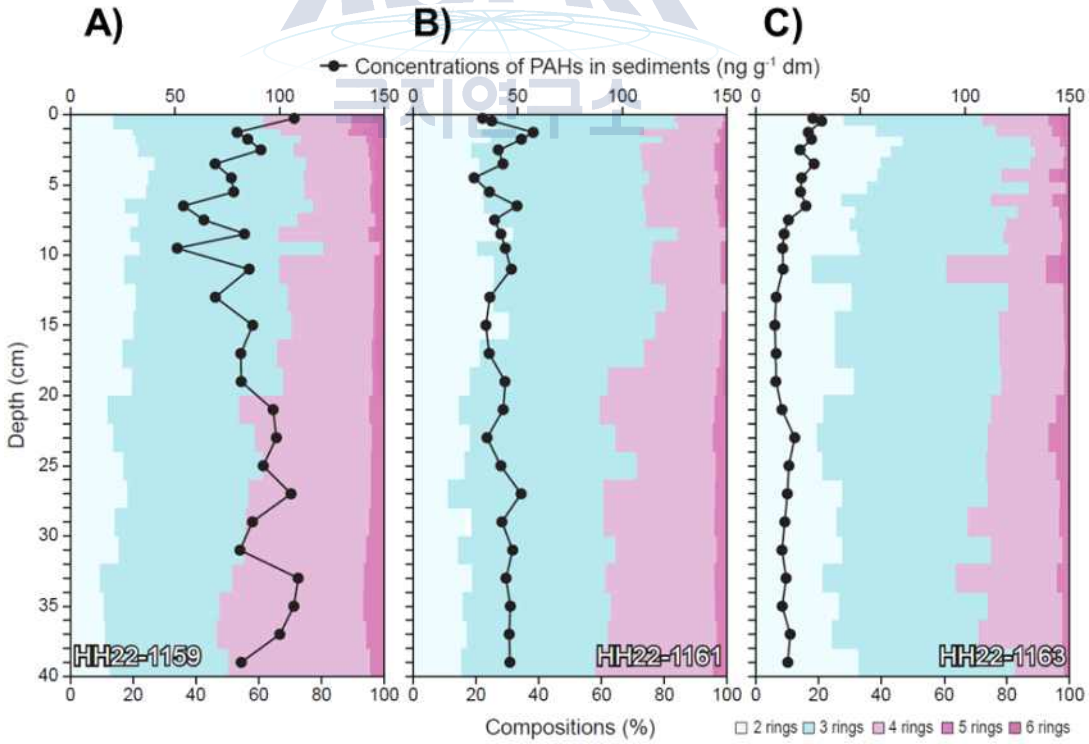


Fig. 240. Concentrations of PAHs in the sediments (0-40 cm) of multicores (A) HH22-1159MUC, (B) HH22-1161MUC, and (C) HH22-1163MUC collected from Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

(다) 스발바르 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 alkyl-PAHs의 농도 및 조성

- 스발바르 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 alkyl-PAHs의 평균 농도는 HH22-1159 정점에서 1,900 ng g-1 dm, HH22-1161 정점에서 1,400 ng g-1 dm, HH22-1163 정점에서 190 ng g-1 dm으로 확인(Fig. 241)
- 스발바르 니알슨에서의 탄광 활동은 지난 1916년부터 시작하여 1962년 폭발 사고가 일어나기 전까지 활발하게 진행되었고 이후 1963년부터는 완전히 폐쇄되었으나, 여전히 탄광 활동의 흔적이 남아 있음에 따라 alkyl-PAHs에 의한 오염이 존재하는 것으로 판단
- HH22-1163 정점의 시추 퇴적물 내 alkyl-PAHs의 농도는 10 cm 이후 감소하는 경향을 보였으나, 나머지 두 정점에서는 깊이가 증가하면서 농도 감소 경향이 관찰되지 않음
- 분석 대상 alkyl-PAHs 그룹 중, HH22-1159와 HH22-1161 정점의 퇴적물에서는 naphthalene (C1-C4)와 phenanthrene (C0-C4)의 조성이 우세하였고, HH22-1163 정점의 퇴적물에서는 phenanthrene (C0-C4)의 조성이 우세함
- 본 연구지역의 퇴적물 시료 내 alkyl-PAHs의 조성 확인을 통해 석탄 기원과 영향이 있는지 확인하고자 하였음
- 석탄 기원 PAHs가 환경에 노출되게 되면 물리, 화학, 생물학적 풍화 과정을 거치며, 화합물의 메틸화 과정이 일어나게 됨
- Parent PAHs의 미생물 분해가 동시에 일어나며, 결과적으로 풍화가 진행될수록 C3, C4-PAHs의 상대적인 조성이 커지게 되며(Hong et al., 2015), 이를 이용하여 환경 내 잔류 alkyl-PAHs의 풍화된 정도를 파악할 수 있음
- 모든 정점의 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 alkyl-PAHs는 bell-shaped 분포 패턴을 보여주며, 코어 깊이에 관계 없이 일정함(Fig. 242)
- 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 alkyl-PAHs는 비교적 최근에 유입된 석탄 기원 PAHs로 예상

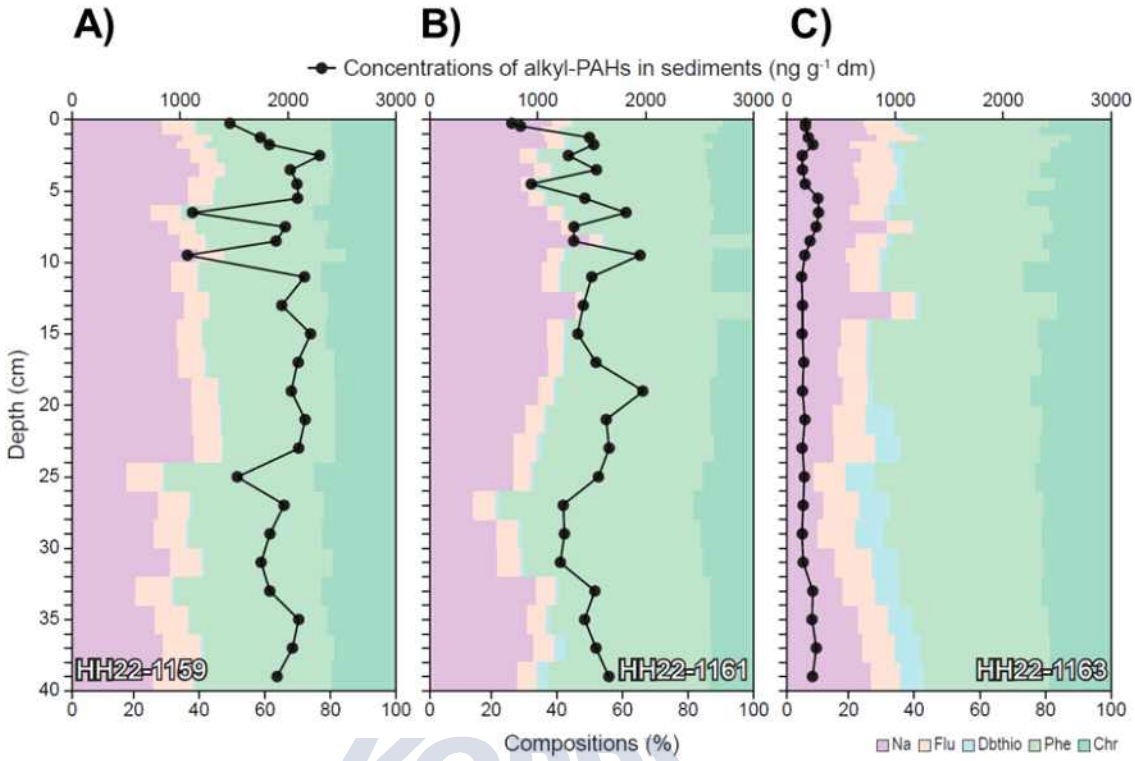


Fig. 241. Concentrations of alkyl-PAHs in the sediments (0-40 cm) of multicores (A) HH22-1159MUC, (B) HH22-1161MUC, and (C) HH22-1163MUC collected from Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

KOPRI 극지연구소

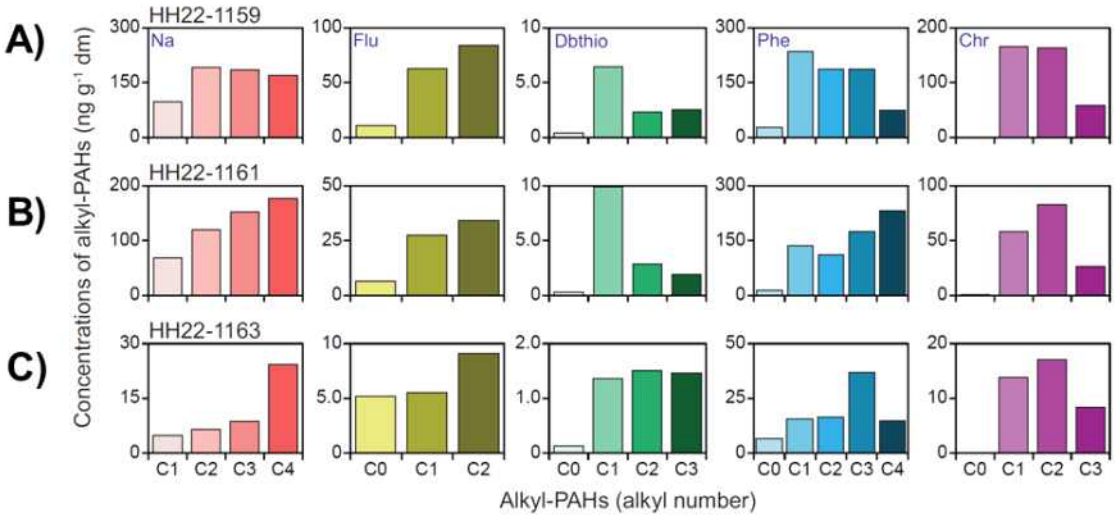


Fig. 242. Relative compositions of alkyl-PAHs in the sediments of multicores (A) HH22-1159MUC, B) HH22-1161MUC, and (C) HH22-1163MUC collected from Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

(라) 스발바르 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 PAHs의 잠재적 오염원

- 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 PAHs의 기원은 PMF 모델 분석을 이용하여 오염원을 확인하였음
- PMF 모델 결과 콩스피오르드 퇴적물 내 PAHs는 Factor 1: 바이오매스 연소, Factor 2: 석탄 연소, Factor 3: 이동 수단, 그리고 Factor 4: 석탄으로부터 기인하는 것으로 확인(Fig. 243A)
- 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 PMF factor의 기여도는 정점에 따라 서로 다른 분포를 보였음(Fig. 243B)
- HH22-1159 정점의 퇴적물 내 PAHs는 석탄 기원이 우세한 것으로 관찰되었으며, 0-7.0 cm 구간에서는 바이오매스 연소 기원이 상대적으로 증가하는 반면 연소 기원은 감소하는 경향을 보여줌
- HH22-1159 정점의 퇴적물 내 PAHs는 깊이에 관계 없이 석탄 기원의 영향이 가장 큰 것으로 확인되며, 매장된 석탄 기원 물질의 영향인지 고려할 필요가 있음
- HH22-1161 정점의 퇴적물 내 PAHs의 기원은 바이오매스 연소와 이동수단 기원이 깊이에 관계 없이 가장 우세한 것으로 관찰되며, 0-7.0 cm 구간에서 바이오매스 연소와 이동 수단 기원이 증가하는 경향을 보여줌
- HH22-1163 정점의 퇴적물 내 PAHs의 기원은 이동 수단의 영향이 가장 우세한 것으로 관찰되었으며, 석탄 기원의 영향이 매우 미비한 것으로 확인되었음
- 콩스피오르드 중간 및 내측 정점의 퇴적물은 연구 활동 및 크루즈 탐사와 같은 이동 수단에 의한 PAHs로 오염되어 있는 것으로 판단

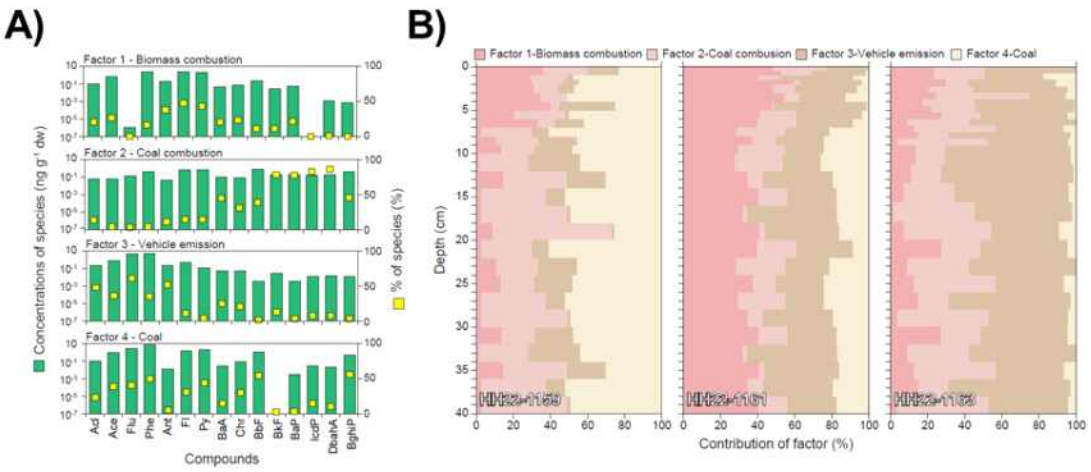


Fig. 243. Source identification and contribution of PAHs in the sediments of Kongsfjorden analyzed in the present study. (A) Factor profiles (Factor 1: biomass combustion, Factor 2: coal combustion, Factor 3: vehicle emission, and Factor 4: coal) in the PMF model and (B) contribution of factors (%) of each PAH source.

(마) 스발바르 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 alkyl-PAHs의 잠재적 오염원

- 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 alkyl-PAHs의 잠재적인 오염원은 개별 화합물의 이중 비를 이용하여 확인하였으며, 상대적으로 alkyl-PAHs의 농도가 높았던 HH22-1159와 HH22-1161의 정점을 대상으로 실시(Fig. 244)
- 시추 퇴적물 내 alkyl-PAHs의 농도는 두 정점에서 깊이에 관계 없이 유사한 농도 패턴을 보였고, 따라서 각 정점에서 검출된 alkyl-PAHs의 평균 농도로 잠재적인 오염원을 비교
- 시추 퇴적물 내 alkyl-PAHs의 잠재적인 오염원은 HH22-1159 정점은 기존 문헌에서 보고된 역청탄과 유사한 조성을 보였고 HH22-1161 정점은 역청탄과 본 연구진이 2022년 니알슨 기지 인근에서 채취한 버려진 석탄 더미 조성과 유사한 결과를 보였음
- 스발바르 지역은 역청탄 더미에서 나오는 alkyl-PAHs에 의한 오염이 존재하는 것으로 보고된 바 있고(Kozak et al., 2013), 본 연구와 유사한 결과를 보여줌

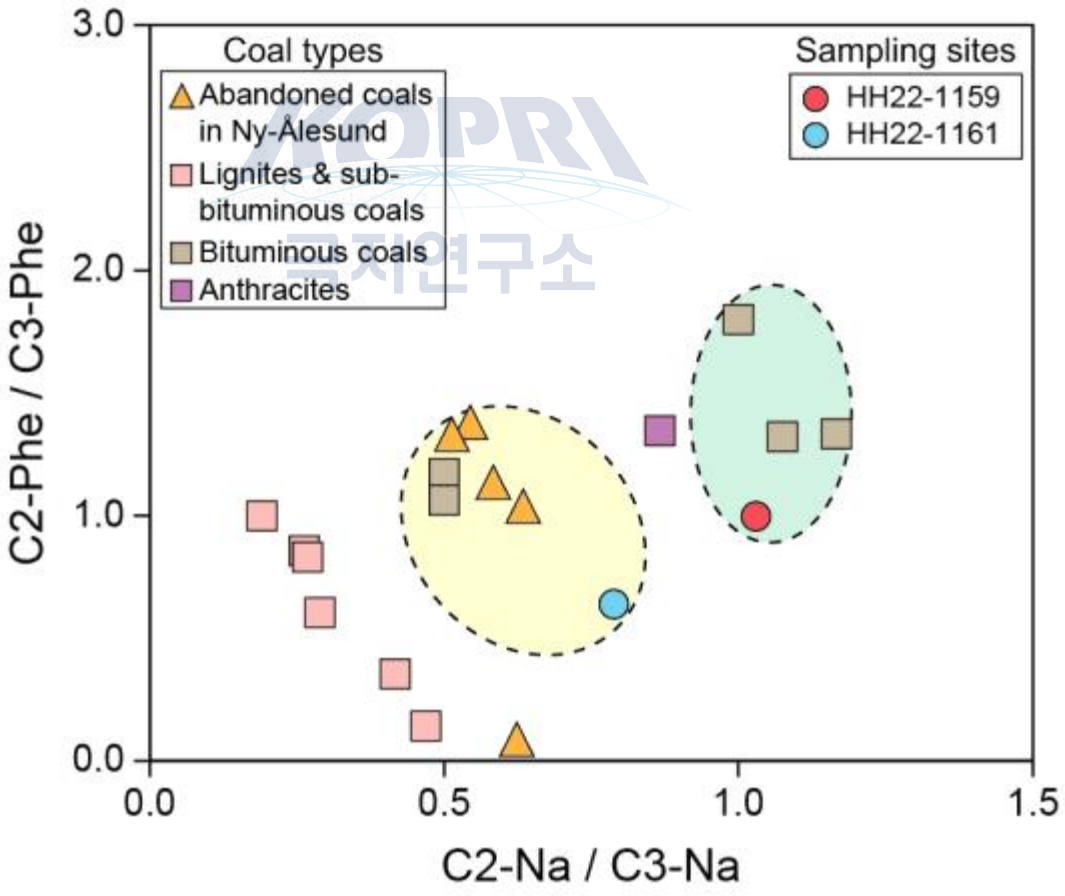


Fig. 244. Diagnostic double ratios (C2-Na/C3-Na and C2-Phe/C3-Phe) in the multicore sediments collected from Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

(바) 콩스피오르드 퇴적물 내 석탄 오염도

- 스발바르 콩스피오르드 지역의 퇴적물은 석탄 기원 PAHs에 의해 심각하게 오염되어 있는 것으로 확인. 기후변화로 인해 동토층의 융해가 가속화된다는 것은 석탄 기원 PAHs가 결국 인접한 피오르드로 유입된 결과, 피오르드에 서식하고 있는 해양 생물에 부정적인 영향을 초래할 수 있음. 본 연구 결과는 스발바르 지역의 환경 보전 및 오염 관리에 대한 중요한 정보를 제공하며, 극지 환경을 보호하고 개선하는 데 이용될 것으로 기대됨. 향후 시추 퇴적물 시료 내 유기탄소함량, 탄소안정동위원소비, 연대측정 자료와 비교 분석을 통해 유기독성물질의 과거와 현재 기원 변화 및 정확한 침전플럭스를 산출하는 후속 연구가 필요함

나) 수은 안정동위원소 기반 과거 홀로세 퇴적물 코어의 수은 유입원과 경로 추적

(1) 연구 목적

- 인위적 활동을 통해 배출된 수은은 대기를 통해 장거리로 거동하여 극지에 침적되는 것으로 보고되고 있음(Global Mercury Assessment, 2018).최근 북극권 온난화 추세로 인해 과거에 극지로 침적되었던 수은의 재방출이 가속화 되고 있어(Rydberg et al., 2010; Stern et al., 2012), 기후환경변화가 북극 지역의 수은 유입원 및 유입 경로에 어떠한 영향을 미치는지 파악할 필요가 있음
- 스발바르 군도는 북대서양 표층수가 유입되는 곳(Farnsworth et al., 2020)에 위치하기 때문에 기후변화에 민감하여 과거 홀로세 동안 홀로세기후최적기(Holocene Thermal Maximum), 중세온난기(Medieval Warm Period), 북극 영구해빙형성(Permanent sea-ice cover), 지역적 한냉기(Regional cooling) 등 다양한 기후환경변화(Farnsworth et al., 2020)를 겪었음.
- 이는 스발바르 지역에 수은 유입원과 유입 경로에 영향을 주었을 것으로 추측됨
- 그러나, 현재까지 인위적 및 자연적 수은 오염원의 영향을 파악할 수 있는 홀로세 기간 복원 연구로는 스페인 토탄늪지(peat bog)에서 채취한 코어를 이용한 수은 안정동위원소 기반 대기 중 가스상 수은 유입원과 순환 변동 연구가 유일함(Enrico et al., 2017)
- 본 연구는 농도 기반의 기존 수은 데이터베이스의 한계점을 극복할 수 있는 수은 안정동위원소 분석 기법을 이용하여 궁극적으로 기후변화에 의한 미래 수은 거동을 예측하고자 함
- 이를 위해 과거 홀로세 동안 기후환경변화에 따른 수은 유입원과 유입 경로가 어떻게 변동했는지 파악하고 수은 안정동위원소를 기후 프록시로 활용하여 데이터를 구축하고자 함

(2) 연구 방법

- 퇴적물 코어 시료의 수은 농도는 포항공과대학교 환경보건평가연구실에서 보유하고 있는 Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) 및 Cold Vapour Atomic Fluorescence Spectroscopy (CV-AFS) 장비를 이용하여 분석함
- 수은 안정동위원소는 국내 유일하게 포항공과대학교에서 보유하고 있는 다검출기유도결합플라즈마질량분석기(Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry; MC-ICP-MS)를 이용하여 분석함. 본 장비는 수은 안정동위원소 분석 전용 장비로 구축되어 있음

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 콩스피오르드 퇴적물 수은 농도 및 안정동위원소 분석 결과

- 콩스피오르드 입구에서 획득한 퇴적물 코어(Kongsfjorden; KH17-GPC01) 시료 총 50개의 수은 농도 분석을 완료한 결과 콩스피오르드 퇴적물 코어 시료의 총 수은 농도는 18.80 ~ 56.48 ng/g로 측정됨(Fig. 245)
- 콩스피오르드 퇴적물 코어 시료의 수은 안정동위원소 분석 결과(총 24개), δ^{202}Hg는 -1.43 ~ -0.82‰, Δ^{199}Hg는 -0.19 ~ -0.04‰, Δ^{200}Hg는 -0.03 ~ 0.02‰ (Fig. 246)로 측정됨. 콩스피오르드 퇴적물 코어의 수은 안정동위원소비는 앞서 보고한 딕슨피오르드, 우드피오르드, 호르준드에서 확인된 수은 안정동위원소비와 유사하게 나타남. 기존 연구 논문에서 보고된 북극 홀로세 해양 퇴적물 코어와 북극 토탄층 및 기반암의 수은 안정동위원소비와도 매우 유사한 값을 보임
- 콩스피오르드의 퇴적물 코어는 전 시기에 걸쳐 THg와 δ^{202}Hg 사이에서 통계적으로 유의미한 상관관계를 보여줌($R = 0.44$; $p < 0.01$). 이는 콩스피오르드 퇴적물 내 수은의 기원이 δ^{202}Hg와 관련이 있고, 단일 유입원이 존재함을 의미함. 콩스피오르드 퇴적물 코어의 총 수은 농도와 총유기탄소가 상관관계를 보이지 않는다는 점을 고려 할 때 ($R = 0.02$; $p > 0.05$) 수은의 기원과 총유기탄소의 기원이 다른 것으로 추정됨
- 콩스피오르드 퇴적물 코어에서는 약 12,000년 전 시료의 Δ^{199}Hg에서 통계적으로 유의한 음의 값(by 0.09‰, >2 SD)이 계측되었음. 이는 약 12,000년 전, 홀로세 이전 영거 드라이어스(Younger Dryas) 시기에 스발바르 전역의 빙하 증가가 콩스피오르드 인근 기반암 침식을 증가시켰던 것으로 추정됨

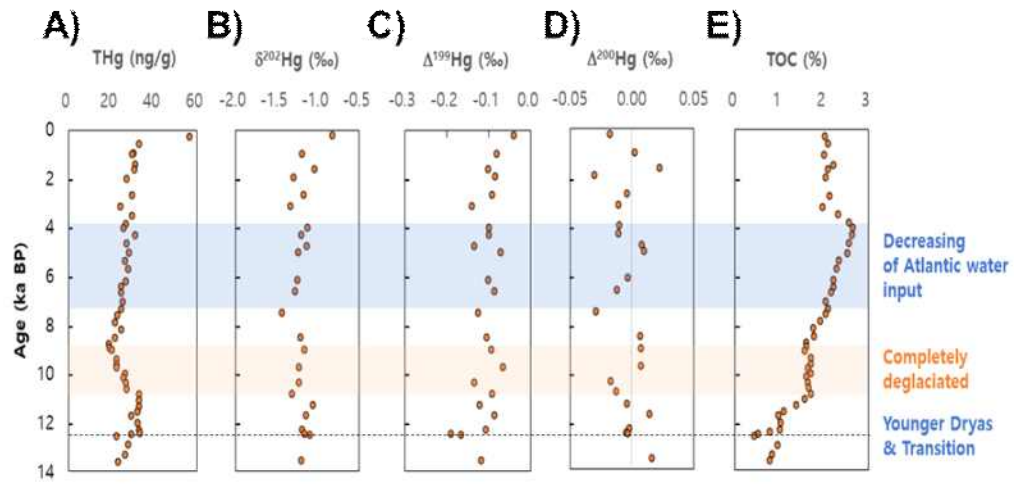


Fig. 245. Temporal variations of (A) THg, (B)δ^{202}Hg, (C) $\triangle^{199}$Hg, (D) $\triangle^{200}$Hg, and (E) TOC in Kongsfjorden sediment core (KH17-GPC01) measured in this study.

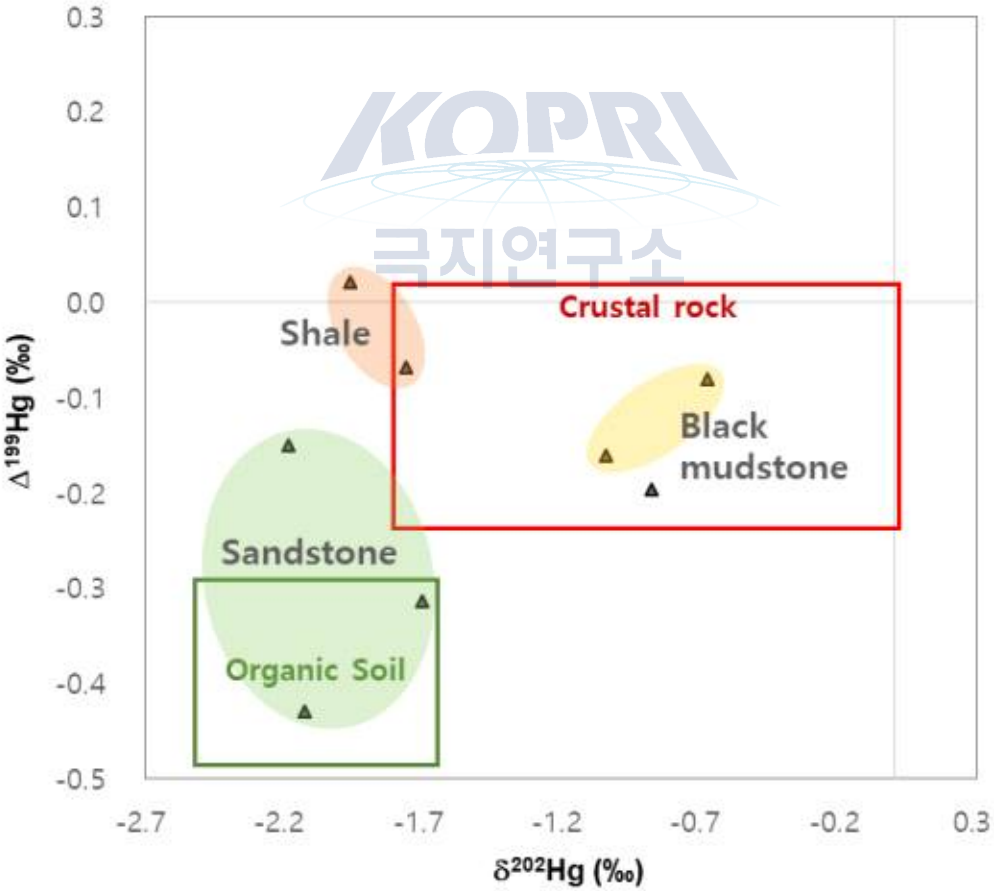


Fig. 246. δ^{202}Hg and $\triangle^{199}$Hg of Svalbard bedrock (black mudstone, sandstone, shale). The red and green boxes represent the ranges of δ^{202}Hg and $\triangle^{199}$Hg of the crustal rocks (Yin et al., 2014) and organic soil (Jiskra et al., 2017).

- 콩스피오르드 퇴적물 코어의 최상부 시료에서는 인위적인 대기 수은 배출 영향이 증가하는 것을 볼 수 있음. 콩스피오르드의 δ^{202}Hg (−1.04 ~ −0.82‰, n= 3), Δ^{199}Hg (−0.10 ~ −0.04‰ ,n = 3), Δ^{200}Hg (0.00 ~ 0.04‰ ,n = 3)로 측정되었음. 이는 현재까지 보고된 근대 산업화 이전(AD1850)의 인간 활동(채광, 삼림벌채, 바이오매스 연소 등)에서 배출된 대기 수은 안정동위원소비와 일치함

(나) 스발바르 기반암 시료의 수은 농도 및 안정동위원소 분석 결과

- 스발바르 피오르드 퇴적물 코어의 수은 안정동위원소 end member를 정립하기 위해 극지연구소에서 기획득한 스발바르 기반암 시료를 확보함. 총 7개의 기반암 시료 수은 농도 분석을 완료함. 총 수은 농도는 3.2 ~ 22.8 ng/g 로 측정됨.
- 스발바르 기반암 시료의 수은 안정동위원소 분석 결과(총 7개), Black mudstone의 δ^{202}Hg는 -1.04 ~ −0.67‰, Δ^{199}Hg는 -0.16 ~ −0.08‰, Δ^{200}Hg는 0.01 ~ 0.04‰로, Shale의 δ^{202}Hg는 -1.96 ~ −1.76‰, Δ^{199}Hg는 -0.07 ~ 0.02‰, Δ^{200}Hg는 -0.01 ~ 0.03‰로, Sandstone의 δ^{202}Hg는 -2.19 ~ −1.70‰, Δ^{199}Hg는 -0.43 ~ −0.15‰, Δ^{200}Hg는 -0.05 ~ 0.04‰로 측정됨. 스발바르 기반암 시료의 수은 안정동위원소비는 기존에 보고된 퇴적암의 수은 안정동위원소비와 유사한 것을 확인함 (Blum and Johnson., 2017)

(다) 콩스피오르드 수은 유입원 변동

- 콩스피오르드 퇴적물 코어의 수은 농도 및 안정동위원소 분석을 통해 홀로세 전 시기에 걸쳐 기후환경변화에 의한 수은 유입원 변동을 파악함. 콩스피오르드는 스발바르 연안에 위치하여 스발바르 내륙에 위치한 딕슨피오르드 및 우드피오르드 퇴적물 코어보다 해양 영향이 더 큰 것으로 추정됨. 콩스피오르드 퇴적물과 유사하게 호른준드에서도 상대적으로 더 많은 해양 영향이 확인되었음

다) 현대 스노우팩 수은 유입원 및 유입 경로 추적

(1) 연구 목적

- 현재까지 스노우팩 관련 수은 안정동위원소 연구는 북극해와 인접한 미국 알래스카 최북단 도시인 배로(Barrow)에서 주로 진행되고 있음. 최근 발표된 북극 스노우팩 수은 안정동위원소 비는 현재까지 다른 환경매체에서 보지 못한 매우 특유한 안정동위원소 비를 나타내는 것으로 밝혀졌으며, 이는 광환원 작용으로 조사된 바 있음 (Sherman et al., 2010; Douglas and Blum, 2019)
- 현재 북극권의 급격한 기온상승으로 인해 육지와 연안에 쌓여있던 눈과 얼음이 빠르게 녹으면서 대기−스노우팩 상호작용에 어떠한 영향을 미치는지 파악할 필요가 있지만, 현재까지 이와 관련된 수은 안정동위원소 기반의 연구는 국내에서는 전무한 실정이고,

전 세계적으로도 연구 초기단계에 있음

- 수은 안정동위원소 분석 기법을 이용하여 기후변화로 인한 스노우팩 감소가 스발바르에서 대기 수은 거동에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고 예측하고자 함. 기후변화에 의한 미래 수은 거동을 예측하기 위해 과거 홀로세 동안 기후환경변화에 따른 수은 유입원과 유입 경로가 어떻게 변동했는지 파악하고 수은 안정동위원소를 기후 프록시로 활용하여 데이터를 구축하여 현재와 미래 기후변화로 인해 수은 거동이 어떻게 변동할 것인지 예측하는 통합적이고 체계적인 연구를 구성하고자 함

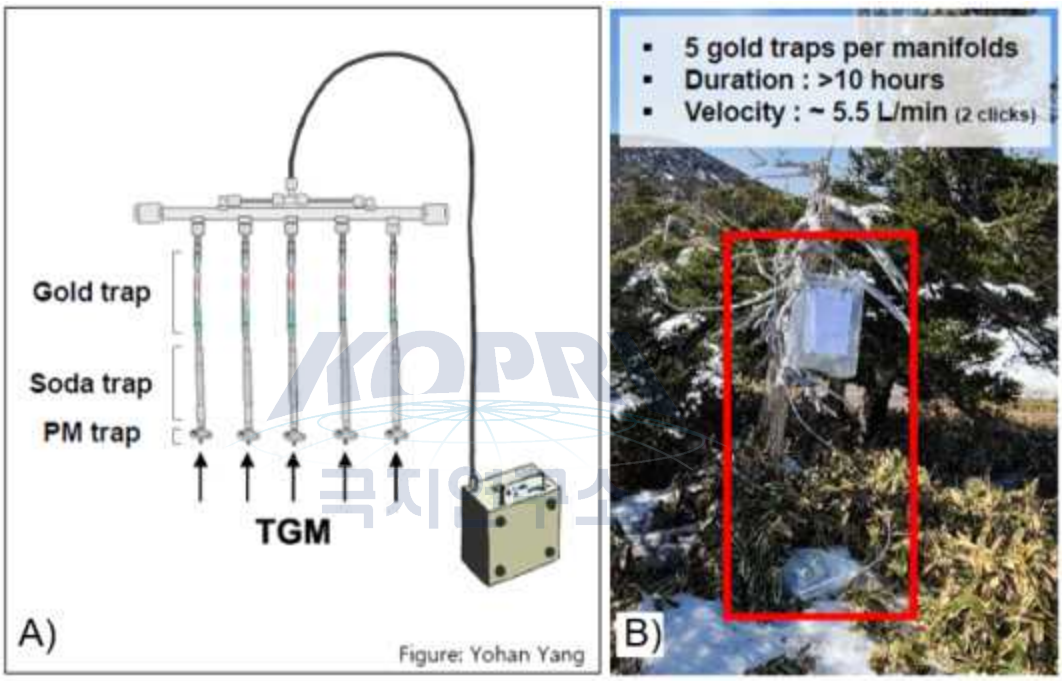


Fig. 247. (A) Total gaseous mercury sampling system and (B) on-site sampling at Mountain Halla, Jeju Island, South Korea.

(2) 연구 방법

(가) 스노우팩, 대기 중 수은을 통한 시료 채취

- 스노우팩(fresh snow) : 표층 1cm의 눈을 채취하여 냉동 보관. 스노우팩(fresh snow) 시료 총 10개 채취
- 스노우팩(aged snow) : 표층 2cm의 눈을 채취하여 냉동 보관. 스노우팩(aged snow) 시료 총 10개 채취
- 대기 중 수은 : 스노우팩 샘플링과 동일한 지점에서 대기 중 가스상 총 수은, 대기 중 산화 수은 채취. 대기 중 수은 시료 총 12개 채취(Fig. 247)

(나) In-situ snow flux chamber 현장 실험 (Fig. 248)

- In-situ flux chamber 실험 : 표층 눈(약 2cm 깊이)을 채취하여 flux chamber 안에 넣은 후 햇빛 아래에 배치한 후 약 2-3일 동안 눈에서 재방출되는 대기 중 가스상 수은 채취. 시료 개수 총 10개 채취
- In-situ snow flux chamber 현장 실험을 통해 스발바르의 일조량과 대기 중 할로겐으로 인한 대기 수은 침적 플럭스를 산정하여, 수은 안정동위원소 기반의 스노우팩 수은 물질수지를 제시하고자 함
- 이에 본 연구는 국내 제주도 한라산 스노우팩(총 시료 20개), 대기 중 수은(총 12개) 및 현장 실험(총 시료 10개)을 통해 총 32개의 시료를 채취하여 분석함

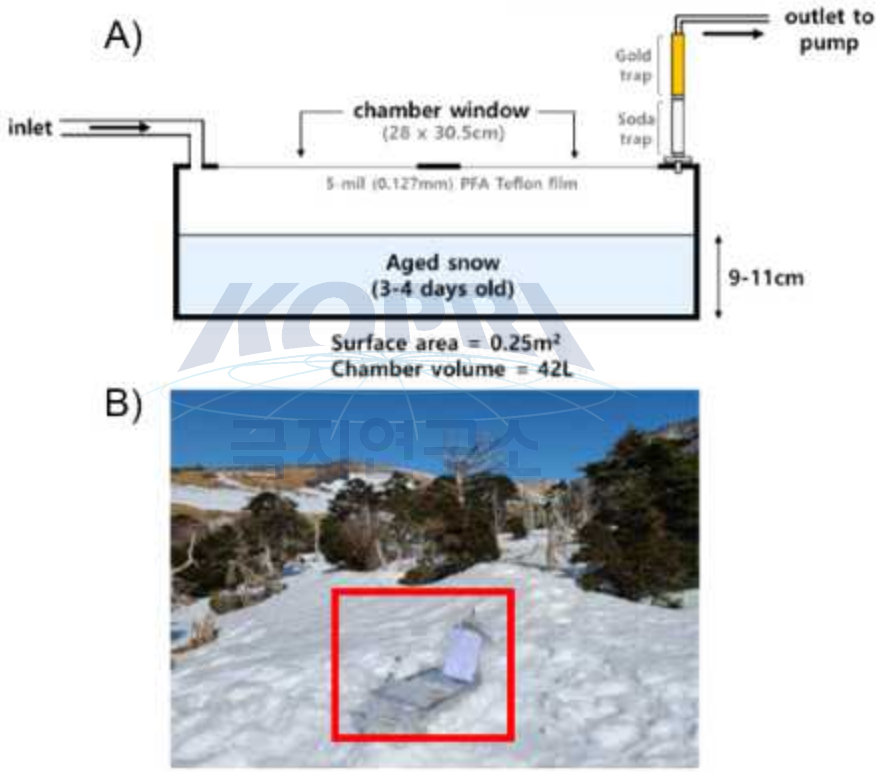


Fig. 248. (A) In-situ snow flux chamber system and (B) on-site experiment at Mountn Halla, Jeju Island, South Korea.

(다) 수은 농도 및 안정동위원소 분석

- 스노우팩 및 대기 중 수은 농도 및 안정동위원소비 기반 대기-스노우팩의 상호작용을 해석하고자 함. 수은 안정동위원소는 국내 유일하게 포항공과대학교에서 보유하고 있는 다검출기유도결합플라즈마질량분석기(Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry; MC-ICP-MS)를 이용하여 분석함

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 스노우팩 및 대기 중 수은으로 정의한 수은 안정동위원소비 기반 대기-스노우팩 상호작용 해석

- 한라산(해발 약 1700m)에서 포집한 대기 중 가스상 총 수은의 수은 안정동위원소비는 해양 표면에서 방출된 대기 중 가스상 총 수은 안정동위원소비와 유사함
- 여러 고도(해발 약 970m, 1400m, 1700m)에서 수집된 표층 눈 및 대기 시료에서 북극 AMDE에 의해 영향을 받은 강설 및 스노우팩(fresh and aged snow)과 일관된 수은 안정동위원소비를 확인함. 이는 해양 기원의 할로겐과 수은에 의해서 한라산의 대기 수은 침적이 발생하는 것으로 추측됨(Fig. 249)

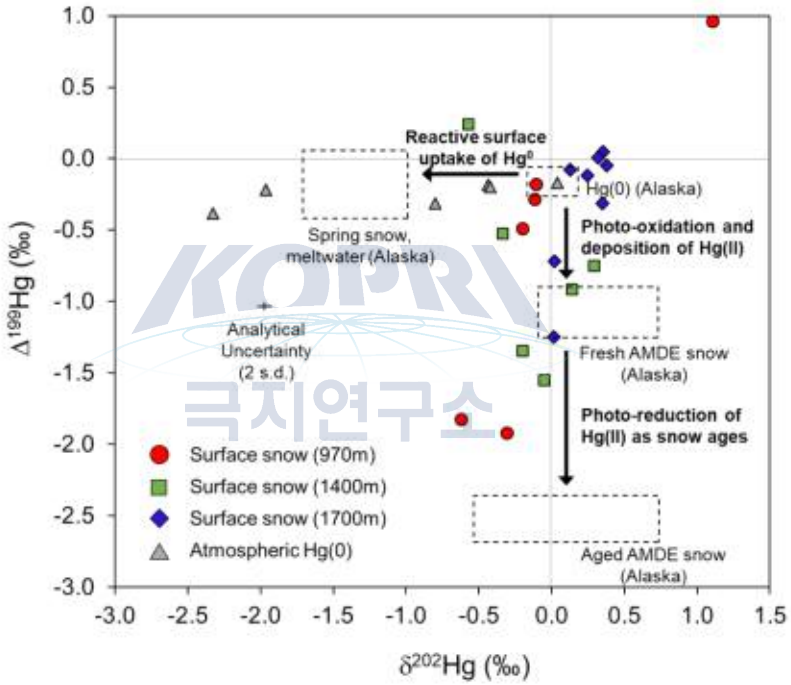


Fig. 249. δ^{202}Hg and Δ^{199}Hg isotope compositions of total gaseous mercury and surface snow samples from Mountain Halla. The boxes represent the ranges of δ^{202}Hg and Δ^{199}Hg of spring snow and meltwater (Douglas and Blum 2019), atmospheric Hg(0) (Sherman et al. 2010), fresh AMDE affected snow (Sherman et al. 2010 and 2012) and aged AMDE affected snow (Sherman et al. 2010) from Utqiagvik, Alaska.

- 한라산 눈에서는 북극에서 일어나는 snow photo-reduction 반응 대신, 수중에서 일어나는 aqueous photo-reduction 반응이 일어나는 것으로 보임. 강설 후 3일간 연속으로 채취한 눈의 수은 안정동위원소비에서 시간이 지날수록 수은의 Δ^{199}Hg 및 δ^{202}Hg 안정동위원소값이 증가하고, Δ^{199}Hg/Δ^{201}Hg 비율이 1을 보임. 이는 수은이 수중에서 광화학적 환원 반응에 의해 분별된 것을 지시함

- 한라산에서 북극과 유사하게 대기 수은이 해양 기원의 할로겐과 반응하여 광산화되면서 눈 표면으로 침적이 되고, 눈이 녹으면서 발생하는 수중 광환원 반응을 통해서 대기로 재방출되며 수은 순환이 일어나는 것을 시사함
- 국내 제주도 한라산에서 확보한 스노우팩, 대기 중 수은 및 현장 실험을 통해 확보한 수은 농도 및 안정동위원소 결과의 비교는 중위도 해안 지역에서 북극 알래스카와 유사하게 할로겐에 의한 광산화 반응으로 대기 수은 침적이 발생하지만 눈이 융해되면서 발생하는 수중 광환원 반응으로 인해 북극과는 다른 대기-스노우팩 상호작용을 보여줌
- 1단계에서 연구된 홀로세 퇴적물과 함께, 제주도 한라산 현대 스노우팩을 end-member 데이터베이스로 사용하여, 스발바르 군도에서 채집할 계획인 스노우팩 및 대기 수은 데이터와의 비교함으로써 현대 수은 유입원과 유입 경로 추적에 충분한 역할을 할 수 있을 것으로 판단됨

4-4) 4차년도

가) 스발바르 이스피오르드 및 힌로펜 해협 코어 퇴적물 내 유기독성물질의 분포 특성

(1) 연구 목적

- 이스피오르드는 스발바르 군도에서 가장 큰 피오르드 중 하나로, 주요 거주지인 롱이어비엔과 가까운 위치에 있어 지역적 인간 활동의 영향을 크게 받음
- 과거와 현재의 탄광 활동, 거주 환경, 연구 활동 및 관광업 등 다양한 인간 활동이 이 지역 환경에 축적된 오염물질의 주요 기원으로 작용할 수 있음
- 이러한 활동의 결과로, 이스피오르드 퇴적물 내 PTSs의 분포와 조성에 관한 연구는 수행된 바 있음
- 힌로펜 해협은 스발바르 군도 북동쪽에 위치한 주요 해협으로 인근 빙하에서 유입되는 물질의 영향을 받음
- 그러나, 현재까지 힌로펜 해협 내 PTSs의 분석에 관한 연구는 거의 이루어지지 않은 상태로, 이 지역은 북극 PTSs 연구에서 미탐사 지역으로 남아있음
- 힌로펜 해협은 주요 인간 활동 지역에서 멀리 떨어져 있지만, 대기와 해류를 통한 오염물질의 장거리 이동과 축적에 대한 주요 사례 연구를 제공할 수 있음
- 본 연구의 2단계 2차년도의 목표는 스발바르 이스피오르드와 힌로펜 해협 시추 퇴적물 내 축적된 유기독성물질의 분포를 확인하고자 함

(2) 연구 방법

- 2022년 7월 스발바르 이스피오르드 외측(HH22-1156), 중간(HH22-1154) 및 내측(HH22-1152) 정점 시추 퇴적물 대상(Fig. 250A)
- 또한, 힌로펜 해협의 외측(HH22-1185), 중간(HH22-1179) 및 내측(HH22-1176) 정

점에서 채취한 시추 퇴적물 시료 이용(Fig. 251)

- 이스피오르드 시추 퇴적물 시료의 상부 2.0 cm는 0.5 cm 간격, 2.0–10 cm는 1.0 cm 간격, 10–20 cm는 2.0 cm 간격으로 분석
- 힌로펜 해협 시추 퇴적물 시료의 상부 2.0 cm는 0.5 cm 간격, 2.0–5.0 cm는 1.0 cm 간격으로 분석
- 동결건조 된 퇴적물 시료는 DCM을 이용하여 약 20분 동안 고속용매추출 후 질소 농축기를 이용하여 농축하였음
- 유기 추출액은 황을 제거하기 위해, 활성화된 구리를 넣어 약 1시간을 반응시켰음
- 퇴적물 유기 추출액은 실리카겔 컬럼 크로마토그래피를 이용하여 극성 기반으로 2개의 분액으로 분리하였음(F1: 비극성 및 F2: 중극성)
- 최종적으로, 이스피오르드 및 힌로펜 해협 시추 퇴적물 유기 추출액 내 유기독성물질의 농도는 GC–MSD를 이용하여 분석하였음

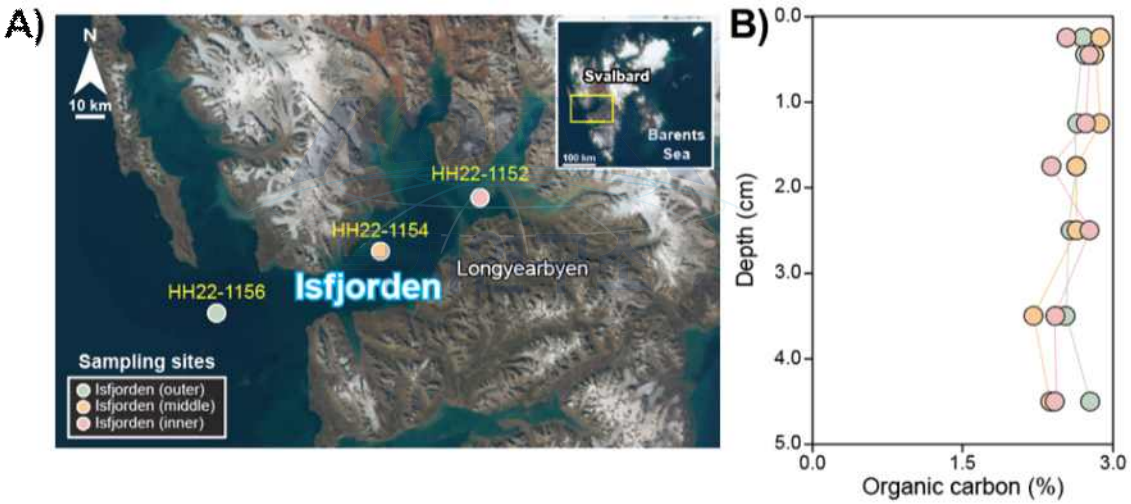


Fig. 250. (A) Sampling sites of core sediments in Isfjorden, Svalbard, showing outer (HH22–1156), middle (HH22–1154), and inner (HH22–1152) fjord locations. (B) Depth profiles of organic carbon (%) in the core sediments, indicating variations in organic carbon content across different depths and locations.

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 이스피오르드 시추 퇴적물 내 PTSs 농도

- 이스피오르드 시추 퇴적물의 유기탄소 함량(0~5 cm)은 외측, 중간, 내측 정점 모두 유사한 경향을 보였음(Fig. 250B)
- 이스피오르드 시추 퇴적물 내 PCBs의 농도는 5.0 cm 이후 검출 한계 미만으로 검출

(Fig. 252)

- 이러한 결과는 PCBs 사용 및 규제의 영향에 따라 과거와 현재 오염원의 영향이 표층에 집중되었을 가능성을 시사함
- PCBs 농도 변화를 보다 명확히 해석하기 위해, 시추 퇴적물의 연대를 측정하여 PCBs 침적 시기와 당시의 환경적/인위적 요인을 분석할 필요가 있음
- 시추 퇴적물 내 PAHs와 alkyl-PAHs의 농도는 내측 정점이 중간 및 외측 정점에 비해 1.5-2.0배 높은 것으로 관찰(Fig. 253)
- 퇴적물 내 PAHs의 농도는 표층에서 가장 상대적으로 높은 값을 나타내며, 깊이가 증가함에 따라 농도가 감소하는 경향을 보임
- 농도의 감소는 PAHs의 상대적 분해, 침적 속도 변화, 그리고 과거 인위적 또는 자연적 배출량 감소와 관련될 가능성이 있음
- Alkyl-PAHs의 농도는 PAHs와 유사하게 표층에서 높은 값을 보임
- PAHs와 alkyl-PAHs의 농도 변화는 과거와 현재의 오염원을 이해하는 데 중요한 단서를 제공하며, 이를 보다 명확히 해석하기 위한 연대 데이터와의 매칭이 필숮거임
- 따라서, 연대 분석을 통해 각 퇴적층이 형성된 시기를 명확히 한다면, 특정 시기와 오염원의 연관성을 보다 정밀하게 파악할 수 있음

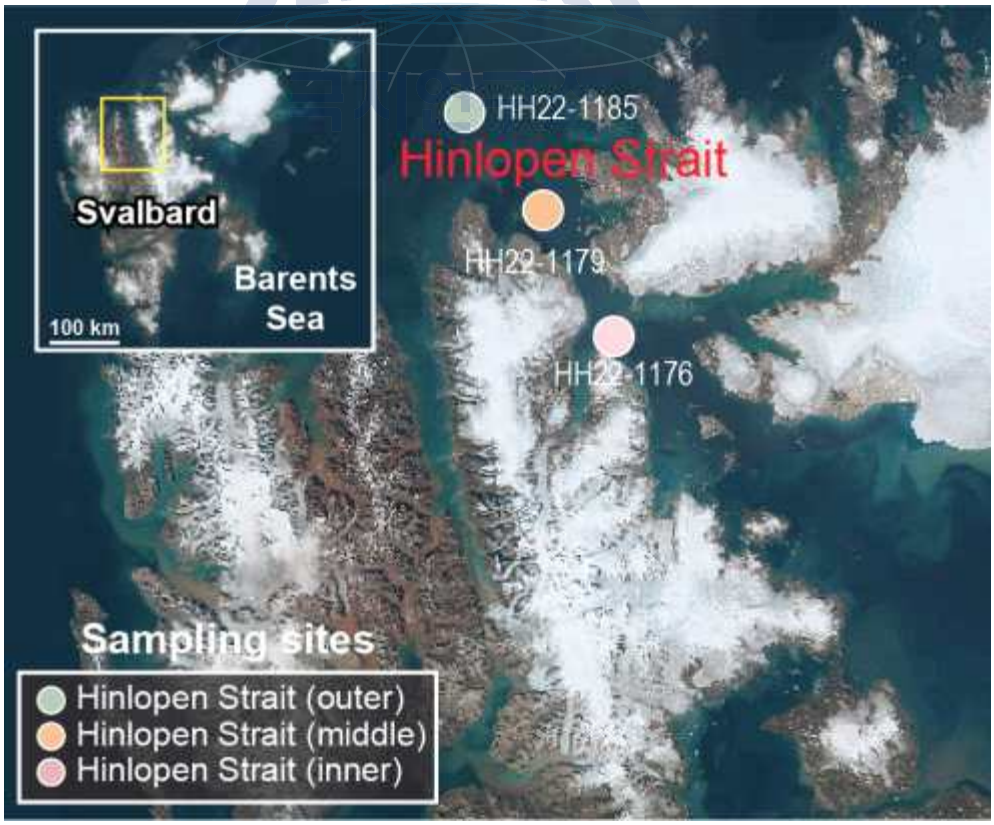


Fig. 251. Map showing the multicore sites in Hinlopen Strait, Arctic Svalbard.

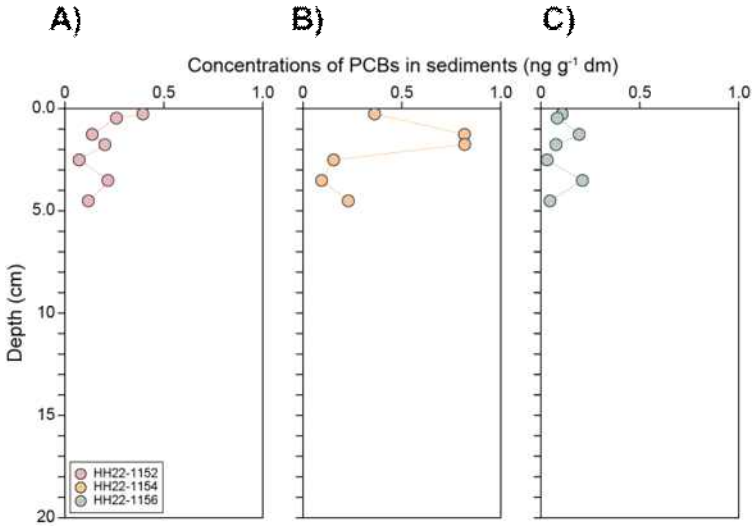


Fig. 252 Concentrations of PCBs in the sediments of multicores (A) HH22-1152MUC, (B) HH22-1154MUC, and (C) HH22-1156MUC collected from Isfjorden, Arctic Svalbard.

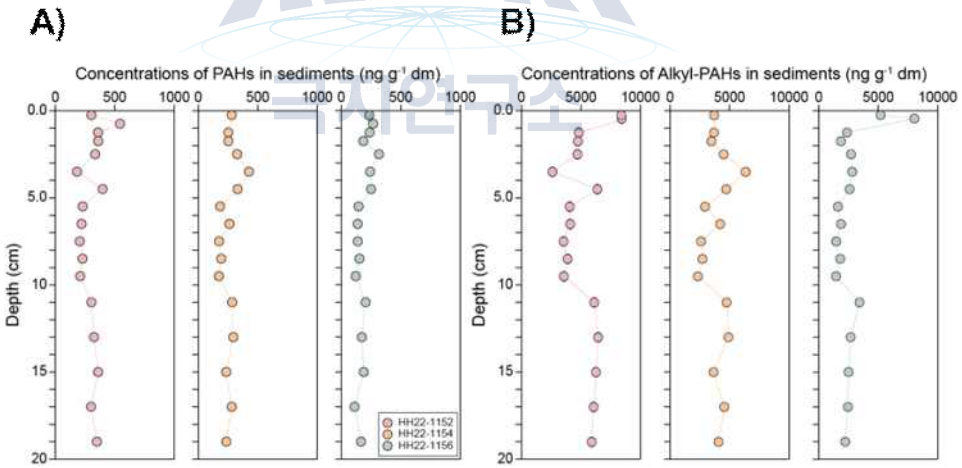


Fig. 253. Concentrations of (A) PAHs and (B) alkyl-PAHs in the sediments of multicores collected from Isfjorden, Arctic Svalbard.

(나) 힌로펜 해협 시추 퇴적물 내 PTSs 농도

- 힌로펜 해협 시추 퇴적물 내 PCBs와 PAHs의 농도는 외측 정점에서 상대적으로 높은 경향을 보임(Fig. 254)
- 퇴적물 내 PCBs의 농도는 깊이가 깊어짐에 따라 감소 경향이 두드러지게 관찰되었지만, PAHs는 두드러지지 않는 결과를 보임

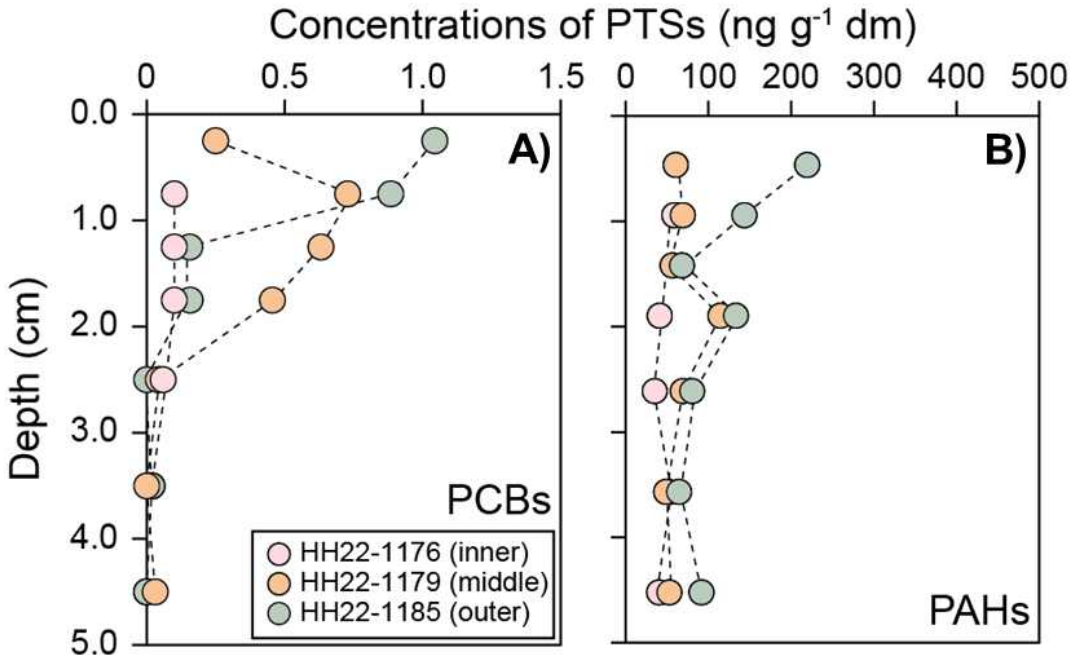


Fig. 254. Concentrations of (A) PCBs and (B) PAHs in the sediments of multicores collected from Hinlopen Strait, Arctic Svalbard.

KOPRI 극지연구소

나) 온난화로 인한 스노우팩 감소에 의한 스발바르 내 대기 수은 거동 파악 및 예측

(1) 연구 목적

- 현재까지 스노우팩 관련 수은 안정동위원소 연구는 북극해와 인접한 미국 알래스카 최북단 도시인 배로우(Barrow)에서 주로 진행되고 있음. 최근 발표된 북극 스노우팩 수은 안정동위원소 비는 현재까지 다른 환경매체에서 보지 못한 매우 특유한 안정동위원소 비를 나타내는 것으로 밝혀졌으며, 이는 광환원 작용으로 조사된 바 있음(Sherman et al., 2010; Douglas and Blum, 2019)
- 현재 북극권의 급격한 기온상승으로 인해 육지와 연안에 쌓여있던 눈과 얼음이 빠르게 녹으면서 대기-스노우팩 상호작용에 어떠한 영향을 미치는지 파악할 필요가 있지만, 현재까지 이와 관련된 수은 안정동위원소 기반의 연구는 국내에서는 전무한 실정이고, 전 세계적으로도 연구 초기 단계에 있음
- 수은 안정동위원소 분석 기법을 이용하여 기후변화로 인한 스노우팩 감소가 스발바르에서 대기 수은 거동에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고 예측하고자 함. 기후변화에 의한 미래 수은 거동을 예측하기 위해 과거 홀로세 동안 기후환경변화에 따른 수은 유입원과 유입 경로가 어떻게 변동했는지 파악하고 수은 안정동위원소를 기후 프록시로 활용하여 데이터를 구축하여 현재와 미래 기후변화로 인해 수은 거동이 어떻게 변동할 것인지 예측하는 통합적이고 체계적인 연구를 구성하고자 함

(2) 연구 방법

(가) 스노우팩, 대기 중 수은 시료 채취

- 표층 스노우팩(fresh snow): 강설 직후의 표층 1cm의 눈을 채취하여 0.5% HCl으로 산처리 후 냉장 보관. 스노우팩(fresh snow) 시료 총 11개 채취
- 표층 스노우팩(aging snow) : 강설 이후 5일간 연속적으로 표층 1cm의 눈을 채취하여 0.5% HCl 로 산처리 후 냉장 보관. 스노우팩(aging snow) 시료 총 20개 채취
- 스노우팩(aging snow): 표층 1-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm 및 20-30 cm 총 4개 깊이의 눈을 채취하여 0.5% HCl 로 산처리 후 냉장 보관. 스노우팩(aged snow) 시료 총 16개 채취
- 대기 중 수은: 스노우팩 샘플링과 동일한 지점에서 대기 중 입자상 수은 총 10개 채취
- 이에 본 연구는 북극 한라산 스노우팩(총 시료 47개), 대기 중 수은(총 10개) 총 57개의 시료를 채취하여 분석함

(나) 수은 농도 및 안정동위원소 분석

- 스노우팩 및 대기 중 수은 농도 및 안정동위원소비 기반 대기-스노우팩의 상호작용을 해석하고자 함. 수은 안정동위원소는 국내 유일하게 포항공과대학교에서 보유하고 있는 다검출기유도결합플라즈마질량분석기(MC-ICP-MS)를 이용하여 분석함

KOPRI 극지연구소

(3) 연구 결과 및 토의

(가) AMDE 시기 광반응에 의한 시간별 표층 스노우팩의 변화 분석을 통한 수은 안정동위원소비 기반 대기-스노우팩 상호작용 해석

- 북극 스발바르에서 확보한 스노우팩(fresh snow, aging snow and aged snow), 대기 중 수은 농도 및 안정동위원소 결과를 비교. AMDE 기간에 획득한 표층 스노우팩(fresh snow and aging snow)와 AMDE 이전 스노우팩(aged snow)의 서로 다른 수은 동위원소 특성을 확인함. 그러나 기존 북극 알래스카 지역에서 연구된 AMDE 전후의 스노우팩의 조사 결과(Duglas and Blum. 2019)와는 일치하는 경향을 보임
- 이에, AMDE 이전의 시기에 쌓인 중간층 및 기저층의 스노우팩은 기존 연구 결과와 유사하게 대기 수은 Hg(0)이 눈 속 구조로 침투된 후 산화로 이어지는 반응성 표면 흡착 과정을 추정 할 수 있음. 반면, 초기 AMDE에 획득된 표층 스노우팩(fresh snow and aging snow)은 대기 중 존재하는 해염 에어로졸(브로민을 비롯한 할로겐)에 의한 광산화 반응 이후 눈 표면에 직접 침적됨을 추정할 수 있음
- 초기 AMDE 시기에 획득된 표층 스노우팩 중 강설 직후 채취한 눈(fresh snow)과 이후 5일간 연속으로 채취한 눈(aging snow)의 수은 안정동위원소비에서, 시간이 지날수록 수은의 $\Delta^{199}Hg$ 안정동위원소비가 감소하는 경향을 나타내며, 기존 북극에서 일어나는 snow photo-reduction 반응이 동일하게 적용되고 있음을 시사함

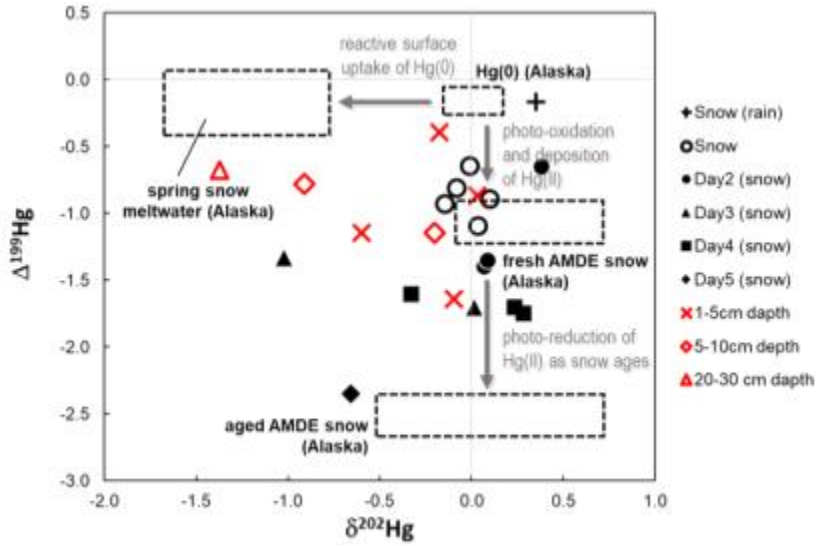


Fig. 255. δ^{202}Hg and Δ^{199}Hg isotope compositions of surface snow samples from Svalbard. The boxes represent the ranges of δ^{202}Hg and Δ^{199}Hg of spring snow and meltwater (Douglas and Blum 2019), atmospheric Hg(0) (Sherman et al. 2010), fresh AMDE affected snow (Sherman et al. 2010 and 2012) and aged AMDE affected snow (Sherman et al. 2010) from Utqiagvik, Alaska.

KOPRI 극지연구소

- 북극 스발바르에서 확보한 스노우팩은 국내 제주도 한라산에서 확보한 스노우팩과 비교 해 볼 때 동일하게 두 지역에서 모두 할로겐에 의한 광산화 반응으로 대기 수은 침적이 발생하지만, 제주 한라산에서는 수중 광환원 반응으로 인해 스노우팩에서 대기로 수은이 재방출 되었던 반면, 북극에서는 기존 연구와 동일하게 snow photo-reduction 반응을 확인하며 위도에 따른 차이를 확인 할 수 있었음
- 1단계에서 연구된 홀로세 퇴적물과, 2단계 1차년도에 연구된 한라산 스노우팩 및 대기 데이터를 현대 스노우팩으로 유입되고 방출되는 수은의 end-member 데이터베이스로 사용. 이를 통해 본 연구에서 수행되는 스발바르 스노우팩의 대기-스노우팩의 상호작용 뿐 아니라 북극내 다양한 지역에서 활용할 수 있을 것으로 판단됨
- 스발바르 스노우팩 시료의 획득과 동일한 기간에 획득한 대기 수은(대기 중 입자상 수은) 총 10개 시료는 2025년 상반기(1월 중 예정) 내에 수은 안정동위원소 분석을 완료할 예정임. 이후 snow 데이터와의 비교를 통해 스발바르 대기-스노우팩의 수은 상호작용을 규명하고자 함
- 본 연구 내용을 바탕으로 북극 스발바르 피오르드 퇴적물 내 수은 안정 동위원소 분석을 통해 기후 변동에 따른 수은 공급원의 시공간적 변동 연구에 대한 논문을 국제학술지(SCI)에 투고(1월) 및 게재(9월)

5) 유동모델(FVCOM) 구축을 통한 기후변화에 따른 조수빙하 유출 물질의 순환 기작 이해

5-1) 1차년도

가) 스발바르 연안 관측자료 수집 및 FVCOM 모델 기반 구축

(1) 기초자료 수집 및 분석

- 스발바르 연안 해역을 대상으로 물질 수송 기작을 파악하기 위하여, 당해 연도의 연구지역을 스발바르 북서쪽에 위치한 콩스피오르드로 선정하였음
- 콩스피오르드 연안은 대한민국의 북극 다산기지를 포함한, 노르웨이, 독일, 영국, 네덜란드, 프랑스 등 10개 국가에서 운영하고 있는 기지를 통해 장기적인 현장관측 자료가 누적되어 있어, 모델 구축에 필요한 관측자료 수집에 용이한 장점이 있음
- 본 연구에서는 모델 구축에 필요한 개방 경계 입력장과 초기 입력장, 격자 구성 등과 관련된 신뢰성 있는 시·공간적인 자료를 수집하기 위하여, 앞서 언급한 현장자료뿐만 아니라 광역모델의 예측결과 자료를 수집 및 분석하였음
- UMASS 대학의 Chen 교수 연구팀의 북극권 FVCOM 모델 도메인 및 수심 자료가 수집 및 분석되었음
- HYCOM 모델의 해류, 수온, 염분의 외해경계조건을 활용하기 위하여 HYCOM과 FVCOM 모델 간의 격자점을 비교하여 외해경계조건에 대해 검토함(Figs. 256, 257)

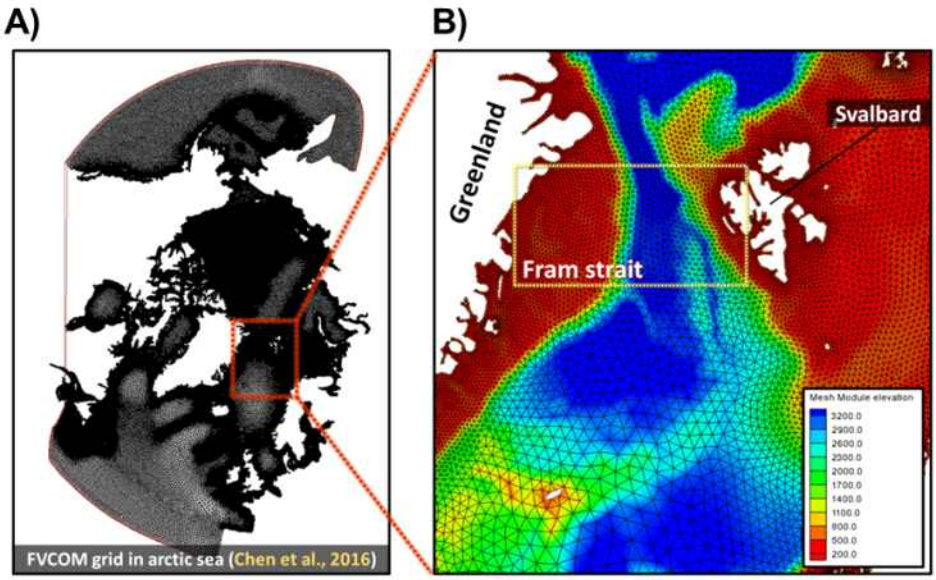


Fig. 256. (A) Computational model domain and (B) water depth data for the AO-FVCOM.

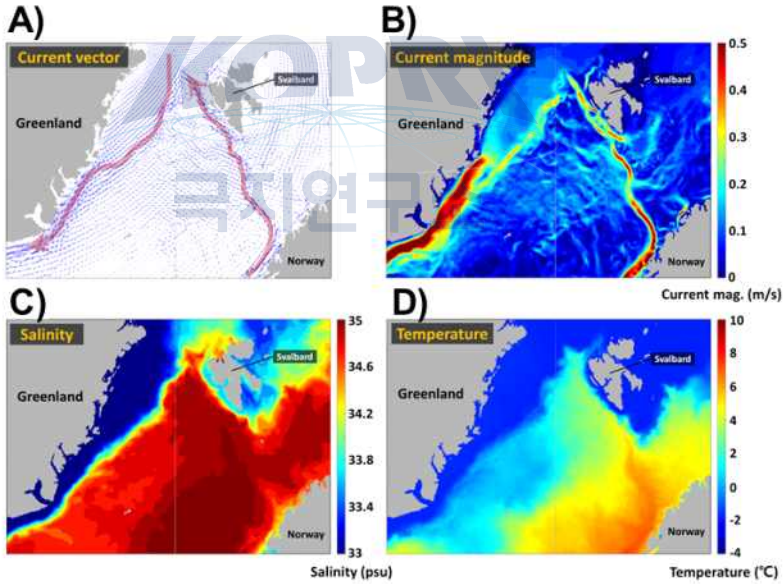


Fig. 257. Model results for the surface layer of HYCOM in February 2020: (A) current vector, (B) current speed, (C) salinity, and (D) temperature.

(2) FVCOM 수치모델 가변격자체계 구축

- NORSK POLARINSTITUTT의 지형도의 해안선 자료 기반 스발바르 연안 60~200 m 간격의 고해상도 모델 구축 도메인 초기 구축(Fig. 258)
- 수심자료 International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO 4.0) 자료 수집 및 분석 후 2차원 보간기법 후 모델에 구축

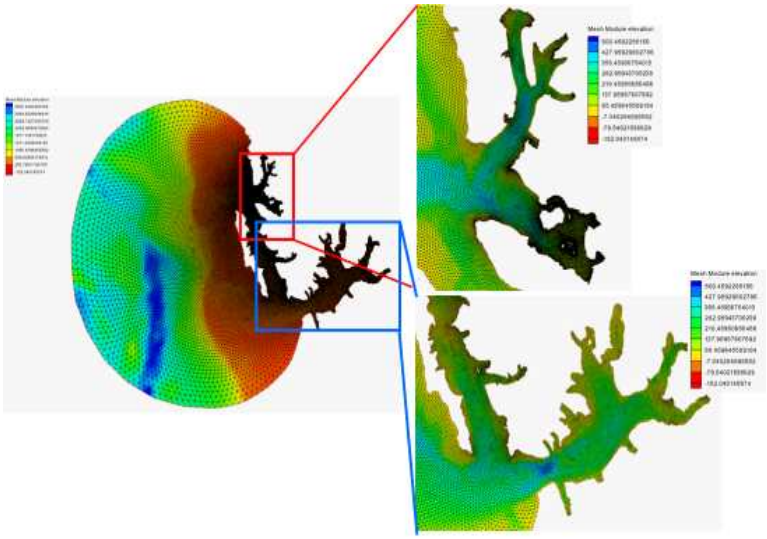


Fig. 258. Computational model domain for the FVCOM in Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

(3) 3차원 조석 모의 기반 구축

- HYCOM & 오레곤 대학의 5대 분조 자료 수집 및 조석관련 모델 입력 구성
- 스발바르 연안에 적용된 NPI-ROMS 모델의 개방경계 입력자료와의 비교 및 분석 후 구성
- 수위와 유속에 대한 초기 조건은 모든 노드와 셀에 대해서 0으로 설정되었음
- M1 정점에서의 수온과 염분 관측 자료를 바탕으로, FVCOM의 모델 영역에 대한 수온과 염분 초기장은 각각 3.5 ℃, 34.5 psu로 공간적으로 균일하게 입력되었음
- 외해 개방경계에 대한 조석 조건을 구성하기 위하여, Tidal Model Driver (TMD)를 통해 TPXO8-atlas 모델 결과의 8개의 분조에 대한 조화상수(M2, S2, K1, O1, N2, K2, P1, Q1)가 추출되었음

KORDI 극지연구소

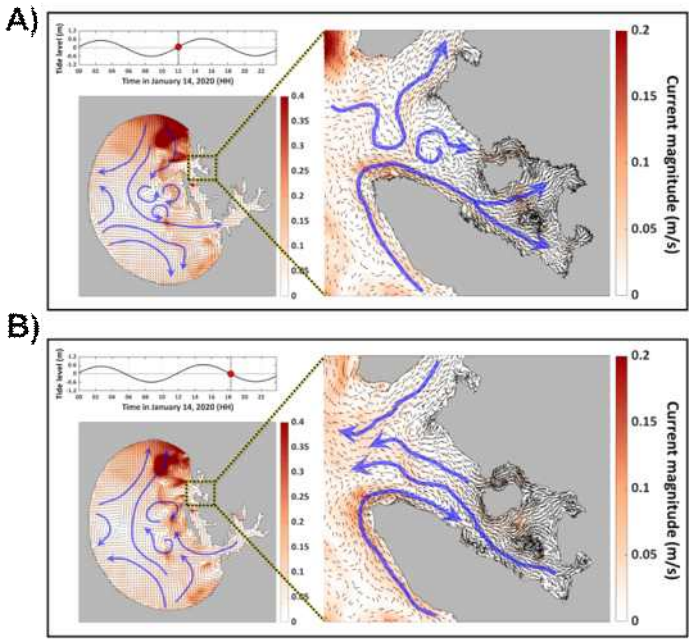


Fig. 259. Model results explaining the current velocity distributions during (A) flood and (B) ebb currents in Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

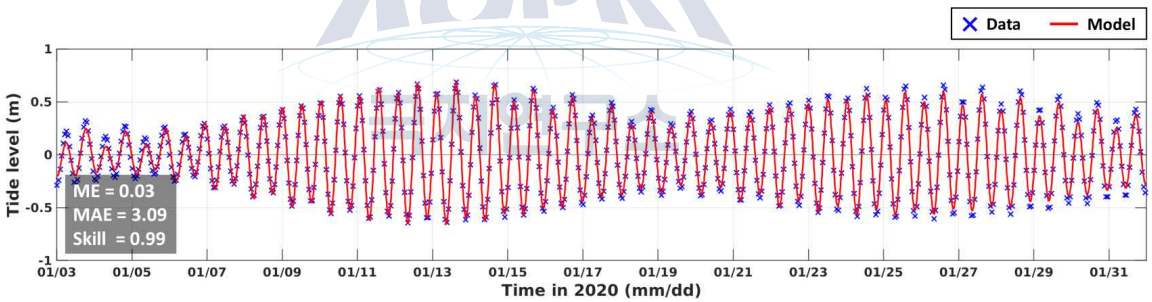


Fig. 260. Model-data comparison of tide levels.

- 추출된 8개의 분조에 대한 조화상수는 선형 보간 기법을 통해 외해 개방경계의 노드에 보간되어 입력되었음
- 스발바르 연안 내 조석 및 조류 초기 시뮬레이션 수행 및 결과 분석(Fig. 259)
- 모델 결과와 관측 자료의 조위 시계열에 대한 조화분해를 통해 추출된 5개 분조(M2, S2, K1, O1, N2)의 조화상수가 1:1로 비교된 결과, 5개 분조의 진폭과 위상에 대한 모델 결과와 관측 자료가 일치함. 또한, 관측 자료에서 나타나는 창조-낙조 및 대조-소조의 변동성이 수치모델에서 재현됨(Fig. 260)

5-2) 2차년도

가) 스발바르 연안 해역 중심의 수치모델 구축 및 조석과 해류패턴 변동성 파악

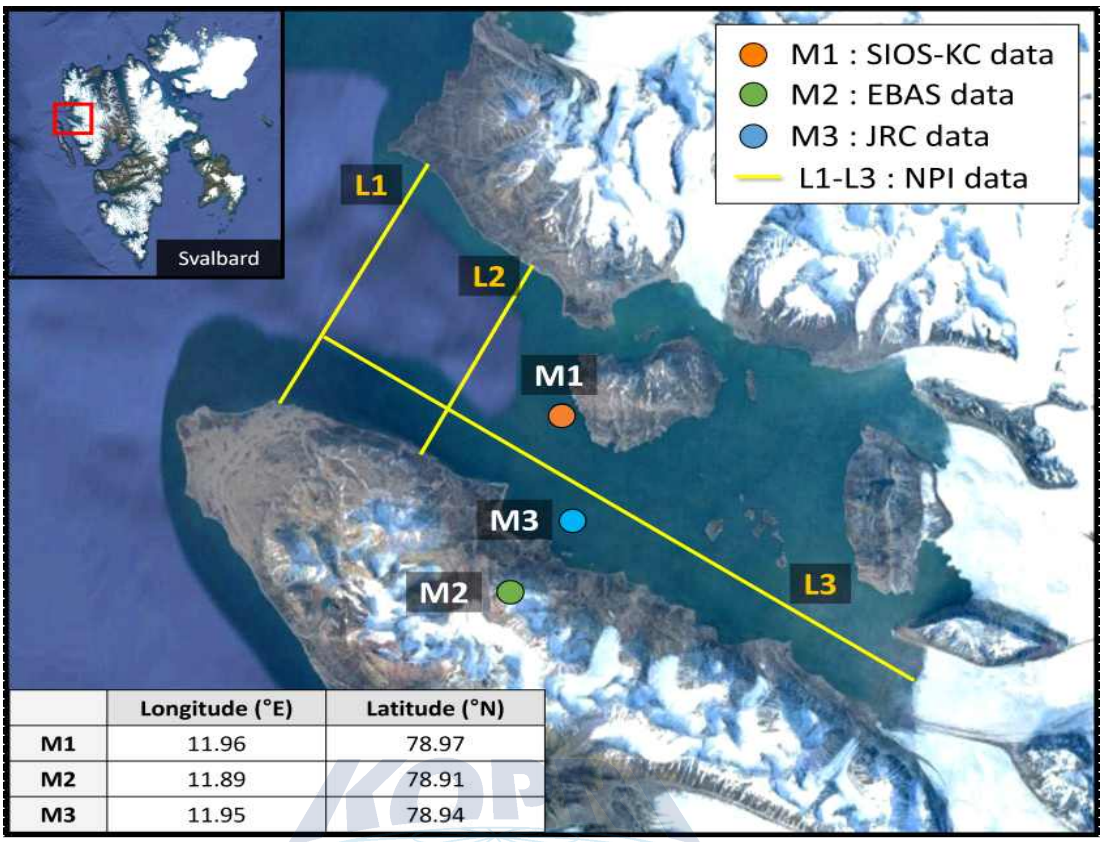
(1) 연구 목적

- 스발바르 연안 해역의 물질 수송 기작을 파악하기 위하여, 연구 지역을 스발바르 북서쪽에 위치한 콩스피오르드로 선정하였음. 콩스피오르드는 대한민국의 북극 다산기지(위도: 78.92° , 경도: 11.93°)를 포함한, 노르웨이, 독일, 영국, 네덜란드, 프랑스 등 10개 국가에서 운영하고 있는 기지를 통해 장기적인 현장관측 자료가 누적되어 있어, 모델 구축에 필요한 관측자료 수집에 용이한 장점이 있음
- 모델 구축에 필요한 개방 경계 입력장과 초기 입력장, 격자 구성 등과 관련된 신뢰성 있는 시 · 공간적인 자료를 수집하기 위하여, 광역모델의 예측결과 자료를 추가적으로 수집 및 분석하였음

(2) 연구 방법

(가) 현장자료: 시-공간 자료 수집 및 기초분석

- 현장자료들은 북극 스발바르 해역을 대상으로 Svalbard integrated Arctic earth observing system-knowledge centre (SIOS-KC), Joint research centre (JRC), Korean polar data center (KPDC), EBAS (http:/ebas.nilu.no/)의 데이터베이스를 조사하여 수집되었음(Fig. 261). 또한, Norwegian polar institute (NPI) 연구팀과의 연구협업을 통하여 2007년 현장 관측자료들이 수집되었음
- SIOS-KC의 M1 정점의 유동 자료(유속, 유향, 수온, 염분)가 수집 및 분석되었음. KPDC과 EBAS로부터 M2 정점 니알슨 기지의 기상 자료(기압, 기온, 풍속, 풍향)와 JRC로부터 M3 정점에서 수위 변동에 대한 시계열 자료가 수집 및 분석되었음
- NPI 연구팀으로부터 L1, L2, L3의 총 3개 정선에 대한 CTD 프로파일링 자료가 수집되었으며, 해당 자료를 기반으로 각 정선의 3차원 수온 및 염분에 대한 수직적인 분포 특성이 분석되었음



	Longitude (°E)	Latitude (°N)
M1	11.96	78.97
M2	11.89	78.91
M3	11.95	78.94

Fig. 261. Locations of mooring associated with the hydrodynamic and atmospheric data in Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

(나) 현장자료: 지형, 해안선 및 수심 자료

- 수치모델의 격자 구성 및 고해상도의 수심 분포를 적용하기 위하여, Norwegian Polar Institute (NPI)의 스발바르에 대한 해안선 및 지형 자료(Fig. 261)와 International bathymetry chart of the arctic ocean (IBACO) 4.0의 수심자료(Fig. 262)가 수집 및 분석되었음
- NPI의 해안선과 지형자료는 연안선 및 표고에 대해 100 m 간격의 고해상도로 제공되며, 피오르드와 연결된 주요 지류들에 대한 지형 정보를 제공함. 수치모델링에 앞서 SMS 프로그램과 QGIS 프로그램을 활용하여 격자 구성에 필요한 자료 포맷변환, 오류 지형데이터 선별 등의 전처리 과정이 수행되었음
- IBACO4.0 수심자료 기반으로, 스발바르 서쪽에 대륙붕이 존재하여 2000~3000 m의 급격한 수심 차이가 존재함. 크로스피오르드와 콩스피오르드를 포함한 해역(A1)의 경우, 수심은 약 250~350 m의 범위로 분포함
- 반면, 피오르드 내부(A2)에 인접할수록 연안선을 따라 약 0~30 m의 상대적으로 낮은 수심이 분포하며, 우리나라의 반 폐쇄적인 하구와 유사한 수심 특성이 있음

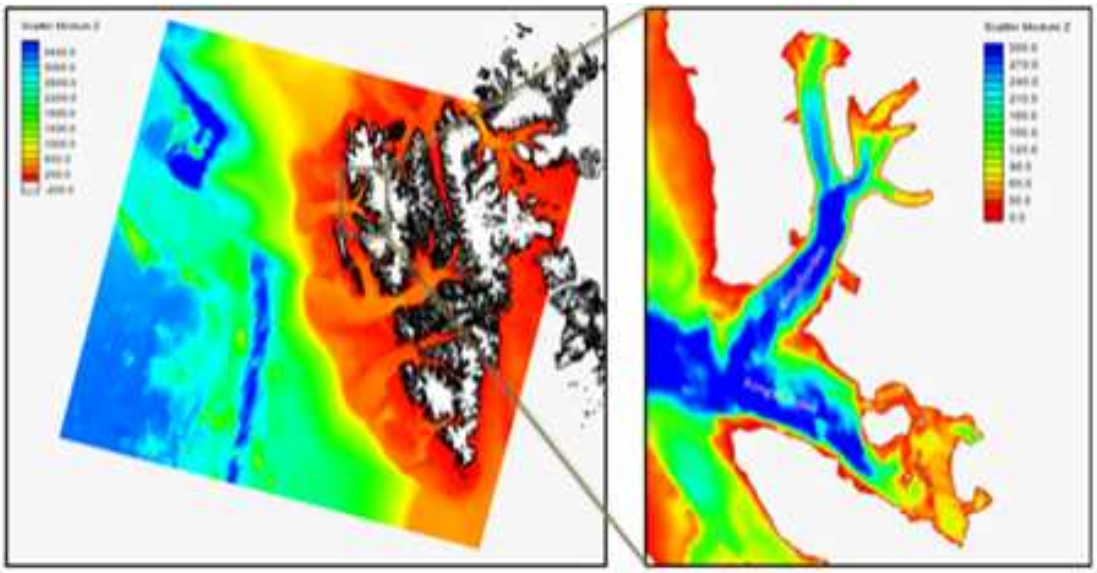


Fig. 262. Distributions of water depth obtained from the IBCAO4.0 on the west coast of Svalbard.

(다) 광역모델 결과 수집 및 분석

- 기 연구결과 검토 시, 스발바르 연안 수치모델 구축을 위해서는 서쪽 지역의 West Spitsbergen current (WSC)가 필수적으로 재현될 필요가 있음
- WSC를 재현하기 위해서는 Norwegian-Atlantic Current (NwAC)와 Norwegian-Atlantic Slope Current (NwASC)의 대서양으로부터 유입되는 해류가 고려되어야 하며, 관련 해저지형 조건과 기 광역모델 시·공간적인 모델 결과들이 활용되어야 함
- 광역모델인 HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)의 3차원 모델결과와 UMASSD 대학의 Chen 교수 연구팀의 북극권 Arctic Ocean-FVCOM (AO-FVCOM) 모델 도메인 및 수심 자료가 수집되었으며, 스발바르 해역에 대한 유동 모델 결과인 Svalbard 800 (S800)이 수집되었음. 또한, 수치모델의 기상 조건을 재현을 위한 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)의 재분석 자료가 수집되었으며, Snow model로부터 도출된 피오르드 담수 유출량 자료가 NPI-group으로부터 수집되었음

(라) FVCOM 수치모델 구축

- 본 연구에서는 Chen et al. (2003)에 의해 개발된 비정규 격자 해양순환 모델인 Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM)이 활용되었음
- FVCOM의 격자는 복잡한 해안선과 지형을 가진 해역에 대하여 효율적으로 수치 계산이 이루어지는 삼각형 형태로 구성되어 있음. 또한, 연속 방정식, 운동 방정식, 열-염 보존 방정식 등 여러 가지 지배방정식에 대한 차분을 통해 격자 내에서 수치적인 계산이 이루어지는 유한 체적법이 사용됨

(2) 연구 결과 및 토의

(가) 수위 및 조석 검증

- 모델의 모의 기간 2007년에서, 대조기 기간에 해당하는 6월 17일의 고조 및 저조에 대한 수위 결과가 Fig. 263에 제시되었음
- 이 기간동안, 피오르드 내만에 위치한 모델의 수위는 −0.6~0.6 m의 변동성으로 계산되었으며, 조차는 약 1.2 m로 계산되었음
- 수위에 대한 FVCOM의 재현성을 정량적으로 평가하기 위하여, 평균 오차(mean error, ME), 평균 절대 오차(mean absolute error, MAE) 및 Willmott (1981)에 의해 정의된 predicted skill (Skill)이 계산되었음

$$ME = \frac{\sum(M_n - O_n)}{N},\ MAE = \frac{\sum|M_n - O_n|}{N},\ Skill = 1 - \frac{\sum(M_n - O_n)^2}{\sum(|M_n - \overline{O}| - |O_n - \overline{O}|)^2}$$

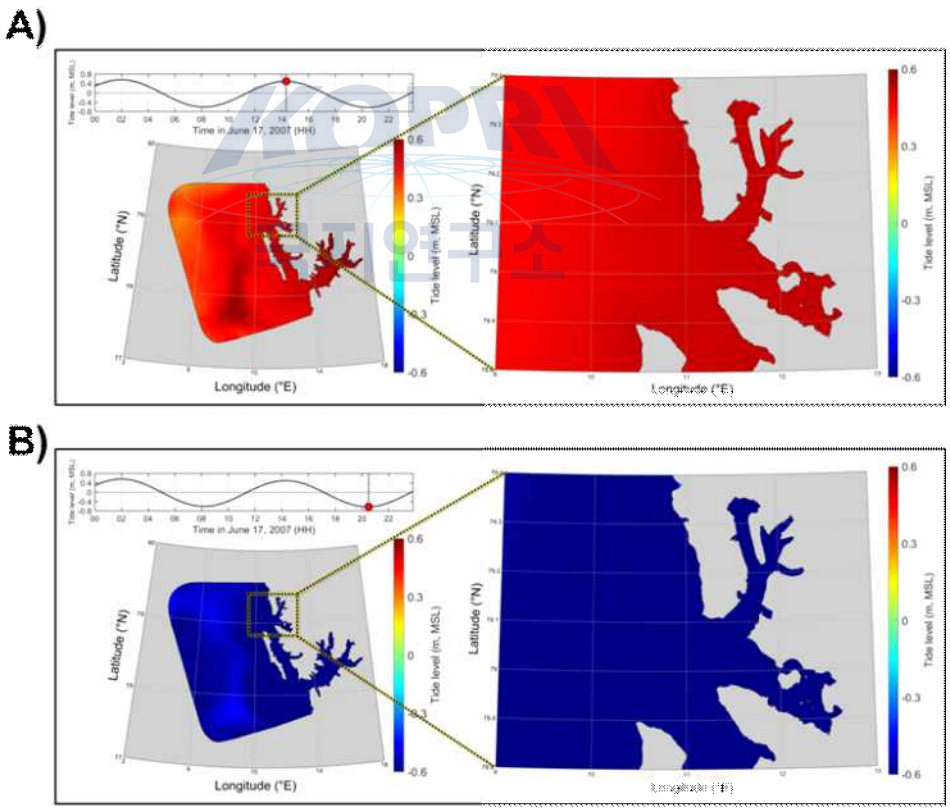


Fig. 263. Model results for water level distributions at (A) high tide and (B) low tide in Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

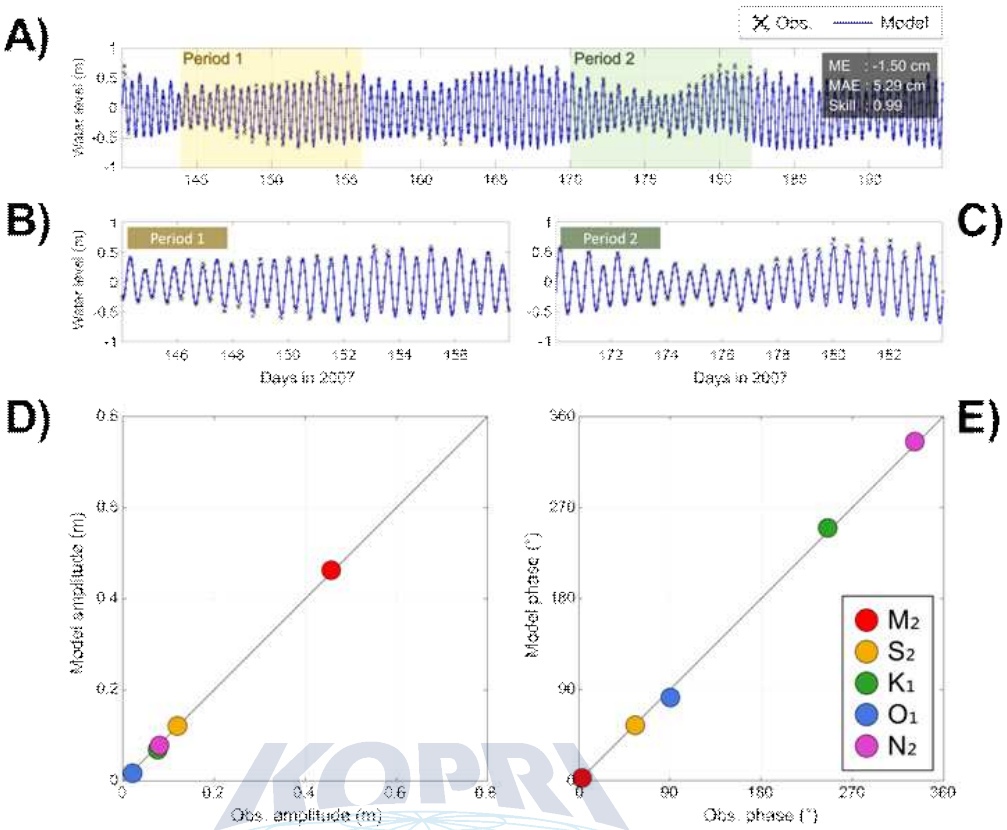


Fig. 264. Model-data comparison of (A-C) water levels and (D-E) harmonic constants at station M3.

KOPRI 극지연구소

- M3 정점(Fig. 261)에서의 수위 시계열에 대한 수치모델 결과와 관측 자료가 1:1로 비교되었음(Figs. 264A-C). 또한, 모델 결과와 관측자료의 수위 시계열에 대한 조화분해를 통해 추출된 5개 분조(M2, S2, K1, O1, N2)의 조화상수가 1:1로 비교되었음(Figs. 264D-E)
- 모델 결과의 수위는 창조-낙조 및 대조-소조 변동성을 잘 재현하고 있으며, ME와 MAE는 각각 -1.50 cm와 5.29 cm로 계산되었음. 또한, Skill은 0.99로 산정되었으며, 수위 결과에 대한 구축된 모델의 재현성이 우수함
- 5개 분조의 진폭과 조화상수에 대한 모델과 관측의 통계 검증 자료가 Table 51에 제시되었음. 모든 분조에 대한 진폭은 관측자료와 모델 결과에 대하여 약 0.01 m 이하의 오차가 계산되었음. 위상의 경우, M2와 S2 분조에 대한 오차가 가장 낮게 (<1°) 계산되었으며, K1, O1 및 N2의 오차는 각각 -4.41° , +8.07° , -2.87° 로 계산되었음

Table 51. Model-data comparison of harmonic constants at station M3.

Station	constituents	Amplitude (m)			Phase (°)		
		Obs. (A)	Model (B)	Error (A-B)	Obs. (A)	Model (B)	Error (A-B)
M3	M_2	0.45	0.46	-0.01	3.22	2.92	0.29
	S_2	0.12	0.12	0.00	55.78	55.25	0.53
	K_1	0.08	0.07	0.01	245.78	250.19	-4.41
	O_1	0.02	0.02	0.00	90.46	82.38	8.07
	N_2	0.08	0.08	0.00	331.73	334.61	-2.87

(나) 해류 패턴 검증

- FVCOM 결과의 해류에 대한 신뢰성을 검토하기 위하여, 2007년 6월의 K160 모델 결과가 활용되었음. K160 모델은 콩스피오르드 및 크로스피오르드 해역에 대한 160 m의 격자 해상도로 구축된 ROMS 모델 결과임(Sundfjord et al., 2017; Torsvik et al., 2019). K160 모델의 외해개방경계는 S800 모델 결과가 일 평균값으로 입력되며, TPXO tidal model의 조석 조건이 고려되어 있음. 또한, Met Norway (NORA10) 기반 10 km 해상도의 기상장이 사용되며, The Weather Reaearch and Forecasting model (WRF) 기반 3 km 해상도의 바람장이 사용됨
- 2007년 6월 평균 유속장 기반, K160에서 나타난 주요 4개의 해류(C1-C4)가 FVCOM에서 재현되었음(Fig. 144). 콩스피오르드 외해 해역의 약 0.2 m/s 이상의 남향류(C1)는 K160와 FVCOM에서 모두 재현되지만, FVCOM에서 C1의 폭이 K160에 비해 더 넓은 경향이 있음. 반시계 방향의 회전성 흐름인 C2와 스발바르 연안을 따라 흐르는 C3는 콩스피오르드 입구부에서의 주요 해류 패턴이며(Sundfjord et al., 2017), 유속의 세기는 0.12 m/s 이상임. 또한, Blomstrandhalboya (BL)의 남부 해안선을 따라 피오르드 북부로 유출되는 Conwaybreen 기원의 해류(C4)가 FVCOM에서 잘 재현되었음(Fig. 265B와 Fig. 265D). C4 해류는 K160와 FVCOM에서 각각 최대 0.10 m/s와 0.15 m/s까지 증가됨

(다) 수온 및 염분 검증

- Torsvik et al. (2019)는 수온 및 염분 항목에 대한 수치모델의 재현성을 평가하기 위하여 콩스피오르드 내부의 L1-L3 정선(Fig. 266)에 대한 현장관측을 수행하였음. 관측은 Seabird Electronics사의 전기음성도, 수온, 그리고 수심을 측정하는 시스템(SBE49 CTD)을 활용하여 2007년 7월 20일 하루 동안 진행되었으며, L1-L3 정선에 대한 수온 및 염분의 수직 분포를 취득하였음. L1-L3 정선에 대한 수직적인 수온 분포 관측 결과는 Figs. 267A-C에 제시되었으며, 수직적인 염분 분포 관측 결과는 Figs. 268A-C에 제시되었음
- 본 연구에서는 수온 및 염분 항목에 대한 FVCOM의 재현성을 평가하기 위하여, L1-L3 정선과 동일한 위치의 수직적인 수온 및 염분 분포 결과를 계산하였음. FVCOM

결과는 2007년 07월 20일 하루 동안의 수온 및 염분 결과를 일 평균하여 산정되었으며, 수직적인 수온 분포 FVCOM 결과 및 수직적인 염분 분포 FVCOM 결과는 각각 Figs. 267D-F와 Figs. 268D-F에 제시되었음

- L1-L3 정선에 대한 관측자료의 수직적인 수온 분포는 표층 및 저층에서 각각 최대 약 6 ℃, 최소 약 2 ℃로 관측되었으며, 수심이 증가함에 따라 수온이 감소되는 경향성이 나타남. FVCOM의 경우, L1-L3 정선에 대한 수직적인 수온 분포는 표층 및 저층에서 각각 최대 약 6 ℃, 최소 약 3 ℃로 계산되었으며, 관측자료에서의 수심이 증가함에 따라 수온이 감소되는 경향성이 재현됨

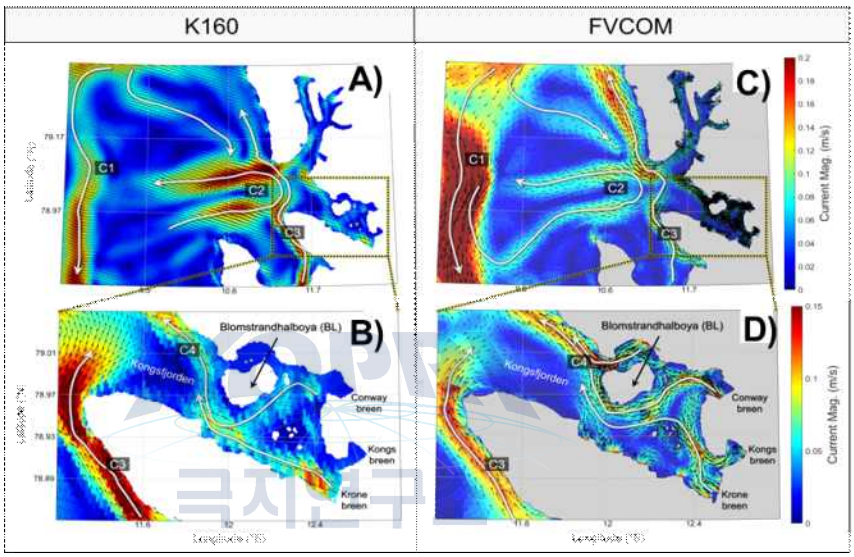


Fig. 265. Comparison of current patterns between (A–B) K160 and (C–D) FVCOM in Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

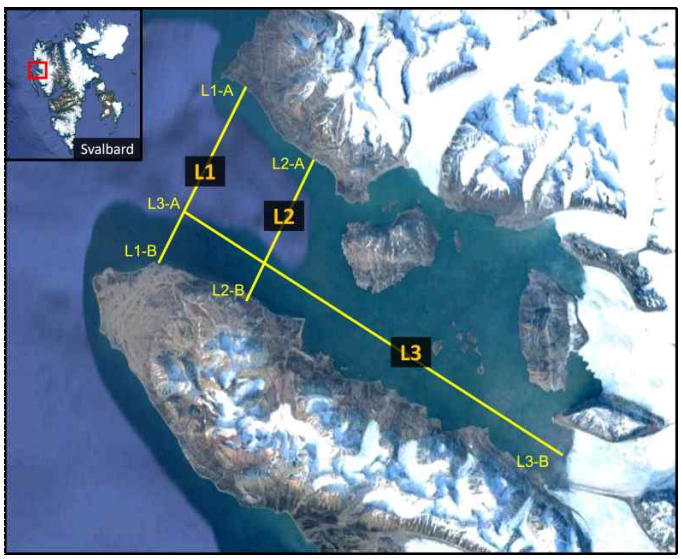


Fig. 266. Locations of L1–L3 cross-sections associated with the temperature and salinity data in Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

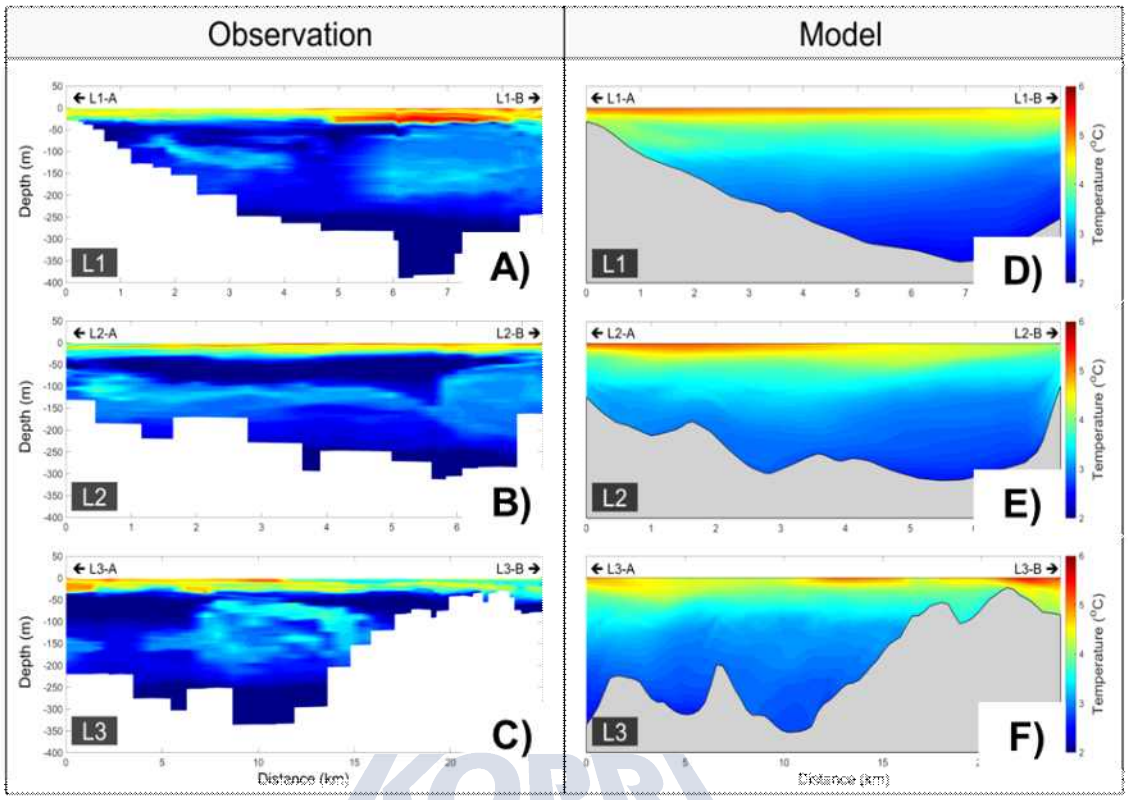


Fig. 267. Comparison of (A–C) observed and (D–F) modeled temperatures along the L1–L3 cross–sections in Kongsfjorden (July 20, 2007).

KOPRI
극지연구소

- L1 정선에 대한 관측자료는 L1–A로부터 약 5~8 km 떨어진 구간의 표층에 5 ℃ 이상의 높은 수온이 관측되었으나, FVCOM의 경우, 약 0~7 km 구간의 표층에서 5 ℃ 이상의 높은 수온이 산출되었음. L2 정선의 경우, 약 0~4 km 구간의 표층 관측자료에서 약 4~5 ℃의 수온이 관측되었으며, FVCOM 결과는 동일 구간에서의 수온이 약 1 ℃ 높은 5 ℃ 이상으로 계산되었음. L3 정선에 대한 관측자료는 약 0~10 km 구간의 표층에서 수온이 가장 높게 관측되었으나, FVCOM 결과는 L3–A로부터 약 17~25 km 이상 떨어진 구간의 표층에서 수온이 가장 높게 관측되었음. 따라서, L1–L3 정선에 대한 표층의 수온 범위는 관측자료와 FVCOM 결과 모두 약 4~6 ℃로 유사하지만, 상대적으로 높은 수온이 나타나는 위치는 다름
- L1–L3 정선에서 수심 약 50 m 이상의 구간에 대한 관측자료는 수온이 약 2~3 ℃ 범위로 관측되었음. FVCOM 결과의 경우, L1–L3 정선에서 수심의 약 50 m 이상 구간에 대한 수온은 약 3~4 ℃ 범위로, 관측자료에 비해 약 1 ℃ 과대 산정되었음. 따라서, FVCOM의 수직적인 수온에 대한 성층 강도는 관측자료에 비해 약하게 계산되었으며, 지속적인 FVCOM 민감도 실험을 통해 개선되어야 함

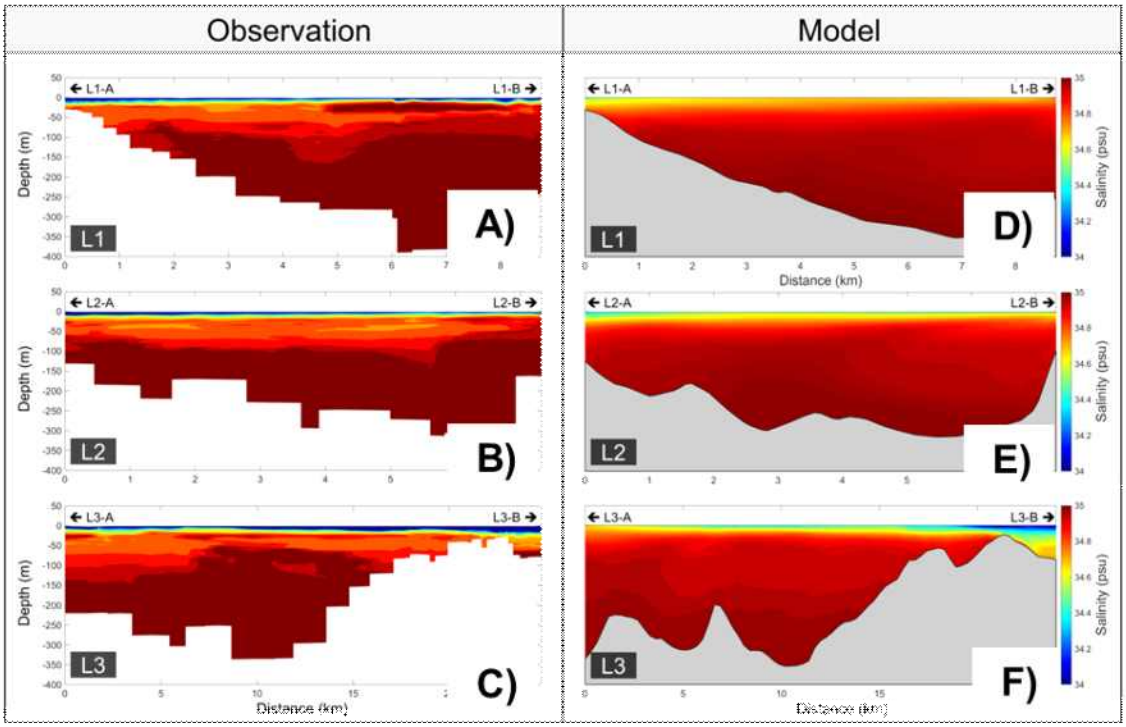


Fig. 268. Comparison of (A–C) observed and (D–F) modeled salinity along the L1–L3 cross-sections in Kongsfjorden (July 20, 2007).

- L1-L3 정선에 대한 관측자료의 수직적인 염분 분포는 34~35 psu의 범위 내로 분포함. 관측자료의 경우, 모든 정선에서 조수 빙하로부터의 담수 유출의 영향으로 수심 약 0~10 m구간의 표층에서 염분이 34 psu 이하로 감소됨. L1-L3 정선에 대한 관측 자료 중, 조수 빙하로부터의 담수 유출에 의해 수직적으로 가장 염분이 낮아진 정선은 L3 정선이며, L3-A로부터 약 23~25 km 떨어진 구간에서 최대 약 40 m의 수심까지 염분이 34 psu로 감소됨. FVCOM 결과의 경우, L1-L3 정선에 대한 수직적인 염분 분포는 관측자료와 동일한 34~35 psu의 범위 내로 계산됨
- L3 정선에 대한 FVCOM 결과의 경우, 관측자료에 비하여 정선의 조수 빙하로부터의 담수 유출에 의한 수평적인 염분 감소가 과소 산정되었으며, 수직적인 염분 성층의 강도가 관측자료에 비하여 약하게 계산되었음. L1-L2 정선에 대한 FVCOM 결과의 경우, 관측자료에 비하여 L1 정선에서의 조수 빙하로부터의 담수 유출에 의한 수평적인 염분 감소가 과소 산정되었으며, 수직적인 염분 성층의 강도가 관측자료에 비하여 약하게 계산되었음
- 따라서, L1-L3 정선의 염분 분포 범위는 관측자료와 FVCOM 결과 모두 34~35 psu로 유사하며 조수 빙하로부터의 담수 유출에 의한 염분 감소 패턴이 FVCOM에서 일부 재현됨. 하지만, 관측자료에 비해 FVCOM의 수직적인 염분 결과는 표층에서 과대 산정되었으며, 수직적인 염분 성층의 강도는 과소 산정되었음

(라) 성층 재현을 위한 민감도 실험

- 콩스피오르드 해역의 성층 재현을 위하여, 대표적으로 L3 정선의 수온 성층에 대한 총 8개의 민감도 실험이 수행되었음. 민감도 실험에 사용된 FVCOM의 파라미터들은 수평/수직 확산계수(Horizontal and Vertical mixing coefficient) 및 Prandtl number이며, 각 실험에 대한 입력 파라미터들이 Table 52에 제시되었음

Table 52. Details of the sensitivity test for vertical stratification.

Case number	Horizotal term		Vertical term	
	Mixing coefficient (m^2/s)	Prandtl number	Mixing coefficient (m^2/s)	Prandtl number
Case 1	0.08	0.1	0.001	1.0
Case 2	0.08	1.0	0.001	1.0
Case 3	0.08	0.1	0.001	0.1
Case 4	0.40	0.1	0.001	1.0
Case 5	0.80	0.1	0.001	1.0
Case 6	0.80	1.0	0.001	1.0
Case 7	0.08	0.1	0.0005	1.0
Case 8	0.08	0.1	0.0001	1.0

KOPRI 극지연구소

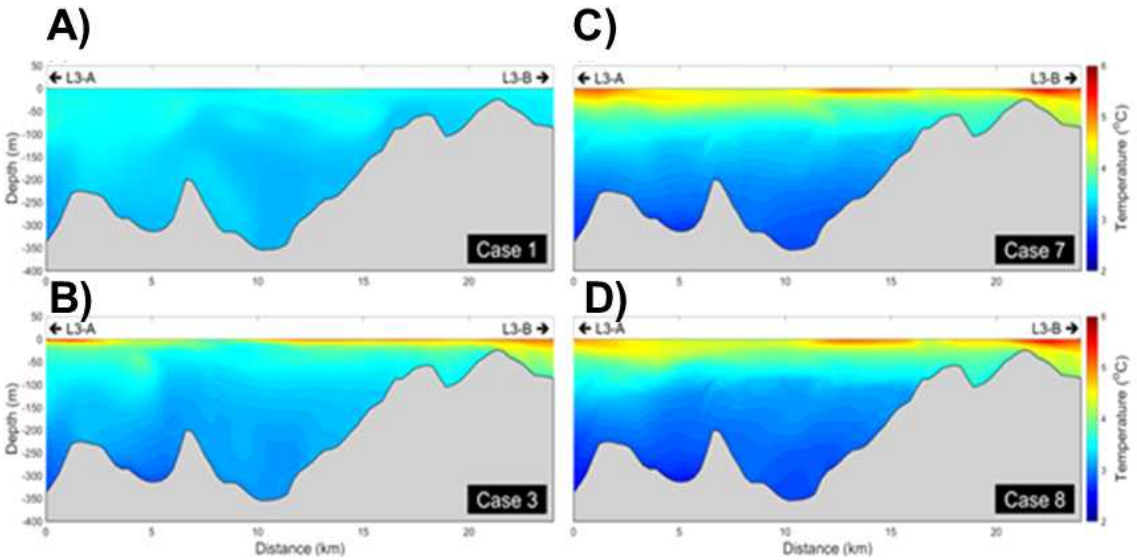


Fig. 269. Vertical temperature distribution for (A) Case 1, (B) Case 3, (C) Case 7, and (D) Case 8 at the L3 cross-section.

- 총 8가지 실험 중, Case 1, Case 3, Case 7, Case 8에 대한 L3 정선에서의 수온 수직 분포가 Fig 269에 제시되었음. 수직 확산계수가 0.001인 Case 1와 수직 확산계수가 0.0001인 Case 8을 비교하였을 때, Case 8이 관측자료의 성층을 가장 유사하게 재현하였음. 따라서, 본 연구의 FVCOM 시뮬레이션에 사용된 확산계수 관련 파라미터는 Case 8에 해당하는 값들로 선정되었음

(마) 수치모델 분석

- 콩스피오르드 해역에서의 계절적인 해류 변동을 야기시키는 주요 요인은 담수 유출량임(Fig. 261). 이에 따라, 콩스피오르드 조수빙하로부터의 담수 유출량이 낮은 시기(Low discharge period, LDP)와 높은 시기(High discharge period, HDP)에 대한 해류 특성이 각각 비교 및 분석되었음
- 본 연구에서는 Conwaybreen, Kongsbreen 및 Kronebreen으로부터 유출되는 월 평균 담수 유출량의 합이 10 m3/s 이하인 시기(5월)를 LDP로 정의하였으며, 80 m3/s 이상인 시기(7월)는 HDP로 정의하였음

(바) 담수 유출량에 의한 표층 해류 패턴

- LDP 와 HDP 기간에 대한 콩스피오르드 해역에서의 월 평균 표층 해류 패턴이 Fig. 270에 제시되었음
- LDP의 경우, 피오르드 북부에서 약 12 cm/s 이상의 북서향 유속이 계산되었으며, 피오르드 남부에서 약 8 cm/s 이상의 남동향 유속이 계산되었음(Fig. 270A). 또한, 피오르드 입구 부분에서 반시계 방향의 회전성 흐름이 나타났으며, 스발바르 연안선을 따라 피오르드 남부를 통해 유입되는 해류도 확인되었음

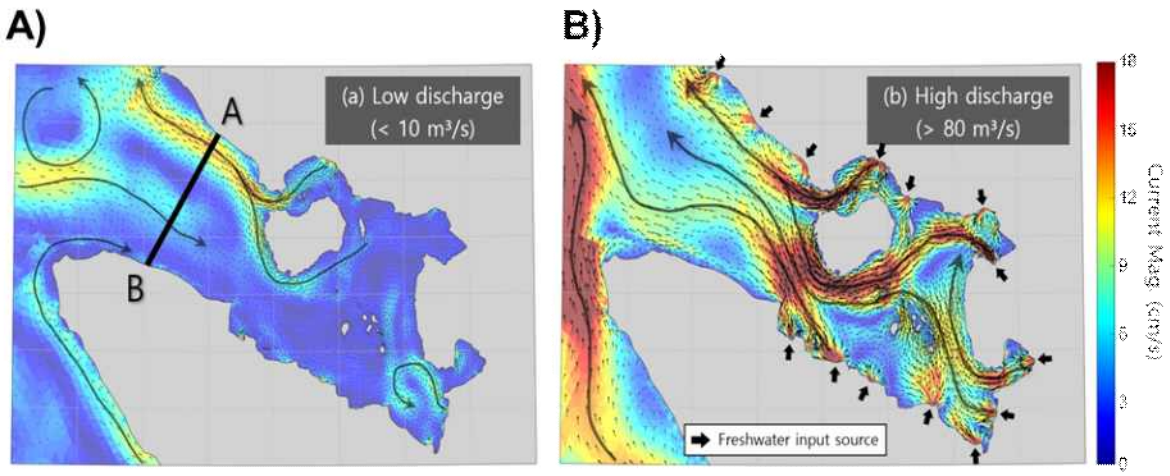


Fig. 270. Current patterns due to freshwater discharge in Kongsfjorden, Arctic Svalbard: (A) low discharge period and (B) high discharge period.

- HDP의 경우, 피오르드 전반적으로 유속이 최대 18 cm/s까지 강화되었음(Fig. 270B). 피오르드 입구에서의 유입과 유출 패턴이 뚜렷한 LDP와는 다르게, HDP의 유속 패턴은 피오르드 외부로 유출되는 흐름이 우세함
- 따라서, 콩스피오르드 해역에서의 담수 유출량은 표층 해류의 세기를 강화시키며, 피오르드 표층 입구부에서 유입되는 해류를 통제하는 역할을 담당함

(사) 담수 유출량에 의한 A-B 정선의 특성

- LDP와 HDP에 대하여, Fig. 270의 A-B 정선에서의 유속 및 염분의 수직 분포가 Fig. 271에 제시되었음
- Fig. 271A와 Fig. 271B에서, 적색은 피오르드 내부로 유입되는 유속을 의미하며, 청색은 피오르드 외부로 유출되는 유속을 의미함
- HDP 기간의 표층 약 0~20 m의 구간을 제외하고, 피오르드 입구부에서의 주요 해류 패턴은 반시계 방향의 회전성 흐름임(Figs. 271A, B). 피오르드 입구의 남단(B)에서는 외해로부터 해류가 유입되며, 피오르드 입구의 북단(A)에서는 피오르드로부터 해류가 유출됨

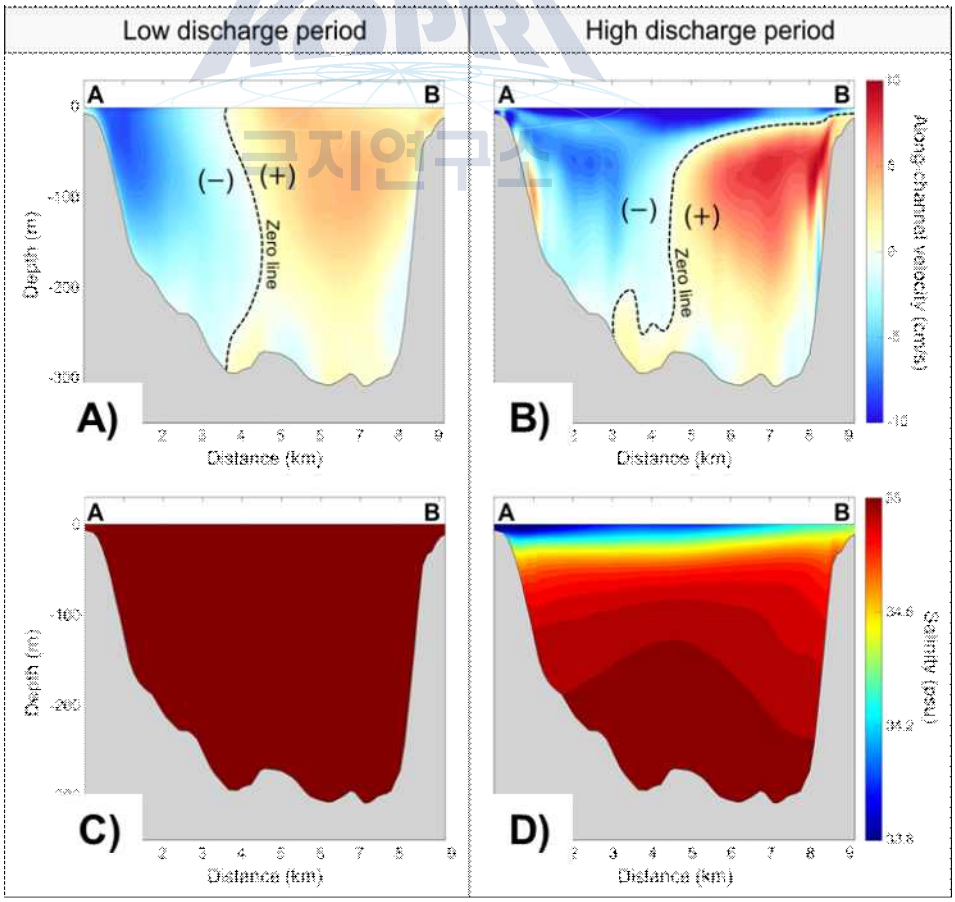


Fig. 271. Vertical distribution of (A-B) along-channel velocity and (C-D) salinity duet to freshwater discharge in the A-B cross-section.

- 조수빙하로부터의 강한 담수 유출량은 HDP 기간의 염분 성층과 피오르드 남단에서의 2층 흐름 구조를 강화시킴(Figs. 271B, D). 강화된 2층 흐름 구조에 의해, 피오르드 남단의 저층 유속은 약 10 cm/s까지 증가됨. 이에 따라, 콩스피오르드 해역에서의 담수 유출량은 외해로부터 유입되는 저층 흐름을 강화시키는 요인이 될 수 있음

(아) 입자추적 분석

- 콩스피오르드 해역에서의 유동 환경에 따른 물질 이동 특성을 파악하기 위하여, FVCOM의 라그랑지안 입자 추적 모듈이 활용되었음. 이 모듈은 상미분 방정식의 비선형성을 해결하며, 수식은 다음과 같음

$$\frac{dx}{dt} = v[x(t),t]$$

- 여기서, x는 시간 t일 때의 위치를 의미하며, dx/dt는 시간에 따른 입자 위치의 변화율임. v[x(t),t]는 특정 위치와 시간에 대한 유속을 의미함. FVCOM에 공간적으로 분포된 입자들은 질량 보존 법칙을 따르며, 입자 추적에 설정된 시간 간격 동안은 유속장이 정지된 것으로 간주됨

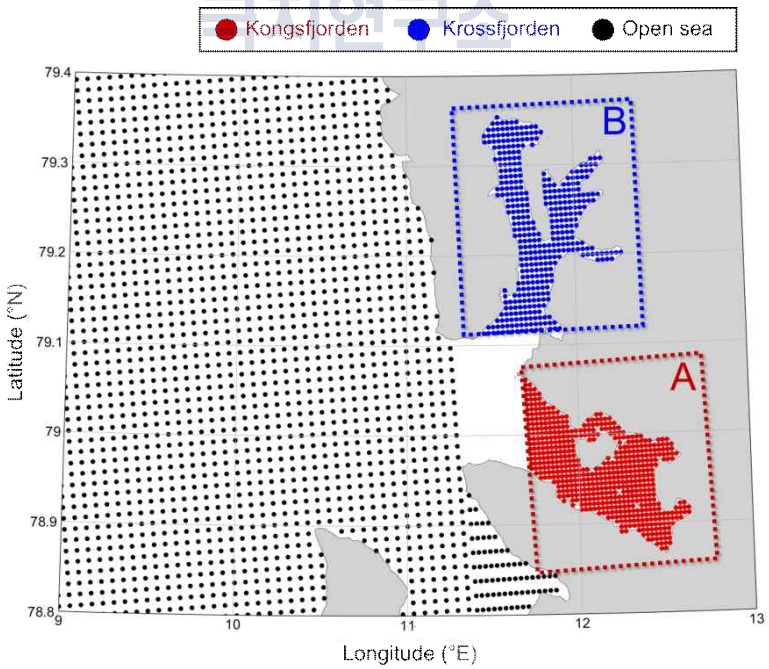


Fig. 272. Initial distribution of particles in the FVCOM domain. Red, blue, and black dots represent particles sourced from Kongsfjorden, Krossfjorden, and open sea, respectively.

- FVCOM 모델 도메인 내에서 설정된 입자들의 초기 분포는 Fig. 272에 제시되었음. 입자 추적이 수행되는 동안 입자의 기원을 파악하기 위하여, 콩스피오르드, 크로스피오르드 및 외해 해역에 대한 입자의 색을 각각 적색, 청색, 흑색으로 구분하였음. 입자 추적 분석 기간은 LDP와 HDP이며, 콩스피오르드 및 크로스피오르드 해역으로 유입 및 유출되는 입자의 프로세스를 분석하기 위하여, 각각의 구역이 A와 B로 구분되었음

(자) LDP 기간 동안의 입자 추적 결과

- LDP 기간에 대한 총 31일 동안의 표층과 저층에 대한 입자 추적 결과가 Fig. 273A와 Fig. 274A에 4일 단위로 제시되었으며, 콩스피오르드(A) 및 크로스피오르드(B) 해역에 대한 잔여 입자 변화율이 Figs. 273B, C와 Figs. 274B, C에 각각 제시됨
- 표층의 경우, 총 31일 동안 A 해역 전체 입자 중 약 27%가 B 해역으로 이동되며, 약 36%는 외해로 유출됨(Figs. 273B, C). 입자의 이동이 급격하게 발생하는 기간은 초반 약 6일 동안이며, 이 기간에 전체 입자 중 약 45%가 B 해역 또는 외해로 이동됨. A 해역 입자의 약 37%는 외부로 유출되지 않고, 피오르드 내부에서 잔류된 상태로 존재함. B 해역은 표층에서 입자의 외부로의 유출이 약 10% 미만으로 발생함. 31일 동안 B 해역에 잔류되고 있는 입자 중 26%는 A 해역 기원이며, 8%는 외해 기원임

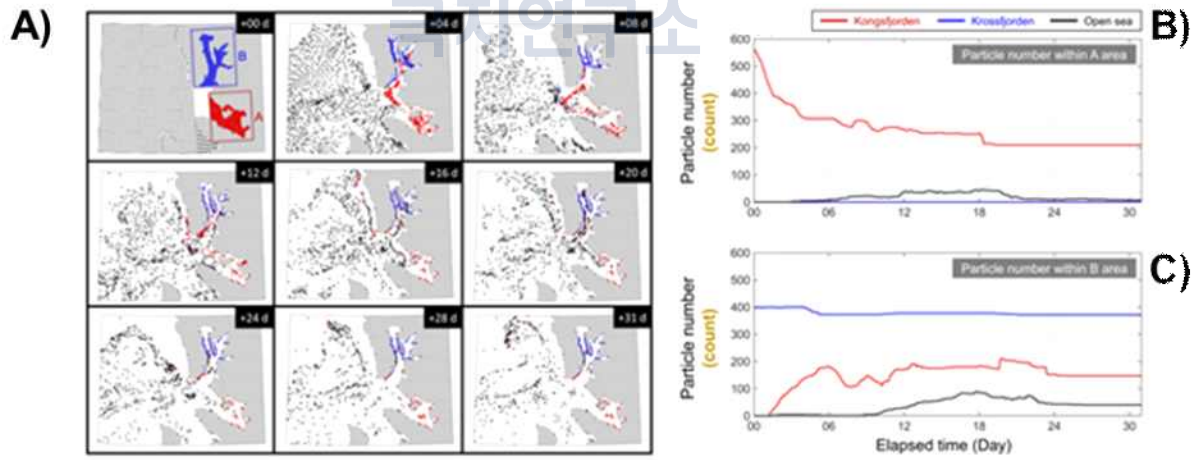


Fig. 273. (A) Particle tracking results in the surface layer during the LDP period and (B–C) variations in particle numbers in Kongsfjorden (red) and Krossfjorden (blue).

- 저층의 경우, A 해역 전체 입자 중 약 18%가 B 해역으로 이동되며, 약 27%는 외해로 유출됨(Figs. 274B, C). 31일 동안 A 해역의 입자들은 점진적으로 외부로 유출되며, B 해역 또는 외해로부터 유입되는 입자는 약 1% 미만임. B 해역에서 외해로 유

출되는 입자와 A 해역으로부터 유입되는 입자 사이의 비는 약 3:2임. 즉, B 해역으로 유입되는 입자의 기원은 주로 A 해역 기원이며, 유출되는 물질은 A 해역보다 외해로 유출되는 경향이 우세함

- 결과적으로, LDP 기간 동안 콩스피오르드(A) 해역의 입자들의 약 45~60%는 크로스피오르드(B)와 외해로 이동될 수 있으며, 외해 기원 입자들은 주로 콩스피오르드 해역보다 크로스피오르드 해역으로 유입됨

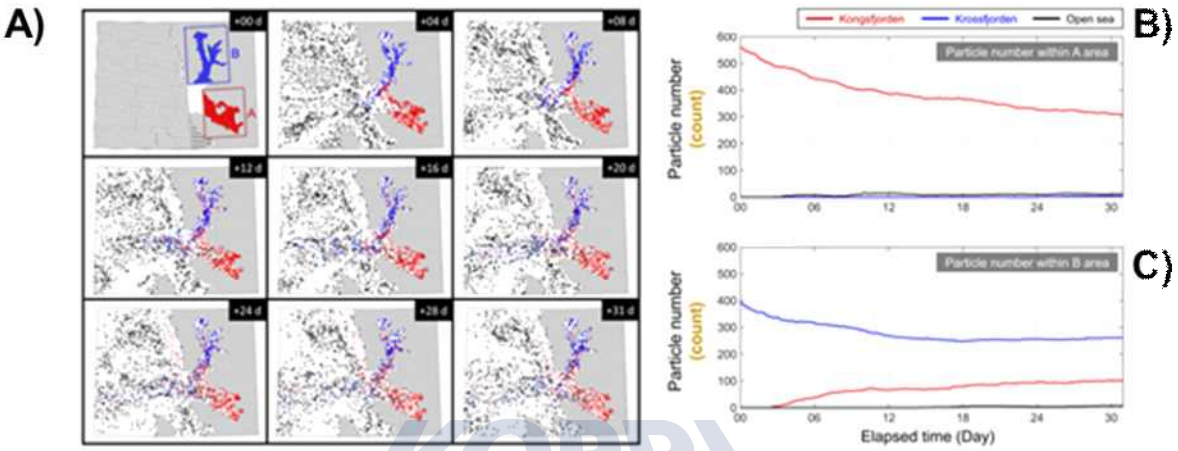


Fig. 274. (A) Particle tracking results in the bottom layer during the LDP period and (B–C) variations in particle numbers in Kongsfjorden (red) and Krossfjorden (blue).

(차) HDP 기간 동안의 입자 추적 결과

- HDP 기간에 대한 총 31일 동안의 표층과 저층에 대한 입자 추적 결과가 Fig. 275A와 Fig. 276A에 4일 단위로 제시되었으며, 콩스피오르드(A) 및 크로스피오르드(B) 해역에 대한 잔여 입자 변화율이 Figs. 275B, C와 Figs. 276B, C에 각각 제시됨
- HDP 기간 동안, A와 B 해역의 표층 입자들이 외해로 유출되는 비율은 각각 80%, 37%임(Figs. 275B, C). 또한, 이 기간 동안 A와 B 해역으로 유입되는 외해 기원의 입자는 1% 미만임. 모의 기간 중, 약 13일 및 21일에 A와 B 해역에서의 입자 개수가 급격하게 감소하는 시기가 존재함. 이는 한 지점에 중첩되어있던 여러 개의 입자가 외부로 유출되면서 발생함

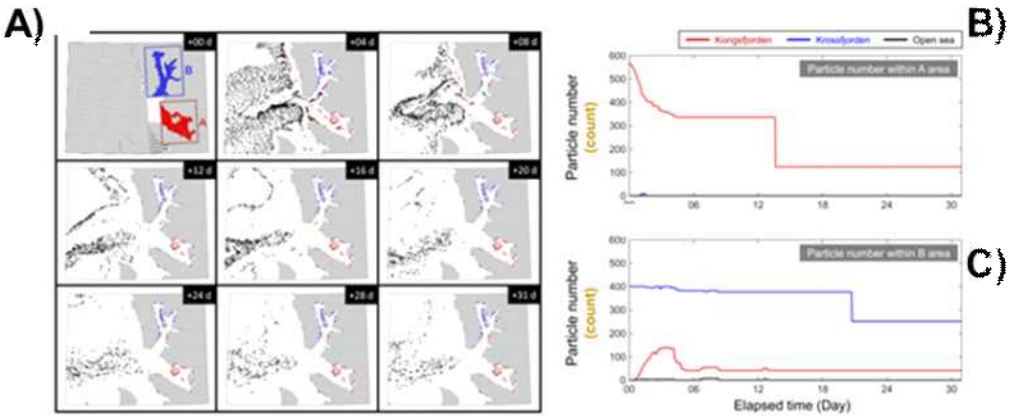


Fig. 275. (A) Particle tracking results in the surface layer during the HDP period and (B–C) variations in particle numbers in Kongsfjorden (red) and Krossfjorden (blue).

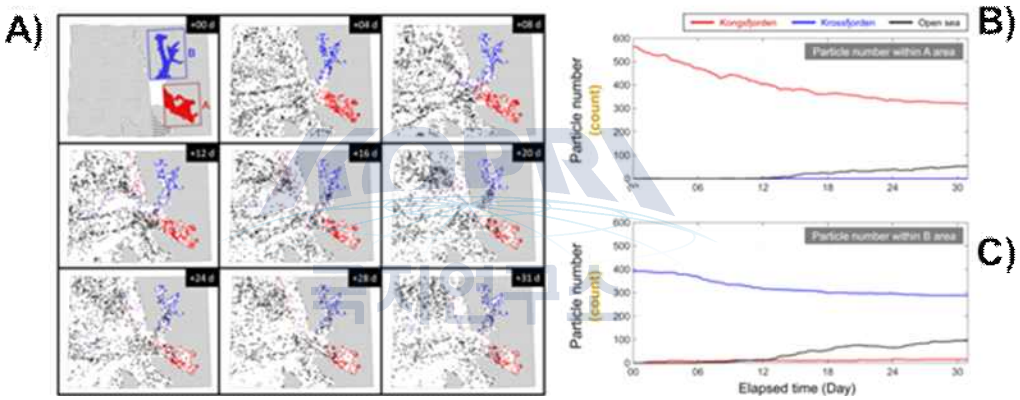


Fig. 276. (A) Particle tracking results in the bottom layer during the HDP period and (B–C) variations in particle numbers in Kongsfjorden (red) and Krossfjorden (blue).

- HDP 기간은 A와 B 해역에 대하여, 저층으로부터의 외해 기원 입자 유입이 강화되는 시기임(Figs. 276B, C). 31일 동안 A와 B 해역 전체 입자 중 각각 42%, 25%가 피오르드 외부로 유출되며, A와 B 해역에 대한 잔류 입자 중 각각 14%, 25%가 외해 기원의 입자임. 이는 Fig. 272에서 언급된 2층 흐름 구조에 의한 저층류 강화에 기인될 수 있음
- 결과적으로, HDP 기간 동안 콩스피오르드(A) 해역의 입자들은 표층에서 대부분 유출되며, 담수 유출량에 의한 2층 흐름 구조에 의해 저층으로부터의 외해 기원 입자의 유입이 강화됨

5-3) 3차년도

가) 스발바르 연안 해류 변동성 파악 및 물질 확산 모델링 기술 개발

(1) 연구 목적

- 본 연구는 스발바르 연안 해역에서, 조수빙하 기원 유출 물질의 순환 기작을 이해하고자 해저에 퇴적된 표층퇴적물질의 이동패턴에 관한 현장 조사가 수행되었으며, 물질의 이동 경로를 분석할 수 있는 라그랑지안 입자 추적 모델링 결과가 분석에 활용됨
- 입자 체류시간은 해당 해역의 유동 조건을 기반으로 계산되었으며, 퇴적물과 오염물질의 분포 및 이동 경로와 관련된 중요한 지표로써, 조수빙하 기원 물질의 순환 기작을 해석하는데 중요한 정보를 제공함

(2) 연구 방법

(가) 현장 자료: 스발바르 콩스피오르드 해저 표층퇴적물 시료 수집 및 기초분석

- 해저 표층퇴적물 시료는 북극 스발바르 콩스피오르드 해역을 대상으로 2023년 07월 08일부터 07월 10일까지 총 3일간 R/V Tiesten 소형 선박에서, Van Veen grab sampler를 활용하여 수집되었음(Fig. 277)
- 시료 수집은 총 37개의 선정된 정점에서 약 1-3.5 km 간격으로 수행되었음(Fig. 278, Table 53)
- 수집된 해저 표층퇴적물 시료에 대한 입도분석을 수행하기 이전, 분석의 정확성을 높이기 위하여, 과산화수소(H_2O_2)와 염산(HCl)을 사용하여 시료 내의 유기물 및 탄산염을 제거하는 전처리 과정이 진행되었음
- 시료의 입도별 조성비는 인하대학교 표준분석연구원에서 보유 중인 레이저 회절 방법을 활용한 입도분석장비(Malvern 사의 Mastersizer 2000)를 활용하여 분석되었음
- 분석된 입도분포곡선을 활용하여 각 시료의 조직변수(평균입경, 분급도, 왜도)가 계산되었으며, 해저 표층퇴적물의 공간분포 특성이 분석되었음

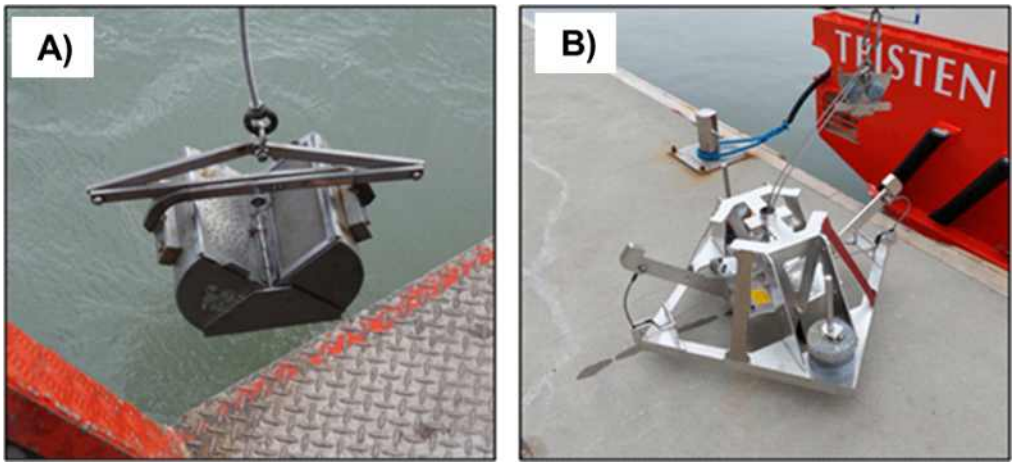


Fig. 277. (A) Van Veen grab samplers used for collecting near-bed surface sediments in Kongsfjorden, Arctic Svalbard, and B) a grab primarily used for observations in waters deeper than 200 m.

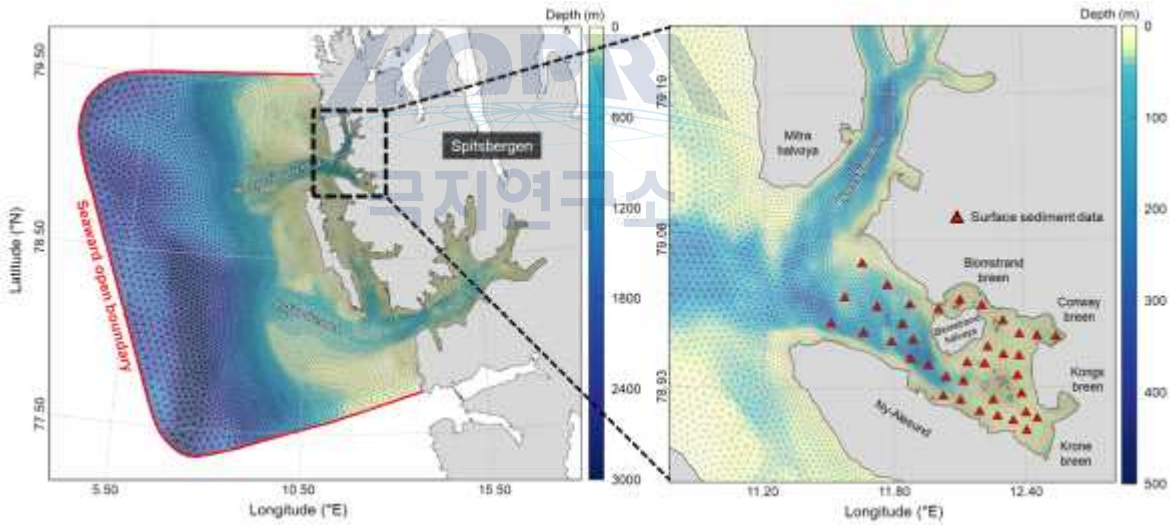


Fig. 278. Map showing surface sediment sampling sites selected in Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

Table 53. Information on sediment sampling sites for grain size analysis.

No.	Latitude(N)	Longitude(E)	Sampling Site	Sampling depth(m)	Sampling Date
1	78° 53.51’	012° 24.48’	Kongsfjorden (inner)	76.7	2023.07.08
2	78° 54.15’	012° 27.38’	Kongsfjorden (inner)	70.0	2023.07.08
3	78° 54.04’	012° 20.78’	Kongsfjorden (inner)	47.8	2023.07.08
4	78° 54.45’	012° 24.31’	Kongsfjorden (inner)	74.5	2023.07.08
5	78° 55.47’	012° 23.16’	Kongsfjorden (inner)	43.7	2023.07.08
6	78° 56.42’	012° 22.09’	Kongsfjorden (inner)	49.1	2023.07.08
7	78° 57.46’	012° 22.56’	Kongsfjorden (inner)	57.4	2023.07.08
8	78° 58.51’	012° 27.61’	Kongsfjorden (inner)	56.0	2023.07.08
9	78° 58.46’	012° 32.83’	Kongsfjorden (inner)	140.0	2023.07.08
10	78° 58.61’	012° 22.70’	Kongsfjorden (inner)	45.8	2023.07.08
11	78° 54.28’	012° 16.48’	Kongsfjorden (inner)	47.2	2023.07.08
12	78° 54.43’	012° 11.58’	Kongsfjorden (inner)	104.0	2023.07.08
13	78° 55.14’	012° 15.36’	Kongsfjorden (inner)	113.0	2023.07.08
14	78° 57.54’	012° 18.23’	Kongsfjorden (inner)	83.8	2023.07.08
15	78° 55.13’	012° 06.34’	Kongsfjorden (inner)	141.0	2023.07.08
16	78° 56.14’	012° 07.16’	Kongsfjorden (middle)	185.6	2023.07.09
17	78° 57.05’	012° 13.08’	Kongsfjorden (middle)	26.0	2023.07.08
18	78° 57.12’	012° 08.26’	Kongsfjorden (middle)	70.7	2023.07.09
19	78° 57.94’	012° 13.92’	Kongsfjorden (middle)	75.4	2023.07.10
20	78° 59.32’	012° 18.23’	Kongsfjorden (middle)	52.0	2023.07.08
21	78° 55.35’	012° 01.61’	Kongsfjorden (middle)	124.0	2023.07.08
22	78° 56.34’	012° 02.39’	Kongsfjorden (middle)	238.7	2023.07.09
23	78° 00.13’	012° 13.38’	Kongsfjorden (middle)	18.9	2023.07.08
24	79° 00.43’	012° 06.34’	Kongsfjorden (middle)	46.6	2023.07.08
25	78° 56.99’	011° 57.57’	Kongsfjorden (middle)	287.8	2023.07.09
26	78° 57.33’	011° 52.52’	Kongsfjorden (middle)	346.3	2023.07.09
27	78° 58.33’	011° 53.34’	Kongsfjorden (middle)	294.6	2023.07.09
28	78° 59.95’	012° 00.44’	Kongsfjorden (middle)	66.5	2023.07.08
29	78° 58.22’	011° 47.39’	Kongsfjorden (outer)	268.3	2023.07.09
30	78° 59.17’	011° 50.42’	Kongsfjorden (outer)	307.4	2023.07.09
31	79° 00.20’	011° 52.50’	Kongsfjorden (outer)	169.4	2023.07.10
32	78° 58.70’	011° 39.65’	Kongsfjorden (outer)	311.9	2023.07.09
33	79° 00.06’	011° 43.39’	Kongsfjorden (outer)	265.9	2023.07.09
34	79° 01.22’	011° 46.25’	Kongsfjorden (outer)	225.6	2023.07.10
35	78° 59.21’	011° 30.70’	Kongsfjorden (outer)	313.6	2023.07.09
36	79° 00.58’	011° 34.45’	Kongsfjorden (outer)	200.2	2023.07.09
37	79° 02.38’	011° 39.26’	Kongsfjorden (outer)	122.0	2023.07.09

KOPRI 극지연구소

(나) 라그랑지안 입자 추적 수치모델링: 조수빙하 기원 물질이동패턴 분석

- 콩스피오르드 해역에서, 유동 및 조수빙하 기원 융빙수 유출량에 따른 물질이동 특성을 파악하기 위하여, FVCOM의 라그랑지안 입자 추적 모듈이 활용되었음
- 이 모듈은 상미분 방정식의 비선형성을 해결하며, 수식은 다음과 같음

$$\frac{dx}{dt} = v[x(t), t]$$

- 여기서, x는 시간 t일 때의 위치를 의미하며, dx/dt는 시간에 따른 입자 위치의 변화율임. v[x(t),t]는 특정 위치와 시간에 대한 유속을 의미함
- FVCOM은 공간적으로 분포된 입자들은 질량 보존 법칙을 따르며, 해수 유동 조건에 의한 이류 과정을 정확히 재현하기 위하여, 중성부력 조건이(외력이 없는 경우, 가라앉거나 떠오르지 않음) 가정됨
- 기 구축(1단계, 2차년도)된 FVCOM 유동모델의 경우, 단일 시점에서 약 2,000개의 입자의 방출이 진행되었으며, 이 방법은 모델 전 영역에서의 유동 조건 하에서 입자의 이동패턴을 분석하기에는 적절했으나, 계절적으로 뚜렷한 특징을 보이는 조수빙하 융빙수 유출량에 따른 입자의 이동을 분석하기에는 제한적이었음
- 조수빙하 유출 물질의 순환 기작을 이해하기 위해서, 선행연구(Lemagie and Lerczak, 2015)에서 사용된 방법인 특정 시간마다 입자를 방출하는 방법이 적용되었으며, 이를 위해 FVCOM 입자 추적 입력자료에 입자 방류 시기에 대한 항이 추가되었음

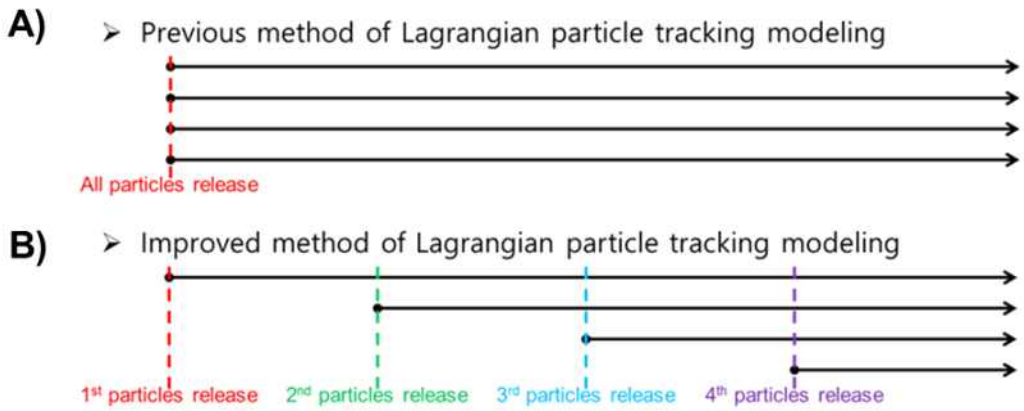


Fig. 279. Comparison between the previous and improved methods of Lagrangian particle tracking modeling: (A) the previous method involves a single release of all particles, whereas (B) the improved method employs a staged release of particles.

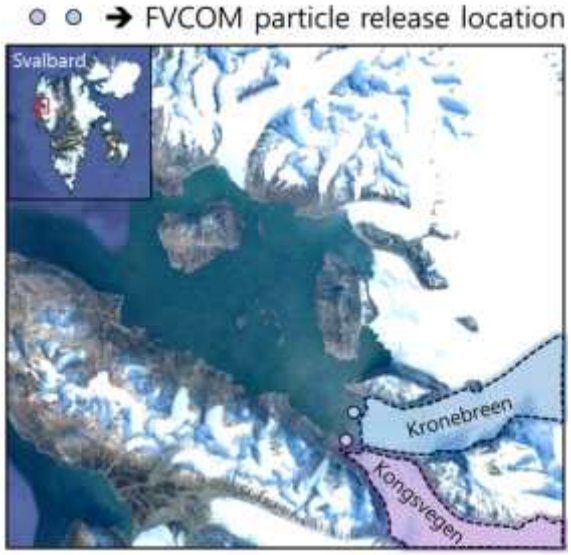


Fig. 280. Location of FVCOM particles discharged through two tidewater glaciers, Kronebreen and Kongsvegen.

- 기존의 방법과 개선된 방법을 설명하는 모식도는 Fig. 279에 제시되었음
- FVCOM 모델 도메인 내에서 설정된 입자들의 분포 위치는 Kongsfjorden에서 가장 융빙수 유출량이 많은 Kronebreen과 Kongsvegen 입구부이며, Fig. 280에 입자 방출 위치가 표시됨

KOPRI 극지연구소

(다) 입자 체류시간 분석: Local Exposure Time (LET) 기법 적용

- 조수빙하 기원 입자의 이동패턴을 정량적으로 평가하기 위해, 선행연구(Du et al., 2020)에서 제시된 입자 체류시간 계산 방법인 LET 분석 기법이 적용되었음(Fig. 281)
- LET 분석 기법에 대한 수식은 크게 두 가지로 구분되었으며, 다음과 같음

First method (general)

$$LET = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\int \sigma_i dt$$

$$\begin{cases} \sigma_i = 0 & (when\ the\ particle\ is\ outside\ the\ specific\ domain) \\ \sigma_i = 1 & (when\ the\ particle\ is\ \in side\ the\ specific\ domain) \end{cases}$$

Second method (practical)

$$LET = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{m=1}^{\infty}(t_{2m} - t_{2m-1})$$

$$\begin{cases} t_{2m-1} : time\ when\ the\ particle\ enters\ the\ specific\ domain \\ t_{2m} \quad\ : time\ when\ the\ particle\ exits\ the\ specific\ domain \end{cases}$$

- 본 연구에서는 첫 번째 방법을 활용하여 LET 계산이 수행되었음
- LET 계산을 수행하기 위해서, 연구 지역의 분석 영역이 일정한 크기를 갖는 정방격

자로 세분화해야 됨. 본 연구에서는 FVCOM 모델 격자 중 콩스피오르드 해역을 대상으로, 500 m × 500 m의 크기를 갖는 정사각형 형태로 구역이 세분화되었으며, 입자의 방류 시기에 따라 분산된 구역에서의 입자들의 체류시간을 계산할 수 있도록 설계되었음(Fig. 282)

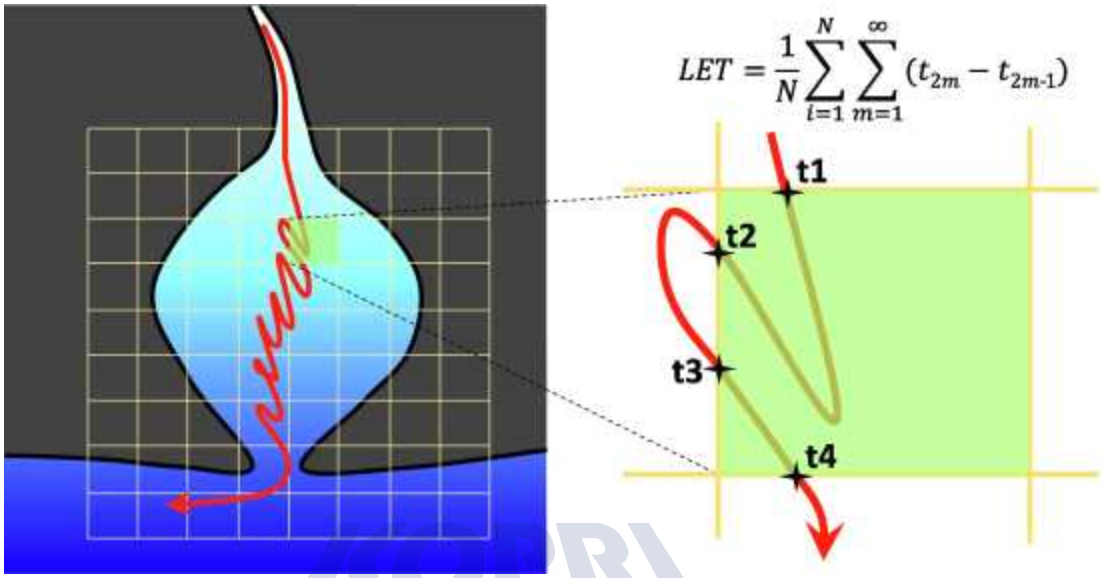


Fig. 281. Calculation methods of the local exposure time (LET) presented by Du et al. (2020).

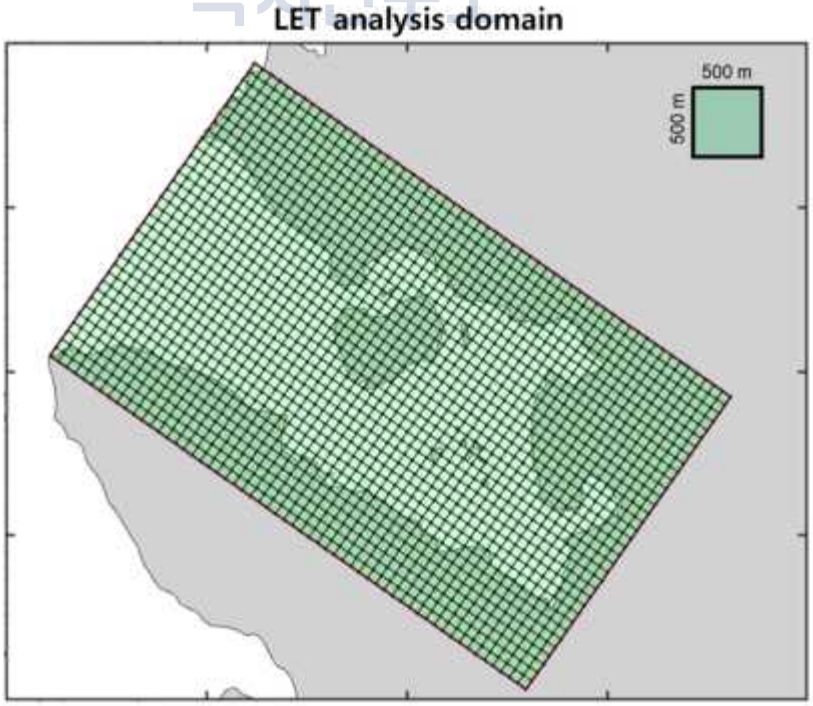


Fig. 282. Configuration of the regular grids in FVCOM for the LET calculation.

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 기 선행연구와의 비교

- Kumar et al. (2018)는 스발바르의 Krossfjorden과 Kongsfjorden을 대상으로 퇴적물 내의 지화학적 분석을 수행하기 위하여, 25개의 정점(Krossfjorden: 12개, Kongsfjorden: 13개)에 대한 해저 표층퇴적물 자료들이 수집됨. 레이저 회절 방법을 활용한 입도분석장비(CILAS 1190 particle size analyzer)를 활용하여 0.03-85 μm (clay to very find sand)의 범위에서 퇴적물 입경이 분석되었음
- 선행 연구에서, 수행된 관측 위치와 퇴적물 입도 분포 곡선은 Fig. 283에 제시됨
- 기 선행연구 결과와 현장조사를 기반으로 수집된 퇴적물 분포 특성과 비교하기 위하여, 레이저 입도분석장비(Mastersizer 2000)를 활용하여 0.01-10,000 μm (clay-coarse sand)의 범위에서 입경이 분석되었음
- 본 연구에서, 수행된 관측 위치와 퇴적물 입도 분포 곡선은 Fig. 284에 제시됨
- 선행연구 결과와 본 연구의 분석 결과에서, 대부분의 해저 표층퇴적물이 실트질(8-16 μm, fine silt)이 우세한 것으로 나타났으나, 본 연구결과 중 일부 정점(26번)에서는 사질(63-125 μm, very find sand)의 비율이 15% 이상으로 계산되었음
- 선행연구 결과와의 차이가 발생한 원인은 두 가지로 예상할 수 있음
  - 선행연구에서는 수집된 해저 표층퇴적물 시료에 사질의 입경을 갖는 시료가 부재하다고 판단하여, 85 μm (coarse sand)까지만 입도분석이 수행되었음
  - 본 연구에서는 해저 표층퇴적물 입도분석 시, 하나의 시료 당 1회씩의 분석이 수행되었으며, 분석 과정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해서는 추가적인 시료 분석이 필요할 것으로 판단됨

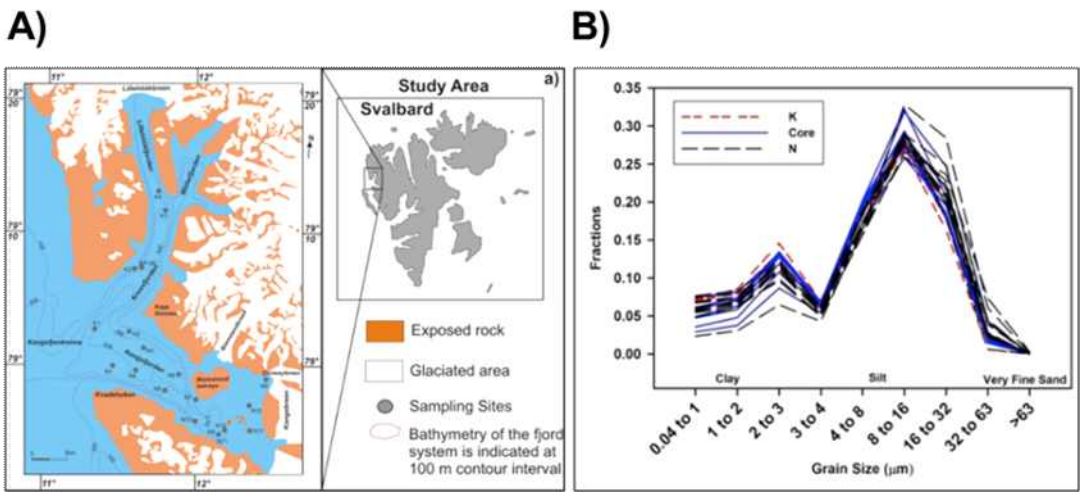


Fig. 283. (A) Observational locations for surface sediments in Krossfjorden and Kongsfjorden, Arctic Svalbard, and (B) grain size distribution curves for each location as presented by Kumar et al. (2018).

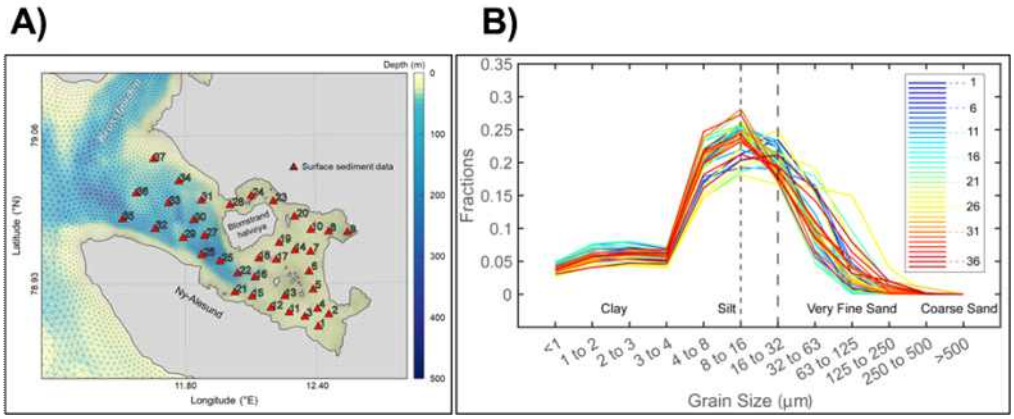


Fig. 284. (A) New observational locations for surface sediments in Kongsfjorden, Arctic Svalbard, and (B) grain size distribution curves for each location.

(나) 퇴적물 조직변수

- 퇴적물의 조직변수는 퇴적물의 운반 메커니즘, 주변 환경의 에너지 상태, 퇴적 속도, 물질이동의 기원 등을 분석하여 퇴적환경을 해석하는 중요한 지표임
- 분석된 퇴적물 입도 분포 곡선을 활용하여 퇴적물 조직변수(평균입경, 분급도, 왜도)가 계산되었으며, 각각의 계산 방법은 다음과 같음

평균입경(Mean):

$$Mean = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3}$$

분급도(Sorting):

$$\sigma(\Phi) = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_{5}}{6.6}$$

왜도(Skewness):

$$Sk = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{50}}{\Phi_{84} - \Phi_{16}} - \frac{\Phi_{50} - \Phi_{5}}{\Phi_{95} - \Phi_{5}}$$

- 계산된 퇴적물 조직변수의 공간적인 분포는 Fig. 285에 제시되었음
- 콩스피오르드 해역은 Blomstrand halvoya 섬을 기준으로 내만측과 외해측으로 구분되어, 분석이 수행되었음
- 조직변수 분석 결과, 해저 표층퇴적물의 평균입경와 분급도는 각각 6.91-16.43ϕ, 2.77-3.94ϕ의 범위로 계산되었으며, 왜도는 최소 -0.2부터 최대 -0.01의 값으로 분석되었음
- Blomstrand halvoya 섬을 기준으로 내만측으로 갈수록 평균입경이 점진적으로 세립화되며, Blomstrand halvoya 섬 주변의 정점의 경우, 평균입경이 다른 내만의 정점들의 입경보다 큰 것으로 나타남(Kim et al., 2005)

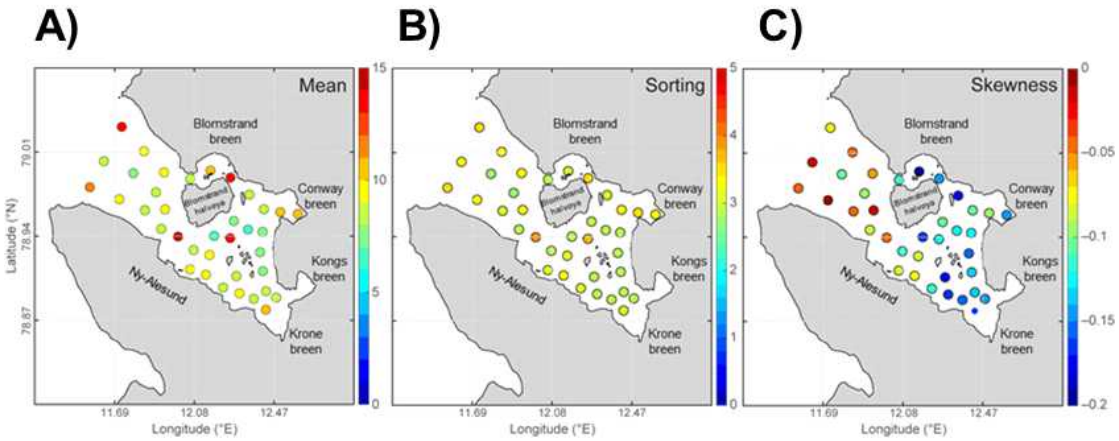


Fig. 285. Results of the sediment textural parameters: (A) mean grain size, (B) sorting, and (C) skewness in Kongsfjorden, Arctic Svalbard.

- 분급도의 경우, Blomstrand halvoya 섬 주변의 정점에서 분급이 불량한 특징이 분석되었으며, 내만측에서 더 분급이 양호한 특징이 확인됨
- 입도 분포의 대칭성을 판단할 수 있는 왜도의 경우, Blomstrand halvoya 섬을 기준으로 내만측에서는 주로 coarse-skewed의 특징이 나타나며, 외만측에서는 near-symmetrical의 특징이 나타남

(다) Sediment Trend Analysis 기법 초기 적용

- 퇴적물의 조직변수들은 McLaren (1981)이 제시한 Sediment Trend Analysis (STA) 분석에 사용되었으며, STA 분석 기법을 활용한 순 퇴적물 이동패턴 분석이 수행되고 있음(Le Roux and Rojas, 2007)
- STA 분석 과정은 다음과 같음
  - 퇴적물 데이터 수집 및 조직변수(평균입경, 분급도, 왜도) 계산
  - 정방격자로의 보간 수행(Kriging 보간법 활용)
  - STA 분석 수행(QGIS 기반 GiSedTrend 프로그램 활용)
- 본 연구에서는 정방격자로의 보간 단계까지만 수행되었으며, 차년도(2단계, 4차년도)에 STA 분석을 활용한 순 퇴적물 이동패턴이 분석될 예정임
- Kringing 보간법은 지리정보시스템(GIS)와 지질학 분야에서, 사용되는 공간적인 보간 방법으로, optimal linear unbiased estimation 방법과 semivariogram 함수를 활용하며, 데이터 포인트들 사이의 공간적인 관계를 분석하여, 미지의 위치 값을 예측하는데 사용됨
- 해저 표층퇴적물의 조직변수는 Kongsfjorden의 지리적 특성이 잘 반영되도록 kringing 보간법을 사용해 500 m × 500 m 크기의 정방격자로 보간되었으며, 그 결과는 Fig. 286에 제시됨

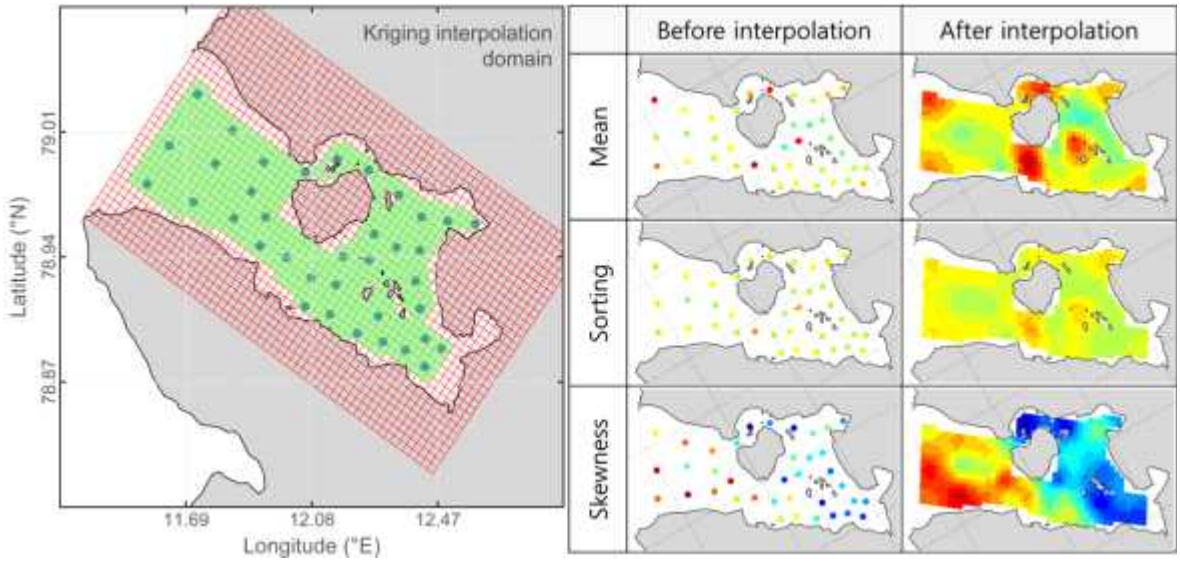


Fig. 286. Interpolation results of the sediment textural parameters over 500 m × 500 m square regular grids using the Kriging interpolation method.

(라) FVCOM을 활용한 입자 추적 및 입자 체류시간 분석

- 입자 추적 모델링은 Kongsfjorden 내 5개의 주요 조수빙하 (Blomstrandbreen, Conwaybreen, Kongsbreen, Kronebreen, Kongsvegen) 중 Kongsvegen과 Kronebreen 조수빙하를 대상으로 수행되었음
- 융빙수 유출량에 따른 입자의 거동을 분석하기 위해, 1시간 간격으로 입자가 방출되도록 설계되었으며, 2007년 05월(low discharge period, LDP)과 2007년 07월(high discharge period, HDP)에 대한 해류 패턴 결과와 입자의 이동궤적 결과가 각각 Fig. 287와 Fig. 288에 제시됨
- LDP 기간에 대한 총 31일 동안의 입자 추적 결과, 입자들은 방출 위치인 Kongsvegen과 Kronebreen 입구부에서 정체되고 있는 패턴이 계산되었으며, 이는 LDP 기간 동안의 낮은 융빙수 유출량으로 인해 외해 기원의 해류의 유입이 강해지고, 조수빙하 입구부에서 물질이 빠져나가지 못하는 것이 원인으로 분석됨
- HDP 기간에 대한 총 31일 동안의 입자 추적 결과, 입자들은 융빙수 유출로 인해 외해 방향으로 빠르게 빠져나가는 패턴이 계산되었으며, Blomstrand halvoya 섬 주변을 따라 빠르게 외해로 빠져나가는 패턴이 분석되었음
- 모델의 해류 패턴 분석 결과를 바탕으로, HDP 기간 동안의 해류 및 융빙수 유출 경로 패턴을 도식화한 결과는 Fig. 289에 제시되었으며, HDP 기간 동안의 융빙수 유출 패턴과 입자들의 이동궤적이 일치하는 것이 확인됨
- LDP 및 HDP 기간 동안의 입자 추적 결과를 정량적으로 분석하기 위해서 LET 계산 기법이 도입되었으며, Fig. 290에 계산 결과가 제시되었음

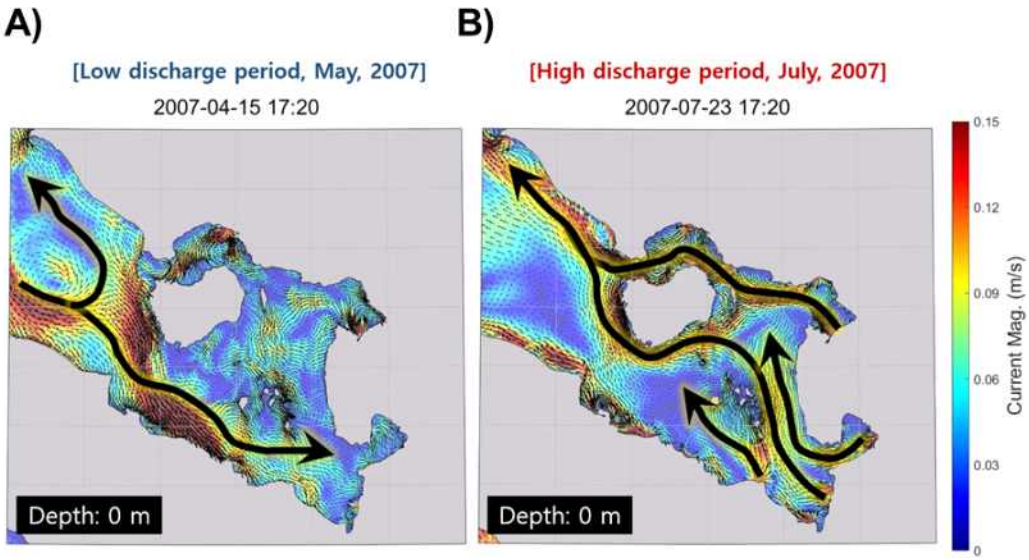


Fig. 287. Simulation results for the surface current patterns in Kongsfjorden, Arctic Svalbard, during two periods in 2007: (A) the low discharge period in May and (B) the high discharge period in July. The black arrows indicate the general direction of current flow. The color bar on the right panel represents the current magnitude. Both figures are model results calculated at a depth of 0 m.

KOPRI 극지연구소

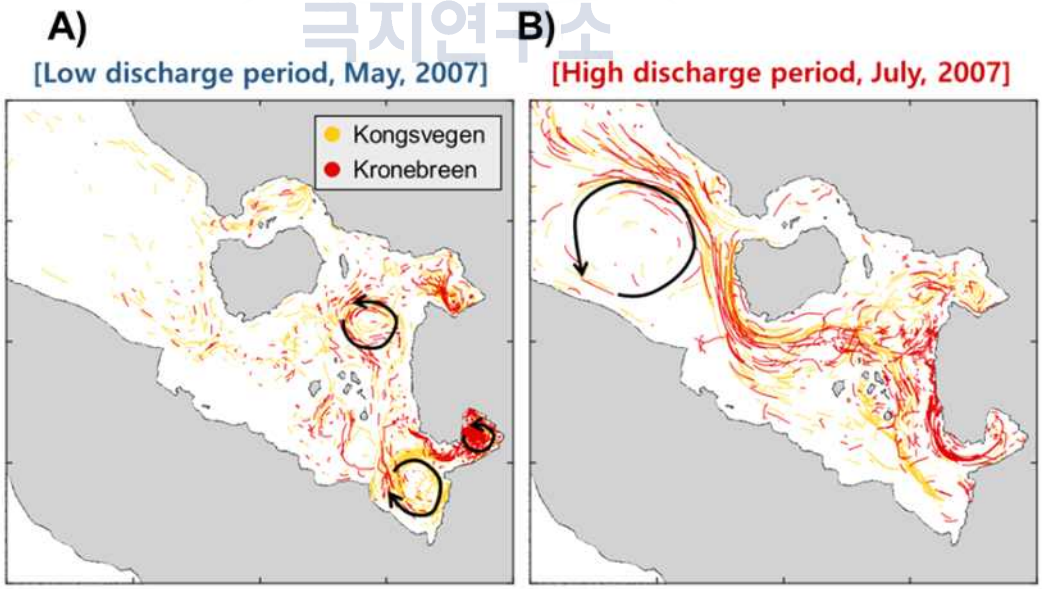


Fig. 288. Particle tracking results in FVCOM during two periods in 2007: (A) the low discharge period in May and (B) the high discharge period in July. The black arrows indicate the general rotational pattern of particles. The yellow and red dots represent the particle tracking results discharged from Kongsvegen and Kronebreen, respectively.

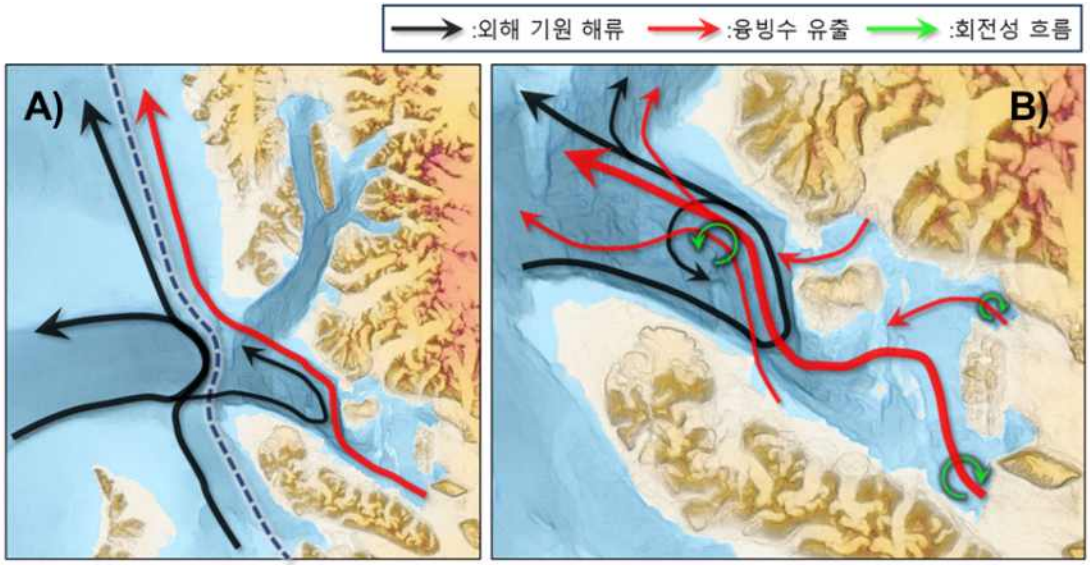


Fig. 289. Schematic diagram of the flow patterns in Kongsfjorden, Arctic Svalbard: (A) the diagram illustrates the offshore–origin currents (indicated by black arrows); (B) tidewater glacier–origin meltwater is depicted by red arrows, while green arrows highlight areas of rotational flow generation. The arrow colors above the images provide further clarity on the flow direction and origin.

KOPRI
극지연구소

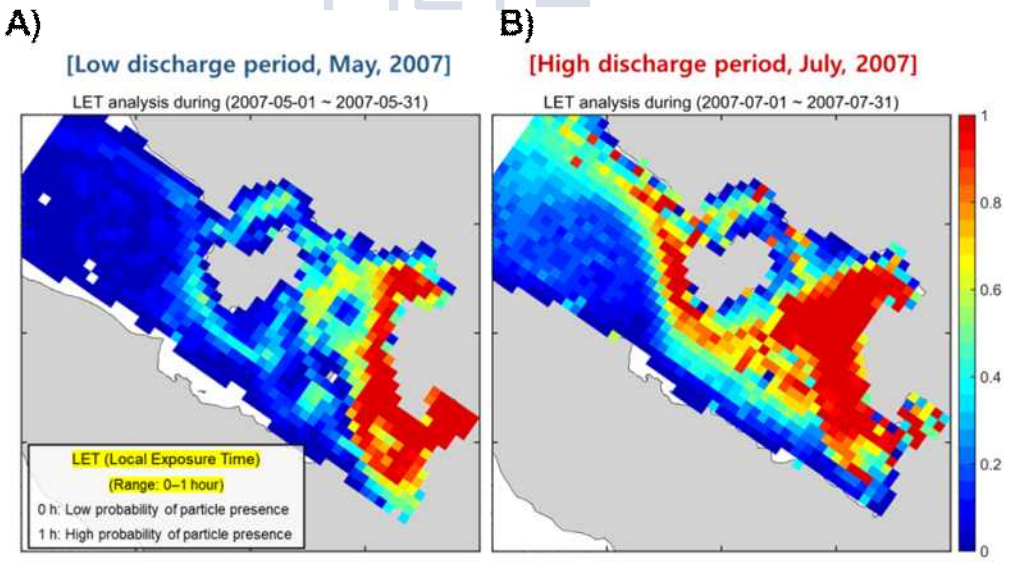


Fig. 290. Comparison of local exposure time (LET) analyses for the Kongsfjorden coastal region during two distinct periods: (A) low discharge in May 2007 and (B) high discharge in July 2007. The color represents the probability of particle presence, ranging from low (blue) to high (red) exposure times over an hour.

- LET 분석 결과, LDP 기간 동안에는 대부분의 입자가 Blomstrand halvoya 섬을 기준으로 내만 해역에서 0.6 이상의 LET 값이 계산되었으며, 조수빙하 기원 물질이 외해로 빠져나가지 못하고 정체되는 특징이 확인되었음
- HDP 기간 동안에는 융빙수 유출 패턴을 따라 입자가 콩스피오르드의 외해측으로 빠져나가는 패턴이 확인되었으며, 내만 해역에서도 조수빙하 입구부에 입자가 정체되는 것이 아닌, Blomstrand halvoya 섬 측으로 입자의 거동이 변화되었음
- 추후, 관측된 해저 표층퇴적물의 조직변수 결과들을 활용한 STA 분석 결과와 함께 LET 분석 결과를 해석할 예정이며, 이를 통해 조수빙하 기원의 물질이동패턴을 명확히 규명할 수 있을 것으로 기대함

5-4) 4차년도

가) 해류특성변화로 인한 조수빙하 유출 물질의 이송 및 확산 기작 파악

(1) 연구 목적

- 스발바르 콩스피오르드 대상 연안 해양 순환 모델의 정확도를 향상시키기 위해 융빙수 입력 자료 개선이 진행됨. 또한, 해당 해역에 대한 수온, 염분 그리고 해류에 대한 관측자료가 추가로 수집됨. 이는 모델 정확도의 정량적, 정성적 평가에 활용됨
- 2023년 콩스피오르드 내부에서 수집된 표층 퇴적물의 조직변수를 활용한 Sediment Trend Analysis (STA) 분석이 수행됨. 이를 통해, 피오르드 내부에서 실제 표층 퇴적물의 이동 경향을 파악하고자 함
- 콩스피오르드 대상 고해상도 해양 순환 모델 결과를 활용한 입자 추적 모델이 수행됨. 입자 추적 모델의 결과의 입자의 체류 시간 및 이동 경로를 분석하기 위해 Local Exposure Time이 수행됨
- 모델의 해류 패턴 결과와 STA 분석 결과, 그리고 LET 분석결과를 통해 스발바르 콩스피오르드 지역에서 주요 물질 순환 기작을 제시하고자 함

(2) 연구 방법

(가) 현장자료 추가 수집: 시-공간 자료 수집

- 과업의 1단계 1차년도에 수집된 관측자료 이외에 콩스피오르드 내부의 수온, 염분에 대한 계류 관측 자료(Cottier et al., 2022a, b)가 추가로 수집됨
- 스발바르 해역의 표층 수온과 표층 염분에 대한 위성 관측 재분석장 데이터가 Copernicuse에서 추가로 수집됨
- 2023년 하계 스발바르 스피츠베르겐 서쪽 연안 대상으로 진행된 해류 관측 자료를 극지연구소 측으로부터 제공받음

(나) 융빙수 입력자료 개선을 통한 모델 정확도 향상

- 염분 정확도 향상을 위해, 기존에 K160 Krossfjorden과 Kongsfjorden의 연안의 58개 지점에서 적용되던 융빙수 유출을, 모델 전체 영역의 연안에서 948개 지점에 적용함
- Godiksen et al. (2011)에서 제시된 콩스피오르드 인근 하천의 수온을 활용하여 표층 유출되는 융빙수의 수온 입력 조건에 계절변동을 적용함

(다) Sediment Trend Analysis

- STA 분석을 진행하기 위해 2023년 수집 및 분석된 표층 퇴적물의 입도 매개 상수인 평균 입경, 분급도, 왜도가 계산되었음. 이때, pi scale을 사용하는 Logarithmic method of moments 수식이 사용됨(Fig. 291)
- 250×250m 정방격자 형태의 퇴적물의 입도 매개 상수의 공간 분포 데이터를 형성하기 위해 Kriging interpolation이 활용됨.
- STA 분석 시, GiSedTrend 프로그램이 사용됨 (Poizot and Mear, 2010). 또한, FB−(이동 방향을 따라 입경이 세립(Finer, F)해지고, 분급이 양호(Better, B)해지고, 왜도가 불량해지는 경향)와 CB+ 경향이 사용됨. 두 경향은 STA 분석에서 보편적으로 많이 사용되는 매개 상수가 변하는 경향임(Yoon and Lee, 2008)

(라) 각 수심별 입자의 Local Exposure Time 분석

- 수심별로 위치한 입자의 이동 경로 및 체류시간을 파악하기 위해 수심 0 m와 50 m에서 입자를 투하하여 2007년 7월간 입자추적 모델이 모의 됨
- 2차년도 1단계에서 적용된 LET 분석을 수행함. 이때, STA결과와의 비교를 위해 250×250m 크기의 정방격자가 활용됨

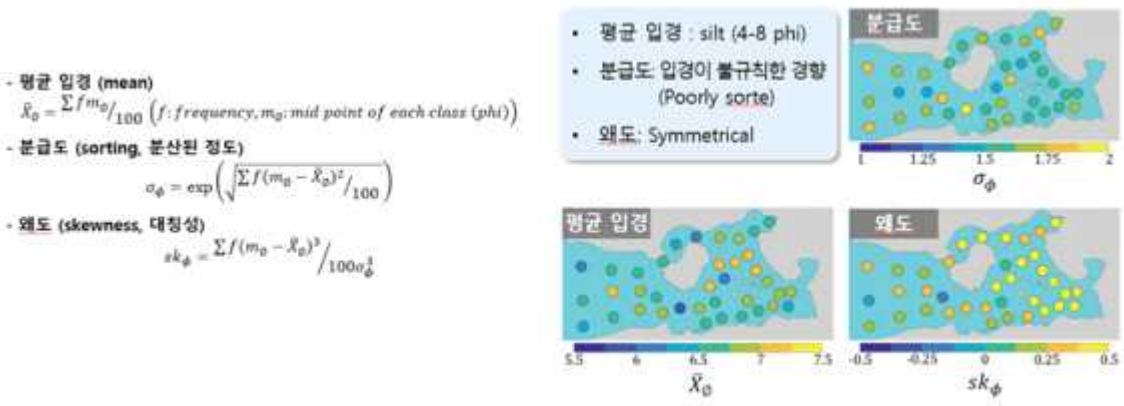


Fig. 291. Equation to calculate and results of the mean sediment diameter, sorting, and skewness in kongsfjorden, Arctic Svalbard.

(2) 연구 결과 및 토의

(가) 융빙수 입력자료 개선을 통한 모델 정확도 향상

- 융빙수 유출 지점을 58개에서 945개로 증가시켰을 때, 모델 염분의 Skill 값이 0.54에서 0.66으로 개선됨. 또한, 표층 유출되는 융빙수의 수온에 계절변동을 적용하였을 때, 모델 수온의 Skill 값이 0.80에서 0.85로 개선됨(Fig. 292)
- 2023년 관측된 해류 관측자료와 모델의 해류 결과 사이의 정성적인 분포를 비교하였을 때, 피오르드 내부에서 약 2.5 km 반경의 반시계 방향으로 회전하는 해류의 분포가 나타남(Fig. 293)
- 개선된 콩스피오르드 대상 연안 수치 모델은 해류특성 분석 및 입자 추적 모델의 외력으로 활용됨

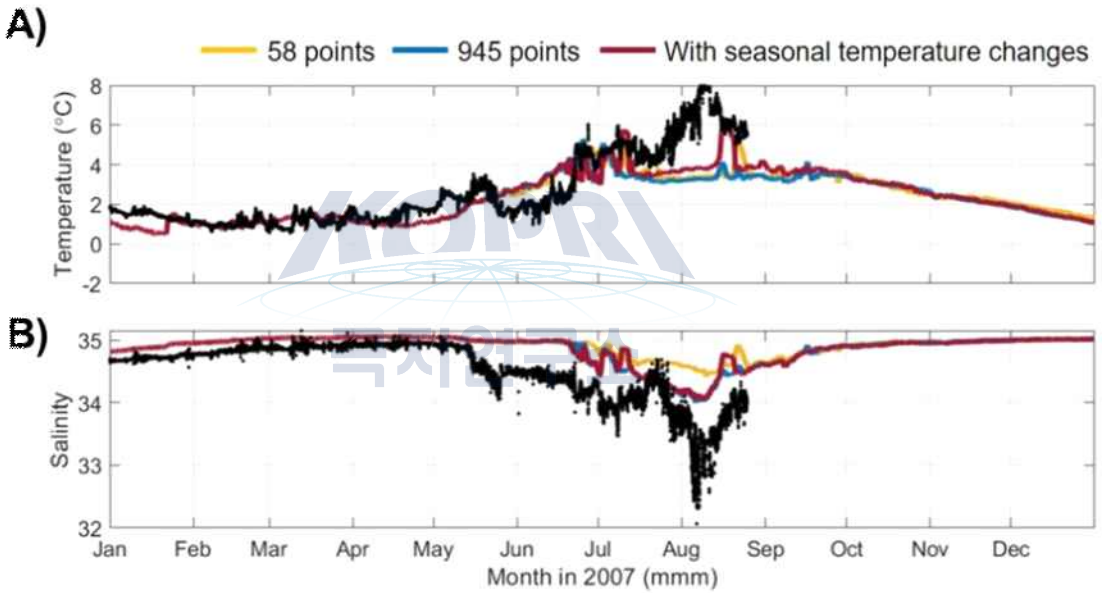


Fig. 292. Temporal variations in (A) temperature and (B) salinity at station M1 at a depth of 16 m. Observed data (black dots), FVCOM results with 58 runoff points (yellow lines), and results with 948 runoff points (blue lines), and results with seasonal temperature changes in surface runoff meltwater (red lines).

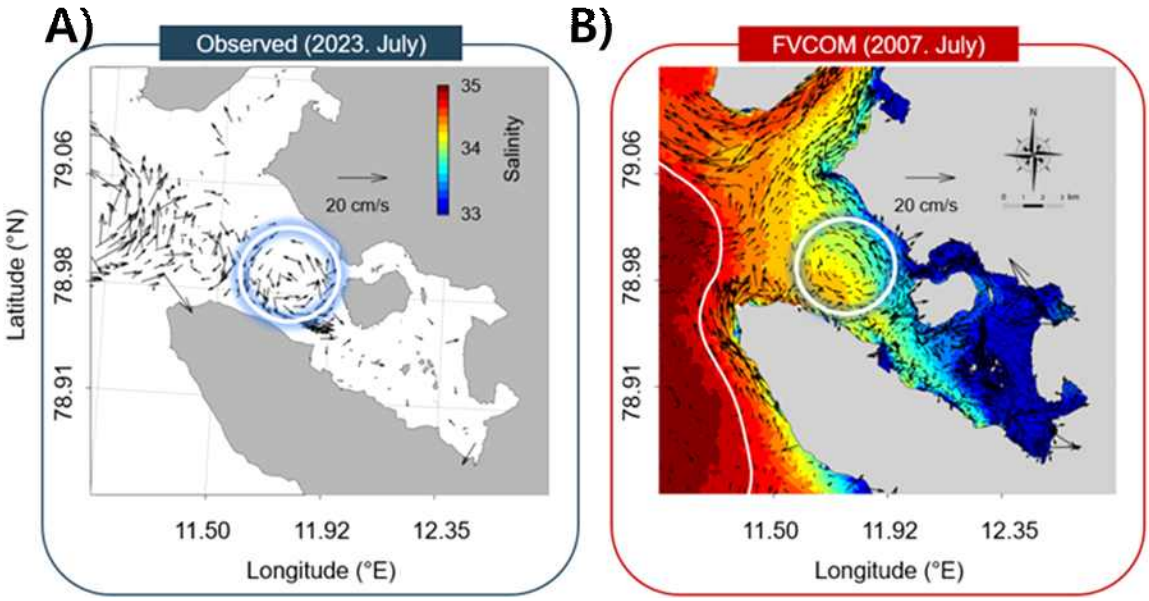


Fig. 293. Depth-averaged current vector distribution (black arrows) of (A) observed data and (B) model results, along with the surface salinity distribution of the model results.

(나) FVCOM을 활용한 각 수심별 입자의 이동경로 분석

- 수심 0 m에서 입자는 Blomstrand halvoya 섬의 남측을 따라 입자가 빠르게 바깥으로 향하는 이동경로를 보임(Fig. 294). 반면, 수심 50 m에서 투하된 입자는 피오르드 중앙에서 회전하는 이동 경로를 주로 보임

(다) Sediment Trend Analysis 결과 및 물질 이동 기작 제시

- 콩스피오르드 표층 퇴적물의 이동 경향은 피오르드 중앙에서 반시계 방향으로 회전하는 이동 경향을 보이며(Fig. 295), 이러한 이동 경향은 모델의 해류 분포, 입자의 이동경로, 그리고 2023년에 관측된 해류 분포에서 유사하게 나타남
- 퇴적물은 피오르드 내부 동쪽 해안선을 따라 북상하는 이동 경향이 나타남. 이러한 이동 경향은 융빙수 유출로 발생하는 표층 해류 분포와 유사함
- 위 결과는 피오르드 내 수심경사를 따라 피오르드 입구부에서 반시계 방향으로 해류 전파(중층~저층)로 인한 외해 기원 물질 유입 및 고립이 발생함을 제시함. 또한, 외해 기원 해수와 조수빙하 유출수 사이의 밀도 경사(전선) 발생으로 인한 조수빙하 융빙수 기원 물질의 피오르드 북부 방향의 확산(표층) 및 유출이 발생하고 조수빙하 전면부에서의 수평적인 유속 경사와 국지적인 회전성 흐름 형성(중층~저층)으로 인한 피오르드 내부 입자 정체가 나타날 수 있음을 보여줌
- 본 연구 내용을 바탕으로 콩스피오르드 조수 빙하에 의한 융빙수 유출과 해류 패턴 및 물질 이동 기작 연구에 대한 논문을 국제학술지(SCI)에 투고(준비중)

KOPRI 극지연구소

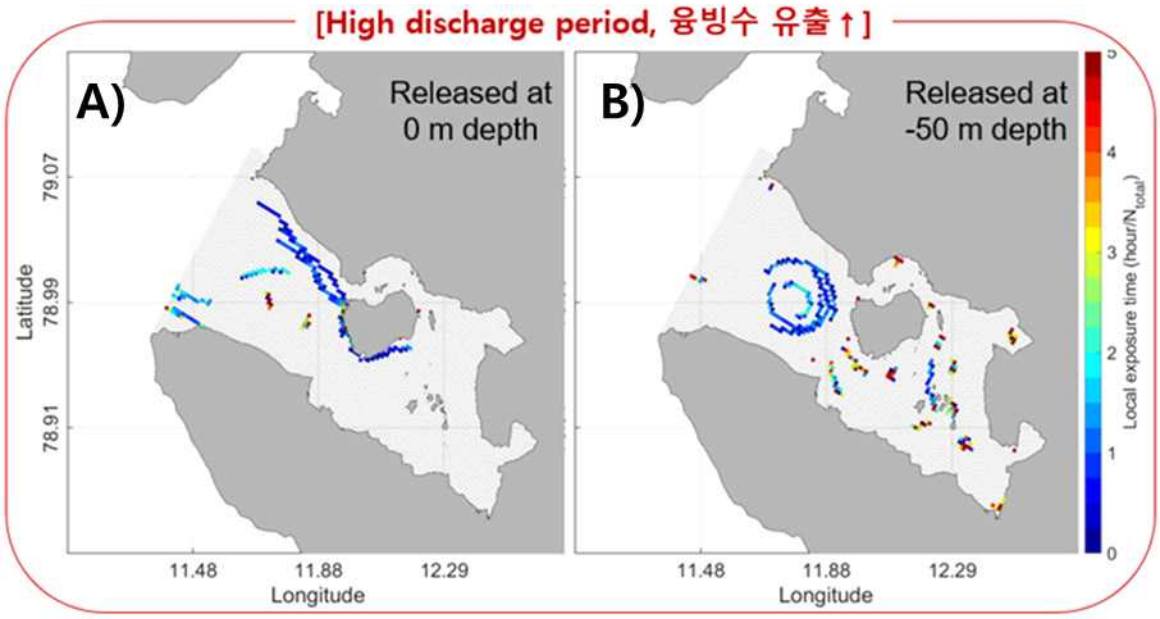


Fig. 294. Results of the LET analysis for particles released at (A) 0 m and (B) 50 m (right) during the high discharge period.

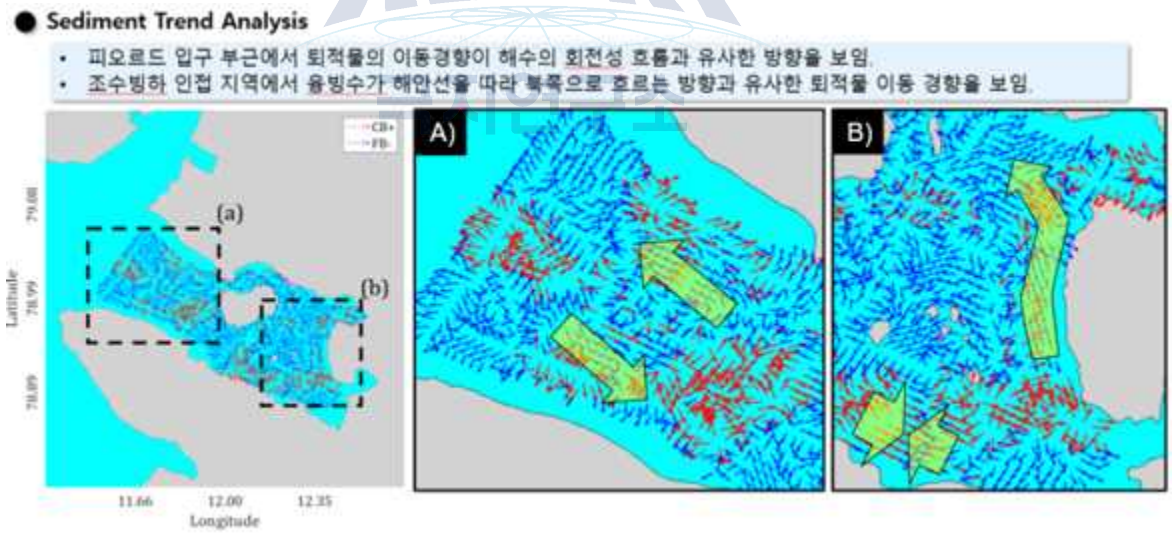


Fig. 295. Results of the sediment trend analysis in (A) the outer and (B) the inner parts of Kongsjforden, Arctic Svalbard.

6) 딕슨피오르드 지형 변동성, 퇴적환경 진화 및 기후변화 영향 규명

가) 딕슨피오르드 점이지대의 지형 변동성 양상 연구

(1) 연구 목적

- 최근 진행되고 있는 지구 온난화는 강설과 조수빙하의 용융 정도를 증가시켜 강과 인접한 연안역으로의 상당한 양의 유출수와 퇴적물 공급을 일으켰음
- 결과적으로 일부 극지 연안역에서 해안선의 전진과 퇴적이 발생되고 있는 실정임
- 딕슨 피오르드 점이지대 환경은 내만의 위치임에도 불구하고 소빙기(Little Ice Age) 이후인 1930년부터 최근 2020년까지 약 90년 동안 매우 활발한 전진 퇴적의 결과로 형성된 지역임
- 딕슨 피오르드 점이지대에서의 다년간에 걸친 지형 변동성 모니터링 및 시공간적인 침 · 퇴적 양상 분석 연구는 조수 빙하가 소멸되어 가는 북극권 연안 퇴적 환경에서 지형 변화를 유발하는 프로세스 및 환경 제어 요인을 규명할 수 있음

(2) 연구 방법

(가) RTK-GPS 지형 측량

- 지형 측량 및 기준점 측량은 Real Time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS, 상대측위법) mode를 사용했음.
- 상대측위법은 미지점(이동국)의 위치를 기지점(기지점)에 관련하여 결정하는 방법으로 두 측점간의 위치벡터변위를 결정하는데, 기지국은 위치가 고정되어 있으며 의사거리 관측 값과 반송파 위상을 결정, 기지국은 이 관측 값을 컨트롤러를 통해 이동국으로 전송함(Fig. 296)
- RTK-GPS 고정국의 정밀 좌표 획득을 위해 1시간 동안 획득된 좌표 값의 평균을 사용하려고 하였으나. 극지방의 특성상 수렴되는 좌표 값이 생성되지 않아 상대적인 좌표 값으로 등록하여 활용함
- 국내와는 달리 통합기준점과 같은 측량 기준점이나 위치 보정 정보를 활용이 불가하여 부득이하게 상대적인 고도 값을 사용하였으며, 측량된 지형의 절대 고도는 최인접 지점의 수준점 측량을 통해 보정된 값을 사용함
- RTK-GPS는 수평오차 10 mm, 수직오차 20 mm 수준의 정확도를 보유하고 있으며, 설정된 측선 혹은 측점의 좌 · 우 5 cm 오차 범위 이내의 지점에서 측량을 실시함
- WGS 84 타원체와 TM zone 33N 좌표계 기준으로 획득된 RTK-GPS 자료를 위 · 경도 좌표로 변환함

Fig. 296. (A) Field photos showing the base station of the RTK-GPS installed at a point with known coordinates and elevation, and (B) the bench mark point of Dicksonfjorden.

(나) 무인 항공기 활용 지형 조사

- 무인항공기 촬영 범위와 정확도를 고려하여 운영 고도와 비행경로를 계획함.
- 무인항공기는 DJI 사의 Phantom 4, Mavic 2 pro 를 사용하였으며 3축 짐벌에 장착된 카메라를 사용함
- 북극 지역의 낮은 온도로 인해 발생하는 저효율 문제 예방을 위하여 무인항공기 운영 전에 배터리 예열을 통하여 운용 온도를 확보함
- 항공 이미지 보정과 위치 정보 확보를 위하여 지상기준점(Ground control point, GCP)를 예상 촬영 구역보다 10 % 외곽 지역까지 등 간격으로 설치하고 RTK-GPS 측량을 통하여 위치 정보를 획득함
- 항공 이미지는 무인항공기의 종 방향으로 60 %, 횡 방향으로 70 % 이상 중첩하여 무인항공기가 정지된 상태에서 지면과 수직 방향의 카메라 각도로 촬영함
- 촬영된 항공 이미지는 초점과 중첩도를 고려하여 1차 선별 후, 고도, 위치, roll (파이), yaw (카파), pitch (오메가) 정보를 이용하여 자료에 불필요한 사진을 비활성화함. 선별된 사진은 Pix 4D mapper 소프트웨어를 이용하여 tie point를 추출하고 영상 정합을 수행
- 구축된 영상 정합 결과에 RTK-GPS 로 측량한 지상기준점(GCP) 자료를 입력하고 정합 영상의 지상기준점 위치와 결합을 통하여 보정을 수행함
- 항공측량 기법을 활용하여 수치표고모델(DEM)과 정사영상(Ortho-photograph)를 구축함

(다) 지형 변동성 시계열 분석

- 무인항공기 기반 이미지로 구축한 수치표고모델(DEM)과 정사영상의 TIFF 파일을 ArcGIS (버전 10.1) 소프트웨어를 활용하여 분석함
- TIFF 파일 각각의 픽셀에 입력된 고도 값을 일정한 기준으로 구분하고, 음영을 통해

시각화하고, 작성된 DEM 파일에 Topology tool을 수행하고 단면 추출 기능을 이용하여 지형 단면을 추출

- 고도 자료를 이용하여 등고선, 지형 경계선 추출 및 polyline 생성
- 각 연도별로 구축한 DEM을 동일한 범위의 분석 구역을 기준으로 추출하고, 두 시기 DEM의 고도 차이를 계산하고 DEM 자체의 오차 범위를 적용하여 순 변화량을 분석함(Fig. 297)

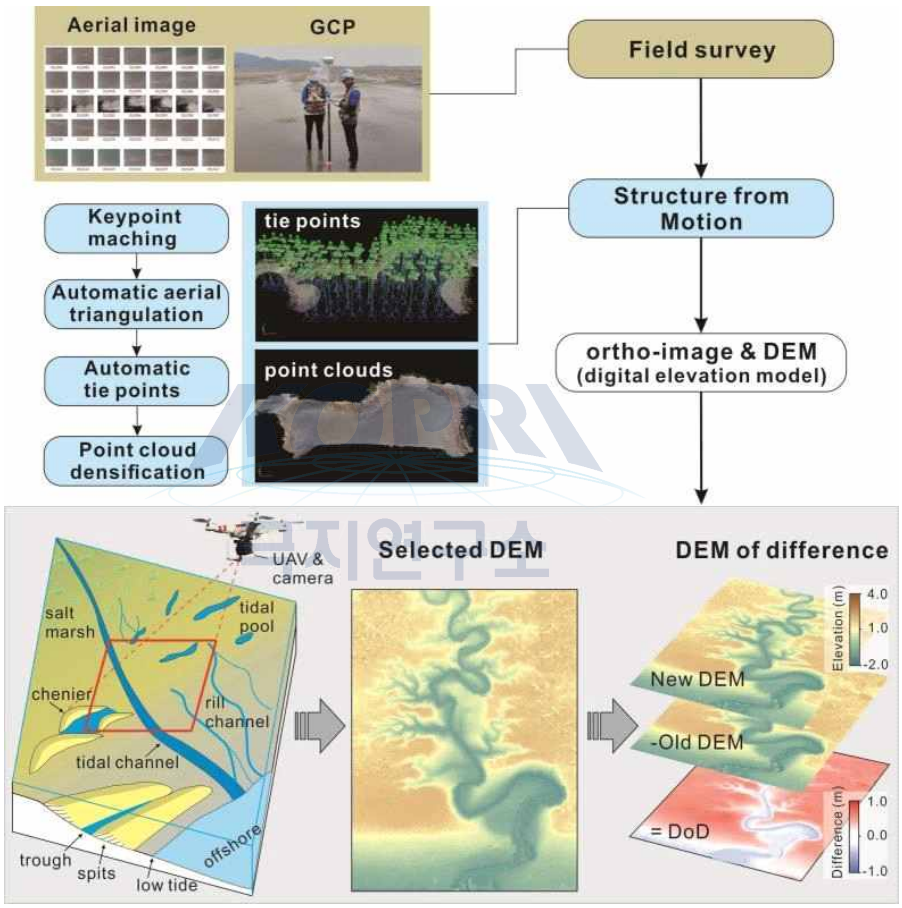


Fig. 297. Workflow to create a digital elevation model (DEM) and analyze the difference of DEMs (DoD) based on UAV-assisted photogrammetry.

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 무인항공기 기반 지형 변동성 분석 결과

- 딕슨 피오르드 내부 점이지대의 지형 변동성 분석을 위하여 기 구축된 로지스틱스 공조 체계를 활용하여 2022년 7월에 현장 조사를 수행하였으며 무인항공기를 기반으로 고해상도 공간자료를 구축함(Table 54)

Table 54. Summary of the key parameters and results of the UAV surveys.

Field survey	Spit 0	Spit 1-3	Spit 4-5
Number of image	265	542	1337
Average flight altitude (m)	60	70	70
Ground sample distance (cm)	1.77	1.90	1.95
Average point density (p/m^3)	735.0	720.2	588.7
Analysis area (km^2)	0.051	0.167	0.314
Coordinated system	WGS 84 / UTM zone 33N (EGM 96 Geoid)		

- Real Time Kinematic-Global Positioning System(RTK-GPS)를 사용하여 기준점 및 지상 기준점 측량을 실시하였으며, 수준점 정보를 활용하여 측량된 지형의 절대 고도 값을 보정함
- 피오르드 상류에 발달한 상부 조간대 니질 퇴적층 상부의 평균해수면과 해발고도 1미터 사이에 국지적으로 사취 0가 형성되어 있으며, 육지쪽 방향으로 휘어진 형태의 기복구조(ridge and swale)가 반복적인 양상으로 발달하고 있음(Fig. 298)
- 2016-2022년까지 5차례 조사를 수행하였으며(2020-2021년 제외), X, Y, Z 값을 비교하여 연도별 지형 변동성을 정량 분석 결과 사취 0의 형태 변화는 미미한 수준이며, 남동쪽 말단부 지역의 상대적으로 고도가 낮은 지역에서 세립한 퇴적물이 피복함에 따라 자갈로 구성된 사취 0의 경계부가 불분명해지는 경향성만 관찰됨

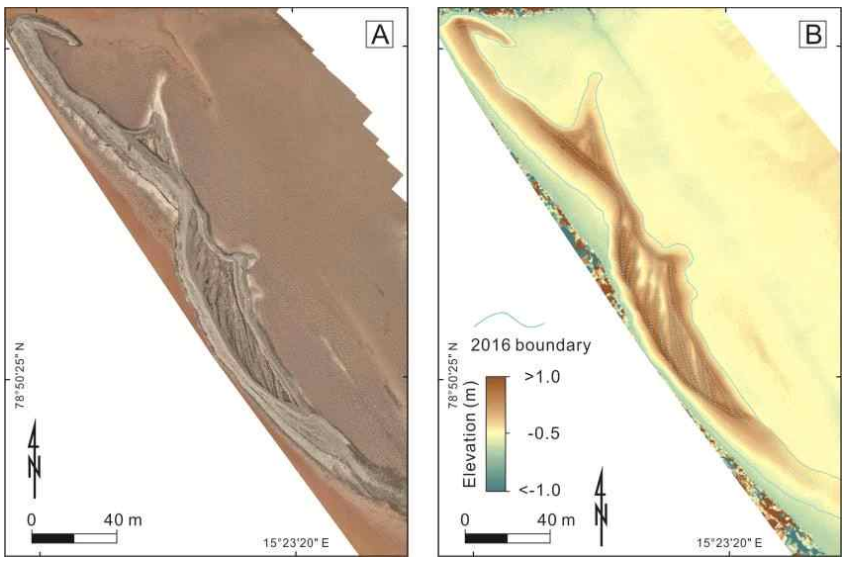


Fig. 298. (A-B) Ortho-photomosaic and DEM of Spit 0 located in upfjord. The boundary of the Spit 0 in 2016 was overlapped with the DEM in 2022.

- 사취 0에서 남쪽으로 약 3 km 지점에 사취 1이 발달하고 있음. 사취 1은 사취 0보다 고도가 낮은 피오르드 입구방향의 외곽지역에 발달하고 있음. 약 1 km 길이의 해안선을 따라 5개의 사취가 독립적으로 발달하고 있으며, 사취가 형성되어 있는 조간대의 고도는 북쪽(내륙 방면)이 가장 높고 남쪽(바다 방면)이 가장 낮음(Fig. 299)
- 해안선과 인접한 사취 1의 높이 0.3 m 로 정부의 고도는 0.4 m 인 반면 해안선과 가장 먼 지역의 사취 3의 높이는 1.2 m 로 정부의 고도는 0.5 m 임. 해안선에서 멀어 질수록 사취의 규모가 증가하는 경향을 보임
- 사취 1, 2는 2016년 이후 연구 기간 동안 낮은 변동성을 보이며 고정된 형태로 존재하는 반면 사취 3은 피오르드 상류 방향으로 길이가 신장되고 있음. 성장률은 2016–2017년 사이에 가장 높게 나타났으며, 지속적으로 성장률은 감소하여 2019–2022년 사이에 약 10 m 길이가 신장됨
- 가장 남쪽에 위치한 사취 4, 5가 형성된 조간대의 고도는 -1 m이며, 사취 5의 남쪽 부분은 해빈 및 해안절벽과 연결되어 있음. 사취의 동쪽(육지방향) 조간대는 0.2 m 고도로 높은 반면 서쪽(조하대 방향) 조간대는 -1 m 고도로 사취를 기준으로 급격한 고도 차이를 보임(Fig. 300)
- 사취 5는 가장 활발하게 이동 및 성장하고 있으며, 2016–2019년에 피오르드 내부방향으로 연간 30–50 m 규모로 신장되었고, 사면 방향으로 2–5 m 이동한 반면 2019–2022년에는 내부방향으로 40 m 신장되고 사면으로 2 m 내외 이동하여 변동성이 감소함

KOPRI 극지연구소

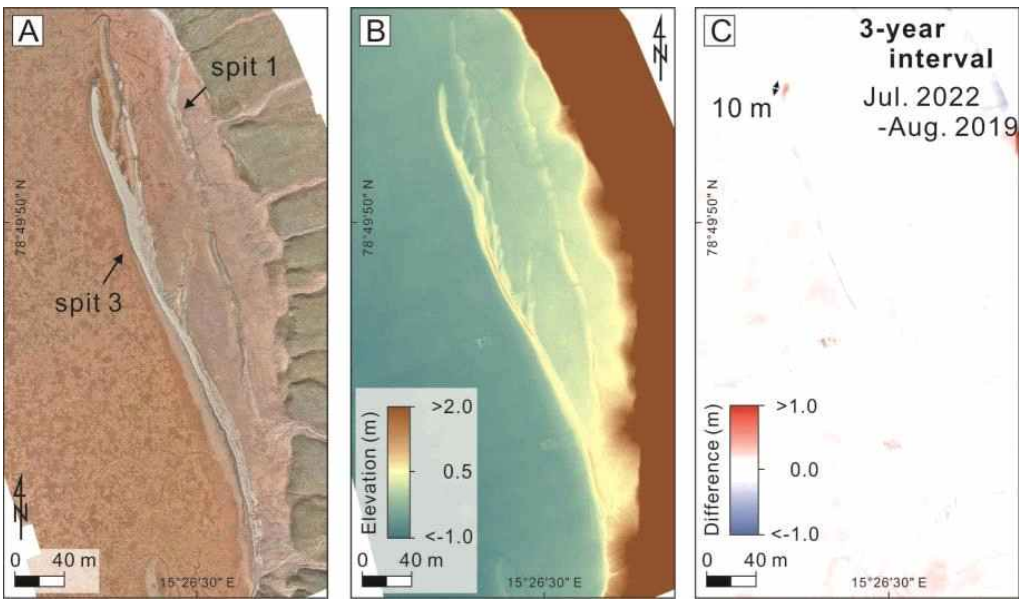


Fig. 299. (A–B) Ortho–photomosaic and DEM of Spit 1 to 3 located in downfjord. (C) DoD of spit complexes for the intervals between 2019 and 2022. Note the marked migration of Spit 3 during the study period.

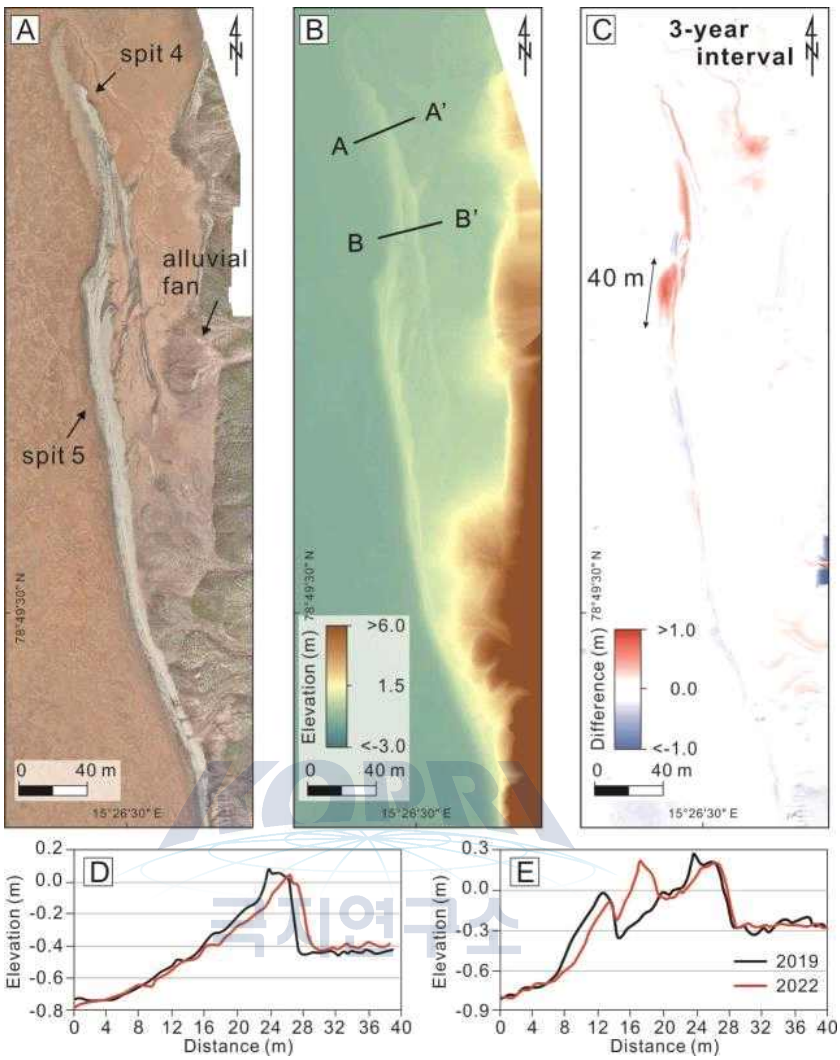


Fig. 300. (A–C) Ortho–photomosaic, DEM and DoD analysis of Spit 4 to 5 located in downfjord. Repeated transect profiles (D) AA' and (E) BB' perpendicular to the spits, exhibiting remarkable landward migration of spits 4 and 5.

- 사취가 발달하고 있는 조간대의 남쪽지역은 자갈해빈과 해안절벽으로 구성되어 있으며 간조 시 소규모의 조간대가 노출됨. 해안절벽은 폭 200m, 높이 20m 내외의 크기이며, 해안절벽 하단에 폭 5m 내외의 자갈해빈이 형성되어 있으며 자갈해빈의 서쪽에 조간대가 형성되어 있음. 자갈해빈을 구성하는 퇴적물은 선상지를 통해서 유입되거나 해안절벽 침식과 붕괴를 통해 유입되는 것으로 추정됨(Fig. 301)
- 사면붕괴가 지속적으로 발생하고 있으며, 특히 절벽의 상단 부분에서 붕괴가 활발하게 진행되고 있음. 사면 붕괴로 퇴적물들이 절벽 하단부로 이동하여 국지적으로 퇴적된 지역이 관찰되며 이 퇴적물들의 대부분은 조석과 파랑에 의해 재이동되는 것으로 추정됨. 사면붕괴는 파랑에 의한 침식작용, 융빙수에 의한 사면상 곡침식, 동토층의 물리적 풍화 등 다양한 요인이 복합적으로 작용한 결과로 판단됨

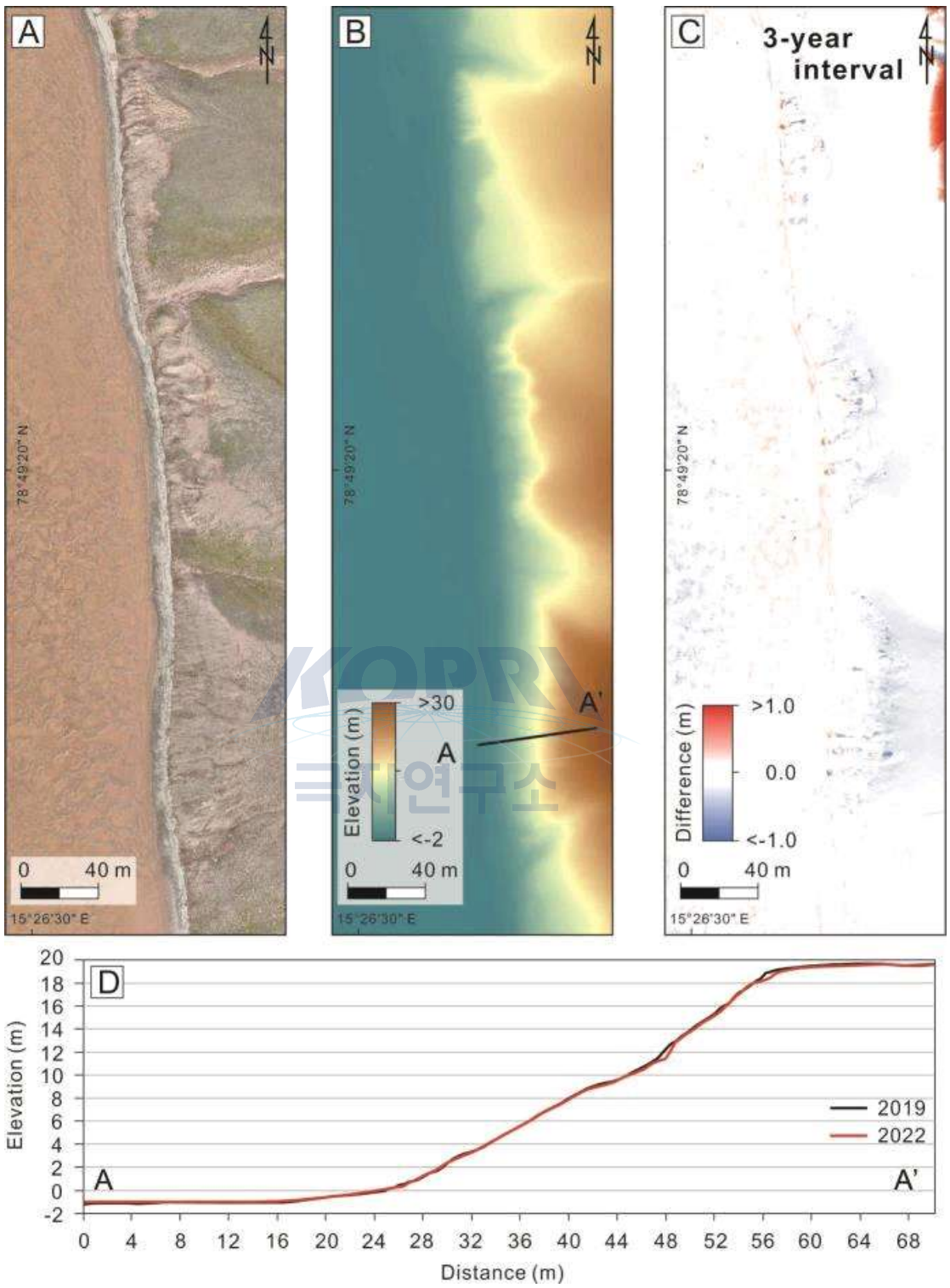


Fig. 301. (A–C) Ortho–photomosaics, DEM and DoD analysis of the coastal cliff. (D) Repeated transect profiles AA' and DoD analysis between 2019 and 2022 indicates that the coastal cliff experienced gully erosion.

나) 딕슨피오르드 점이지대의 퇴적 환경 연구

(1) 연구 목적

- 지구 온난화에 따른 조수 빙하의 용융 증가는 연안역으로 막대한 양의 유출수와 퇴적물 공급을 일으켜 해안선의 전진과 퇴적을 유발하고 있음(Zajączkowski et al., 2004; Szczuciński et al., 2009)
- 딕슨 피오르드 점이지대는 조수 빙하의 용융과 함께 지반의 융기로 인해 상대적인 해수면이 하강하고 있는 지역으로, 활발한 퇴적작용으로 인해 해안선이 바다방향으로 이동하는 지역임(Kim et al., 2022)
- 딕슨 피오르드 점이지대를 따라 퇴적물의 공간적인 물성 분포 양상과 수직적인 퇴적작용에 관한 연구는 기후 변화에 따른 북극권 피오르드의 물질 순환 양상을 심층적으로 이해하는데 기여할 것으로 판단됨

(2) 연구 방법

(가) 불교란 주상 시료 획득 및 입도 분석

- 딕슨 피오르드 점이지대의 수직적인 퇴적상 분석을 위하여 Eijkelkamp사의 핸드 오우거 코어러를 사용했음
- 핸드 오우거 코어러의 직경은 3 cm로서 길이 50 cm의 rode를 연결하여 조간대 표면으로부터 93 cm 깊이의 불교란 주상 시료를 획득했음(Fig. 302)
- 표면에서 50 cm 깊이까지는 2 cm 간격으로, 50 – 93 cm 깊이는 3 cm 간격으로 총 70점의 퇴적물 시료를 채취하였으며, 입도분석 연구를 수행했음
- 채취된 퇴적물들은 과산화수소를 사용하여 유기물을 제거하고 핫플레이트를 사용하여 열을 가해 잔존하는 과산화수소와 유기물을 제거하는 전처리 과정을 진행했음
- 입도 조성에 따라 sieve/pipette method 혹은 레이저 회절 방법을 활용한 입도분석 장비(Malvern 사의 Mastersizer 3000)를 활용하여 평균 입도, 분급, 입도별 조성비 등을 분석했음
- 자갈과 패각이 협재된 30–32 cm 구간은 sieve/pipette method를, gravel이 없는 나머지 구간에서는 레이저 회절 입도분석 장비를 활용하여 수직적인 퇴적상을 분석했음

(나) 방사능 동위원소 ^{210}Pb를 활용한 퇴적률 계산#

#한국기초과학지원연구원(KBSI)에 70점 시료에 대한 210–Pb 방사능 연대측정 분석 의뢰하였으나, 현재까지 분석이 완료되지 않은 상황임

- 210–Pb는 반감기가 22.26년으로 반감기가 비교적 짧기 때문에 호소, 염하구 및 조간대 등의 퇴적물의 퇴적률을 계산하는데 있어서 매우 널리 이용되고 있는 방사성 동위원소 중 하나임(Appleby and Oldfield, 1978)

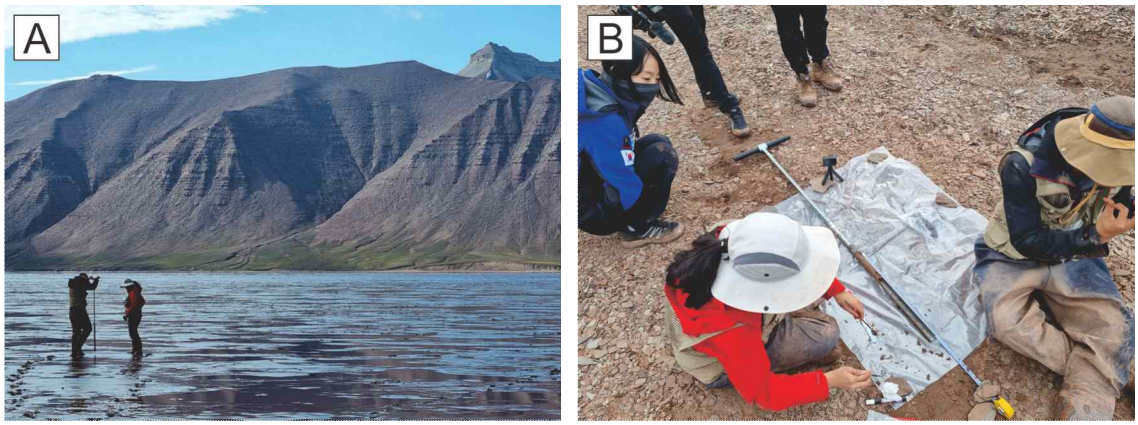


Fig. 302. (A) Field photo showing the acquisition of an undisturbed core sample by using hand augers to analyze vertical sedimentary facies (grain size, sedimentary structures) and (B) calculate sedimentation rate. A total of 70 sediments were sampled from 93 cm long undisturbed core with 2–3 cm intervals.

- ^{210}Pb는 해수 내에서의 체류 시간이 매우 짧으며, 유기물에 의한 섭식 혹은 입자에의 흡착 과정을 거쳐 퇴적물에 침전되는 unsupported 210-Pb는 퇴적물 침전 후 226-Ra 붕괴에 의해 만들어지는 supported 210-Pb 함량보다 높으므로 두 210-Pb 사이의 차이로부터 계산되는 excess 210-Pb로부터 퇴적률을 계산함 (Nittrouer et al., 1979)
- 딕슨 피오르드 점이지대가 조수 빙하 용융 정도에 비례하여 융빙수와 퇴적물의 연안역 공급으로 인해 현재 매우 활발한 전진 퇴적작용을 겪고 있음을 고려할 때, 본 연구에서 취득된 불교란 주상 시료를 대상으로 210-Pb의 수직분포 양상을 분석함으로써 퇴적속도, 퇴적률 추정 연구를 진행한다면 과거 100-150년 정도의 시간 규모에서 딕슨 피오르드 점이지대의 퇴적과정과 퇴적환경 진화에 관해 이해하는 것이 가능할 것으로 사료됨(e.g. Nittrouer et al., 1979; Wei et al., 2007)
- 93 cm 깊이의 오우거 코어 자료로부터 얻어진 총 70점의 퇴적물 시료를 대상으로 65℃ 드라이 오븐에서 3-4시간 충분히 건조시킨 뒤, 7-10 g의 시료를 막자사발에 넣고 충분히 파우더링 시키는 전처리 과정을 진행했음
- 퇴적물의 210-Pb 분석은 한국 기초과학지원 연구원(KBSI)에서 보유중인 고순도 게르마늄 감마핵종 분석기 (HPGe gamma detector)를 이용할 예정으로 현재 전처리가 완료된 시료들을 대상으로 분석 진행 중에 있음.
- 210-Pb 기반 퇴적률을 계산하기 위해 사용되는 대표적인 모델에는 Constant Initial Concentration (CIC) model (Goldberg, 1963; Robbins, 1978)과 Constant Rate of Supply 혹은 Constant Flux (CRS) model (Goldberg, 1963; Appleby and Oldfield, 1978; Robbins, 1978) 두 가지가 있음

(3) 연구 결과 및 토의

- 딕슨 피오르드 조간대(tidal flats)에서 30–32 cm 구간을 제외하고 93 cm 깊이에서의 코어 퇴적물의 전반적인 평균 입자 크기는 4.39 phi (0.0477 mm, coarse silts) – 6.16 phi (0.01400 mm, fine silts)의 범위를 보이는데, 표층으로 갈수록 조립해지는 경향성(coarsening–upward trends)을 보임(Fig. 303)
- 상향 조립화 층서는 딕슨 피오르드 조간대가 지난 90년 동안의 활발한 delta progradation에 의해 형성된 지역임과 동시에 지형 변동성 연구결과에서 보이듯이 현저한 파랑의 영향에 노출된 결과로 추정됨(Kim et al., 2022)
- 현재 입도 분석 진행 중에 있는 30–32 cm 구간에서는 최소 0.5 cm 직경의 자갈이 육안으로 관찰되는데, 전반적인 코어 퇴적물의 평균 입도 결과와 입도 조성 자료와 비교해보면 상대적 특이적인 결과값이 나올 것으로 예상됨
- 딕슨 피오르드 조간대 현장 조사로부터 관찰된 자갈 퇴적물의 분포 양상은 1) channel thalweg (channel–lag deposits), 2) chenier, 3) spits, 4) cliff 인근이거나 혹은 5) ice–rafted debris가 원인이 될 수 있음 (Kvam, 2018)

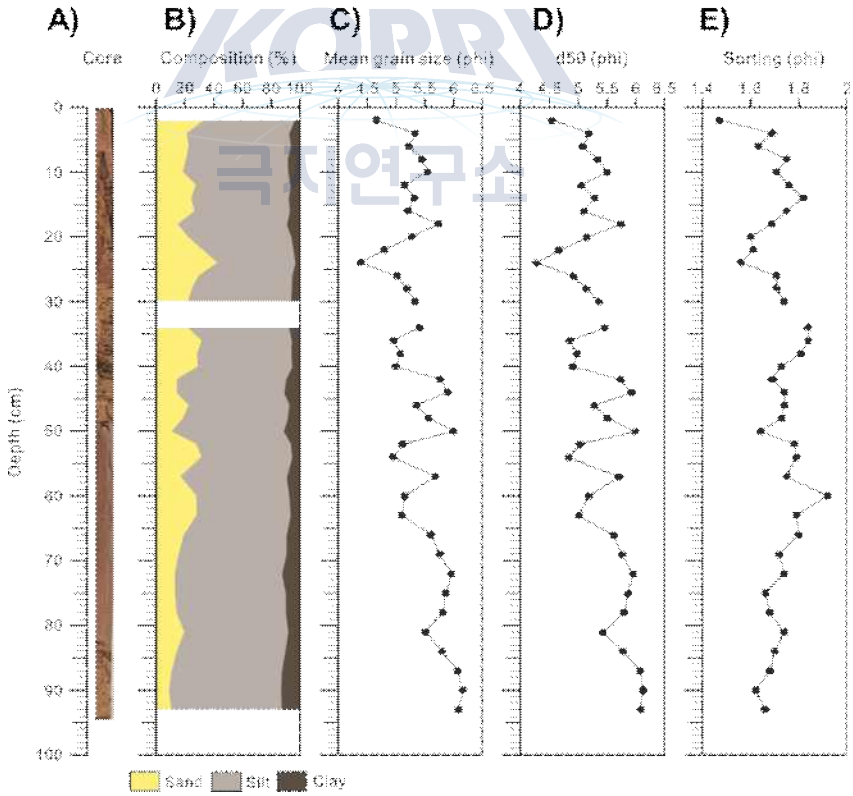


Fig. 303. (A) Undisturbed core photo image of Dicksonfjorden, which is obtained by using hand auger core. The results of grain–size analysis, showing (B) composition, (C) mean grain size, (D) median grain size (D50), and (E) sorting. Sediments from 30 to 32 cm intervals contain gravels with 0.5 cm diameter.

- 210-Pb 동위원소 연대측정 자료가 도출되는 대로 지형 변동성 자료와의 연계 분석을 통해 자갈 퇴적물이 딕슨 피오르드에서 시사하는 바에 대해 해석을 진행할 예정임('항목 다. 딕슨피오르드 내부 점이지대 퇴적환경 진화 양상 및 기후변화 영향 규명' 참조)
- 210-Pb 연대자료는 CIC model과 CRS model을 모두 활용할 예정이며, 피오르드 점이지대에서의 수직적인 퇴적상 분석, 다년간의 지형 변동성 자료들을 연계하여 해석할 예정임('항목 다. 딕슨피오르드 내부 점이지대 퇴적환경 진화 양상 및 기후변화 영향 규명' 참조)
- 현재까지 딕슨 피오르드 점이지대 조간대에서 표층으로부터 깊이 37 cm의 코어 퇴적물로부터 210-Pb 분석을 통해 계산된 퇴적률은 0.3 cm/yr 임을 고려할 때 (Kvam, 2018), 본 연구에서 93 cm 깊이에서의 210-Pb를 통한 퇴적률 계산은 처음으로 시도되는 연구로서, 과거 딕슨 피오르드의 퇴적환경 진화에 대한 보다 깊이있는 이해가 가능할 것으로 생각됨

KOPRI
극지연구소

다) 딕슨피오르드 내부 점이지대 퇴적환경 진화 양상 및 기후변화 영향 규명

(1) 연구 목적

- 최근 스발바르는 급격한 빙하 후퇴, 강설과 조수 빙하의 용융으로 인해 강과 인접한 연안역으로의 유출수와 퇴적물 공급량이 증가했으며 일부 극지 연안역에서는 해안선의 전진과 퇴적 등의 퇴적환경 변화를 겪고 있음
- 스발바르 딕슨 피오르드 내부 점이지대 환경은 내만의 위치임에도 불구하고 소빙기(Little Ice Age) 이후인 1930년부터 최근 2020년까지의 약 90년 동안 매우 활발한 전진 퇴적의 결과로 형성된 지역임
- 다년간에 걸친 지형 변동성 모니터링 및 시공간적인 침·퇴적 양상 분석연구는 조수빙하가 소멸되어 가는 북극권 연안 퇴적 환경에서 지형변화를 유발하는 프로세스 및 환경 제어 요인을 규명할 수 있으며, 퇴적물의 공간적인 물성 분포 양상과 퇴적환경별 퇴적상 분류는 북극권 피오르드 물질 순환 양상을 심층적으로 이해하는데 이바지할 것으로 판단됨

(2) 연구 방법

(가) RTK-GPS 측량

- 지형 측량 및 기준점 측량은 Real Time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS, 상대측위법) mode를 사용했음. 이 방법은 미지점(이동국)의 위치를 기지점(기지점)에 관련하여 결정하는 방법으로 두 측점 간의 위치벡터 변위를 결정하는데, 기지국은 위치가 고정되어 있으며 의사 거리 관측값과 반송파 위상을 결정, 기지국은 이 관측값을 컨트롤러를 통해 이동국으로 전송함(Fig. 304)
- 국내와는 달리 통합기준점과 같은 측량 기준점이나 위치 보정 정보를 활용이 불가하여 부득이하게 상대적인 고도 값을 사용하였으며, 측량된 지형의 절대 고도는 최인접 지점의 수준점 측량을 통해 보정된 값을 사용했음
- RTK-GPS는 수평오차 10 mm, 수직오차 20 mm 수준의 정확도를 보유하고 있으며, WGS 84 타원체와 TM zone 33N 좌표계 기준으로 획득된 RTK-GPS 자료를 위·경도 좌표로 변환했음

(나) 무인 항공기 기반 고해상도 3차원 지형 공간자료 구축

- 무인항공기는 DJI 사의 Phantom 4, Mavic 2 pro를 사용하였으며 3축 짐벌에 장착된 카메라를 사용했음
- 항공 이미지 보정과 위치 정보 확보를 위하여 지상기준점(Ground control point, GCP)을 예상 촬영 구역보다 10 % 외곽 지역까지 등 간격으로 설치하고 RTK-GPS 측량을 통하여 위치 정보를 획득했음
- 촬영된 항공 이미지는 초점과 중첩도를 고려하여 1차 선별 후, 고도, 위치, roll (파

이), yaw (카파), pitch (오메가) 정보를 이용하여 자료에 불필요한 사진을 비활성화 함. 선별된 사진은 Pix 4D mapper 소프트웨어를 이용하여 tie point를 추출하고 영상 정합을 수행하고 구축된 영상 정합 결과에 RTK-GPS 로 측량한 지상기준점 (GCP) 자료를 입력하고 정합 영상의 지상기준점 위치와 결합을 통하여 보정을 수행했음

- 항공측량 기법을 활용하여 수치표고모델(DEM)과 정사영상(Ortho-photograph)를 구축함

(다) 지형 변동성 시계열 분석

- 수치표고모델(DEM)과 정사영상의 TIFF 파일을 ArcGIS (버전 10.1) 소프트웨어를 활용하여 분석했는데, TIFF 파일 각각의 픽셀에 입력된 고도 값을 일정한 기준으로 구분하고, 음영을 통해 시각화했음
- 작성된 DEM 파일에 Topology tool을 수행하고 단면 추출 기능을 이용하여 지형 단면을 추출했고 고도 자료를 이용하여 등고선, 지형 경계선 추출 및 polyline 생성했음
- 각 연도별로 구축한 DEM을 동일한 범위의 분석 구역을 기준으로 추출하고, 두 시기 DEM의 고도 차이를 계산하고 DEM 자체의 오차 범위를 적용하여 순 변화량을 분석했음

(라) 퇴적상 및 퇴적률 분석

- 퇴적상 분석을 위한 주상 시료 획득은 Eijkelkamp사의 핸드 오우거 코어러와 can core를 활용했음. auger core로 길이 93 cm의 코어를 획득했으며, can core는 다양한 퇴적환경에서 최대 60 cm 깊이의 불교란 주상 시료를 획득했음. 일부 코어를 대상으로 epoxy peel를 제작하여 퇴적구조 및 입도 분석 연구를 수행했음(Fig. 304)
- 주상 시료 내 퇴적물들을 일정한 구간별로 서브 샘플링하여 입도 분석 및 퇴적률 계산을 위한 210-Pb 동위원소 분석을 진행했음. 210-Pb는 22.26년의 비교적 짧은 반감기를 가지고 있어서 호소, 염하구 및 조간대 퇴적물의 퇴적률을 계산하는데 널리 이용됨
- 퇴적물의 입도 분석은 레이저 회절 방법을 활용한 입도분석 장비(Malvern 사의 Mastersizer 3000)를 이용하여 평균 입도, 분급, 입도별 조성비 등의 입도 매개변수를 추출했음
- 퇴적물의 연대측정은 한국기초과학지원연구원(KBSI)에서 보유 중인 고순도 게르마늄 감마선 검색기(HPGe gamma-ray spectrometer)를 이용하여 210-Pb와 226-Ra 값을 산출했음. 퇴적률 계산은 Constant Rate of Supply 혹은 Constant Flux (CRS) model을 기반으로 계산했음

KOPRI 극지연구소

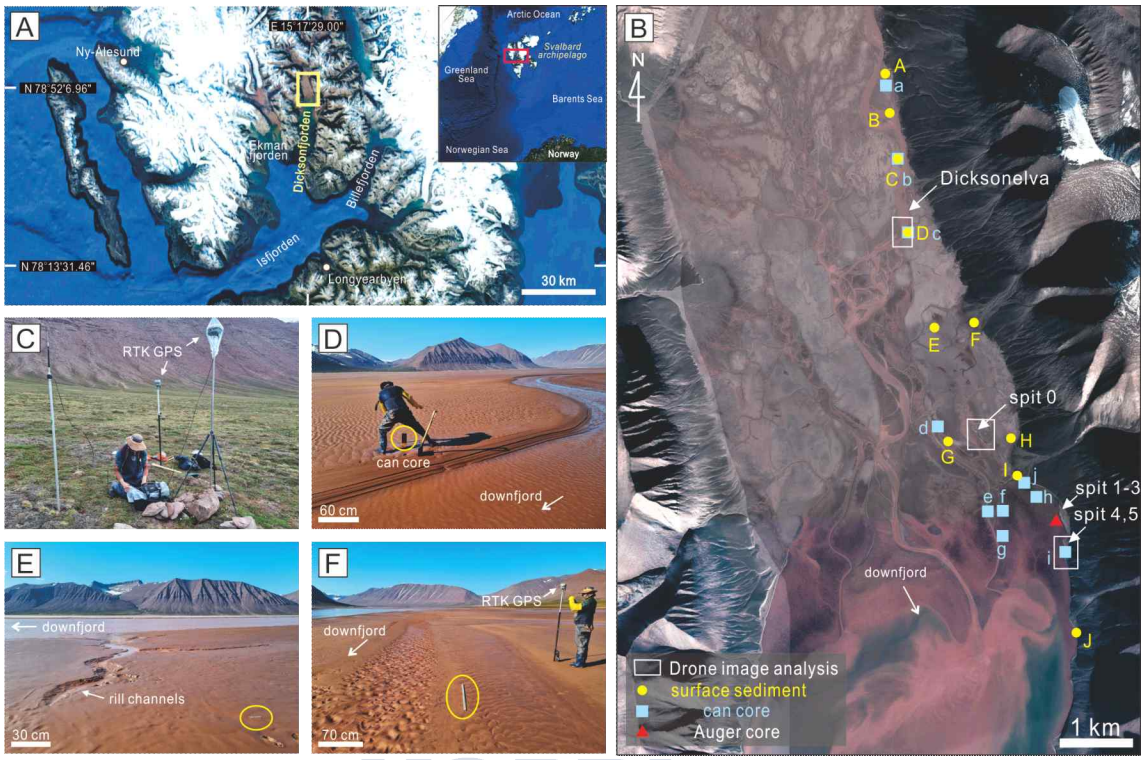


Fig. 304. (A–B) Satellite images of the Dicksonfjorden in Svalbard showing the locations of data acquisition points for surface sediments and cores. (C) Field photos showing the installation for RTK GPS. Coring in (D) tidal channel point bar, (E) rill channels flowing into the Dicksonelva, and (F) bedforms.

극지연구소

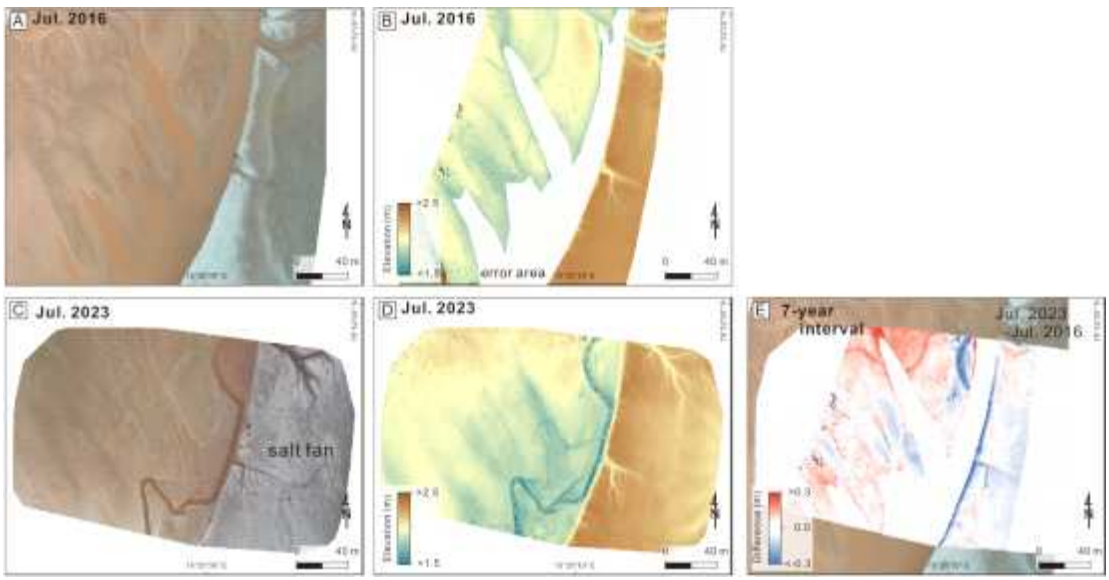


Fig. 305. (A–D) Ortho-photomosaic and DEM of the Dicksonelva (glaciofluvial channel) and (E) DoD (DEM of Difference) between 2016 and 2023 over 7 years.

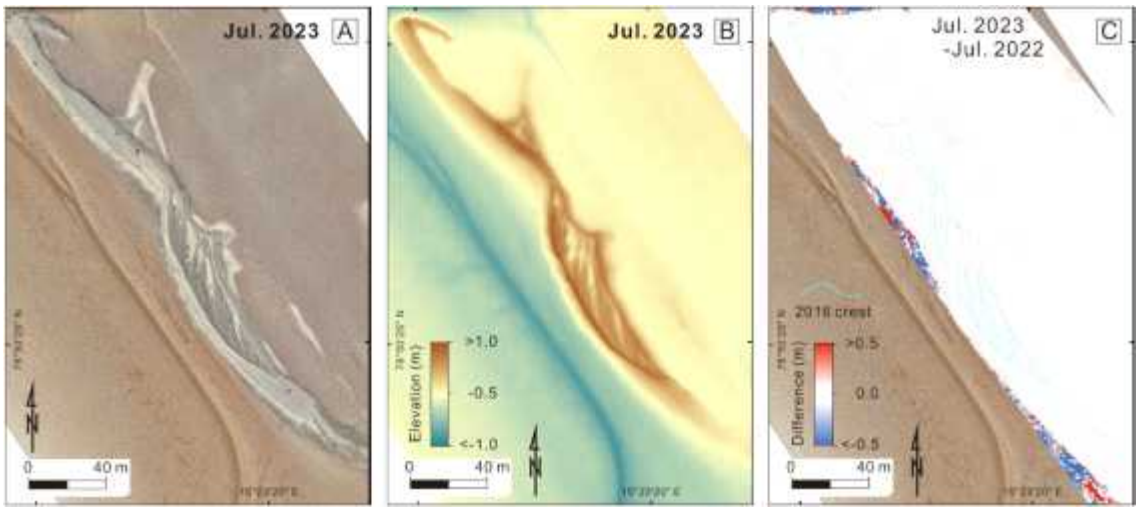


Fig. 306. (A–B) Ortho–photomosaic and DEM of spit 0 and (C) DoD between 2022 and 2023.

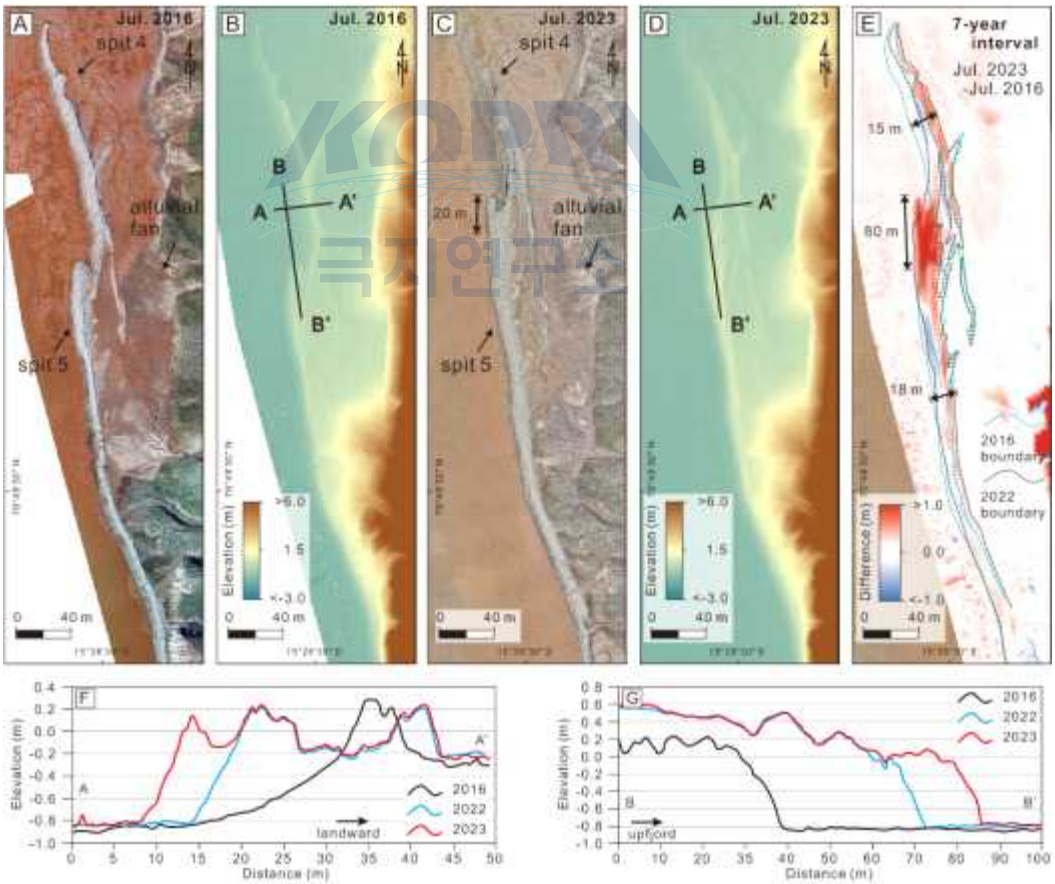


Fig. 307. (A–D) Ortho–photomosaic and DEM of spit 4 and spit 5. (E) DoD between 2016 and 2023 over 7 years. (F–G) Transect profiles of spit morphodynamics showing up–fjord and landward growth in response to waves and sediments (gravels, sands) supplied from adjacent alluvial fans and cliffs.

(3) 연구 결과 및 토의

(가) 딕슨 피오르드 내부 점이지대 지형 변동성 및 퇴적환경 변동 양상

- 딕슨 피오르드의 상류부터 하류에 이르는 총 6개 지역(Fig. 304)에서 빙하천(glacio-fluvial channel), 조수로(tidal channels), 사취(spits), 해빈(beach) 및 해안절벽(cliffs) 등의 퇴적환경을 대상으로 2016년부터 2023년 사이(2020-2021 제외) 6차례에 걸쳐 고해상도 공간자료를 구축했음(Figs. 94-96)
- 상류 지역에는 빙하천(Dicksonelva)을 따라 조간대가 발달하며 빙하천 제방에는 증발한 소금으로 피복되어 있음(Fig. 305). 빙하천의 폭은 2016년 30 m에서 2023년 5 m로 감소했으며 하천 인근 조간대에서 전반적으로 퇴적작용이 우세하게 나타났고 수로의 사행도가 증가했음. 이는 상류 방향에서의 빙하천의 이동 혹은 단절로 인해 하류 방향 빙하천이 유기된 결과로 생각됨
- 사취 0은 평균 해수면과 해발고도 1 m 사이에 발달하며 모래와 자갈로 구성된 사질 퇴적체로 상부 조간대 니질 퇴적층 상부에 위치함. 육지 방향으로 휘어진 형태의 기복구조(ridge and swale)가 반복적인 양상으로 나타남(Fig. 306)
- 사취 0은 모니터링을 시작한 2016년 이후 거의 이동하지 않고 유의미한 형태 변동성을 보이지 않으며 사취 0 인근 조간대 또한 뚜렷한 침·퇴적 양상을 보이지 않고 안정된 상태를 보이는데, 이것은 파랑의 영향이 매우 미미하여 조립질 퇴적물의 이동이 거의 일어나지 않는 환경으로서 조수 혹은 하천 기원 퇴적물의 공급 정도가 작기 때문으로 추정됨
- 딕슨 피오르드의 하류 방향는 약 1 km 길이의 해안선을 따라 북쪽에서 남쪽방향으로 사취 1에서 사취 5까지 사취 연속체(spit complexes)가 각각 독립적으로 발달함(Fig. 304)
- 사취 1, 2는 연구 기간 동안 낮은 형태 변동성을 보였고, 반면 사취 3의 경우 2016년과 2023년의 7년 동안 40 m 길이가 신장되었으나 성장률은 지속적으로 감소하여 2022년과 2023년의 2년 동안에는 약 3 m 수준으로 감소했음
- 사취 4, 5는 피오르드 입구와 가장 인접한 지역에 위치하며 사취 5의 남쪽 지역은 해빈 및 해안절벽과 연결되어 있음(Fig. 307). 사취의 동쪽과 서쪽에 발달한 조간대는 각각 지형고도가 -0.2 m, -1.0 m 로 0.8 m의 지형고도 차이를 보임
- 사취 5는 사취 연속체 중 가장 활발한 형태변동성을 보임. 2016년과 2023년 사이 피오르드 상류 방향으로 약 40 m 가량 길이가 신장되었으며 사취 정부의 지형고도는 0.4 m 증가하며 부피가 증가했음. 사취 사면 방향에서의 이동률은 피오르드 입구 쪽으로 갈수록 큰데, 최대 20 m 내외이며 침식이 우세한 반면 피오르드의 상류 쪽의 사취의 경우 사취 4와 결합되어 사취의 폭이 전반적으로 확대되는 경향성을 보임(Fig. 307)

KOPRI 극지연구소

(나) 표층 퇴적물 공간적인 분포 양상

- 딕슨 피오르드의 상류-하류 방향의 8 km 범위에서 빙하천과 조수로를 인근의 조간대에서 총 34점의 표층 퇴적물을 획득했음. 입도분석 결과 전반적으로 표층 퇴적상은 상류에서 하류 방향으로 갈수록 세립해지는 경향성을 보였으며, 저조선에서 만조선 방향으로 갈수록 평균 입도는 조립해졌음(Fig. 308, Table 55)

Table 55. Grain-size parameters of surface sediments along the proximal-distal locations of DIcksonfjorden.

Site	Mean size (phi)	Sand %	Silt %	clay %	Sorting (phi)	Sedimentary environment	Location
A	4.48	30.71	68.13	1.16	0.97	Glaciofluvial point bar	Proximal (upfjord)
B	6.58	2.02	86.99	11.00	1.15	Tidal flat	
C	4.88	19.05	78.96	1.99	1.09	Glaciofluvial channel	↑
D	5.04	21.09	75.70	3.21	1.35	Tidal channel point bar	
E	5.64	12.44	81.68	5.88	1.46	Tidal flat	
F	5.74	8.73	85.05	6.22	1.36	Tidal flat	
G	6.21	1.36	91.77	6.88	1.21	Tidal channel point bar	
H	5.18	22.56	72.68	4.76	1.56	Tidal flat	↓
I	4.51	35.44	62.21	2.35	1.55	Alluvial fan	Distal (downfjord)
J	2.81	81.33	17.48	1.19	1.50	Sandy beach	

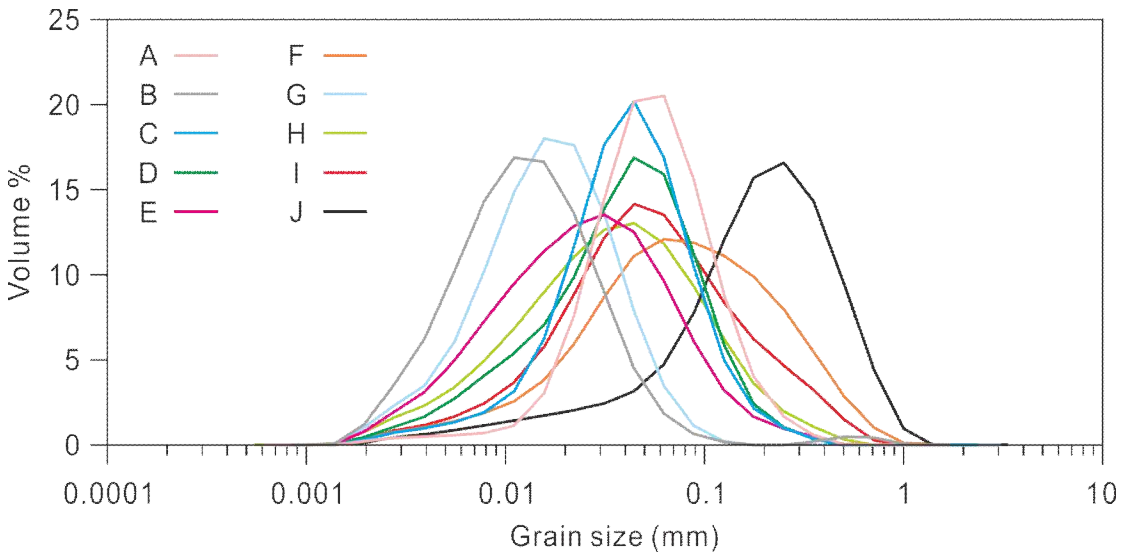


Fig. 308. Grain size distribution of the surface sediments. Refer to Fig. 304 for location.

(다) 퇴적환경별 퇴적상 분류 및 공간적인 퇴적상 분포 양상

- 딕슨 피오르드에서 2016년부터 2023년의 조사를 통해 획득된 점이지대 시추코어 자료를 바탕으로 총 8개의 소퇴적환경을 분류할 수 있었음(Fig, 305). 1) 빙하천 제방(Glaciofluvial channel cutbank), 2) 빙하천 우각사주(Glaciofluvial channel point bar), 3) 조수로 제방(Tidal channel cutbank), 4) 조수로 우각사주(Tidal channel point bar), 5) 조간대(Tidal flat), 6) 사취(Spit), 7) 선상지(Alluvial fan), 8) 해빈(Beach)
- 빙하천 제방과 빙하천 우각사주(Figs. 309A–C)에서 획득된 코어에서는 하류 방향으로 주로 우세한 상승 연흔 사층리(climbing–ripple cross lamination)가 발달하며 퇴적 당시 상당량의 밑짐–부유 퇴적물이 피오르드 하류 방향으로 공급되었음을 의미함. 또한 빙하천의 우각사주와 제방 모두에서 이러한 퇴적상이 관찰되었다는 것은 퇴적될 당시 빙하천이 양방향으로 활발하게 이동했었음을 시사함(Fig. 309)
- 코어 a, b, c로 미루어 볼 때 빙하천 퇴적상은 상류에서 하류 방향으로 갈수록 세립해지는 경향성을 보였으며 특히 하류 방향의 빙하천 우각사주 퇴적상에서는 조석 우세 퇴적환경에서 조석의 주기적인 상승과 하강에 의해 형성되는 조수 리듬층(tidal rhythmites)처럼 보이는 퇴적층이 관찰됨. 이는 빙하천의 하류 방향으로 갈수록 증가한 조류의 영향을 시사함. 다만 연구지역의 알려진 퇴적률 0.1–0.3 cm/year (Kvam, 2018) 그리고 0.03–0.9 cm/year (Fig. 310)임을 고려할 때 빙하천 유량 혹은 융빙수 유출량 변화의 관점에서도 고찰해볼 필요성이 있겠음
- 조수로 제방과 우각사주(Figs. 309D–G)에서는 주로 점토–실트 우세의 점토층(mud beds)이 발달하고 있으며 뚜렷한 퇴적구조는 찾아보기 힘듦. 생물교란에 의한 교란구조도 거의 관찰되지 않음. 조수로 제방에서는 수로 방향으로 경사져 있는 층과 함께 내부에는 양방향의 연흔 사층리와 점토 자갈(mud pebbles), 자갈(granules), 유기물(organic materials) 그리고 명확한 침식면이 관찰됨. 과거 조수로 제방이 우각사주였음을 의미하며 이는 조수로가 양방향의 형태 변동성을 보였었음을 의미함
- 또한 빙하천 우각사주에서 주로 피오르드 하류 방향 우세의 퇴적상과 비교했을 때, 조수로 우각사주에서 양방향의 연흔 사층리의 발달은 피오르드 상류 방향으로 거슬러 올라가는 밀물의 흐름, 즉 양방향성 조류에 의한 퇴적작용임을 시사함
- 선상지 하류 방향의 조간대에서 획득된 코어 퇴적상(Fig. 309H)은 점토층과 모래층(sand beds)이 번갈아 나타남. 모래층을 구성하는 모래는 인근 선상지로부터 공급된 것으로 추측되는데, 점토–모래층의 교호는 선상지(Fig. 309J)로부터 유출되는 융빙수의 유량 변화와 관련 있을 것으로 추측됨
- 사취 퇴적상(Fig. 309I)은 육지 방향으로 기울어진 경사면과 육지방향의 비늘구조(imbrication)를 가짐. 사취 퇴적상은 주로 overwash 프로세스에 의한 퇴적작용의 결과로서 파랑의 영향을 시사하며, 인근 선상지의 해안 절벽으로부터 공급된 것으로서 사취의 성장에 주요한 역할을 하는 것으로 생각됨(Kim et al., 2022)

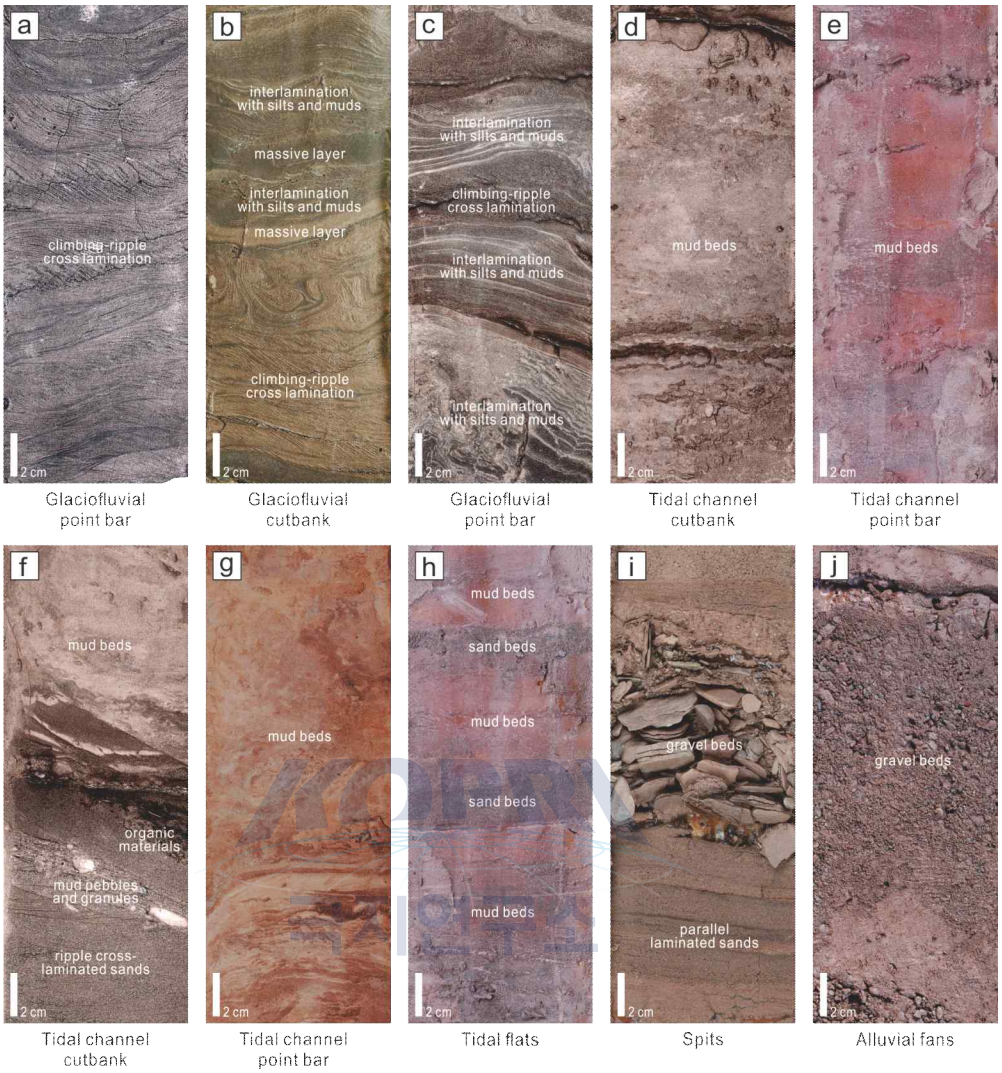


Fig. 309. Epoxy relief peels showing (A–C) glaciofluvial deposits, (D–G) tidal channel deposits, (H) tidal flats, (I) spits, and (J) alluvial fans. The right side is the downfjord direction.

(라) 시추코어 퇴적물 연대측정 및 깊이별 퇴적률 계산

- 딕슨 피오르드 사취 3의 서측 조간대에서 오우거 코어를 사용하여 획득된 시추코어는 전반적으로 상부로 갈수록 조립해지는 경향성(coarsening-upward trends)을 보이며, 연구지역이 삼각주 전진퇴적(delta progradation)에 의해 형성된 지역임과 동시에 지형 변동성 연구결과에서 보이듯이 현저한 파랑의 영향에 노출된 결과로 추정됨(Fig, 307)
- 210-Pb 연대측정 예비분석 결과 93 cm 깊이의 퇴적층은 1921년부터 2020년의 약 100년 동안 퇴적된 것으로 추정되며, 평균 퇴적률은 약 0.909 cm/year로 계산되었음
- 깊이별 퇴적률은 퇴적층 하부로 갈수록 감소하는데, 표층 0-2 cm에서는 0.885

cm/year, 2–4 cm 에서는 0.651 cm/year, 4–6 cm 에서는 0.559 cm/year, 6–8 cm 에서는 0.279 cm/year임. 34 cm 깊이 이하에서 연간 퇴적률은 0.1 cm/year가 넘지 않음

- 딕슨 피오르드에서의 퇴적률은 1990년대 이후 점진적으로 증가하기 시작했으며 최근 2010년대에 들어서 급격하게 증가하고 있음. 스발바르 지역에서 지난 100년 동안 획득된 연 대기 기온 자료와 비교해보면 점차 기온이 상승하기 시작하는 1990년대 이후와 퇴적률이 증가하기 시작하는 시기가 거의 비슷한 것을 볼 수 있음(Fig. 311)
- 급격한 기온 상승은 해안절벽의 침식과 후퇴를 가속화시키는 것은 물론 빙하 용융을 가속화시켜 융빙수 유출량을 증가시킬 수 있으며 이로 인해 피오르드 점이지대 내로 공급되는 퇴적물 유입량을 증가시킬 것으로 추정되는데, 딕슨 피오르드의 퇴적률 증가는 이러한 기온 상승과 밀접한 관련이 있을 것으로 추정됨

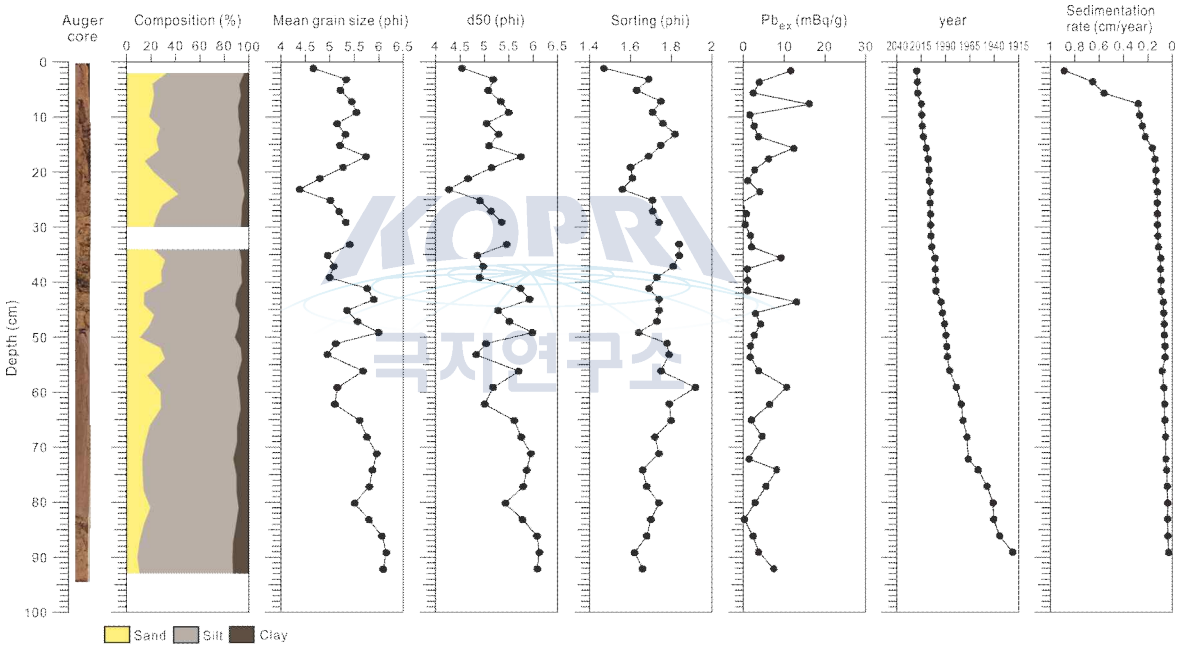


Fig. 310. Composition, mean grain size, median size (d50), sorting, excess ^{210}Pb and ^{210}Pb age dating results showing age–depth profiles and sedimentation rates.

(마) 스발바르 피오르드 점이지대 퇴적환경 진화 및 기후변화 영향

- 스발바르 딕슨 피오르드는 최근 기후 변화에 의해 빙하의 용융이 가속화됨에 따라 피오르드 내부 점이지대로의 융빙수 유출량이 증가했고 퇴적물의 순공급이 이루어짐에 따라 강제 해퇴성(forced regressive)의 삼각주 전진퇴적(delta prograding)을 겪고 있음
- 연구결과를 토대로 딕슨 피오르드 내부 점이지대의 하천–조석–파랑 프로세스의 시공간적인 우세 정도는 하천 프로세스의 경우 빙하천(glaciofluvial)에 가까울수록 그리

고 피오르드의 상류 방향으로 갈수록, 조석 프로세스는 점이지대 중-하류로 갈수록 그리고 파랑 프로세스의 경우 간조선 근방에서 우세한 것으로 추정됨

- 파랑의 경우 딕슨 피오르드의 사취 그리고 해안절벽의 형태 변동성에 중요하며 특히 만조시 형성되는 파랑에 의해 사취가 이동하거나 생성되고 있음을 알 수 있음. 다만 파랑은 해빙이 없는 6-9월 사이 기간에 주요한 영향을 줄 수 있는 것으로 판단됨
- 융빙수 등의 하천 프로세스가 우세한 빙하천과 조류가 우세한 조수로는 양방향성으로 이동한 것으로 추정되며 이는 피오르드 내부 점이지대의 유량과 퇴적물 공급량이 상당하다는 것을 의미함
- Landsat 자료에 기반하여 정성적으로 추정한 삼각주의 전진 퇴적속도는 연간 80 m로 예측되며, 2000년부터 2008년에 특히 빠르게 성장한 것으로 미루어 볼 때 연간 전진퇴적하는 속도는 일정하지 않은 것으로 추정됨. 지난 80년 동안 만조선(high tide line)보다 간조선(low tide line)이 보다 더 피오르드 하류 방향으로 이동한 것을 알 수 있으며 이는 삼각주 해안선이 바다 방향으로 전진퇴적해오고 있다는 것을 의미함(Fig. 312)
- 210-Pb를 통한 퇴적물 연대측정 및 퇴적률 분석 결과 최근 2000년대 들어서 퇴적률이 급격하게 증가하고 있으며 이는 기온의 증가와 밀접한 연관이 있는 것으로 생각되며, 딕슨 피오르드 퇴적환경 진화에 대한 연구 결과는 향후 빙하후퇴를 겪고 있는 극지역에서의 퇴적환경을 진단하고 예측하는데 활용될 수 있을 것으로 기대됨

KOPRI 극지연구소

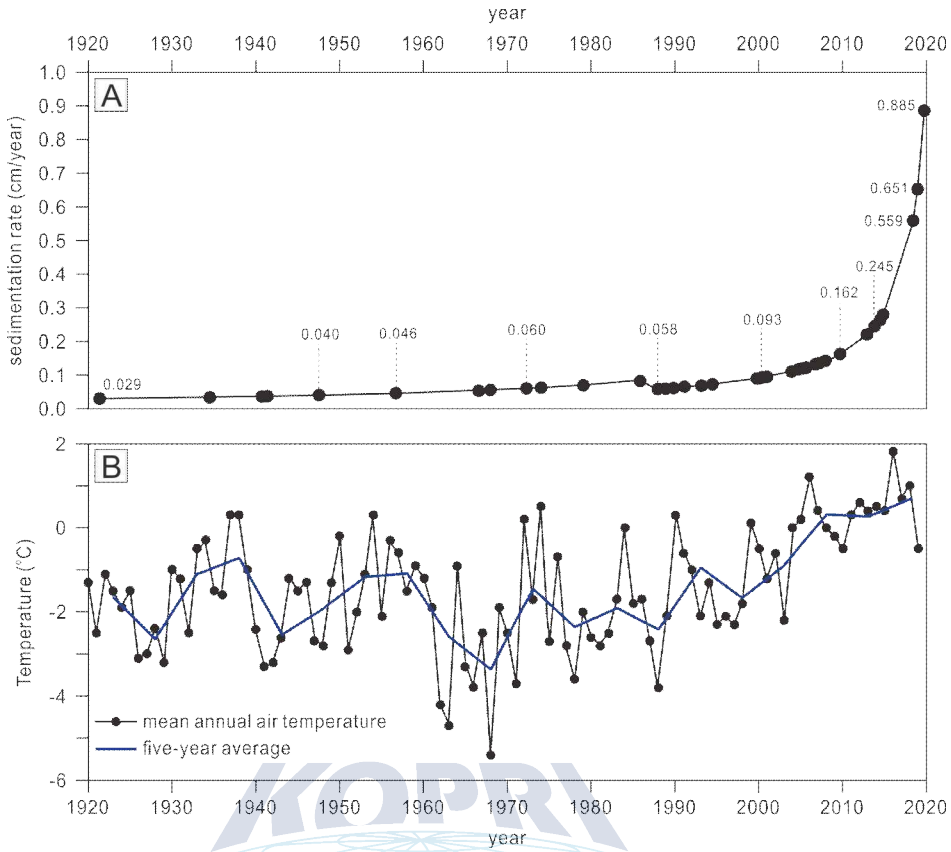


Fig. 311. (A) Sedimentation rates and (B) mean annual air temperature.

KOPRI
극지연구소

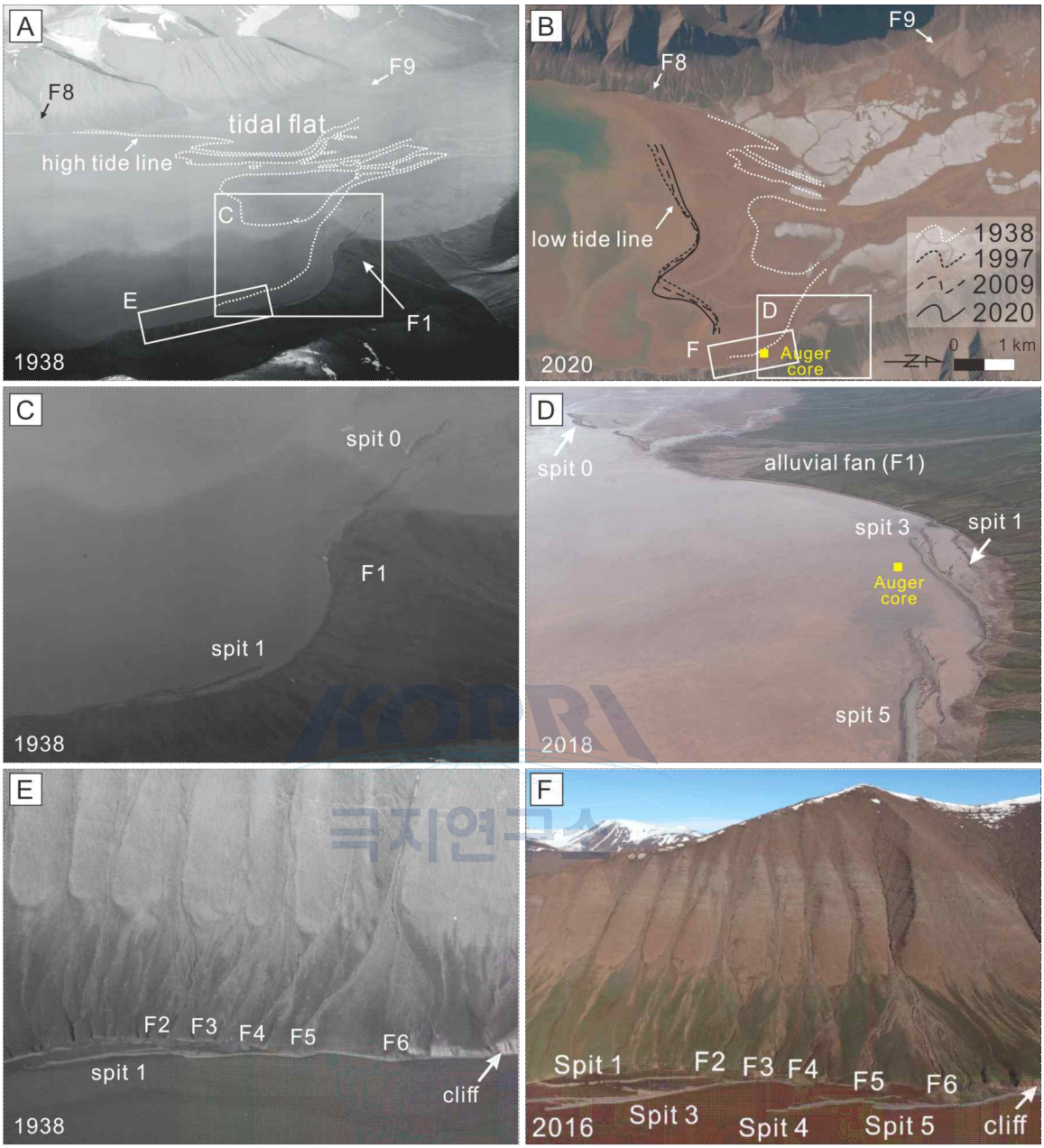


Fig. 312. (A–B) Comparison of old and recent aerial photographs of Dicksonfjorden, highlighting geomorphic changes of coastline, spits, and alluvial fans. The high tide line appears to have migrated downfjord less significantly than the low tide line (C–F) Spits 2–5 did not exist in 1938.

다. 환경인자 등재 목록 [2025.01월 현재]

※ 3세부과제(NRF-2021M1A5A1075512 / 극지연구소 과제분류번호-PN21013, PN22013, PN23013, PN24013)의 한국극지데이터센터(KPDC; Korea Polar Data Center) 및 PANGAEA 환경인자 등재 목록

연번	PN22013	등록일
1	[KOPRI-KPDC-00002156] 2022 FVCOM results for sea level in Svalbard Kongsfjorden	2022-11-07
2	[KOPRI-KPDC-00002157] 2022 FVCOM results for salinity in Svalbard Kongsfjorden	2022-11-07
3	[KOPRI-KPDC-00002158] 2022 FVCOM results for temperature in Svalbard Kongsfjorden	2022-11-07
4	[KOPRI-KPDC-00002161] 2022 FVCOM results for current in Svalbard Kongsfjorden	2022-11-07
5	[KOPRI-KPDC-00002159] 2022 FVCOM results for particle tracking (2007/05) in Svalbard Kongsfjorden	2022-11-07
6	[KOPRI-KPDC-00002160] 2022 FVCOM results for particle tracking (2007/07) in Svalbard Kongsfjorden	2022-11-07

연번	PN23013	등록일
1	[KOPRI-KPDC-00002399] 2023 Near-bed sediment analysis results in Svalbard Kongsfjorden	2023-11-14
2	[KOPRI-KPDC-00002398] 2023 FVCOM results for particle tracking in Svalbard Kongsfjorden (2007.05)	2023-11-14
3	[KOPRI-KPDC-00002400] 2023 FVCOM results for particle tracking in Svalbard Kongsfjorden (2007.07)	2023-11-14

연번	PN24013	등록일
1	[KOPRI-KPDC-00002444] Results of sediment core measurements recovered from the northern Svalbard (Wijdefjorden) - grain size and grain size end member modelling data	2024-02-28
2	[KOPRI-KPDC-00002463] Geochemical, physical and sedimentological properties of core HH19-878-GC in Hornsund, Arctic Svalbard	2024-11-08
3	[KOPRI-KPDC-00002735] Core data of CAGE19-3-KH17-GPC01 recovered from northwestern Svalbard (off Kongsfjorden) - grain size and grain size end member modelling data	2025-01-06
4	[KOPRI-KPDC-00002736] Concentrations of persistent toxic substances (PCBs, PAHs, Alkyl-PAHs, and Perylene) in soils from Midtre Lovnbreen, Svalbard	2025-01-07
5	[KOPRI-KPDC-00002737] AhR-mediated potency using effect-directed analysis and nontarget screening in sediments from Kongsfjorden, Svalbard	2025-01-07
6	[KOPRI-KPDC-00002738] Bulk parameters (TOC, Ntot, Norg, d13C, 14C, Mean grain size, sorting) for surface sediment samples in Svalbard fjords	2025-01-07

2. 목표 달성 수준 및 추진일정 실적
가. 대표적 연구성과

※ 아래 예시를 참고하여 우선순위별 3개 이내 작성

1) 진도관리, 자체평가 결과 등을 반영하여 성과가 우수한 3대 기술을 선정

– (1) 퇴적물 내 철산화광물 함량 변화를 통한 과거 빙하후퇴속도 추적 기술

1) 스발바르 북부 대륙붕에서 비데피오르드까지 남-북 방향으로 확보한 4점의 코어퇴적물에서 XRD 광물분석 수행 및 철산화광물 정량화
2) 철산화광물의 시공간적인 함량 변화를 활용한 과거 빙하 거동 복원 가능성 최초 제시
3) 온도 상승에 따른 빙하용융의 비선형적 거동에 대한 고해양학적 증거 최초 제공

– (2) 북극 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 내 유기독성물질 분포 규명

1) 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 내 유기독성물질의 분석
2) 지난 100년 동안의 토양 내 유기독성물질의 출적률 및 플럭스를 평가
3) 스발바르 지역의 독특한 환경 조건과 오염 특성을 규명하고, 북극 생태계 보호 및 관리를 위한 기초자료를 제공

– (3) 북극 스발바르 콩스피오르드 퇴적물 내 유기독성물질의 분포 및 잠재적 독성 평가

1) 스발바르 콩스피오르드 퇴적물 및 니알슨 다산과학기지 인근 석탄 잔존물 내 유기독성물질의 분포와 잠재적 오염원 추정
2) 비표적 분석을 통한 석탄 기원 주요 유기독성물질 확인
3) 스발바르 콩스피오르드 지역 퇴적물 내 석탄 기원 화하물이 수 생태계에 미치는 잠재적 위험성을 평가

– (4) 스발바르 피오르드 퇴적물 코어 내 홀로세 기후환경 변화에 따른 수은 유입원과 유입 경로 변동 파악

1) 스발바르 딕슨피오르드 및 우드피오르드 총 2점의 코어 퇴적물에서 수은 농도 및 안정동위원소 분석 수행 및 퇴적물 내 수은 오염원 기원 특성
2) 스발바르 피오르드 기후변화와 수은의 거동 복원 연구 수행을 통해, 현재까지 초기적 단계인 극지방 수은 유입원 및 생지화학적 순환 연구 분야에서 유의미한 성과를 도출 할 수 있었음
3) 극지 및 고환경 퇴적물에서 수은 안정동위원소를 활용한 환경 복원의 가능성을 확인

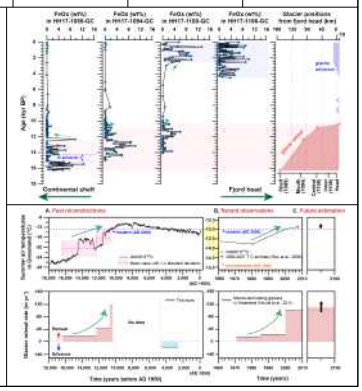
– (5) 기후 변화로 인한 북극 스노우팩의 감소와 수은의 대기 재방출 이후의 순환 경로 예측

1) 다매체 시료(해양 생물군 및 대기, 해수, 퇴적물, 스노우팩)를 대상으로 수은 농도 및 안정동위원소 분석을 수행. 북극해 내 여러 매체에서의 수은 유입원의 기여도를 수은 안정동위원소비를 통해 최초로 정량적으로 평가
2) 북극해 해양 표면에서 해염 에어로졸(sea salt aerosols)을 통한 대기 수은(Hg(0)) 산화와 해수 및 생태계로의 수은 공급을 밝히며 북극해 생태계로의 수은 노출 발생 과정을 규명
3) 북극해로 유입되는 대기를 포함한 수은 유입원의 유입량을 재산정하여 극지 시나리오 및 모델을 개선

2) 성과별 내용

성과 1	퇴적물 내 철산화광물 함량 변화를 통한 과거 빙하후퇴속도 추적 기술

① 성과개요

연구자	극지연구소 연수연구원 장광철/책임연구원 남승일/조영진 연수연구원/안영규 박사과정								
과제명	북극 스발바르 기후 · 환경 취약성과 회복력 이해								
기술성숙도 (TRL)	기본원리 파악	기본개념 정립	기능 및 개념검증	연구실환경 테스트	유사 환경 테스트	파일럿 현장 테스트	상용모델 개발	실제 환경 최종 테스트	상용 운영
	O	O	O						
성과개요	• 핵심 개발 내용: 1) 스발바르 북부 대륙붕에서 비데피오르드까지 북-남 방향으로 확보한 4점의 코어퇴적물에서 XRD 광물분석을 수행하여 철산화광물 정량화 2) 철산화광물의 시공간적인 함량 변화를 활용한 과거 빙하 거동 복원 가능성 최초 제시 3) 급격한 지구온난화에 의한 온도 상승과 빙하용융의 비가역적 및 비선형적 거동에 대한 고해양학적 증거 최초 제공								

② 성과내용

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
XRD 광물 분석 자료	스발바르 북부 코어퇴적물 4점(HH17-1085-GC, HH17-1094-GC, HH17-1100-GC, HH17-1106-GC)에서 XRD 광물조성 분석(n=334)
후빙기 및 홀로세 전기 빙하후퇴 속도	철산화광물 활용 후빙기 및 홀로세 전기(16,300년 전~10,800년 전) 동안의 빙하후퇴 속도 변화 양상 추정
빙하용융의 비선형적 거동에 대한 과거 증거 제시	해당 시기 가파르게 상승하는 빙하 후퇴 속도와 달리 해수 및 대기 온도의 상승은 점진적인 것을 바탕으로, 온도 변화에 대한 빙하용융의 비선형적 거동에 대한 고환경적 증거 최초 제시

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

- 빙하 인접부와 같이 융빙수와 해수가 만나는 하구 환경에서 침전 및 흡착 현상으로 급격히 사라지는 철의 특성을 활용, 퇴적물 내 철산화광물 함량 변화를 활용하여 빙하 인접부의 위치를 추적하는 방법을 세계 최초로 제시함(3단계: 알려진 방법으로 기존지식을 근본적으로 개선)
- 해당 자료를 바탕으로, 과거 16,000년 전 스발바르 북부에 존재했던 빙하의 거동과 후퇴 양상을 처음으로 복원함

– 우수성

- 철산화광물을 활용한 빙하 후퇴 속도 추정법을 세계 최초로 제시하며(3단계 세계 최초 구현), 본 연구과제의 주요 목표인 기후환경복원 프록시 개발 성과 달성

KOPRI 극지연구소

- 오늘날 특정 온도 이상에서 빙하가 급격하게 용융되는 현상을 지시하는 온도 임계점 가설을 지지하는 과거 사례 최초 제시하며, 국제 저명 지구행성과학 학술지인 Earth and Planetary Science Letters (JCR ranking 93.6%) 지에 출판

– 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	• 기후변화에 따른 북극 스발바르 과거와 현재 환경변화 및 영향 진단	• 기후변화에 따른 북극 스발바르 과거 환경변화 복원 기술 확보
분야별 목표	• 환경 프록시 개발/검증 • 저해상도 프록시 자료 분석	• 과거 빙하 거동을 추적하는 프록시 개발에 성공 • 개발된 프록시 분석을 통한, 후빙기 이후 북부 스발바르 빙하 환경 복원 수행

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

– 철산화광물 함량 변화를 활용한 과거 빙하 후퇴 속도 추적 기술은 조수 빙하 등 marine-terminating glaciers가 발달한 지역에서 범용적인 적용이 가능함. 이에 따라, 스발바르 피오르드에서 획득한 코어 퇴적물에서 분석된 XRD 광물분석 결과를 바탕으로 그 활용성이 1차적으로 평가될 예정임

구분	기업명	제품/기술명	매출액	상태	주요내용
기술 이전					
창업					

KOPRI 극지연구소

④ 파급효과/기대효과

– (학술적/기술적/인프라 측면)

- 담수와 해수가 섞이는 전이지대에서의 철이 선별적으로 침전하는 특성을 바탕으로 한 철산화광물 활용 과거 빙하 거동 복원 방법은, 극지 고환경 연구 분야에서 널리 활용될 여지가 있음. 특히, 남극의 경우 해저와 맞닿아 있는 빙하가 널리 발달 되어 있어, 철산화광물을 바탕으로 한 과거 빙하 거동 추적 연구에 활용성이 큼

– (산업경제적 측면)

- 극지 고환경 복원연구를 통한 극지환경에 대한 이해력 증진은, 향후 경제적인 극지환경 개발 계획 수립의 기초자료로 활용될 수 있음

– (사회적 측면)

- 지구온난화에 대한 빙하용융의 비선형적 거동과 관련된 고환경적 증거 제시를 통해, 향후 빙하 거동 예측의 정확성을 높여 사회적 불안감 해소

⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간		1	1							

논문	논문명	학술지명	IF	게재년월
	Non-linear response of glacier melting to Holocene warming in Svalbard recorded by sedimentary iron (oxyhydr)oxides	Earth and Planetary Science Letters	5.3	23.04

특허	출원/등록	특허명	출원/등록번호	출원국
	등록			대한민국
	출원			PCT

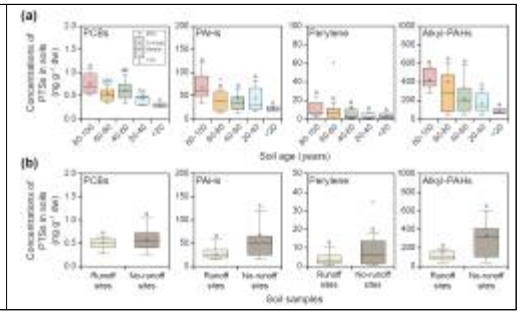
창업	기술명	기업명	창업일

KOPRI 극지연구소

성과 2	**북극 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 내 유기독성물질 분포 특성 규명**

① 성과개요

연구자	충남대학교 홍성진/차지현 박사과정	
과제명	북극 스발바르 지역 내 인위적 유기독성물질의 분포 및 거동 특성	
성과개요	• 본 연구는 노르웨이 스발바르 군도의 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 내 유기독성물질의 분포 특성을 조사하였음 • 빙하 후퇴로 대기 중에 노출된 토양 45개를 채취하여, 다양한 연령 그룹으로 분류하였으며, 유기독성물질의 연대별 분포 및 잠재적 오염원을 확인하고자 하였음 • 또한, 지난 100년 동안의 토양 내 유기독성물질의 축적률 및 플럭스를 평가하였음 • 본 연구 결과는 북극 스발바르 생태계 보호를 위한 기초자료를 제공할	

	것으로 기대됨	

② **성과내용**

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
분석 대상 토양 시료 정보	• 2014년 7월, 중앙로벤 빙하후퇴지역에서 채취한 깊이 0~5 cm의 토양 시료 45개 • 80–100년(n=7), 60–80년(n=12), 40–60년(n=16), 20–40년(n=7), <20년(n=3)
시료 전처리법	• 고속용매추출기를 이용한 토양 유기 추출 실시 • 토양 유기 추출액 내 복잡성 감소를 위한 극성 기반 실리카겔 컬럼 분액화 기술 도입
분석 대상 물질	• 32종 PCBs, 29종 PAHs, 20종 alkyl–PAHs
분석 기기	• 가스크로마토그래피 질량 분석기(GC–MSD)
통계 분석	• 주성분 분석(PCA) 및 PMF 모델링을 통해 유기독성물질의 잠재적 오염원 추정
유기독성물질 농도 범위	• PCBs (0.29–0.74 ng g^{-1} dw) • PAHs (21–80 ng g^{-1} dw) • Alkyl–PAHs (73–420 ng g^{-1} dw)
유기독성물질 잠재적 오염원	• PCBs: 장거리 대기 수송을 통한 제품 기원 • PAHs: 자연 매장 석탄, 석탄 잔존물 및 인간 활동의 영향

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

- 기존 연구와 비교하였을 때, 본 연구에서는 중앙로벤 빙하후퇴지역을 중심으로 45개의 토양에 대해 매우 세밀하게 PCBs, PAHs, alkyl–PAHs의 농도 및 조성을 분석하였음
- 이를 통해 같은 지역이더라도, 토양의 유기탄소 함량, 입도, 빙하 융빙수의 영향, 초목의 존재 등 다양한 요인에 의해 유기독성물질의 분포 특성이 다를 수 있음을 증명하였음
- 기존 연구에서 분석하였던 EPA PAHs 이외에도 신규 PAHs의 분포를 파악하여, 극지 환경 내 신규 PAHs가 EPA PAHs와 유사한 분포 및 거동 특성이 있음을 확인

– 우수성

- 유기독성물질의 연대별 분포 및 조성 분석을 통해 이들의 잠재적 오염원을 규명하였고, 석탄 잔존물, 인간 활동, 자연적으로 매장된 석탄 오염원의 영향을 성공적으로 확인하였음
- 본 연구는 스발바르 지역의 독특한 환경 조건과 오염 특성을 밝혔고, 북극 생태계 보호 및 관리에 중요한 기초자료를 제공할 것으로 기대됨

– 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	• 북극 스발바르와 주변 지역 내 인위적 유기독성물질의 다매체 분포 및 거동 특성 규명	• 북극 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 내 유기독성물질의 분포 특성 파악 완료
분야별 목표	• 북극 스발바르와 주변 지역 내 유기독성물질의 다매체 분포 특성 규명 • 유기독성물질의 오염역사, 오염원의 장기 변동, 오염 경로 추적 • 유기독성물질의 생물축적 및 먹이망 전이 연구, 잠재적 위해성 평가	• 토양 내 유기독성물질의 연대별 분포, 오염 수준 및 잠재적 오염원 제시 • 지난 약 100년 동안의 토양 내 유기독성물질의 축적률 및 플럭스 계산 • 본 연구결과는 북극 스발바르 생태계 보호를 위한 기초자료를 제공할 것으로 기대

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

– 활용 현황
- 스발바르 토양 내 유기독성물질의 분포 결과 논문을 국외 학술지에 게재 완료

– 활용 계획
- 유기독성물질 데이터베이스를 구축하여 북극 생태계 모니터링 및 관리를 위한 기초자료 활용
- 극지 유기독성물질 연구의 양적·질적 수준 향상

④ 파급효과/기대효과

– (학술적/기술적/인프라 측면)
- 극지 토양 유기독성물질 분석 기술 향상
- 국내 극지 유해 물질 연구 수준과 이해도 향상에 기여

– (산업 경제적 및 기후변화 대응 측면)
- 극지 생태계의 건강하고 지속 가능한 이용에 기여
- 극지 유해물질의 분포 및 거동에 대한 기초자료 확보

– (사회적 측면)
- 북극 주민과 서식 생물의 다양성 보호에 기여
- 지속 가능한 북극 환경 유지에 기여

⑤ 성과근거자료

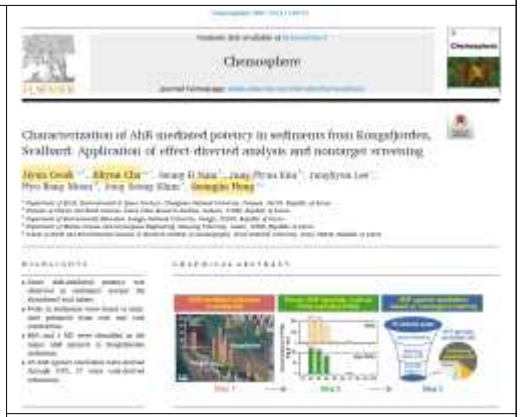
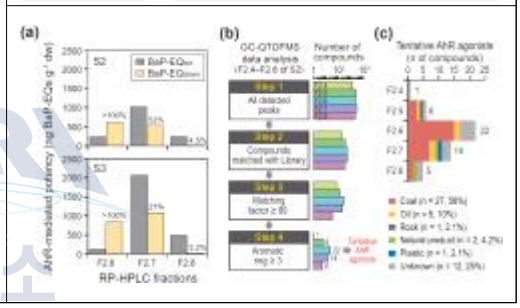
구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–

	논문명	학술지명	IF	게재년월
논문	Chronological distribution and potential sources of persistent toxic substances in soils from the glacier foreland of Midtre Lovenbreen, Svalbard	Environmental Pollution	7.6	24.09

KOPRI 극지연구소

성과 3	북극 스발바르 콩스피오르드 퇴적물 내 유기독성물질의 분포 및 잠재적 독성 평가

① **성과개요**

연구자	충남대학교 홍성진/곽지윤 박사과정/차지현 박사과정	
과제명	북극 스발바르 지역 내 인위적 유기독성물질의 분포 및 거동 특성	
성과개요	• 스발바르 콩스피오르드 퇴적물 (n=10) 내 아릴탄화수소 수용체 활성 측정 • 콩스피오르드 퇴적물 및 니알슨 다산과학기지 인근 석탄 잔존물 내 유기독성물질의 분포와 잠재적 오염원 추정 • 비표적 분석을 통한 석탄 기원 주요 유기독성물질 확인 • 본 연구 결과는 콩스피오르드 지역 퇴적물 내 석탄 기원 화합물이 수 생태계에 미치는 잠재적 위험성을 평가하고, 이를 통해 북극 생태계 보전에 기여하고자 함	 

② **성과내용**

– 주요 기능 및 사양

KOPRI 극지연구소

주요 기능/사양	내 용
분석 대상 시료 정보	• 2022년 7월, Kongsfjorden 지역 10개 정점 퇴적물 시료 채취 • 다산과학기지 인근 석탄 잔존물 추가 채취
시료 전처리법	• 고속용매추출기를 이용한 퇴적물 및 석탄 유기 추출 실시 • 퇴적물 및 석탄 유기 추출액 내 복잡성 감소를 위한 극성 기반 실리카겔 컬럼 분액화 기술 도입
생물검정법	• 유전자 재조합 쥐 간암 세포주인 H4IIE-*luc* 생물검정을 이용한 AhR 매개 활성 평가
분석 대상 물질	• 15종 t-PAHs, 14종 e-PAHs, 20종 alkyl-PAHs, 10종 SOs
분석 기기	• 가스크로마토그래피 질량분석기(GC-MSD): PAHs, alkyl-PAHs, SOs 농도 분석 • 가스크로마토그래피 비행시간 질량분석기(GC-QTOFMS): 주요 독성 분액 내 잠재적 AhR 활성 후보물질 선별을 위한 비표적 분석
통계 분석	• 주성분 분석(PCA) 및 PMF 모델링을 통해 유기독성물질의 잠재적 오염원 추정
유기독성물질 농도 범위	• t-PAHs (6.1-2,100 ng g^{-1} dw) • e-PAHs (0.5-1,000 ng g^{-1} dw) • Alkyl-PAHs (47-79,000 ng g^{-1} dw) • SOs (4.2-130 ng g^{-1} dw)
유기독성물질 잠재적 오염원	• PAHs: 석탄, 석유 연소 및 석탄 연소
잠재적 신규 오염물질 규명	• 비표적 분석을 통해 48종의 잠재적 AhR 활성 후보물질 식별 • 이들 중 27종이 석탄 기원 유래 물질로 확인

KOPRI 극지연구소

- 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)
  - 본 연구는 기존 연구에서 주로 분석된 퇴적물 내 EPA-PAHs 분석을 넘어, 비표적 분석(NTS)을 활용하여 극지 퇴적물 내 잠재적 AhR 활성물질을 식별하였음
  - 북극 환경 내 화학적 분석과 생물학적 분석을 통합적으로 수행하여, 오염 물질 분포와 독성 기여도를 종합적으로 평가한 최초 사례 중 하나로, 생물영향지향분석(EDA)와 비표적분석의 결합은 북극 오염 연구에 새로운 패러다임을 제시함
  - VirtualToxLab 및 VEGA QSARs in silico modeling을 통해 개별 화합물의 잠재적 독성을 예측 및 평가함으로서, 다중 오염원의 상호작용과 독성을 이해하는 데 중요한 역할을 함
- 우수성
  - 본 연구는 북극 Kongsfjorden 퇴적물 내 주요 유기독성물질(PAHs, alkyl-PAHs, SOs)의 농도 및 조성을 정밀히 분석하였으며, PAHs의 주요 오염원은 석탄 잔재물, 석탄 및 석유 연소 등을 명확히 규명하였음
  - 퇴적물 내 AhR 활성은 중극성 및 극성 물질에 의해 유발할 수 있다는 점을 밝혔으며, 북극 생태계 독성 연구에 중요한 시사점을 제공하였음
  - 기후변화로 인한 빙하 융해와 석탄 잔존물의 이동이 Kongsfjorden 수 환경의 오염 확산에 잠재적으로 미치는 영향을 확인하였음
  - 본 연구 결과는 북극 생태계 보호 및 지속 가능한 관리를 위한 기초자료를 제공함
- 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	• 북극 스발바르와 주변 지역 내 인위적 유기독성물질의 다매체 분포 및 거동 특성 규명	• Kongsfjorden 퇴적물 내 유기독성물질의 분포 특성 파악 완료
분야별 목표	• 북극 스발바르와 주변 지역 내 유기독성물질의 다매체 분포 특성 규명 • 유기독성물질의 오염역사, 오염원의 장기 변동, 오염 경로 추적 • 유기독성물질의 생물축적 및 먹이망 전이 연구, 잠재적 위해성 평가	• 생물영향지향분석과 비표적 분석을 결합하여 퇴적물 내 주요 AhR 활성물질 규명 완료 • PMF 모델링 및 주성분 분석을 통해 오염 물질의 잠재적 오염원 파악 완료 • 비표적 분석을 통한 석탄 기원 유래 AhR 활성 후보물질 선별 • In silico 모델링 분석을 통한 후보 화합물의 잠재적 독성 예측

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

– 활용 현황
- 스발바르 퇴적물 내 유기독성물질의 분포 결과 논문을 국외 학술지에 게재 완료

– 활용 계획
- 북극 수 환경 내 유기독성물질 분석을 위한 데이터베이스 구축
- 극지 유기독성물질 연구의 양적·질적 수준 향상

④ 파급효과/기대효과

– (학술적/기술적/인프라 측면)
- 생물영향지향분석과 비표적 분석의 결합을 통해 북극 오염 물질 연구의 새로운 패러다임 제시
- 국내 극지 유해 물질 연구 수준과 이해도 향상에 기여

– (산업 경제적 및 기후변화 대응 측면)
- 극지 생태계의 건강하고 지속 가능한 이용에 기여
- 빙하 융해로 인한 오염 물질 확산과 기후변화가 북극 환경에 미치는 영향을 분석하여, 정책 수립 및 산업 기술 개발에 활용

– (사회적 측면)
- 북극 주민과 서식 생물의 다양성 보호에 기여
- 지속 가능한 북극 환경 유지에 기여
- 북극 지역의 생태 보존을 위한 국제적 환경 정책 수립 및 자원에 활용

⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–

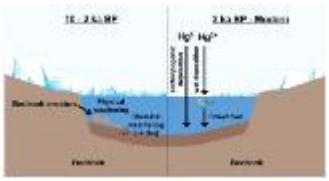
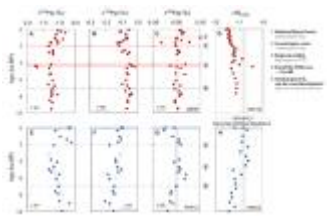
KOPRI 극지연구소

	논문명	학술지명	IF	게재년월
논문	Characterization of AhR-mediated potency in sediments from Kongsfjorden, Svalbard: Application of effect-directed analysis and nontarget screening	Chemosphere	8.1	24.11

KOPRI
극지연구소

성과 4	스발바르 피오르드 퇴적물 코어 내 홀로세 기후환경 변화에 따른 수은 유입원과 유입 경로 변동 파악

① 성과개요

연구자	포항공과대학교 권세윤/이주현 박사과정								
과제명	안정동위원소 기반 스발바르 지역 수은 유입원 및 거동 연구								
기술성숙도 (TRL)	기본원리 파악	기본개념 정립	기능 및 개념검증	연구실환경 테스트	유사 환경 테스트	파일럿 현장 테스트	상용모델 개발	실제 환경 최종 테스트	상용 운영
	O	O	O						
성과개요	• 핵심 개발 내용: 1) 스발바르 딕슨피오르드 및 우드피오르드 총 2점의 코어 퇴적물에서 수은 농도 및 안정동위원소 분석 수행 및 퇴적물 내 수은 오염원 기원 특성 2) 스발바르 피오르드 기후변화와 수은의 거동 복원 연구 수행을 통해, 현재까지 초기적 단계인 극지방 수은 유입원 및 생지화학적 순환 연구 분야에서 유의미한 성과를 도출 할 수 있었음 3) 극지 및 고환경 퇴적물에서 수은 안정동위원소를 활용한 환경 복원의 가능성을 확인						 		

KOPRI 극지연구소

② 성과내용

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
수은 농도 및 안정 동위원소 분석 자료	스발바르 딕슨피오르드 및 우드피오르드 코어퇴적물 2점 (JM05-045-GC, HH19-878-GC)에서 수은 농도 및 안정동위원비 분석(n=56)
홀로세 기후환경 변화에 상응하는 수은 안정 동위원소	기반암 침식에 의한 수은 유입이 이루어진 초기 홀로세부터 대기 수은의 유입이 강화된 후기 홀로세로 이어지는 기후변화에 상응하는 수은 유입원의 변동 계측

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

- 본 과제에서 제안하는 수은 안정동위원소 기반의 스발바르 퇴적물 수은 유입원과 유입 경로 추적은 전 세계적으로 연구된 바 없음. 더불어 스발바르 스노우팩 수은 침적 경로 및 대기-스노우팩 상호작용 파악은 국내에서는 전무하고, 전 세계적으로도 연구 초기 단계에 있음
- 지구온난화에 의한 스발바르 내 미래 수은 거동을 예측하기 위해 과거 홀로세 동안 기후환경 변화에 따른 수은 유입원과 유입 경로가 어떻게 변동했는지 파악할 필요가 있으며, 이를 위해 수은 안정동위원소비를 기후환경변화 프록시로 활용하여 데이터베이스를 구축할 수 있음. 이를 기반으로 수은 거동의 물질수지를 산정하고, 현재와 미래 지구온난화로 인해 수은 거동이 어떻게 변동할 것인지 파악하고 예측할 수 있음
- 스발바르 피오르드 기후변화 관련 연구 수행을 통해 현재까지 미비한 극지방 수은 유입원 및

생지화학적 순환 연구 분야에서 성과를 도출 할 수 있었음

- 우수성
  - 본 연구팀은 국내 유일한 수은 안정동위원소 분석 전용 (MC-ICP-MS) 장비를 보유하고 있어, 스발바르 퇴적물에 축적되는 수은 end member의 안정동위원소 데이터 확보할 수 있었음
  - 스발바르 퇴적물 코어 시료의 수은 농도 및 안정동위원소 분석 결과와 스발바르 지역 관련 문헌조사를 통하여 「ACS Earth and Space Chemistry」 SIC(E)급 국제 학술지에 논문 게재하여('21.08)(JCR IF: 3.475) 해당 국제 학술지의 Supplementary Cover Art로 선정

- 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	• 기후변화로 인한 스발바르 지역의 수은 유입원과 거동 추적 및 예측	• 과거 홀로세 기후변화를 통한 스발바르 퇴적물에 축적되는 수은 유입원과 유입 경로 추적 • 스발바르 주변 스노우팩에 축적되는 현대 수은 침적 경로 및 대기-스노우팩 상호작용 파악 • 향후 지구온난화로 인한 스노우팩 감소가 초래하는 스발바르 내 대기 수은 거동 파악 및 예측
분야별 목표	• 과거 홀로세 기후변화를 통해 스발바르 퇴적물에 축적되는 수은 유입원 및 유입 경로 추적 • 스발바르 퇴적물에 축적되는 수은 end-member 안정동위원소 데이터 확보	• 수은 안정동위원소 기반 선정된 스발바르 퇴적물 코어의 과거 수은 유입원 및 유입 경로 추적 • 분석연구를 통한 과거 홀로세 시간별 퇴적물 코어의 수은 안정동위원소 비 확보 • 스발바르 잠재적 수은 기원(end-member)의 수은 안정동위원소 비 확보

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

- 스발바르 지역 과거 홀로세 수은 생지화학 변동 복원 기록은 미래 기후변동 예측 정확도 향상을 위한 기초자료를 제공하며. 기후변화로 인한 북극 연안 환경 변화 및 미래 기후 예측 신뢰도 향상에 기여하고자 함

- 본 연구를 통해 도출한 수은 유입원 및 생지화학적 변동 결과는 북극을 포함한 다양한 환경에 적용, 연구 지역을 확대하고 국내외 연구진들과 공동 연구 추진에 활용할 예정임

- 수은-기후 변화의 상관관계에 대한 기초과학 지식은 현재 북극 연안 환경을 이해하고, 정책 및 기후변화에 따라 변동하는 수은의 유입원과 거동을 예측하는데 중요한 자료로 활용

- 기후변화로 인한 북극 연안 환경 변화에 따른 국내외 수은 관리 및 보건비용 절감 등 경제적인 효과와 더불어 국제적 환경 문제 및 UN 국제수은협약 등과 같은 가이드 라인에 대응하기 위한 기초 자료로 활용

- 본 연구를 통해 획득한 스발바르 수은 농도 및 안정동위원소 데이터를 활용하여 UN 국제수은협약의 Global Observation System for Mercury Isotopes(iGOS4M) 데이터베이스 구축에 기여함으로써 극지 오염저감 정책에 대한 기초자료를 제공함

KOPRI 극지연구소

구분	기업명	제품/기술명	매출액	상태	주요내용
기술 이전					
창업					

④ 파급효과/기대효과

– (학술적/기술적/인프라 측면)

- 본 연구팀은 국내 유일한 수은 안정동위원소 분석 장비(MC-ICP-MS)를 보유하고 있음. 극지 기초과학 분야 연구 수행을 통해 수은 안정동위원소 분석 기술력과 전문성을 강화할 수 있음
- 스발바르 피오르드 기후변화 관련 연구 수행을 통해 현재까지 미비한 극지방 수은 유입원 및 생지화학적 순환 연구 분야에서 초기 데이터를 제공하며 지속적인 관련 성과 도출이 가능할 것으로 기대됨

– (산업경제적 측면)

- 기후변화로 인한 북극 연안 환경 변화에 따른 국내외 수은 관리 및 보건비용 절감 등 경제적인 효과와 더불어 국제적 환경 문제 및 가이드라인에 대응 가능함

– (사회적 측면)

- 기후변화로 인한 북극 연안 환경 변화 및 미래 기후 예측 신뢰도 향상을 위해 필요한 기초자료를 제공함
- UN 국제수은협약에 대응할 수 있는 기초자료를 확보할 수 있음

KOPRI 극지연구소

⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간		1	1							

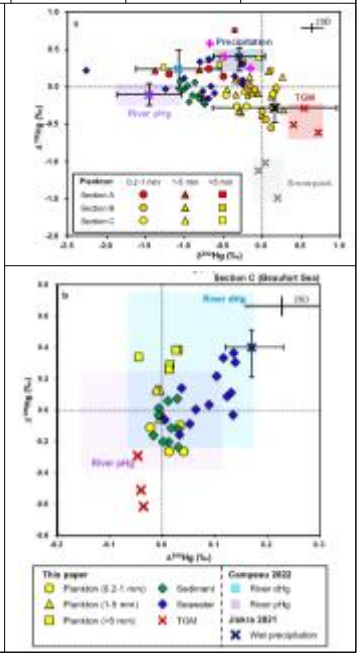
논문	논문명		학술지명	IF	게재년월
	Climate-Associated Changes in Mercury Sources in the Arctic Fjord Sediments		ACS EARTH AND SPACE CHEMISTRY	3.475	202105
특허	출원/등록	특허명	출원/등록번호	출원국	
	등록			대한민국	
	출원			PCT	
창업	기술명		기업명	창업일	

KOPRI
극지연구소

성과 5	북극해 해수의 수은 기원 및 생태계 수은 노출과정 규명

① 성과개요

연구자	포항공과대학교 권세윤 / 환경 연구소 연구원 이아영								
과제명	안정동위원소 기반 스발바르 지역 수은 유입원 및 거동 연구								
기술성숙도 (TRL)	기본원리 파악	기본개념 정립	기능 및 개념검증	연구실환경 테스트	유사 환경 테스트	파일럿 현장 테스트	상용모델 개발	실제 환경 최종 테스트	상용 운영
	O	O	O						
성과개요	• 핵심 개발 내용: 1) 다매체 시료(해양 생물군 및 대기, 해수, 퇴적물, 스노우팩)를 대상으로 수은 농도 및 안정동위원소 분석을 수행. 북극해 내 여러 매체에서의 수은 유입원의 기여도를 수은 안정동위원소 비를 통해 최초로 정량적으로 평가 2) 북극해 해양 표면에서 해염 에어로졸(sea salt aerosols)을 통한 대기 수은(Hg(0)) 산화와 해수 및 생태계로의 수은 공급을 밝히며 북극해 생태계로의 수은 노출 발생 과정을 규명 3) 북극해로 유입되는 대기를 포함한 수은 유입원의 유입량을 재산정하여 극지 시나리오 및 모델을 개선								



② 성과내용

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
수은 농도 및 안정 동위원소 분석 자료	북극 다매체 시료(해양 생물군 및 대기, 해수, 퇴적물, 스노우팩)를 대상으로 수은 농도 및 안정동위원소 분석
스노우팩의 증감이 북극 대기 수은에 미치는 기여 정량화	스노우팩을 비롯한 다양한 환경 시료의 수은 안정동위원소 비 분석을 통해 북극해로 유입되는 수은 유입원을 정량화 하며 가스상 수은을 북극해의 주요 수은 기원 중 하나로 추정

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

- 북극은 인위적 오염원이 거의 존재하지 않는 청정지역으로 알려져 있지만, 저위도로부터 이동된 인위적인 수은으로 인해 생태계에서는 비교적 높은 농도의 수은이 검출됨. 그러나 수송된 수은이 유입되는 경로와 주요한 유입원이 파악되지 못하고 있음
- 북극해로의 수은 유입원을 규명하고 각 유입원들의 기여도를 정량화하여 모델에서 사용할 수 있는 지표를 제시함. 이를 통해 추후 기후변화에 따른 북극에서의 수은 변동을 예측할 수 있는 지표로 활용
- 플랑크톤 및 어류의 분석 결과, 가장 낮은 생태적 지위를 가지는 플랑크톤이 어류에 미치는

영향을 파악 할 수 있었으며, 플랑크톤은 대기 및 강물로부터 유입된 산화 및 메틸화된 수은을 흡수하며 어류로 이동되어 축적되는 것을 수은 안정동위원소 비를 통해 규명함

- 우수성
  - 본 연구팀은 국내 유일한 수은 안정동위원소 분석 전용 (MC-ICP-MS) 장비를 보유하고 있어, 북극의 다양한 매체에 축적되는 수은의 안정동위원소 데이터 확보할 수 있었음
  - 북극 해양 생물군 및 대기, 해수, 퇴적물, 스노우팩 시료의 수은 농도 및 안정동위원소 분석 결과와 북극 지역 관련 문헌조사를 통하여 「Nature Communication」 SIC(E)급 국제 학술지에 논문 게재('24.08)(JCR IF: 14.7)
- 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	• 기후변화로 인한 스발바르 지역의 수은 유입원과 거동 추적 및 예측	• 과거 홀로세 기후변화를 통한 스발바르 퇴적물에 축적되는 수은 유입원과 유입 경로 추적 • 스발바르 주변 스노우팩에 축적되는 현대 수은 침적 경로 및 대기-스노우팩 상호작용 파악 • 향후 지구온난화로 인한 스노우팩 감소가 초래하는 스발바르 내 대기 수은 거동 파악 및 예측
분야별 목표	• 기후변화로 인한 현대 스노우팩 감소가 초래하는 스발바르 내 대기 수은 거동 예측 • 스발바르 스노우팩에 축적되는 수은 end-member 안정동위원소 데이터 확보	• 수은 안정동위원소 기반 북극해 수은 유입원 및 유입 경로 추적 • 현대 북극 스노우팩의 대기 수은과의 관계성 및 계절에 따른 변동성 추정 • 기후 변화로 인한 수은 유입원의 변동을 정량적으로 평가, 거동 예측을 위한 시나리오 및 모델 정립의 기초 자료 제공 • 북극 스노우팩을 비롯한 환경 시료의 수은 end-member 안정동위원소 데이터 확보

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

- 본 연구팀은 국내 유일한 수은 안정동위원소 분석 장비(MC-ICP-MS)를 보유. 극지 기초과학 분야 연구 수행을 통해 수은 안정동위원소 분석 기술력과 전문성을 강화하여 정부출연연구기관, 기업 등에 필요한 수은 안정동위원소 연구 분야의 지식을 갖춘 전문 인력 양성에 기여

- 스노우팩을 비롯한 다양한 매체들의 수은 순환 관계는 현재 북극 연안 환경을 이해하고, 정책 및 기후변화에 따라 변동하는 수은의 유입원과 거동을 예측하는데 중요한 자료로 활용

- 기후변화로 인한 북극 연안 환경 변화에 따른 국내외 수은 관리 및 보건비용 절감 등 경제적인 효과와 더불어 국제적 환경 문제 및 UN 국제수은협약 등과 같은 가이드 라인에 대응하기 위한 기초 자료로 활용

구분	기업명	제품/기술명	매출액	상태	주요내용
기술 이전					
창업					

④ 파급효과/기대효과

– (학술적/기술적/인프라 측면)

- 본 연구팀은 국내 유일한 수은 안정동위원소 분석 장비(MC-ICP-MS)를 보유하고 있음. 극지 기초과학 분야 연구 수행을 통해 수은 안정동위원소 분석 기술력과 전문성을 강화할 수 있음
- 스발바르 피오르드 기후변화 관련 연구 수행을 통해 현재까지 미비한 극지방 수은 유입원 및 생지화학적 순환 연구 분야에서 초기 데이터를 제공하며 지속적인 관련 성과 도출이 가능할 것으로 기대됨

– (산업경제적 측면)

- 기후변화로 인한 북극 연안 환경 변화에 따른 국내외 수은 관리 및 보건비용 절감 등 경제적인 효과와 더불어 국제적 환경 문제 및 가이드라인에 대응 가능함
- 북극 지역 사회에서 섭취하는 어류의 수은 농도를 파악하고, 지역 사회의 보건문제에 대한 가이드라인 제시

– (사회적 측면)

- 기후변화로 인한 북극 연안 환경 변화 및 미래 기후 예측 신뢰도 향상을 위해 필요한 기초자료를 제공함
- 급변하는 극지 환경에서 수은 유입원을 평가하여, 추후 극지 생태계에서 나타날 변화를 예측할 수 있는 시나리오 및 모델을 정립하는데 중요한 지표와 가이드라인을 제시
- UN 국제수은협약에 대응할 수 있는 기초자료를 확보할 수 있음

⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간		1	1							

논문	논문명		학술지명	IF	게재년월
	Near surface oxidation of elemental mercury leads to mercury exposure in the Arctic Ocean biota		Nature Communication	14.7	202408
특허	출원/등록	특허명	출원/등록번호	출원국	
	등록			대한민국	
	출원			PCT	
창업	기술명		기업명	창업일	

KOPRI
극지연구소

나. 추진 일정 실적

1차년도 (1단계 1차년도)

개발내용	추진 일정 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	책임자 (소속기관)	비고 (변경사유 등)
한-노 스발바르 국제공동탐사 계획수립 및 실시#													남승일 (부경대) 박지현	#코로나 미진정시 미실시
부시료 채취 및 코어 스캐닝 자료 획득#													남승일 (부경대) 박지현	#코로나 확산에 따른 노르웨이 입국 불가로 인해 NGU 일부 시료 운송 받아 수행
시료 선정 및 기초 분석 자료 획득													남승일 (부경대) 박지현	
환경복원 프록시 개발 및 연구 인프라 구축													남승일 (부경대) 박지현	
(위탁) 스발바르 퇴적물 코어 시료 확보 및 수은 농도 분석													권세윤 (포항공과대학교)	
(위탁) 표층 퇴적물 내 유기독성물질 분포 및 조성 특성 파악													홍성진 (충남대)	
(위탁) 관측자료 수집 및 FVCOM 모델링 기반 구축													우승범 (인하대)	

2차년도 (1단계 2차년도)

개발내용	추진 일정 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	책임자 (소속기관)	비고 (변경사유 등)
탐사계획수립 및 자료조사													남승일 (부경대) 박지현	
한-노 스발바르 국제공동탐사 및 부시료채취 등 코어 스캐닝 자료 획득													남승일 (부경대) 박지현	
스발바르 지역 다중매체 시료 분석자료 획득													남승일 (부경대) 박지현	
환경복원 프록시 저해상도 분석													남승일 (부경대) 박지현	
스발바르 환경변화 1차 해석													남승일 (부경대) 박지현	
(위탁) 퇴적물 수은 안정동위원소 기반 과거 수은 유입원과 경로 추적													권세윤 (포항공과대학교)	
(위탁) 환경 다매체 시료 내 유기독성물질 분포특성 파악													홍성진 (충남대)	코로나 상황으로 1차년도 탐사 미실시에 따라 시추코어퇴적물 미확보. 2차년도 탐사를 통해 획득한 시료를 활용 3차년도 계획 우선 수행
(위탁) 스발바르 연안 조석 및 해류변화 특성 모델 재현성 검증													우승범 (인하대)	

KOPRI 극지연구소

3차년도 (2단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
스발바르 탐사계획수립 및 자료조사													남승일 (극지연)	
국제공동탐사 및 부시료채취 등 코어 스캐닝 자료 획득													남승일 (극지연)	
스발바르 지역 공동탐사 및 다중매체 시료 분석자료 획득													남승일 (극지연)	
홀로세 퇴적물 연대모델 정교화													남승일 (극지연)	
홀로세 자연시료 내 다중 프록시 고해상도 분석													남승일 (극지연)	
스발바르 환경변화에 대한 기후변화 영향력 평가													남승일 (극지연)	
(위탁) 제주도 한라산 스노우팩 시료 채취 및 수은 농도 및 동위원소 분석													권세윤 (포항공과대학교)	
(위탁) 북극 스발바르 지역 퇴적물 내 유기독성물질의 수직분포 특성													홍성진 (충남대)	
(위탁) 스발바르 연안 해류변동성 파악 및 물질 확산 모델링 기술 개발													우승범 (인하대)	

KOPRI 극지연구소

4차년도(최종) (2단계 2차년도)

개발내용	추진 일정															책임자 (소속기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
탐사계획수립 및 자료조사																남승일 (극지연)	
한-노 스발바르 국제공동탐사 및 부시료채취 등 코어 스캐닝 자료획득																남승일 (극지연)	UiT와의 일정 협의에 따라 기간이 단축되었으나, UiT 기술원의 사전 분석 및 업무 협력 등을 통해 기획한 분석 및 자료취득 달성
스발바르 지역 탐사 및 다중매체 시료 분석자료 획득																남승일 (극지연)	다중매체 획득은 일정 협의에 따라 3월에 진행
인류세 퇴적물 고해상 연대 모델 정립																남승일 (극지연)	
인류세 자연시료 내 다중 프록시 고해상도 분석																남승일 (극지연)	기간 연장에 따른 '25년 1월-3월 연구 진행 예정
스발바르 환경변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 평가																남승일 (극지연)	기간 연장에 따른 '25년 1월-3월 연구 진행예정
(위탁) 스발바르 대기 수은 거동 파악 및 예측																권세윤 (포항공과대학교)	기간 연장에 따른 '25년 1월-3월 연구 진행예정
(위탁) 북극 스발바르 시추 퇴적물 시료 내 유기독성물질의 오염역사, 오염원의 장기 변동 및 오염경로 추적																홍성진 (충남대)	기간 연장에 따른 '25년 1월-3월 연구 진행예정
(위탁) 해류특성변화로 인한 조수빙하 유출 물질의 이송 및 확산 기작 파악																우승범 (인하대)	기간 연장에 따른 '25년 1월-3월 연구 진행예정

당초계획 실 적

KOPRI 극지연구소

* 예산 집행 실적('25.01.16일 기준)

(단위: 천원)

비목	세목			2024 예산	2024 집행액	2024 집행률(%)	비고 (잔액활용 계획)
직접비	인건비	내부인건비	미지급				
			지급(A) 현금	203,343	203,343	100.0	
			지급(A) 현물				
		외부인건비	미지급				
			지급(B) 현금	91,955	74,596	81.1	'25.1~3월 인건비
			지급(B) 현물				
		연구지원인력인건비(C)					
	학생 인건비(D)			91,500	74,680	81.6	'25.1~3월 인건비
	인건비 소계(E=A+B+C+D)			388,822	352,619	91.2	
	연구시설·장비비(F)	현금	일반	8,265	8,265	100.0	
			통합관리				
		현물					
	연구활동비(G)	현금		105,920	103,860	98.1	국내외 출장 및 회의비
		현물					
	연구재료비(H)	현금		63,749	63,547	99.7	기타 소모품 구입
		현물					
	연구수당(I)			58,090	28,330	48.8	'25.3월 집행
	위탁연구개발비(J)			109,000	109,000	100.0	
	국제공동연구개발비(K)						
	직접비 소계(L=E+F+G+H+I+J+K)			731,823	665,622	91.0	
간접비(M)				89,512	89,512	100	
(간접비 중 연구실 안전관리비)				(4,300)			
연구개발비 총액(N=M+L)				821,335	755,134	91.9	

연구개발비 총액 구조 : 2024년 예산(760,000천원) + 2023년 잔액 이월금(61,335천원)

KOPRI 극지연구소

제 3 장
연구개발 결과의 활용 방안

KOPRI
극지연구소

1. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여정도

가. 한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사 주도적 수행 및 탐사자료 확보를 통해 대한민국의 「다산」 북극과학기지 위치한 스발바르 군도에서 과학영토 확장 및 북극 기후환경연구 초석 마련에 기여

기타목적활용 성과정보		
과제번호	탐사 기간	탐사 내용
NRF-2021M1A5A1075512	2022.07.23. - 2022.08.01.	스발바르 스피츠베르겐 섬 서부 피오르드(템펠피오르드, 이스피오르드, 콩스피오르드)와 스발바르 북부 힌로펜 해협에서 천부지층탄성파 탐사 자료, CTD, 해수시료, 퇴적물 멀티(51점)/중력코어(6점) 획득
NRF-2021M1A5A1075512	2023.07.07. - 2023.07.12.	스발바르 스피츠베르겐 서부 피오르드(템펠피오르드, 삭센피오르드, 빌레피오르드, 노르드피오르드, 에크만피오르드, 딕슨피오르드, 콩스피오르드, 크로스피오르드, 뮐레피오르드, 막달레나피오르드) 대상 천부지층탄성파 탐사자료, ADCP(acoustic doppler current profiler) 측정 자료, CTD, 해수시료, 퇴적물 멀티(79점)/중력코어(10점) 획득

나. 스발바르 탐사연구를 통한 북극 기후환경변화 연구역량 제고 및 수월성 높은 논문게재

▪ 논문 게재

[2021년]

- Lee, Ju Hyeon et al., 2021, Climate-Associated Changes in Mercury Sources in the Arctic Fjord Sediments. ACS EARTH AND SPACE CHEMISTRY, 5(9). (mrnIF 61.63)
- Kim, Myung-Seok et al., 2021, Occurrence of pressure-forced meteotsunami events in the eastern Yellow Sea during 2010-2019. NATURAL HAZARDS AND EARTH SYSTEM SCIENCES, 21(11), 3323-3337. (mrnIF 79.60)
- Lee, Dong-Hun et al., 2021. Geochemical and Microbial Signatures of Siboglinid Tubeworm Habitats at an Active Mud Volcano in the Canadian Beaufort Sea. FRONTIERS IN MARINE SCIENCE, 8, 656171. (mrnIF 95.54)
- Lee, Ju Hyeon et al., 2021. Spatiotemporal Characterization of Mercury Isotope Baselines and Anthropogenic Influences in Lake Sediment Cores. GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES, 35(10), e2020GB006904. (mrnIF 92.54)

[2022년]

- Penaud, A. et al., 2022. Ocean Productivity in the Gulf of Cadiz Over the Last 50 kyr. PALEOCEANOGRAPHY AND PALEOCLIMATOLOGY, 37(2), e2021PA004316. (mrnIF 100.00)
- Kim, J. W. et al., 2022. An observational study of hydrodynamic impact on water mass transport due to tidal power generation. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, 807, 151013. (mrnIF 90.88)

KOPRI 극지연구소

- Kim, Dahae et al., 2022. Changes in the burial efficiency and composition of terrestrial organic carbon along the Mackenzie Trough in the Beaufort Sea. ESTUARINE COASTAL AND SHELF SCIENCE, 275, 107997. (mrnIF 83.33)
- Bae, Seongjun et al., 2022. The composition and abundance of phytoplankton after spring bloom in the Arctic Svalbard fjords. ESTUARINE COASTAL AND SHELF SCIENCE, 275, 107970. (mrnIF 83.33)
- Kim, Myung-Seok et al., 2022. Towards observation-and atmospheric model-based early warning systems for meteotsunami mitigation: A case study of Korea. WEATHER AND CLIMATE EXTREMES, 37, 100463. (mrnIF 92.47)
- Lee, Dong-Hun et al., 2022. Metalloenzyme signatures in authigenic carbonates from the Chukchi Borderlands in the western Arctic Ocean. SCIENTIFIC REPORTS, 12(1), 16597. (mrnIF 70.83)
- Joe, Young Jin et al., 2022. Glacial history and depositional environments in little Storfjorden and Hambergbukta of Arctic Svalbard since the Younger Dryas. FRONTIERS IN EARTH SCIENCE, 10, 1017594. (mrnIF 56.72)
- Wu, Junjie et al., 2022. Deglacial release of petrogenic and permafrost carbon from the Canadian Arctic impacting the carbon cycle. Nature Communications, 13(1), 7172. (mrnIF 93.06)

[2023년]

- Brice, Camille et al., 2023. Millennial-scale oscillations and an environmental regime shift around the Middle to Late Holocene transition in the North Atlantic region based on a multiproxy record from Isfjorden, West Spitsbergen. BOREAS, 52(1), 42-59. (mrnIF 55.95)
- Lee, Hye Min et al., 2023. Mechanisms of Advective and Tidal Oscillatory Salt Transport in the Hypertidal Estuary: Yeomha Channel in Gyeonggi Bay. JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND ENGINEERING, 11(2), 287. (mrnIF 79.17)
- Jang, Kwangchul et al., 2023. Arctic deep-water anoxia and its potential role for ocean carbon sink during glacial periods. COMMUNICATIONS EARTH & ENVIRONMENT, 4(1), 45. (mrnIF 96.03)
- Jang, Kwangchul et al., 2023. Non-linear response of glacier melting to Holocene warming in Svalbard recorded by sedimentary iron (oxyhydr)oxides. EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS, 607, 118054. (mrnIF 93.00)
- Lee, Juhee et al., 2023. Distributions and potential sources of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in the glacimarine sediments of Arctic Svalbard. Marine Pollution Bulletin, 189, 114740. (mrnIF 96.61)
- Kim, Jong Wook. et al., 2023. Effect of Freshwater Discharge From Estuary Dam on Residual Circulation in Bifurcated Channel. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: OCEANS, 128(5), e2022JC019338. (mrnIF 85.94)
- Joe, Young Jin et al., 2023. Commentary: Reply to commentary by Noormets and Kirchner on Glacial history and depositional environments in little Storfjorden and Hambergbukta of Arctic Svalbard since the younger dryas [Frontiers in Earth Science, (2022), 2211]. FRONTIERS IN EARTH SCIENCE, 11, 1196640. (mrnIF 47.22)
- Kim, Dahae et al., 2023. Large contributions of petrogenic and aged soil-derived organic carbon to Arctic fjord sediments in Svalbard. SCIENTIFIC REPORTS, 13(1), 17935. (mrnIF 81.95)
- Kim, Jong Wook, Woo, S.-B., 2023. A numerical approach to the treatment of submerged water exchange processes through the sluice gates of a tidal power plant. RENEWABLE ENERGY, 219, 119408. (mrnIF 86.39)
- 장광철, 남승일, 2023. 퇴적물의 네오디뮴 동위원소 비를 활용한 북극 고환경 복원. Ocean

and Polar Research, 45(2).

[2024년]

- Ahn, Youngkyu et al., 2024. Post-glaciation depositional changes in Wijdefjorden, northern Svalbard, using grain-size end-member modelling. Marine Geology, 472, 107306. (mrnIF 71.88)
- Jang, Kwangchul et al., 2024. A distinctive rare earth element signature for pyrite oxidation and glacial weathering. Chemical Geology, 660, 122167. (mrnIF 85.00)
- Lim, Seung Hyeon et al., 2024. Near surface oxidation of elemental mercury leads to mercury exposure in the Arctic Ocean biota. Nature Communications, 15(1), 7598. (mrnIF 94.78)
- Cha, Jihyun et al., 2024. Chronological distribution and potential sources of persistent toxic substances in soils from glacier foreland of Midtre Lovenbreen, Arctic Svalbard. Environmental Pollution, 357, 124387. (mrnIF 89.92)
- Gwak, Jiyun et al., 2024. Characterization of AhR-mediated potency in sediments from Kongsfjorden, Svalbard: Application of effect-directed analysis and nontarget screening, Chemosphere, 368, 143771. (mrnIF 91.32)
- Han, Dukki et al., 2024. Interaction between phytoplankton and heterophic bacteria in Arctic fjords during the glacial melting season as revealed by eDNA metabarcoding, FEMS Microbiology Ecology, 100(5), (mrnIF 58.4)

[2025년]

- Jang, Kwangchul et al. 2025. Geochemical and Mineralogical Characteristics of Fjord Sediments in Arctic Svalbard: Insights into Holocene Glacial Activity and Weathering Variability. J. Sediment. Res. Accepted 2024, 11 (MrnIF 86.90)

KOPRI 극지연구소

▪ 학술 발표

[2021년]-국내

- 이혜민 외, 2021. 05. 경기만 염하수로에서의 한강 유량과 담수 영향범위의 상관관계. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회.
- 김다해 외, 2021. 05. Source of sedimentary organic carbon in Wijdefjorden in the Svalbard Archipelago. 한국해양학회 춘계학술대회.
- 조영진 외, 2021. 06. Depositional environment of Little Storfjorden in southern Spitsbergen since the Younger Dryas. 한국제4기학회 춘계학술대회.
- 최재윤 외, 2021. 10. 항 내 조간대가 퇴적물 공급 및 수송에 미치는 영향. 한국해안·해양공학회 추계학술대회.
- 안영규 외, 2021. 10. 마지막 해빙기 이후 북극 스발바르 비데피오르드 퇴적 환경 변화. 추계지질과학연합 학술대회.
- 이혜민 외, 2021. 11. 경기만 하구에서의 한강 유량에 따른 물질 순환 메커니즘. 한국해양학회 추계학술대회.
- 장광철 외, 2021. 11. 네오디뮴 동위원소를 활용한 과거 16,300년간의 북부 스발바르 빙퇴적환경 복원. 한국해양학회 추계학술대회.

[2021년]-국제

- 남승일, 2021. 10. KOPRI research activities on Svalbard: Understanding current-and paleo-environmental changes in Arctic fjord system in response to climate changes. CRYOCARB First Virtual Workshop 2021.
- 남승일, 2021. 11. CRYOCARB-Impact of cryospheric melt-down on submarine slope

stability and carbon release in a warmer Arctic. Svalbard Science Conference 2021.
- 차지현 외, 2021. 12. Distribution and source identification of anthropogenic persistent toxic substances in sediments of Arctic Svalbard. Yellow Sea Ecosystem Symposium (YES 2021).

[2022년]-국내

- 이주현 외, 2022. 04. Atmospheric Mercury Depletion Event and Mercury Photoreduction in Snowpack of Mid latitude Coastal island. 한국기상학회 춘계학술대회.
- 이주희 외, 2022. 06. 북극 스발바르 주변 해역 퇴적물 내 지속성 유기독성물질의 분포 특성. KAOST 춘계공동학술대회.
- 장광철 외, 2022. 06. Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability. 한국해양학회 춘계학술대회.
- 김다해 외, 2022. 06. Source of surface sedimentary organic matter in the Svalbard Archipelago using lignin-derived biomarker. 한국해양학회 춘계학술대회.
- 조영진 외, 2022. 06. Past glacier's behavior in Hambergbukta and Little Storfjorden in Arctic Svalbard based on seismic and lithostratigraphy. 한국해양학회 춘계학술대회.
- 김종욱 외, 2022. 06. 영산강 하구에서 수로 분기와 관련된 흐름 구조에 관한 관측 연구. 한국해양학회 춘계학술대회.
- 남승일 외, 2022. 10. 북극해 대륙빙하와 빙붕 존재 및 그 시기에 관한 논쟁. 대한지질학회 추계학술대회.
- 배민지 외, 2022. 11. Application of comprehensive two dimensional Gas chromatography-time-of-flights mass spectrometry for long chain alkenones analysis. 한국해양학회 추계학술대회.
- 장광철 외, 2022. 11. 퇴적물 내 광물조성 분석을 통한 과거 북극 스발바르 환경 이해. 한국해양학회 추계학술대회.
- 이혜민 외, 2022. 11. Numerical study of glacier runoff effect on the current patterns in Kongsfjorden, Svalbard. 한국해양학회 추계학술대회.

[2022년]-국제

- 이혜민 외, 2022. 03. Mechanisms of salt transport by Han River discharge in the hyper-tidal estuary, Gyeonggi Bay. Ocean Sciences Meeting 2022.
- 이주현 외, 2022. 07. Atmospheric Mercury Depletion Event and Mercury Photoreduction in Snowpack of Mid latitude Coastal island. Goldschmidt Conference 2022 (국외초청강연).
- 이주희 외, 2022. 09. Distribution and source identification of anthropogenic persistent toxic substances in sediments of Arctic Svalbard. International Symposium on Polar Sciences (ISPS 2022).
- 안영규 외, 2022. 09. Glacimarine depositional and environmental changes of Wijdefjorden, northern Svalbard since the last deglaciation using grain-size end member modelling. International Symposium on Polar Sciences (ISPS 2022).
- 조영진 외, 2022. 09. Glacial history and attendant depositional environments in southeastern Svalbard since the Younger Dryas. International Symposium on Polar Sciences (ISPS 2022).
- 손은진 외, 2022. 09. Mercury Sources Reflecting the Holocene Climate Change: Records from the Arctic Fjord Sediments. International Symposium on Polar Sciences (ISPS 2022).
- 장광철 외, 2022. 09. Vulnerability and resilience of Arctic Svalbard to climate variability. International Symposium on Polar Sciences (ISPS 2022).
- 김다해 외, 2022. 09. Characteristics and distributions of sedimentary organic carbon in the Spitsbergen fjords: application of CuO oxidation products. International Symposium

on Polar Sciences (ISPS 2022).
- 장광철 외, 2022. 09. Multi proxies approach for reconstructing glacimarine environmental changes in northern Svalbard since the last deglacial period. International Symposium on Polar Sciences (ISPS 2022).
- 배민지 외, 2022. 09. Analysis of long chain alkenones with comprehensive two dimensional Gas chromatography-Time-of-fight Mass Spectrometry: implication for reconstructing sea surface temperatures in Svalbard fjords. International Symposium on Polar Sciences (ISPS 2022).

[2023년]-국내

- 배민지 외, 2023. 06. Long-chain alkenone-based paleothermometry for reconstructing sea surface temperature in Svalbard fjord. 한국제4기학회 춘계학술대회.
- 안영규 외, 2023. 06. 입도 분포 엔드멤버 모델링을 활용한 마지막 해방기 이후 북극 스발바르 북부 비데피오르드 퇴적 환경 변화 연구. 한국제4기학회 춘계학술대회.
- 차지현 외, 2023. 11. 북극 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 시료 내 유기독성물질의 분포 특성. 한국해양학회 추계학술대회.
- 조은아 외, 2023. 12. Research on past organism community structure and sea ice change reconstruction using ancient DNA derived from sediments of Svalbard Fjords. 한국제4기학회 추계학술대회.

[2023년]-국제

- 김다해 외, 2023. 04. Large contributions of aged organic carbon to Arctic fjord sediments in Svalbard. EGU General Assembly 2023.
- 이주현 외, 2023. 07. Atmospheric Mercury Depletion and Mercury Photoreduction in Snowpack at a Mid-latitude Coastal Island. Goldschmidt Conference 2023.

[2024년]-국내

- 곽지윤 외, 2024. 04. 생물영향동정평가 기법을 이용한 북극 스발바르 퇴적물 내 아릴 탄화수소 수용체 활성 화합물 확인. 한국환경분석학회 춘계학술대회.
- 송윤지 외, 2024. 05. Impact of meltwater discharge on current flow patterns and seawater exchange processes in Kongsfjorden of Arctic Svalbard. 한국해양학회 춘계학술대회.
- 손은진 외, 2024. 11. 지질 시대에 따른 해양 퇴적물 내 수은 침적 변화 : 에오세, 플라이스토세, 홀로세의 기록. 한국해양학회 추계학술대회.
- 박민우 외, 2024. 11. 시간 적분 기법에 따른 sigma 좌표계 내의 수평 압력 경사 오차 분석
- 남승일, 2024. 12. 하인리히 사건(Heinrich Events): 지질학적 현상에 대한 우연한 발견과 기후학적 의미. 한국제4기학회 추계학술대회.
- 김다해 외, 2024. 12. Characterization of sedimentary organic carbon in Kongsfjorden over recent centuries: Application of CuO oxidation products. 한국제4기학회 추계학술대회.

[2024년]-국제

- 남승일 외, 2024. 04. Depositional and paleoenvironmental changes in Arctic Svalbard fjords during the last deglaciation: Insights from Grain Size End Member Modeling. EGU General Assembly 2024.
- 장광철 외, 2024. 04. Tracing glacial weathering and pyrite oxidation using rare earth elements in sedimentary iron oxides. EGU General Assembly 2024.
- 남승일, 2024. 05. Improved stratigraphic framework of sediment cores for reconstructing mid to late Quaternary western Arctic glacial history. 2024 5th International PalaeoArc Conference.

- 김다해 외, 2024. 08. Variations in aged-soil derived organic carbon input into the Kongsfjord over recent centuries: application of CuO oxidation products. International Geological Congress (IGC 2024).
- 조영진 외, 2024. 08. Glacier-induced provenance change in Bellsund, Svalbard, during the Holocene. International Geological Congress (IGC 2024).
- 안영규 외, 2024. 08. Impact of current flow on the depositional environment in Kongsfjorden trough of Arctic Svalbard. International Geological Congress (IGC 2024).
- 장광철 외, 2024. 08. Brackish and anoxic environments in the western Arctic Ocean during the last glacial period: insights from authigenic calcites (IGC 2024).
- 남승일 외, 2024. 10. Quaternary cryospheric and oceanographic change in the Makarov Basin, Western Arctic. ArcSTRAT-Arctic Ocean Stratigraphic and Paleoclimate Conference
- 조영진 외, 2024. 10. Mid-Quaternary lithostratigraphy of the Chukchi Basin in the western Arctic Ocean and its significance for the reconstruction of a better-defined glacial history. ArcSTRAT-Arctic Ocean Stratigraphic and Paleoclimate Conference.

▪ 수상 실적

- 조영진, 2021. 05. 미래해양과학기술인상 우수상, 한국해양학회
- 장광철, 2021. 11. 젊은과학자상, 한국해양학회
- 안영규, 2022. 09. ISPS2022 Early Career Poster Awards. 한국해양과학기술원 부설 극지연구소
- 김다해, 2023. 04. 전재규 젊은과학자상. 한국해양과학기술원 부설 극지연구소
- 김다해, 2023. 12. 연수생 우수논문상. 한국해양과학기술원 부설 극지연구소

▪ 언론 홍보

- KBS 9시 뉴스 연중기획, 2022. 08. 16.-19 기후는 말한다(1, 2, 3, 4부)
- KBS 10시 시사기획 창, 2022. 08. 23. 고장난 심장, 북극의 경고
- Korea Joong-Ang Daily 영자신문, 2023. 02. 18. Scientists look to the past for clues about the Arctic's future
- 연합뉴스, 2023. 03. 14. 극지연 "북극 빙하 용융, 비가역적으로 빠르게 진행될 것."
- 동아사이언스, 2023. 03. 14. "북극 빙하, 더 빠르게 녹을 것...용융 임계점 넘어."
- SBS 뉴스, 2023. 03. 14. 극지연 "북극 빙하 용융, 비가역적으로 빠르게 진행될 것."
- 극지와 세계 웹진, 2023. 03. 31. 과거에서 해답을 얻기 위한 북극해 해저 심부시추

▪ 전문 인력 양성

- 김도형, 2022. 02. 서울대학교 지구환경과학부, 박사
- 조영진, 2022. 08. 제주대학교 지구해양과학과, 박사
- 조은아, 2023. 08. 고려대학교 생명공학과, 박사
- 이주현, 2023. 08. 포항공과대학교 환경공학과, 박사
- 배민지, 2023. 08. 인하대학교 해양과학과, 석사
- 조주희, 2024. 08. 서울대학교 지구환경과학부, 박사
- 차지현, 2025. 02. 충남대학교 지구환경 · 우주융합과학과, 박사(졸업 예정)
- 송윤지, 2025. 02. 인하대학교 해양과학과, 석사(졸업 예정)

다. 연구개발성과의 기대효과

- **과학기술적 기대효과**
  - 북극 스발바르 군도에서 과학 연구에 교두보 역할을 하는 노르웨이와 국제공동연구탐사를 통한 수월성 높은 북극연구 추진에 필요한 과학네트워크 구축 및 강화
  - 북극 및 스발바르 해역 국제공동해저시추사업 참여를 통한 북극에서 수행되는 거대지구과학연구 참여를 통한 지구과학분야 발전 및 국가위상 제고
  - 기후변화에 가장 민감한 스발바르 피오르드 환경에서 초고해상의 기후변화 기록 복원자료를 제공함으로써 미래 기후예측 모델에 필요한 자료 제공
  - 스발바르종합관측망구축(SIOS)사업 및 SIOS-KC(지식센터) 참여를 통한 국내 연구자들의 스발바르 과학연구 활성화 및 과학적 성과제고
  - 극지 환경 다매체 시료 내 유기독성물질 분석 기술 향상
  - 극지 피오르드 특성에 적합한 해수 유동모델 구축을 통한 극지환경 물질 순환 및 수괴 환경 변화 예측 모델 제시 가능

- **경제산업적 기대효과**
  - 북극권 국가와의 거대과학 연구를 통한 국제협력 네트워크 구축과 이를 활용한 자원 확보 경쟁에 대비
  - 극지 해역 오염 및 위해성 저감관리에 기초자료 제공
  - 수치모델 기반 정량적인 예측 자료제시를 통한, 경제적인 극지환경 개발 및 보존방안 수립용이

- **사회적 기대효과**
  - 기후변화에 민감한 북극 스발바르 지역에서 글로벌 이슈인 지구온난화의 영향에 대한 연구를 통한 전 지구적 파급효과 예측을 위한 기초자료 제공 등 국제사회 역할 이행
  - 2013년 5월 인정받은 옵저버 국가로서 북극권 이슈인 환경변화 공동대응으로 북극이사회 옵저버 국가 지위 유지에 기여
  - UN 국제수은협약에 대응 가능한 극지 수은 분석 자료 확보

- **성과확산 시나리오**
  - 스발바르 다양한 피오르드 해역 홀로세 및 인류세 고기후환경 복원 연구 추진기반 조성
  - 논문 및 학술발표를 통한 스발바르 기후환경변화 관련 연구역량 확대
  - 극지역 기후환경변화 복원 적용 가능한 다중프록시 개발 및 분석 전문가 배출
  - 극지환경 수치모델링 개발 기술
    - 표준화된 수치모델링 예측 기술을 통해 분산되어 있던 극지환경 유동 정보의 접근성이 용이해짐에 따라, 극지연구에 대한 원동력 제공

2. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- **스발바르 피오르드 탄성파 탐사자료 및 코어 퇴적물 확보**
  - 2022 및 2023년도 한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사를 통해 획득한 탄성파 탐사자료는 향후 피오르드 국제공동해양탐사프로그램(IODP)에 시추를 위한 기초자료로 활용
  - 노르웨이 지질조사(NGU)에서 시추코어 퇴적물에 대한 비파괴 분석(XRF core scanning, MSCL logging 등)을 통한 고해상도 기초자료 확보
  - 확보한 코어 퇴적물은 본 연구과제의 주요 목표인 스발바르 환경 복원 및 오염물질 거동 파악 연구에 활용할 뿐 아니라, 국내외 연구 협력을 통해 신약 연구 등의 중요 시료로 활용
    - 극지연구소 김한우 박사 연구팀(세부과제-4 책임)에 멀티코어 상층부 시료 제공을 통한 미생물 유전체 분리 활용 환북극권 미생물 유전체 라이브러리 제작 연구 협력 수행
    - 서울대학교 약학대학 오동찬 교수 연구팀에 멀티코어 표층 퇴적물 제공을 통한 신약 개발 연구 협력 수행
    - 노르웨이 베르겐 대학의 슈타인 교수팀에 멀티코어 제공을 통한 aDNA활용 국제공동연구 수행
    - 프랑스 보르도대학교 연구팀(EPOC)에 코어 퇴적물 내 pigment 및 benthic foraminifera 시료 제공을 통해 국제공동연구 수행

- **환경변화 진단 및 기후 복원 다중 프록시 분석 기술 확보**
  - 유기분자생체지표(알케논, 리그닌 페놀) 인프라 구축 및 분석법 확립
    - 과거 표층수온 복원에 사용되는 알케논 분석을 위해 다양한 환경시료(동해 코어 퇴적물, 배양 시료 등)를 활용하여 분석 인프라 구축 및 스발바르 환경에 최적화된 분석법 확립
    - 리그닌 페놀 분석 인프라 구축 및 분석법 확립으로 스발바르 8개 피오르드 표층퇴적물에 적용하여 탄소 안정동위원소, 방사성 탄소동위원소, 및 쇄설성 네오디뮴 동위원소 등 다양한 인자들과의 비교 연구를 통해 육상기원 유기물 거동 파악
  - 스발바르 피오르드의 탄성파층서 및 퇴적물 코어 다중 프록시 분석을 병행한 정밀 환경복원 연구를 논문화하여 투고 추진
  - 스발바르 빙해양 퇴적환경 정밀 복원을 위해 구축한 퇴적물의 입도 end-member 모델링 기법을 활용 여러 피오르드를 대상으로 연구 범위 확장할 예정
  - 스발바르 퇴적물 내 입도 분포의 end-member 분석 결과 및 네오디뮴 동위원소 분석 결과 기반 정밀 환경복원 연구를 논문화하여 투고 추진
  - 스발바르 표층 및 코어퇴적물에서 분석되어 활용된 철산화광물 이외의 광물조성 자료는, KPDC/PANGEA DB에 등록하여 국내·외 협력 연구에 대한 가능성을 확대할 예정
  - 신규 다중프록시 기술은 SCI 학술논문, 학술발표, 보고서 발간을 통한 홍보로 활용성 극대화
  - 확보한 환경인자 및 유해인자 자료의 DB화를 통한 다학제간 연구 증진

- **다중프록시 기반 스발바르 과거 환경 복원**
  - 스발바르 남동부 햄버그북타에서 소빙하기에 존재하였던 조수빙하의 최대 규모를 정확하게 제시하여, 향후 서지(surge) 유형인 빙하의 빠른 후퇴와 오늘날 지구온난화에 의해 가속화되는 빙하후퇴를 비교함으로써 향후 미래 예측 모델링 연구에 활용

- 콩스피오르드 코어 퇴적물(KH-17) 내 다양한 유기분자생체지표(HBIs, sterol, PIIIIP25, PBIP25 및 PDIP25 등) 분석을 통해 과거 스발바르 환경(수온, 해빙 및 유기물 거동)에 대한 새로운 해석이 가능한 정확한 자료 제공
- 지구온난화에 대한 빙하용융의 비선형적 거동에 대한 고환경적 증거를 최초로 제안함으로써 해당 가설을 정립하여 향후 빙하거동에 대한 미래 예측 모델링 연구 검증에 활용
- 미래 기후변화 예측에 사용되는 기후모델 검증에 필요한 현재 및 과거 고해상도 환경자료 제공

▪ **스발바르 코어 퇴적물 내 수은 안정동위원소 분석 결과**

- 기후변화로 인한 북극 연안 환경 변화에 따른 국내외 수은 관리 및 보건비용 절감 등 경제적인 효과와 더불어 국제적 환경 문제 및 UN 국제수은협약 등과 같은 지침(guideline)에 대응하기 위한 기초 자료로 활용
- 본 연구를 통해 도출한 수은 유입원 및 생지화학적 변동 결과는 북극을 포함한 다양한 환경에 적용, 연구 지역을 확대하고 국내외 연구진들과 공동 연구 추진에 활용
- 기후변화로 인한 북극 연안 환경 변화 및 미래 기후 예측 신뢰도 향상을 위해 필요한 기초자료 제공
- UN 국제수은협약의 Global Observation System for Mercury Isotopes(iGOS4M) DB 구축에 기여함으로써 극지 오염저감 정책에 대한 기초자료 제공

▪ **스발바르 다매체 환경 시료 내 유기독성물질 분석을 통한 북극 오염물질 거동 및 오염 역사 복원**

- 연구논문 작성/발표를 통한 기술 검증 및 성과 홍보(스발바르 군도 유해물질 관련 국제저명학술지(SCIE 상위 20%)에 논문 투고)
- 극지 유해물질의 분포, 오염원 및 거동 관련 최신 데이터베이스 구축하고 극지 환경 보호 및 오염저감 정책에 기초자료 제공

▪ **스발바르 연안 고해상도 수치모델링 구축**

- 50 m 이상의 정형격자를 사용하는 기존 연구에 비해, 본 과제에서 개발된 FVCOM 모델은 최소 15 m 이상의 고해상도 자료를 제공하여 보다 정교한 모델링 결과 제공 가능
- 과거-현재-미래에 대한 북극권 해양순환 모델링 결과를 활용하여 기후변화에 따른 미래 북극 환경의 여러 가지 시나리오에 대한 예측 자료로 활용
- 스발바르, 시베리아, 알래스카 등의 연안 침식으로 인한 유출 물질 환경 인자들(조석, 해류, 수온, 염분, 퇴적물 수송량 분석 자료)은 북극 기후 예측과 영향 평가와 연계하여 과학적인 근거 자료로 활용
- 수치모델과 현장 자료를 통해 분석된 연구 결과들은 과업 종료 후 5년 내 SCI 논문 2편 이상 게재에 활용될 예정임

KOPRI 극지연구소

구분(정량 및 정성적 성과 항목)			연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE		매년 상위 20% 이내 논문 1-2편 게재
	비SCIE		계상하지 않음
	계		5-8편
국내논문	SCIE		계상하지 않음
	비CSIE		계상하지 않음
	계		계상하지 않음
특허출원	국내		-
	국외		-
	계		-
특허등록	국내		-
	국외		-
	계		-
인력양성	학사		N/A
	석사		N/A
	박사		4 (한양대,인하대,충남대, 포항공대)
	계		4
사업화	상품출시		N/A
	기술이전		N/A
	공정개발		N/A
제품개발	시제품개발		N/A
비임상시험 실시			N/A
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상	N/A
		2상	N/A
		3상	N/A
	의료기기		N/A
진료지침개발			N/A
신의료기술개발			N/A
성과홍보			2
포상 및 수상실적			3
정성적 성과 주요 내용			- 한-노 스발바르 피오르드 국제공동탐사 추진을 통한 탐사자료, 시추코어 등 시료획득 - 스발바르 및 주변 현장조사 시료 및 자료획득 - 노르웨이, 독일 주도 북극 국제공동탐사 및 시추프로그램 참여 - 대국민 홍보(TV 및 신문, 유튜브, 대중강연 등) 과학기술 대중화 및 outreach 활동을 통한 대국민 인식 제고

KOPRI 극지연구소

3. 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항 (해당시 작성)

▪ **논문 성과**

– (세부3) SCI(E)급 국제 학술지에 논문 게재 승인

◆ '서북극해 과거 환경 복원' 관련 연구 성과 논문 심사 후 재투고 1건

▪ **국내 연구협업 추진**

– (세부3) 서울대학교 최경식 연구팀과의 협업을 통해 2021 및 2023년 하계 현장조사를 실시하여, 딕슨피오르드의 지형 변동성, 퇴적환경 진화 및 기후변화 양상 규명(보고서 내 2. 연구결과 항목 참조)

▪ **국제 연구협업 추진**

– (세부3) 기확보 퇴적물 코어 분석을 위한 노르웨이 트롬소 북극대학교(UiT) 방문 기간 중 UiT에서 2024년 10월 22-25일에 개최된 북극연구 전문가 회의 ArcSTRAT Conference에 참여 및 발표를 통해 스웨덴 스톡홀름 대학교, 독일 AWI 연구진과 국제협력 연구 협업 추진

– (세부3) CRYOCARB 국제공동프로젝트(노르웨이, 한국, 독일, 스웨덴 공동 4개국 참여) 수행을 통해, 2022년 여름탐사기간 동안 획득한 자료에 대한 공유 및 연구 협업 추진

– (세부3) 중국해양대학교(OUC, Ocean University of China in Qingdao)의 Key Laboratory of Marine Chemistry and Technology 학과의 Xiao Xiaotong 교수 연구팀과 스발바르 공동탐사연구 협의(2023. 10. 21-25)

– (세부3-위탁3) 북극권을 대상으로 수치모델링을 장기적으로 수행한 노르웨이 북극 연구소팀(NPI-Pedro)에서 개발한 ROMS 모델 결과와 본 과업의 북극권 모델 도메인 관련 협업 진행

▪ **언론 홍보 및 대중 강연**

– KBS 9시 뉴스 연중 기획 "기후는 말한다" 4회(2022.08.16.-19.) 및 시사기획 창 "고장난 심장, 북극의 경고" 스발바르 현장 동행 취재 방영(2022.08.23.)

– 북극 및 스발바르 기후위기 관련 국내 중 · 고, 대학생 및 출연연, 연구재단 대상 강연 11회 실시

◆ 울산 현대청운고 및 울산현대고, 인제 상남중, 인제 원통중, 인제 인제중

◆ 한국기술교육대학교, 충남대학교 해양환경학과, 한국화학연구원, 포항공과대학교

◆ 한국연구재단 공공기술단 직원대상 "북극이 우리에게 전해 주는 기후위기 메시지" 강연

◆ 중국해양대학 (칭다오) 초청(2023. 10.21-25) 강연

KOPRI 극지연구소

제 4 장

당초 연구계획 대비 주요 변경사항

KOPRI
극지연구소

※2024년도 전체 연구비 감액으로 인한 목표 하향 조정 및 내용 축소, 일부분의 목표만 달성토록 조정

구분	당초 계획(2024년)	협약 변경 내용(2024년)	변경 사유 및 조치사항	협약변경 승인일
연구목표	▪ RV Helmer Hanssen 스발바르 피오르드 국제공동 탐사, 지형/지층 자료 획득, 스발바르 시추 코어 5점 확보 ▪ 인류세 자연 시료 대상 검증된 기후환경복원 프록시 고해상도 분석(최소 2건 이상 적용) ▪ 고해상도 다중 프록시 분석 기반 인류세 스발바르 환경변화 정밀 복원 및 이해 ▪ 3차년도 결과와의 비교를 통한 스발바르 환경 변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 평가 (RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 2건) (위탁-1 포항공대) ▪ 지구온난화로 인한 스노우팩 감소가 스발바르 내 대기 수은 거동에 미치는 영향 파악 및 예측 ▪ 스발바르 퇴적물 및 스노우팩 수은 안정동위원소 비 결과 값 정리 및	〈해당내용 변경없이 수행〉 ▪ 인류세 자연 시료 대상 검증된 기후환경복원 프록시 고해상도 분석(최소 2건 이상 적용) ▪ 고해상도 다중 프록시 분석 기반 인류세 스발바르 환경변화 정밀 복원 및 이해 〈해당내용 축소〉 ▪ RV Helmer Hanssen 피오르드 국제공동 탐사 취소에 따른 스발바르 탐사자료 확보 중단(시추 코어 5점 포함) - 기확보된 중력 시추코어 부시료 채취 및 암층서 분석을 위한 UiT/NGU 방문 대체(변경) ▪ 기후환경복원 프록시 고해상도 분석 1건 축소 ▪ 3차년도 결과 비교 및 스발바르 환경 변화에 대한 학회 참여/발표 1건축소 (위탁-1 포항공대) 〈해당내용 변경없이 수행〉 ▪ 분석연구를 통한 지점별, 시간별 및 일조량에 따라 변동되는 스발바르 스노우팩 수은 농도 및 안정동위원소 비 확보 ▪ 지구온난화로 인한 스노 우팩 감소가 스발바르 내 대기	연구비 감액으로 인한 국제공동탐사 추진 중단 및 목표(분석 및 학회 참여/발표) 하향 조정(주관기관 극지연 및 위탁기관 공통)	연구비 감액으로 인한 목표 하향 조정 및 내용 축소, 일부분의 목표만 달성토록 조정

	종합 해석 ▪ (RFP 충족) SCI급 논문 1편(상위 20% 이내), 국제학술대회 발표 1건 (위탁-2 충남대) ▪ 생물 시료 내 유기독성물질 농도 및 조성 분석을 통한 생물축적 평가 및 농축확대 가능성 제시(시료 > 20, RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건) (위탁-3 인하대) ▪ 스발바르 모델결과 기반 '조수빙하 유출 물질 순환 기작' 주제의 국외학술지 1편	수은 거동에 미치는 영향 파악 및 예측(RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건) 〈해당내용 축소〉 ▪ 스발바르 스노우팩(표층 시료 총 12개) 및 대기(총 10개) 시료 확보(총 22개 분석, 2지점으로 한정) 및 분석량 축소 ▪ In-situ flux chamber 현장 실험연구 지점 축소 ▪ 시료 확보를 위해 '24년 초 다산 북극과학기지 방문 (위탁-2 충남대) 〈해당내용 축소〉 ▪ 북극 스발바르 이스피오르드 시추 퇴적물 1-2점(시료 30개 이상) 유기독성물질의 농도 및 조성 분석 ▪ 스발바르 기확보 시추 퇴적물 시료 내 유기독성물질의 오염역사, 오염원의 장기 변동 및 오염경로 추적 ▪ 스발바르와 주변 지역 내 유기독성 물질의 수직 및 수평 분포 관련 학술발표 1건 (위탁-3 인하대) 〈해당내용 변경없이 수행〉 ▪ 스발바르 모델결과 기반 '조수빙하	(위탁-2 충남대) ▪ 북극 서식 상위포식자 시료 확보에 어려움이 존재함에 따라 차년도 연구 계획은 기존에 확보한 스발바르 코어 퇴적물 시료를 대상으로 진행하고자 함 (위탁-3 인하대) ▪ 해저 표층퇴적물질의 이동패턴에 관한 현장	

KOPRI 극지연구소

	(상위 20% 이내) ▪ 대상 연안 내 3차원 해수 순환 패턴 분석을 통한 물질 수송 규명 ▪ 수치모델 민감도 테스트를 통한 주요외력(바람, 수온, 염분)과 해류와의 상관성 제시 ▪ 3차원 입자 추적을 통한 스발바르 연안 내 물질들의 체류시간 규명	유출 물질 순환 기작' 주제의 국외학술지 1편 (상위 20% 이내) ▪ 3차원 입자 추적을 통한 스발바르 연안 내 물질들의 체류시간 규명 〈해당내용 축소/변경〉 ▪ 스발바르 연안 해역 중심의 모델 구축과 주변 해류 패턴 파악을 주제로 한 학술대회 발표 1건 ▪ 조수빙하 융빙수 유출 관련 수온 및 염분 자료 수집 및 모델 검증 수행	조사 추가로 목표조정 ▪ 대상 연안 내 3차원 해수 순환 패턴 분석을 통한 물질 수송 규명(2단계 1차년도 목표로 변경) ▪ 스발바르 연안 해역 중심의 모델 구축과 주변 해류 패턴 파악을 주제로 한 학술대회 발표 1건 (2단계 2차년도 목표로 조정) ▪ 수치모델 민감도 테스트를 통한 주요외력 (바람, 수온, 염분)과 해류와의 상관성 제시를 "조수빙하 융빙수 유출 관련 수온 및 염분 자료 수집 및 모델 검증 수행"으로 대체	
연구비	1,500,000천원	760,000천원	정부 RnD예산 삭감으로 인한 연구비 축소	2024.03.22.
연구기간	2021. 04. 27. – 2024.12.31.	2021. 04. 27. – 2025.03.31.	본 과제에서 수행하는 기후변화에 따른 북극 스발바르 과거와 현재 환경변화 및 영향 진단 연구의 성공적인 연구활동 마무리	2024.11.20

KOPRI 극지연구소

별첨자료 (참고 문헌)

KOPRI
극지연구소

Ahn et al., 2024. Post-glaciation depositional changes in Wijdefjorden, northern Svalbard, using grain-size end-member modelling, Mar. Geol. 472, 107306.

Allaart et al., 2020. Late Quaternary glacier and sea-ice history of northern Wijdefjorden, Svalbard. Boreas, 49, 417-437.

Anderson et al., 2000. Chemical weathering in the foreland of a retreating glacier. Geochim. Cosmochim. Acta 64, 1173-1189.

Appleby & Oldfield, 1978. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210Pb to the sediment. Catena 5, 1-8.

Arrigo et al., 2008. Coastal Southern Ocean: A strong anthropogenic CO2 sink. Geophys. Res. Lett. 35.

Ashley, 1978. Interpretation of polymodal sediments. J. Geol. 86, 411-421.

Aslam et al., 2019. Trace elements and polychlorinated biphenyls (PCBs) in terrestrial compartments of Svalbard, Norwegian Arctic. Sci. Total. Environ. 685, 1127-1138.

Baeten et al., 2010, Late Weichselian and Holocene sedimentary environments and glacial activity in Billefjorden, Svalbard, in Howe, J.A., Austin, W.E.N., Forwick, M. and Paetzel, M., eds., Fjord Systems and Archives: Geological Society of London, Special Publication 344, 207-223.

Barrett et al. 2021. Does retrogression always account for the large volume of submarine megaslides? Evidence to the contrary from the Tampen Slide, offshore Norway. J. Geophys. Res.: Solid Earth, 126, e2020JB020655.

Bartels et al., 2017. Atlantic Water advection vs. glacier dynamics in northern Spitsbergen since early deglaciation. Clim. Past 13, 1717-1749.

Batchelor & Dowdeswell, 2015. Ice-sheet grounding-zone wedges (GZWs) on high-latitude continental margins. Mar. Geol. 363, 65-92.

Bayon et al., 2004. Sedimentary Fe-Mn oxyhydroxides as paleoceanographic archives and the role of aeolian flux in regulating oceanic dissolved REE. Earth Planet. Sci. Lett. 224, 477-492.

Bayon et al., 2009, Determination of rare earth elements, Sc, Y, Zr, Ba, Hf and Th in geological samples by ICP-MS after Tm addition and alkaline fusion. Geostandard. Geoanalytical Res. 33, 51-62.

Bayon et al., 2015. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited. Geochim. Cosmochim. Acta 170, 17-38.

Bayon et al., 2020. Rare earth element and neodymium isotope tracing of sedimentary rock weathering. Chem. Geol. 553, 119794.

Belt et al., 2007. A novel chemical fossil of palaeo sea ice: IP25. Org. Geochem. 38, 16-27.

Belt et al., 2012. A reproducible method for the extraction, identification and quantification of the Arctic Sea ice proxy IP25 from marine sediments. Ana. Methods, 4, 705.

Belt et al., 2017. Identification of C25 highly branched isoprenoid (HBI) alkenes in diatoms of the genus Rhizosolenia in polar and sub-polar marine phytoplankton, Org. Geochem.110, 65-72.

Beyer & Biziuk, 2009. Environmental fate and global distribution of polychlorinated biphenyls Rev. Environ. Contam. Toxicol. 201, 137-158.

Bhatia et al., 2013. Greenland meltwater as a significant and potentially bioavailable source of iron to the ocean. Nat. Geosci. 6, 274.

Bianchi et al. (2018). Centers of organic carbon burial and oxidation at the land-ocean interface. Org. Geochem. 115,138-155.

Bianchi et al. 2020. Fjords as aquatic critical zones (ACZs). Earth-Sci. Rev. 203,103145.

Blaauw & Christen, 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. Bayesian Anal. 6, 457-474.

Błaszczyk et al. 2013. Fluctuations of tidewater glaciers in Hornsund Fjord (southern Svalbard) since the beginning of the 20th century. Polar Res. 34, 327-352.

Błaszczyk et al., 2019, Freshwater input to the Arctic fjord Hornsund (Svalbard): Polar Res. 38, 3506.

Blattmann et al., 2019. Sulphuric acid-mediated weathering on Taiwan buffers geological atmospheric carbon sinks. Sci. Rep. 9, 2945.

Blott & Pye, 2001, GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Earth Surf. Process. Landf. 26, 1237-1248.

Blum & Bergquist 2007. Reporting of variations in the natural isotopic composition of mercury. Anal. Bioanal. Chem. 388, 353-359.

Böhm et al., 2015. Strong and deep Atlantic meridional overturning circulation during the last glacial cycle. Nature 517, 73-76.

Box et al., 2009. Greenland ice sheet surface air temperature variability: 1840-2007. J. Clim. 22, 4029-4049.

Boyle et al., 1977. The mechanism of iron removal in estuaries. Geochim. Cosmochim. Acta 41, 1313-1324.

Brassel et al., 1986. Molecular stratigraphy: a new tool for climatic assessment. Nature, 320, 129-133.

Brassell, 2014. Climatic influences on the Paleogene evolution of alkenones. Paleoceanography, 29, 255-272.

KOPRI 극지연구소

Briner et al., 2009. Rapid early Holocene retreat of a Laurentide outlet glacier through an Arctic fjord. Nat. Geosci. 2, 496–499.

Broecker, 2001, Was the medieval warm period global? Science, 291, 1497–1499.

Brogi et al. 2019. Seasonal differences in dissolved organic matter properties and sources in an Arctic fjord: Implications for future conditions. Sci. Total Environ. 694, 133740.

Buizert et al., 2018. Greenland-wide seasonal temperatures during the last deglaciation. Geophys. Res. Lett. 45, 1905–1914.

Calmels et al., 2007. Sustained sulfide oxidation by physical erosion processes in the Mackenzie River basin: Climatic perspectives. Geology 35, 1003–1006.

Chauhan et al., 2016. Glaciomarine sedimentation and bottom current activity on the north–western and northern continental margins of Svalbard during the late Quaternary. Geo–Mar. Lett. 36, 81-99.

Chen et al., 2003. An unstructured grid, finite–volume, three–dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. J. Atmos. Ocean. Technol. 20, 159-186.

Chen et al., 2016. Circulation in the Arctic Ocean: Results from a high–resolution coupled ice–sea nested Global–FVCOM and Arctic–FVCOM system. Prog. Oceanogr. 141, 60–80.

Ćmiel et al. 2004. Geochemical and petrographic properties of some Spitsbergen coals and dispersed organic matter. Int. J. Coal Geol. 57,77-97.

Conte & Eglinton, 1993. Alkenone and alkenoate distributions within the euphotic zone of the eastern North Atlantic: correlation with production temperature. Deep Res Part I 40, 1935-1961.

Cottier et al., 2005. Water mass modification in an Arctic fjord through cross-shelf exchange: The seasonal hydrography of Kongsfjorden, Svalbard. J. Geophys. Res. Oceans, 110(C12)

Cottier et al., 2007. Wintertime warming of an Arctic shelf in response to large-scale atmospheric circulation. Geophys. Res. Lett. 34, 10.

Cottier et al., 2010. Arctic fjords: a review of the oceanographic environment and dominant physical processes, in: Austin, W.E.N. Forwick, M. Paetzel. M. (Eds.), Fjord Systems and Archives, Geological Society, London, 344, 35-50.

D' Andrea, W. J., et al. (2012). Mild Little Ice Age and unprecedented recent warmth in an 1800-year lake sediment record from Svalbard. Geology, 40(11),1063-1066

D' Angelo, A., et al. (2018). Multi-year particle fluxes in Kongsfjorden, Svalbard. Biogeosciences, 15,5343-5363.

Dallman & Elvevold, 2015. Bedrock Geology. Geoscience Atlas of Svalbard. Report

Series, 148, 133-173.
Dallmann, 2015. Geoscience Atlas of Svalbard. Norsk Polarinsitutt (Framsenteret/Norwegian Polar Institute). 148, 133-197.
Divine et al., 2011, Thousand years of winter surface air temperature variations in Svalbard and northern Norway reconstructed from ice-core data: Polar Res. 30, 7379.
Douglas & Blum, 2019. Mercury isotopes reveal atmospheric gaseous mercury deposition directly to the Arctic coastal snowpack. Environ. Sci. Technol. Lett. 6, 235-242.
Du et al., 2020. Massive pollutants released to Galveston Bay during Hurricane Harvey: Understanding their retention and pathway using Lagrangian numerical simulations. Sci. Total Environ. 704, 135364.
Elliot et al., 2001, Coherent patterns of ice-rafted debris deposits in the Nordic regions during the last glacial (10-60 ka): Earth Planet. Sci. Lett. 194, 151-163.
Elverhøi et al., 1983. Glaciomarine sedimentation in a modern fjord environment, Spitsbergen. Polar Res. 1(2), 127-150.
Enrico et al., 2017. Holocene atmospheric mercury levels reconstructed from peat bog mercury stable isotopes. Environ. Sci. Technol. 51, 5899-5906.
Etourneau et al., 2010. Intensification of the Walker and Hadley atmospheric circulations during the Pliocene - Pleistocene climate transition. Earth Planet. Sci. Lett. 297, 103-110.
Farnsworth et al., 2016. Over 400 previously undocumented Svalbard surge-type glaciers identified. Geomorphology 264, 52-60.
Farnsworth et al., 2020. Holocene glacial history of Svalbard: status, perspectives and challenges. Earth-Sci. Rev. 208, 103249.
Filippova et al., 2016. Alkenone paleothermometry in the North Atlantic: A review and synthesis of surface sediment data and calibrations. Geochem. Geophys. Geosyst. 17, 1370-1382.
Fjeldskaar et al., 2018. Glaciers on Svalbard survived the Holocene thermal optimum. Quat. Sci. Rev. 199, 18-29.
Flink et al., 2017. Past ice flow in Wahlenbergfjorden and its implications for late Quaternary ice sheet dynamics in northeastern Svalbard. Quat. Sci. Rev. 163, 162-179.
Flink et al., 2018, Holocene glacial evolution of Mohnbukta in eastern Spitsbergen. Boreas, 47, 390-409.
Folk & Ward, 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. J. Sediment. Res. 27(1), 3-26.

KOPRI 극지연구소

Forman et al., 2004. A review of postglacial emergence on Svalbard, Franz Josef Land and Novaya Zemlya, northern Eurasia. Quat. Sci. Rev. 23, 1391–1434.

Forwick & Vorren, 2009. Late Weichselian and Holocene sedimentary environments and ice rafting in Isfjorden, Spitsbergen. Palaeogeo. Palaeoclim. Palaeoecol. 280, 258–274.

Forwick et al., 2010, Spatial and temporal influence of glaciers and rivers on the sedimentary environment in Sassenfjorden and Tempelfjorden, Spitsbergen, in Howe, J.A., Austin, W.E.N., Forwick, M. and Paetzel, M., eds., Fjord Systems and Archives: Geological Society of London, Special Publication 344, 163–193.

Gal et al., 2018. Assessing the saponification effect on the quantification of long chain alkenones and the U37K′ paleothermometer. Geochem. J. 52, 497–507.

Gilbert, 1990, Rafting in glacimarine environments in Dowdeswell, J.A. and Scourse, J.D., eds., Glacimarine Environments: Processes and Sediments: Geological Society of London, Special Publication 53, 105–120.

Goldberg, 1963. Geochronology with 210Pb. In: Radio- active Dating. Int. Atom. Energy Ag. Vienna: 121–131.

Gong et al., 2018. Spatial variation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from rivers in hilly regions of Southern China in the wet and dry seasons. Ecotox. Environ. Safe. 156, 322–329.

Goni et al., 1992. Lignin dimers: structures, distribution, and potential geochemical applications. Geochim. Cosmochim. Acta 56, 4025-4043.

Goni et al., 2005. The supply and preservation of ancient and modern components of organic carbon in the Canadian Beaufort Shelf of the Arctic Ocean. Mar. Chem. 93, 53–73.

Görlich, 1986, Glacimarine sedimentation of muds in Hornsund fjord, Spitsbergen: Annales Societatis Geologorum Poloniae, 56, 433–477.

Grabiec et al., 2018, Coast formation in an Arctic area due to glacier surge and retreat: The Hornbreen-Hambergbreen case from Spistbergen, Earth Surf. Process. Landf. 43, 387–400.

Hald et al., 2004. Holocene paleoceanography and glacial history of the West Spitsbergen area, Euro–Arctic margin. Quat. Sci. Rev. 23, 2075–2088.

Haley et al., 2004. Rare earth elements in pore waters of marine sediments. Geochim. Cosmochim. Acta 68, 1265–1279.

Hawkings et al., 2014. Ice sheets as a significant source of highly reactive nanoparticulate iron to the oceans. Nat. Commun. 5, 1–8.

Hawkings et al., 2020. Enhanced trace element mobilization by Earth’ s ice sheets. Proc. Natl. Acad. Sci. 117, 31648–31659.

Heaton et al., 2020. Marine20—the marine radiocarbon age calibration curve (0-55,000 cal BP). Radiocarbon, 62, 779—820.

Hedges, J. I., et al. (1979). The characterization of plant tissues by their lignin oxidation products. Geochim. Cosmochim. Acta 43, 1803-1807.

Hedges, J. I., et al. (1982). Characterization of lignin by gas capillary chromatography of cupric oxide oxidation products. Anal. Chem. 54, 174-178.

Herbert, 2001. Review of alkenones calibrations (culture, water column, and sediments). Geochem. Geophys. Geosyst. 2.

Holland et al., 2008. Acceleration of Jakobshavn Isbræ triggered by warm subsurface ocean waters. Nat. Geosci. 1, 659—664.

Holoubek et al., 2011. GENASIS information system: A global environmental assessment of persistent organic pollutants, International Symposium on Environmental Software Systems.

Holz et al., 2007. Variability in terrigenous sedimentation processes off northwest Africa and its relation to climate changes: Inferences from grain—size distributions of a Holocene marine sediment record. Sediment. Geol. 202, 499—508.

Hong et al., 2015. Effect—directed analysis and mixture effects of AhR—active PAHs in crude oil and coastal sediments contaminated by the Hebei Spirit oil spill. 199, 110—118.

Hong et al., 2016, Are styrene oligomers in coastal sediments of an industrial area aryl hydrocarbon receptor agonists? Environ. Pollut. 213, 913—921.

Hopwood et al., 2016. Seasonal changes in Fe along a glaciated Greenlandic fjord. Front. Earth Sci. 4.

Howe et al., 2010. Fjord systems and archives: a review. Geological Society, London, Special Publications, 344, 5—15.

Hughes et al., 2016. The last Eurasian ice sheets-a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1. Boreas 45, 1—45.

Husum et al. 2019. The marine sedimentary environments of Kongsfjorden, Svalbard: An archive of polar environmental change. Polar Res. 38, 3380.

Ikonomou et al., 2002. PCB levels and congener patterns from Korean municipal waste incinerator stack emissions. Chemosphere 49, 205—216.

Isobe et al., 2001. Distribution and behavior of nonylphenol, octylphenol, and nonylphenol monoethoxylate in Tokyo metropolitan area: their association with aquatic particles and sedimentary distributions. Environ. Sci. Technol. 35, 1041—1049.

Ito & Kudoh, 1997. Characteristics of water in Kongsfjorden, Svalbard, Proc. NIPR

KOPRI 극지연구소

Symp. Polar Meteorol. Glaciol., 11, 211-232.
Jacobsen & Wasserburg, 1980. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites, Earth and Planetary Science Letters, 50, 139-155
Jakobsson et al., 2020. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0. Sci. Data 7, 176.
Jang et al., 2020. Neodymium isotope constraints on chemical weathering and past glacial activity in Svalbard. Earth Planet. Sci. Lett. 542, 116319.
Jang et al., 2021. Glacial and environmental changes in northern Svalbard over the last 16.3 ka inferred from neodymium isotopes. Glob. Planet. Chang. 201, 103483.
Jang et al., 2023. Non-linear response of glacier melting to Holocene warming in Svalbard recorded by sedimentary iron (oxyhydr)oxides. Earth Planet. Sci. Lett. 607, 118054.
Jang et al., 2024, A distinctive rare earth element signature for pyrite oxidation and glacial weathering. Chem. Geol. 660, 122167.
Jia et al., 2019. Grain size characteristics of the carbonate-free fraction of surface sediments from the Southwest Indian Ridge area and its geological significance. Acta Oceanol. Sin. 38, 34-43.
Jiao et al., 2009. Persistent toxic substances in remote lake and coastal sediments from Svalbard, Norwegian Arctic: Levels, sources and fluxes. Environ. Pollut. 157, 1342-1351.
Jiskra et al., 2017. Source tracing of natural organic matter bound mercury in boreal forest runoff with mercury stable isotopes. Environ. Sci.: Processes Impacts, 19, 1235-1248.
Joe et al., 2022. Glacial history and depositional environments in little Storfjorden and Hambergbukta of Arctic Svalbard since the younger drays. Front. Earth Sci. 10, 2211.
Jonkers et al., 2012. Temporal offsets between surface temperature, ice-rafting, and bottom flow speed proxies in the glacial (MIS 3) northern North Atlantic. Quat. Sci. Rev. 48, 43-53.
Joo et al., 2019. Holocene environmental changes in Dicksonfjorden, west Spitsbergen, Svalbard. Polar Res. 38, 3426.
Jørgensen et al., 2021, Biogeochemistry and microbiology of high Arctic marine sediment ecosystems-Case study of Svalbard fjords. Limnol. and Oceanogr. 66, 273-S292.
Kaufman & Broadman, 2023, Revisiting the Holocene global temperature conundrum. Nature, 614, 425-435.

KOPRI 극지연구소

Keil et al., 1994. Mineralogical and textural controls on the organic composition of coastal marine sediments: Hydrodynamic separation using SPLITT-fractionation, Geochim. Cosmochim. Acta 58, 879-893.

Kempf et al., 2013. Late Weichselian and Holocene sedimentary paleoenvironment and glacial activity in the high-arctic van Keulenfjorden, Spitsberge. Holocene. 23, 1607-1618.

Kim et al., 2005. Spatial characteristics of meiobenthic community of Kongsfjorden sediment in the Svalbard island, the Arctic Sea. Ocean Polar Res. 27, 299-309.

Kim et al., 2011. Large ancient organic matter contributions to Arctic marine sediments (Svalbard). Limnol. Oceanogr. 56, 1463-1474.

Kim et al., 2020. Input of terrestrial organic matter linked to deglaciation increased mercury transport to the Svalbard fjords. Sci. Rep. 10, 3446.

Kim et al., 2021. Spatial distribution and source identification of traditional and emerging persistent toxic substances in the offshore sediment of South Korea. Sci. Total Environ. 789, 147996.

Kim et al., 2022. Changes in the burial efficiency and composition of terrestrial organic carbon along the Mackenzie Trough in the Beaufort Sea. Estuar. Coast. Shelf Sci. 275, 107997

Kim et al., 2022. Morphodynamic evolution of paraglacial spit complexes on a tide-influenced Arctic fjord delta (Dicksonfjorden, Svalbard). Mar. Geol. 447, 106800.

Kim et al., 2023, Large contributions of petrogenic and aged soil-derived organic carbon to Arctic fjord sediments in Svalbard. Sci. Rep. 13, 17935.

Knies & Martinez, 2009. Organic matter sedimentation in the western Barents Sea region: Terrestrial and marine contribution based on isotopic composition and organic nitrogen content. Nor. J. Geol. 89, 79-89.

Kozak et al., 2013. Analytical studies on the environmental state of the Svalbard Archipelago provide a critical source of information about anthropogenic global impact. Trac-Trend. Anal. Chem. 50, 107-126.

Kumar et al., 2016. Evidence of anomalously low δ13C of marine organic matter in an Arctic fjord. Sci. Rep. 6, 1-9.

Kumar et al., 2018. Geochemistry and provenance study of sediments from Krossfjorden and Kongsfjorden, Svalbard (Arctic Ocean). Polar Sci. 18, 72-82.

Kvam et al., 2018. Deposits and Processes on the Tide-influenced Fjordhead Delta in Dicksonfjorden, Svalbard. Unpublished master thesis. The Arctic University of Norway.

Kwon & Selin, 2016. Uncertainties in atmospheric mercury modeling for policy

KOPRI 극지연구소

evaluation. Curr. Pollut. Rep. 2, 103–114.
Kwon et al., 2020. Mercury stable isotopes for monitoring the effectiveness of the Minamata Convention on Mercury. Earth-Sci. Rev. 203, 103111.
Lacan & Jeandel, 2004. Neodymium isotopic composition and rare earth element concentrations in the deep and intermediate Nordic Seas: Constraints on the Iceland Scotland Overflow Water signature. Geochem. Geophys. Geosyst. 5.
Łącka et al., 2015. Late Weichselian and Holocene palaeoceanography of Storfjordrenna, southern Svalbard. Clim. Past 11, 587–603.
Landvik & Salvigsen, 1987. The Late Weichselian and Holocene shoreline displacement on the west-central coast of Svalbard, Polar Res. 5, 29–44.
Landvik et al., 1992. Weichselian stratigraphy and palaeoenvironments at Bellsund, western Svalbard. Boreas 21, 335–358.
Landvik et al., 2005. Rethinking Late Weichselian ice-sheet dynamics in coastal NW Svalbard. Boreas 34, 7–24.
Larkin et al., 2021. Constraints on the source of reactive phases in sediment from a major Arctic river using neodymium isotopes. Earth Planet. Sci. Lett. 565, 116933.
Larsen et al., 2016. A Younger Dryas re-advance of local glaciers in north Greenland. Quat. Sci. Rev. 147, 47–58.
Larsen et al., 2018. Lateglacial and Holocene glacier activity in the Van Mijenfjorden area, western Svalbard. arktos, 4, 1–21.
Laukert et al., 2017, Ocean circulation and freshwater pathways in the Arctic Mediterranean based on a combined Nd isotope, REE and oxygen isotope section across Fram Strait. Geochim. Cosmochim. Acta 202, 285–309.
Le Roux et al., 2007. Sediment transport patterns determined from grain size parameters: Overview and state of the art. Sediment. Geol. 202, 473–488.
Lee et al., 2023. Distributions and potential sources of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in the glacimarine sediments of Arctic Svalbard. Mar. Pollut. Bull. 189, 114740.
Lefauconnier & Hagen, 1991. Surging and calving glaciers in eastern Svalbard. Norsk Polarinsitutt Meddelelser (Norwegian Polar Institute). 116, 1–130.
Lemagie et al., 2015. A comparison of bulk estuarine turnover timescales to particle tracking timescales using a model of the Yaquina Bay estuary. Estuaries Coasts. 38, 1797-1814.
León et al., 2021. Mine waters as a secondary source of rare earth elements worldwide: The case of the Iberian Pyrite Belt. J. Geochem. Explor. 224, 106742.
Li & Li., 2018. Sediment transport processes in the Pearl River Estuary as revealed by

grain-size end-member modeling and sediment trend analysis. Geo-Mar. Lett. 38, 167-178.

Lindner & Marks, 1993, Middle and Late Quaternary evolution of the Hornsund region, south Spitsbergen. Pol. Polar Res. 14, 275-292.

Longo et al., 2013. Unprecedented separation of long chain alkenones from gas chromatography with a poly(trifluoropropylmethylsiloxane) stationary phase. Org. Geochem., 65, 94-102.

Lucchi et al., 2013. Postglacial sedimentary processes on the Storfjorden and Kveithola trough mouth fans: Significance of extreme glacimarine sedimentation. Glob. Planet. Change. 111, 309-326.

Luoto et al., 2018. Synchronized proxy-based temperature reconstructions reveal mid- to late Holocene climate oscillations in High Arctic Svalbard. J. Quat. Sci. 33, 93-99.

Mangerud & Landvik, 2007. Younger Dryas cirque glaciers in western Spitsbergen: smaller than during the Little Ice Age, Boreas 36, 278-285.

Mangerud et al., 2006. Marine 14C reservoir ages for 19th century whales and molluscs from the North Atlantic. Quat. Sci. Rev. 25, 3228-3245.

Mann et al., 2009, Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. Science 326, 1256-1260.

Margold et al., 2018. Reconciling records of ice streaming and ice margin retreat to produce a palaeogeographic reconstruction of the deglaciation of the Laurentide Ice Sheet. Quat. Sci. Rev. 189, 1-30.

Martin et al., 2010. Extraction of Nd isotopes from bulk deep sea sediments for paleoceanographic studies on Cenozoic time scales. Chem. Geol. 269, 414-431.

McCave et al., 1995. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: Parameters for palaeocurrent speed and palaeoceanography. Paleoceanography 10, 593-610.

McGovern et al., 2020. Terrestrial inputs drive seasonality in organic matter and nutrient biogeochemistry in a high Arctic fjord system (Isfjorden, Svalbard). Front. Mar. Sci., 7, 542563.

McLaren, 1981. An interpretation of trends in grain size measures. J. Sediment. Res. 51, 611-624.

Menze et al., 2020. Productive detours-Atlantic water inflow and acoustic backscatter in the major troughs along the Svalbard shelf. Prog. Oceanogr. 188, 102447.

Meslard et al., 2018. Suspended particle dynamics and fluxes in an Arctic fjord (Kongsfjorden, Svalbard). Estuar. Coast. Shelf Sci. 204, 212-224.

Møller et al., 2006. Late-Holocene environment and climatic changes in Ameralik

Fjord, southwest Greenland: Evidence from the sedimentary record. Holocene 16, 685–695.

Moon et al., 2008. Source apportionment of fine carbonaceous particles by positive matrix factorization at Gosan background in East Asia. Environ. Int. 34, 654–664.

Moskalik et al., 2018. Morphological characterization of Recherchefjorden (Bellsund, Svalbard) using marine geomorphometry. Pol. Polar Res. 39, 99–125.

Muir et al., 2003. Bioaccumulation of PCBs and chlorinated pesticides in seals, fishes and invertebrates from the White Sea, Russia. Sci Total Environ. 306, 111–131.

Muller et al., 1998. Calibration of the alkenone paleotemperature index UK’37 based on core–tops from the eastern South Atlantic and the global ocean. Geochim. Cosmochim. Acta 62, 1757-1772.

Muller et al., 2011. Towards quantitative sea ice reconstructions in the northern North Atlantic: A combined biomarker and numerical modelling approach. Earth Planet. Sci. Lett. 306, 137–148.

NGRIP community members, 2004. High–resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. Nature 431, 147-151.

Nielsen et al., 2018. Reconstruction of ice sheet retreat after the Last Glacial mximum in Storfjorden, southern Svalbard. Mar. Geol. 402, 228–243.

Nilsen et al., 2016. A simple shelf circulation model: Intrusion of Atlantic water on the West Spitsbergen shelf. J. Phys. Oceanogr. 46, 1209–1230.

Nittrouer et al., 1979. The use of Pb–210 geochronology as a sedimentological tool: application to the Washington continental shelf. Mar. Geol. 31, 279–316.

Noormets & Kirchner, 2023. Commentary: Glacial history and depositional environments in little Storfjorden and Hambergbukta of Arctic Svalbard since the younger dryas. Front. Earth Sci. 11, 1186972.

Noormets et al., 2021. Glacial dynamics and deglaciation history of Hambergbukta reconstructed from submarine landforms and sediment cores, SE Spitsbergen, Svalbard. Boreas. 50, 29–50.

Novak et al., 2022. U38MEK′ Expands the linear dynamic range of the alkenone sea surface temperature proxy. Geochim. Cosmochim. Acta. 328, 207–220.

Nuth et al., 2013, Decadal changes from a multi–temporal glacier inventory of Svalbard. Cryosphere, 7, 1603–1621.

Nuwer & Keil, 2005. Sedimentary organic matter geochemistry of Clayoquot Sound, Vancouver Island, British Columbia, Limnol. Oceanogr., 50, 1119-1128.

Ó Cofaigh & Dowdeswell, 2001. Laminated sediments in glacimarine environments: diagnostic criteria for their interpretation. Quat. Sci. Rev. 20, 1411-1436.

Osika et al., 2022, Holocene ice-free strait followed by dynamic Neoglacial fluctuations: Hornsund, Svalbard. Holocene, 32, 664-679.

Ottesen et al., 2017. The geomorphic imprint of glacier surges into open-marine waters: Examples from eastern Svalbard. Mar. Geol. 392, 1-29.

Pälli et al., 2003, Glacier changes in southern Spitsbergen, Svalbard,1901-2000. Annals of Glaciology, 37, 219-225.

Paterson & Heslop, 2015. New methods for unmixing sediment grain size data. Geochem. Geophys. Geosyst. 16, 4494-4506.

Pattyn et al., 2018. The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5℃ global warming. Nat. Clim. Change 8, 1053-1061.

Pawłowska et al., 2016, Palaeoceanographic changes in Hornsund fjord (Spitsbergen, Svalbard) over the last millennium: new insights from ancient DNA. Clim. Past 12, 1459-1472.

Pedrosa et al., 2011. Seabed morphology and shallow sedimentary structure of the Storfjorden and Kveithola trough-mouth fans (North West Barents Sea). Mar. Geol. 286, 65-81.

Pedersen et al., 2015. Chemometric analysis for pollution source assessment of harbour sediments in Arctic locations. Water Air Soil Pollut. 216, 150.

Pérez-López et al., 2010. Rare earth element geochemistry of sulphide weathering in the São Domingos mine area (Iberian Pyrite Belt): A proxy for fluid-rock interaction and ancient mining pollution. Chem. Geol. 276, 29-40.

Petschick et al., 1996, Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography. Mar. Geol. 130, 203-229.

Pieńkowski et al., 2022. Revised ΔR values for the Barents Sea and its archipelagos as a pre-requisite for accurate and robust marine-based 14C chronologies. Quat. Geochronol. 68, 101244.

Pin & Zalduegui, 1997, Sequential separation of light rare-earth elements, thorium and uranium by miniaturized extraction chromatography: Application to isotopic analyses of silicate rocks. Anal. Chim. Acta 339, 79-89.

Plassen et al., 2004. Integrated acoustic and coring investigation of glacigenic deposits in Spitbergen fjords. Polar Res. 23, 89-110.

Poizot et al., 2010. Using a GIS to enhance grain size trend analysis. Environ. Model. Softw. 25, 513-525.

Prins et al., 2002. Ocean circulation and iceberg discharge in the glacial North Atlantic: Inferences from unmixing of sediment size distributions. Geology 30, 555-558.

KOPRI 극지연구소

Raiswell et al., 2016. Potentially bioavailable iron delivery by iceberg-hosted sediments and atmospheric dust to the polar oceans. Biogeosciences 13, 3887-3900.

Raiswell et al., 2018, Iron in glacial systems: speciation, reactivity, freezing behavior, and alteration during transport. Front. Earth Sci. 6, 222.

Rantanen et al. 2022. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Commun. Earth Environ. 3, 168.

Rasmussen & Thomsen, 2014. Brine formation in relation to climate changes and ice retreat during the last 15,000 years in Storfjorden, Svalbard, 76-78° N. Paleoceanography, 29, 911-929.

Rasmussen & Thomsen, 2015. Palaeoceanographic development in Storfjorden, Svalbard, during the deglaciation and Holocene: evidence from benthic foraminiferal records. Boreas 44, 24-44.

Rasmussen & Thomsen, 2021. Climate and ocean forcing of ice-sheet dynamics along the Svalbard-Barents Sea ice sheet during the deglaciation ~20,000-10,000 years BP. Quat. Sci. Adv. 3, 100019.

Rasmussen et al., 2014. Spatial and temporal distribution of Holocene temperature maxima in the northern Nordic seas: interplay of Atlantic-, Arctic- and polar water masses. Quat. Sci. Rev. 92, 280-291.

Ritz et al., 2013. Estimated strength of the Atlantic overturning circulation during the last deglaciation. Nat. geosci. 6, 208-212.

Robbins et al., 1978. Comparative 210Pb, 137Cs, and pollen geochronologies of sediments from Lakes Ontario and Erie. Quat. Res. 10, 256-278.

Robbins, 1978. Geochemical and geophysical applications of radioactive lead. In: J.O. Nriagu (ed.), Biogeochemistry of Lead in the Environment. Elsevier Scientific, Amsterdam, 285-393.

Ross & Birnbaum, 2003. Integrated human and ecological risk assessment: a case study of persistent organic pollutants (POPs) in humans and wildlife. Hum. Ecol. Risk Assess. 9, 303-324.

Rø the et al., 2015, Arctic Holocene glacier fluctuations reconstructed from lake sediments at Mitrahalvøya, Spitsbergen. Quat. Sci. Rev. 109, 111-125.

Rutberg et al., 2000, Reduced North Atlantic Deep Water flux to the glacial Southern Ocean inferred from neodymium isotope ratios. Nature 405, 935-938.

Rydberg et al., 2010, Climate driven release of carbon and mercury from permafrost mires increases mercury loading to sub-arctic lakes. Sci. Total Environ. 408, 4778-4783.

Sherman et al., 2010, Mass-independent fractionation of mercury isotopes in Arctic

snow driven by sunlight. Nat. Geosci. 3, 173–177.
Sherman et al., 2012. Investigation of Local Mercury Deposition from a Coal-Fired Power Plant Using Mercury Isotopes. Environ. Sci. Technol. 46, 382-90.
Silva & Bremner, 1966, Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 5. Fixed Ammonium: Soil Science Society of America Journal, 30, 587–594.
Silva et al., 2001, Determination and isotope ratio analysis of different forms of nitrogen in soils. 5. Fixed ammonium. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30, 587–594.
Skirbekk et al., 2010. Holocene climate variations at the entrance to a warm Arctic fjord: evidence from Kongsfjorden trough, Svalbard. Geological Society, London, Special Publications, 344, 289–304.
Ślubowska et al., 2005. Changes in the flow of Atlantic water into the Arctic Ocean since the last deglaciation: evidence from the northern Svalbard continental margin, 80 N. Paleoceanography, 20.
Smik et al., 2016. Semi-quantitative estimates of paleo Arctic sea ice concentration based on source-specific highly branched isoprenoid alkenes: A further development of the PIP25 index. Org. Geochem. 92, 63–69.
Steenhuisen & van den Heuvel-Greve, 2021. Exposure radius of a local coal mine in an Arctic coastal system; correlation between PAHs and mercury as a marker for a local mercury source. Environ. Monit. Assess. 193, 499.
Stern et al., 2012. How does climate change influence Arctic mercury? Sci. Total Environ. 414, 22-44.
Stuiver & Grootes, 2000. GISP2 Oxygen Isotope Ratios. Quat. Res. 53, 277–284.
Sundfjord et al., 2017. Effects of glacier runoff and wind on surface layer dynamics and Atlantic Water exchange in Kongsfjorden, Svalbard; a model study. Estuar. Coast. Shelf Sci. 187, 260–272.
Svendsen & Mangerud, 1997, Holocene glacial and climatic variations on Spitsbergen, Svalbard. Holocene, 7, 45–57.
Svendsen et al., 2002. The physical environment of Kongsfjorden-Krossfjorden, an Arctic fjord system in Svalbard. Polar Res. 21, 133-166.
Szczuciński et al., 2009. Sediment accumulation rates in subpolar fjords - Impact of post-Little Ice Age glaciers retreat, Billefjorden, Svalbard. Estuar. Coast. Shelf Sci. 85, 345-356.
Theroux et al., 2010. Phylogenetic diversity and evolutionary relatedness of alkenone-producing haptophyte algae in lakes: Implications for continental paleotemperature reconstructions. Earth Planet. Sci. Lett. 300, 311–320.
Toney et al., 2010. Climatic and environmental controls on the occurrence and

distributions of long chain alkenones in lakes of the interior United States. Geochim. Cosmochim. Acta 74, 1563–1578.

Torres et al., 2017. Glacial weathering, sulfide oxidation, and global carbon cycle feedbacks. Proc. Natl. Acad. Sci. 114, 8716–8721.

Torsvik et al., 2019. Impact of tidewater glacier retreat on the fjord system: Modeling present and future circulation in Kongsfjorden, Svalbard. Estuar. Coast. Shelf Sci. 220, 152–165.

Tsubouchi et al., 2021. Increased ocean heat transport into the Nordic Seas and Arctic Ocean over the period 1993-2016. Nat. Clim. Change. 11, 21-26.

Ubl et al., 2017. Relationships between atmospheric transport regimes and PCB Concentrations in the Air at Zeppelin, Spitsbergen. Environ. Sci. Technol. 51, 9784–9791.

UN Environment, 2019. Global Mercury Assessment 2018. UN Environment Programme, Chemicals and Health Branch Geneva, Switzerland.

United Nations Environment Programme, 2019. Global Mercury Assessment 2018: Key Findings.

van der Bilt et al., 2015, Reconstruction of glacier variability from lake sediments reveals dynamic Holocene climate in Svalbard. Quat. Sci. Rev. 126, 201–218.

van der Lubbe et al., 2014. Sedimentation patterns off the Zambezi River over the last 20,000 years. Mar. Geol. 355, 189–201.

van Hateren et al., 2018. On the genetically meaningful decomposition of grain–size distribution: A comparison of different end–member modelling algorithms. Sediment. Geol. 375, 49–71.

Vandenberghe, 2013. Grain size of fine–grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification. Earth Sci. Rev. 121, 18–30.

Vanneste et al., 2011. Hinlopen-Yermak Landslide, Arctic Ocean—Geomorphology, Landslide Dynamics, And Tsunami Simulations.

Vogt et al., 2002. Investigation of the clay fraction (< 2 μm) of the clay minerals society reference clays. Clay Clay Miner. 50, 388–400.

Wadham et al., 2019. Ice sheets matter for the global carbon cycle. Nat. Commun. 10, 3567.

Wei et al., 2007. Sedimentation rates in relation to sedimentary processes of the Yangtze Estuary, China. Estuar. Coast. Shelf Sci. 71, 37–46.

Wei et al., 2016. Variations in temperature–related extreme events (1975-2014) in Ny–Alesund, Svalbard. Atmos. Sci. Lett. 17, 102-108.

Weltje, 1997. End–member modeling of compositional data: numerical–statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. Math. Geol. 29, 503-549.

Werner et al., 2016. Holocene sea subsurface and surface water masses in the Fram Strait-Comparisons of temperature and sea-ice reconstructions, Quat. Sci. Rev. 147, 194-209

Willmott, 1981. On the validation of models. Phys. Geogr. 2, 184-194.

Winkelmann & Knies, 2005. Recent distribution and accumulation of organic carbon on the continental margin west off Spitsbergen. Geochem. Geophys. Geosyst. 6.

Xue et al., 2019. Anthropogenic influences on mercury in Chinese soil and sediment revealed by relationships with total organic carbon. Environ. Pollut. 255, 113186.

Yin et al., 2014. Trends and advances in mercury stable isotopes as a geochemical tracer. Trends Environ. Anal. Chem. 2, 1-10.

Zaborska et al., 2006. Some sediment characteristics and sedimentation rates in an Arctic fjord (Kongsfjorden, Svalbard). Rocznik Ochrona Środowiska, 8, 79-96.

Zaborska et al., 2017. History of heavy metal accumulation in the Svalbard area: Distribution, origin and transport pathways. Environ. Pollut. 231, 437-450.

Zajączkowski et al., 2004. Recent changes in sediment accumulation rates in Adventfjorden, Svalbard. Oceanologia 46, 217-231.

Zheng et al., 2016. Excluding the di-unsaturated alkenone in the UK37 index strengthens temperature correlation for the common lacustrine and brackish-water haptophytes. Geochim, Cosmochim. Acta, 175, 36-46.

Zheng et al., 2017. Optimizing chromatographic resolution for simultaneous quantification of long chain alkenones, alkenoates and their double bond positional isomers. Org. Geochem., 111, 136-143.

Zheng et al., 2019. Systematic chemotaxonomic profiling and novel paleotemperature indices based on alkenones and alkenoates: Potential for disentangling mixed species input. Org. Geochem. 128, 26-41.

Zhu et al., 2016. Organic carbon flux and particulate organic matter composition in Arctic valley glaciers: Examples from the Bayelva River and adjacent Kongsfjorden. Biogeosciences 13, 975-987.

[첨부목록]

구분	목록	제출여부(Y/N)
첨부1	연구개발 목표의 달성도 증빙	Y
첨부2	연구개발결과 활용계획서	Y
첨부3	자체평가의견서	Y
첨부4	[해당 시] 연구개발성과 공개제한 요청사유서	N
첨부5	[해당 시] 청년 의무채용 관련 실적	N
첨부6	[해당 시] 참여기업의견서	N
첨부7	평가의견에 대한 수정·보완 대비표	Y

KOPRI 극지연구소

첨부1 연구개발 목표의 달성도 증빙

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약	달성도 (%)	관련증빙
(정성) 한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사 및 시료 획득 (3-4차례)	30	1,2,3	1차년도 (1단계)	▪ RV Helmer Hanssen 국제공동탐사, 지형/지층자료 획득, 스발바르 표층퇴적물 및 시추코어 3점 확보#코로나 미진정시, UiT 및 NGU 협업 코어 퇴적물 부시료 확보	▪ 코로나 미진정으로 노르웨이 NGU 협업 코어 퇴적물 활용 ✓ KH-17-GPC01 코어 주상도 제작 ✓ KH-17-GPC01 일부 코어 64점 부시료 확보 및 입도분석 수행	100	1. 극지연구소와 노르웨이 지질조사소 연구책임자 간의 협력연구 협약서 (증빙 1) 2. KH-17-GPC01 퇴적 코어 주상도 및 입도분석 결과 (증빙 2)
			2차년도 (1단계)	▪ RV Helmer Hanssen 한-노 국제공동탐사, 지형/지층자료 획득, 스발바르 시추코어 5점 확보	▪ 2022년 한-노 스발바르 피오르드 국제공동탐사 수행(7-8월) ✓ 힌로펜 해협 해저지형/지층자료 획득 ✓ 이스피오르드, 콩스 피오르드 및 힌로펜 해협에서 멀티코어 13점 및 중력코어 6점 획득 ▪ NGU 협업 콩스피오르드 지역 기초자료 및 퇴적코어 부시료 확보(3월) ✓ 천부 해저지층 탄성파자료 확보(NGU제공) ✓ KH-17-GPC01 부시료 760점, KH-17-GC01 부시료 130점 및 KH-14-GPC02 부시료 100점 확보	100	3. 탐사보고서 및 확보한 퇴적코어 자료 (증빙 3-1) 4. KPDC 등록 증빙 자료 (증빙 3-2) 5. 천부 해저지층 탄성파자료 및 퇴적코어 이미지 (증빙 4-1, 4-2)
			3차년도 (2단계)	▪ *RV* Helmer Hanssen 한-노 국제공동탐사, 지형 및 지층자료 획득, 스발바르 시추 코어 6점	▪ 2023년 한-노 스발바르 국제공동탐사 수행(7월) ▪ 서스피츠베르겐 서부의 10개 피오르드 대상	100	6. 2023년 한-노 국제공동탐사 보고서 (증빙 5) 7. 2023년 닥슨 피오르드 현장탐사 결과

KOPRI 극지연구소

				확보 및 딕슨 피오르드 지형 변동 현장조사	천부지층탐성파 자료 및 시추 코어 퇴적물 획득 ▪ 10개 피오르드 대상 CTD 34정점(해수 채취: 48개, 16정점 대상), 멀티코어 16정점(79개 퇴적물 코어 확보, 부시료: 2000개 채취) ▪ 7개 피오르드 대상 중력 코어 10점 확보 ▪ 각 피오르드 전 구간 대상 ADCP 측정(연안 해류 모델 구축용) ▪ 2023년 딕슨 피오르드 고해상도 공간자료 확보(상·하류 총 6개 지역) ▪ 딕슨피오르드 빙하천과 조수로 퇴적물 채취(총 34점)		(증빙 6-1, 6-2) 8. 3차년도 탐사 및 현장조사 관련 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.42-55] 항목 참조
			4차년도 (2단계)	▪ 기확보된 중력 시추 코어 부시료 채취 (UiT/NGU 방문) ▪ 퇴적물 색상, 구조, 물성, 지화학 조성 등 중력 시추 코어의 기초 암층서 분석 수행(UiT/NGU 방문)	▪ UiT 방문 2022년-2023년 한-노 스발바르 국제공동탐사 중력시추코어 기초 암층서 분석 수행 ▪ 다산기지 방문 및 대기중 입자상 수은 및 스노우 팩 시료 확보(2024년 3월)	100	9. 기확보 코어 분석 관련 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.56-59] 항목 참조
(정성/정량) 기후환경 복원 프록시 개발 및 적용	20	1	1차년도 (1단계)	▪ 환경복원 적용 가능한 프록시 개발 및 분석연구 인프라 구축	▪ 햄버그북타/리틀 스토르피오르드 퇴적코어(3점) 부시료의 유기질소분석(코어 901(10점), 903(19점), 905(25점) - 총 54점) 및 XRF 분석 수행 ▪ 비데피오르드 퇴적코어 부시료 입도 분포 자료(410점)의 end-member 모델링을 통한	100	10. 2021년 국내학술대회 초록(구두) 및 국제학술대회 발표 포스터 (증빙 7-1, 7-2)) 11. 2021년 국내학술대회 초록(구두) (증빙 8) 12. 표층퇴적물 QXRD 분석 결과서 (증빙 9)

KOPRI 극지연구소

					퇴적 환경 복원 ▪ 스발바르 표층퇴적물 XRD 광물분석(61점) 수행 ▪ 스발바르 고환경 복원 연구를 위한 유기분자생체지표(HBIs, sterols) 분석 인프라 구축 ▪ 비데피오르드 코어(3점) 퇴적물 내 유기분자생체지표(HBIs, sterols) 분석을 통한 해빙 프록시 자료 확보		13. 2021년 국내학술대회 발표 포스터 (증빙 10)
			2차년도 (1단계)	▪ 개발된 기후 환경복원 프록시 활용 저해상도 분석(최소 3건 이상 적용) ▪ 기초 및 문헌자료 대비를 통한 개발 프록시 검증	▪ 비데피오르드 퇴적코어(6점) 부시료(346 점) 입도 분포 자료를 활용한 end-member 모델링 수행 ▪ 기후환경복원 프록시 개발 및 검증 ✓ aDNA 분석을 통한 과거 환경복원 가능성 타진(9점) ✓ 과거 수온 복원을 위한 알케논 분석 인프라 구축 ✓ 육상기원 유기물 규명 연구를 위한 리그닌 페놀 분석 인프라 구축 ▪ 콩스피오르드 KH-17-GPC01 퇴적코어 유기분자생체지표(HBIs (60점), sterols(60점), 알케논(60점) 및 리그닌 페놀(47점)) 분석 수행 ▪ 스발바르 북부 코어퇴적물 내 XRD 광물조성분석 수행(4점의 퇴적코어 대상 부시료 334점) 및 기초 문헌자료와의	100	14. 2022년 국제학술대회 발표 포스터 및 Early Career Poster Award 수상 증빙 자료 (증빙 11) 15. 알케논 및 리그닌 페놀 분석 인프라 구축 (증빙 12) 16. 국내 및 국제 학술대회 발표 포스터 (증빙 13-1, 13-2) 17. 콩스피오르드 퇴적코어 유기분자생체지표(HBIs, sterols, 알케논 및 리그닌 페놀) 분석 결과 (증빙 14) 18. 2022년 국내학술대회 발표 포스터 (증빙 15)

KOPRI 극지연구소

					대비를 통한 프록시 검증		
			3차년도 (2단계)	▪ 홀로세 자연 시료 대상 검증된 기후환경 복원 프록시 고해상도 분석(최소 2건 이상 적용)	▪ 콩스피오르드 퇴적코어 KH-17-GPC01 부시료(345점) 입도 end-member 모델링 수행 및 해석 ▪ 비데피오르드 퇴적코어(1점) 희토류 농도 분석(29점) ▪ 벨준트 퇴적코어 퇴적코어(1점) XRD 광물분석(87점) 수행 및 결과 해석	100	19. 모델링, 희토류 및 광물 분석 결과 (증빙 16) 20. 벨준트 XRD 분서 결과 (증빙 17)
			4차년도 (2단계)	▪ 기후환경복원 프록시 고해상도 분석 (1건) ▪ 3차년도 결과 비교 및 스발바르 환경변화에 대한 학회 참여/발표 (1건)	▪ KH-17 연대 모델,EM 모델, Nd 동위원소, XRF 등 환경 프록시 분석 결과 및 환경 복원 ▪ Bellsund 시추 코어 및 SBP 자료 분석 및 환경 복원 ▪ 힌로펜 해협과 메가슬라이드지역 시추코어 분석 (입도, EM, XRF, X-radiography, 연대 분석을 위한 유공충 확보)	100	21. 네오디뮴 동위원소 분석 결과 (증빙 18) 22. 논문 게재(1건) (증빙 19) 23. IGC 국제학술대회 구두 발표 2건 (증빙 20-1, 20-2)
(정성/정량) 스발바르 환경변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 이해	20	1	1차년도 (1단계)	▪ 문헌조사 및 기초분석자료 기반 pristine 환경 및 인간 활동거점 환경 영향 연구 지역 선정	▪ Pristine 및 인간 활동 거점 지역 선정 완료 ▪ 선정 지역 표층퇴적물에 대한 기초분석자료 획득(입도 분석(32점) 등)	100	24. 시료 선정 및 기초분석 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.173-176] 항목 참조
			2차년도 (1단계)	▪ 자연시료 내 저해상도 프록시 분석을 통한 과거와 인류세 이후 현재 환경 모니터링 및 복원	▪ 햄버그북타/리틀 스토르피오르드 퇴적코어(3점) 및 천부지층 탄성파 층서대비 과거 13,000년 전 이후 빙하역사 및 퇴적환경변화 복원 ▪ 스발바르 북부 퇴적코어(4점) XRD 광물분석	100	25.햄버그북타 연구 논문 게재 1건 (증빙 21) 26. 국내 및 국제 학술 대회 발표 초록 및 포스터 (증빙 22-1, 22-2) 27. XRD 활용 스발바르 북부

					자료를 활용한 스발바르 북부 빙하거동 복원		연구 논문 투고 (증빙 23)
			3차년도 (2단계)	▪ 고해상도 다중 프록시 분석 기반 홀로세 스발바르 환경변화 정밀 복원 및 이해 (RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 2건)	▪ 철산화광물 함량 변화를 이용한 과거 빙하후퇴 속도 추적 기술개발 및 북극 빙하의 비가역적인 빠른 용융 가설 제시 ▪ 천부지층 퇴적물 기록 (탄성파 및 시추코어)을 이용한 빙하 기원 지형 형성 기작 및 시기 규명 ▪ 알케논 분석을 적용한 과거 스발바르 수온 복원 가능성 제시 ▪ 입도 end-member modelling을 적용한 비데피오르드 과거 환경 변화 복원 ▪ 리그닌 분석을 이용한 스발바르 퇴적물 유기물 기원(source) 분류 및 상대적 기여도 분석	100	28. 논문게재(3건) (증빙 24-26) 29. 논문투고(2건) (증빙 27, 28) 30. 언론보도 (증빙 29, 30) 31. 국내·외 학회발표(4건) (증빙 31-34) 32. 리그닌 분석 최종보고서 내 [2. 연구결과 내 p.225-235] 항목 참조
			4차년도 (2단계)	▪ 인류세 자연 시료 대상 검증된 기후환경복원 프록시 고해상도 분석(최소 2건 이상 적용) ▪ 3차년도 결과와의 비교를 통한 스발바르 환경 변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 평가 (RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건)	▪ 콩스피오르드 퇴적물 활용 유기물 기원 및 영향 파악 연구 (bulk parameter TOC, $^{13}C_{org}$, ^{14}C, N_{tot}, 입도, 유기분자생체지표) ▪ 힌로펜해협, 이스피오르드, 콩스피오르드 저서성 유공충 분포 연구 ▪ 광물조성분포, REE 등 분석 기반 호른준드 복원 연구	100	33. 탄소-질소함량, 안정 동위원소 비 및 방사성 동위원소, 유기분자생체지표 분석 결과 및 국내학술발표 1건 (증빙 35-1~ 35-3) 34. 퇴적물 내 DNA 저서성 유공충 분석 결과 (증빙 36-1, 36-2) 35. 논문 게재(1건) (증빙 37)
(정성/정량) 유기·무기 오염물질 유입량 변화 추적 및 생태 영향력 평가	20	2	1차년도 (1단계)	▪ 표층 퇴적물 내 유기독성물질 조성 분석을 통한 잠재적 오염원 제시(시료 > 30, 학회 발표 1건)	▪ 스발바르에서 기 확보한 표층 퇴적물 시료 대상 유기독성 물질 조성 분석(41점) 수행 ▪ 스발바르	100	36. 2021년 Yellow Sea Ecosystem Symposium 발표 포스터 (증빙 38) 37. 수은 관련 논문

KOPRI 극지연구소

(위탁-1) 포항공대 (위탁-2) 충남대				▪ 코어 퇴적물(3점 이상) 내 수은 농도 분석	퇴적코어 4점 확보 및 퇴적코어 부시료(93점) 수은 농도 분석 수행 ▪ 스발바르 퇴적물 코어 시료의 수은 농도 및 안정 동위원소 분석 결과와 스발바르 지역 관련 문헌조사를 통한 SCIE 논문 게재 및 Supplementary Cover Art 선정		게재 1건 (증빙 39)
			2차년도 (1단계)	▪ 환경 다매체 시료 내 유기독성물질 농도 및 조성 분석을 통한 잠재적 오염원 및 오염경로 제시(시료 > 30 및 학회 발표 1건)# # 1차년도 탐사 연기로 인한 2차년도 분석 대상 코어퇴적물 미확보로(2차년도 동안 확보한 코어퇴적물은 현재 노르웨이 UiT 냉장시료 보관소에 보관 중), 3차년도 추진 목표 우선 수행 ▪ 코어 퇴적물 내 수은 안정동위원소 분석을 통한 과거 수은 유입원 및 유입 경로 추적(90개 시료)	▪ 북극 스발바르 토양 시료(54점) 내 지속성 유기독성물질의 분포 및 오염원 파악 ▪ 북극 스발바르 다산과학기지 주변 육상 잠재적 오염원 시료(물, 퇴적물 등, 33점) 내 지속성 유기독성물질 분포 파악 ▪ 스발바르 퇴적물 코어 부시료 수은 농도(113점) 및 안정동위원소 (65점) 분석 기반 과거 수은 유입원 및 유입경로 추적 ✓ (추가 성과) 스발바르 호른준드 퇴적코어 부시료 수은 농도(25점) 및 안정동위원소 (12점) 분석수행 ✓ (추가 성과) 스발바르 기반암 부시료(8점) 확보 및 수은 농도 분석 수행	100	38. 유기독성물질 분석 결과 (증빙 40) 39. 국내 및 국제 학술대회 발표 포스터 (증빙 41, 42) 40. 스발바르 퇴적코어 수은 농도 및 안정동위원소 분석 결과 (증빙 43-1, 43-2)
			3차년도 (2단계)	▪ 코어 퇴적물 내 유기독성물질 조성 분석을 통한 오염역사, 잠재적 오염원의 변화, 침전 플럭스 제시(시료 > 30, RFP 충족-SCI급 논문	▪ 콩스피오르드 시추 퇴적물 3점(총 시료: 80개) 유기독성 물질 분포 및 조성 분석 완료 ▪ 콩스피오르드 시추 퇴적물 내 분석된 화합물 그룹의 모델링	100	41. 유기독성물질 실험결과 (증빙 44) 42. 논문게재(1건) (증빙 45) 43. 국내 학회발표(1건) (증빙 46) 44. 수은동위원소

				1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건)# ## 2차년도 한-노 국제공동탐사 동안 확보한 코어 퇴적물 대상 분석(코로나 여파로 인해 1차년도 탐사 연기가 불가피하여 기존 2차년도 연구목표 수행) ▪ 한라산 스노우팩 시료 채취(표층 20개, 대기 12개) 및 In-situ flux chamber 현장 실험 연구를 통한 대기-스노우팩 상호작용 파악 ▪ 수은 농도 및 안정동위원소 분석 기반 현대 수은 유입원 및 유입 경로 추적(RFP 충족- SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건)	분석(예: PMF) 및 진단비 분석을 통한 잠재적 오염원 추정 ▪ 스발바르와 주변 지역 환경 시료 내 유기독성 물질의 수평 분포 관련 국외학술지(SCIE 상위 20% 이내) 1건 게재 완료 및 1건투고 ▪ 스발바르와 주변 지역 환경 시료 내 유기독성 물질의 수평 분포 관련 학술발표 1건(추계해양학회 포스터 발표) ▪ 제주도 한라산 표층 눈 (총 시료 20개), 대기 중 수은(총 시료 12개) 및 snow flux chamber 현장 실험 (총 시료 10개)을 통해 총 42개 시료 확보 ▪ 제주도 한라산 표층 눈 및 대기 시료 채취 (해발 약 970m, 1,400m, 1,700m 시료 채취) ▪ 제주도 한라산 표층 눈(총 시료 20개), 대기 중 수은(총 시료 12개) 및 snow flux chamber 현장 실험(총 시료 10개) 총 42개 시료의 수은 농도 및 안정동위원소 분석 ▪ 3차년도 스노우팩 실험 설계 및 장비 테스트 결과를 활용하여 2023년도 국제 골드슈미트 학회 (Goldschmidt Conference 2023) 초청 구두발표(Invited Talk)로 선정		분석결과 (증빙 47) 45. 국제 학회발표(1건) (증빙 48) 46. 한라산 눈시료 채취 관련 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.334-338] 항목 참조
			4차년도	▪ 북극 스발바르	▪ 이스피오르드	100	47. 실험 결과 raw

KOPRI 극지연구소

			(2단계)	피오르드 시추 퇴적물 1-2점(시료 30개 이상) 유기독성물질의 농도 및 조성 분석 ▪ 스발바르 기확보 시추 퇴적물 시료 내 유기독성물질의 오염역사, 오염원의 장기 변동 및 오염경로 추적 ▪ 스발바르와 주변 지역 내 유기독성물질의 수직 및 수평 분포 관련 학술발표 1건 ▪ 스발바르 스노우팩 (표층 시료 총 12개, 대기 시료 총10개) 시료 (총 22개 시료) 확보 및 수은 농도 · 안정동위원소 분석 ▪ In-situ flux chamber 현장 실험 연구를 통한 대기-스노우팩 상호작용 해석 ▪ 스발바르 퇴적물 및 스노우팩 수은 안정동위원소비 결과값 정리 및 종합 해석(RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내) 및 학회 발표 1건)	시추 퇴적물 3점 (총 시료: 50개) 및 힌로펜 해협 3점(총 시료: 21개) 유기독성물질 분석 완료 ▪ 이스피오르드 시추 퇴적물 내 분석된 화합물 그룹의 모델링 분석 및 진단비 분석을 통한 잠재적 오염원 분석 ▪ 토양 유기독성물질 분석 결과 Environmental Pollution 논문 게재 ▪ 표층 퇴적물 석탄 기원 유기독성 물질 분석 결과 Chemosphere 논문 게재 ▪ 표층 퇴적물 석탄 기원 유기독성 물질 분석 결과 한국환경분석학회 춘계학술대회 포스터 발표 ▪ 스노우팩 및 대기 시료 확보를 위해 24년 3월 북극 다산과학기지 방문 및 시료채취 ▪ 스발바르 스노우팩(표층 총 31개, 대기시료 총 10개) 시료 확보 ▪ 중간층 및 기저부 스노우팩(표층 1-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-30cm 총 16개) 시료 확보 ▪ 스발바르 스노우팩 및 대기 수은 농도 및 안정동위원소 분석 ▪ 수은 농도 및 안정동위원소 분석 결과를 활용하여 북극		data 제출 (증빙 49) 48. 실험 결과 raw data 제출 (증빙 50) 49. 논문게재(2건) (증빙 51, 52) 50. 학술발표(1건) (증빙 53) 51. 스발바르 스노우팩 수은 안정동위원소 분석 (증빙 54)

					스발바르 스노우팩의 현대 수은 유입원과 유입 경로 추적		
(정성/정량) 유동모델(FVCOM) 구축을 통한 기후변화에 따른 조수빙하 유출 물질의 순환 기작 이해 (위탁-3) 인하대	15	3	1차년도 (1단계)	▪ 스발바르 연안 수괴 유동 관련 기본 관측자료(수위, 해류, 조석, 바람, 수온, 염분) 조사 및 수집 ▪ 수심과 해안선 등의 자료를 기반으로 피오르드의 지형적 특성을 반영한 비구조 삼각격자 구성	▪ 콩스피오르드 대상 SIOS-KC, KPDC 및 EBAS로부터 유동 및 기상 관련 기본 관측자료 수집과 분석 수행 ▪ NPI로부터 확보한 스발바르 해안선 자료와 IBACO 4.0기반 수심 자료를 토대로 콩스피오르드를 포함한 스발바르 연안의 지형적 특성이 반영된 FVCOM 비구조 삼각격자 구성 ▪ 기상 해일, 물질 수송 메커니즘 해석 및 담수 유출 영향에 관한 모델링 연구 수행 ▪ 이벤트성 기후현상 판별에 대한 측정 및 분석 방법 연구를 통한 극지 모델링 계획 수립	100	52. 2021년 기후적 해류 변동성 관련 게재 논문 (증빙 55) 53. 2021년 모델링 관련 국내학술대회 발표 초록(2건) (증빙 56, 57)
			2차년도 (1단계)	▪ 수집 자료 기반 유동모델 구축 및 검증 (1건) ▪ 조수빙하로부터의 물질 유출량과 위치에 대한 관측자료 수집 및 분석	▪ FVCOM 입력자료 구축 및 조석, 수온, 염분 관련 모델-자료 비교 기반 수치모델 검증 수행 ▪ NPI의 K160와 비교를 통한 해류 재현성 검토 완료 ▪ SIOS-KC 및 NPI 연구팀으로부터 콩스피오르드 해류 및 조수빙하 물질 유출량에 대한 관측자료 확보 및 분석 수행 ▪ 조수빙하로부터의 담수유출량이 고려된 수치모델 결과 기반, 해류 패턴 결과와 입자 이동 양상 비교	100	54. 2022년 FVCOM 모델 결과 KPDC 등재(6건) (증빙 58-63) 55. 국내 학술대회 발표 초록(2건) (증빙 64-1, 64-2)

KOPRI 극지연구소

					연구 수행		
			3차년도 (2단계)	▪ 입자 추적 모듈 개선과 모델에 필요한 입력장 구성 후 대상 스발바르 연안 해역에 적용 ▪ FVCOM 결과의 보정 및 검증을 통한 대상해역에 적합한 물질추적 기술 확립 ▪ 시공간적 해류 변동성에 대한 FVCOM 결과 검증 및 분석 ▪ 해저 표층퇴적물 자료 수집을 위한 현장 조사 수행 ▪ 조수빙하 인근 해저 표층퇴적물 분포 특성과 이동패턴 분석 (RFP 충족-SCI급 논문 1편(상위 20% 이내)) ▪ 대상 연안 내 3차원 해수 순환 패턴 분석을 통한 물질 수송 규명	▪ 스발바르 콩스피오르드 해저 표층퇴적물 시료 채취(37점) ▪ 기존 문헌자료의 해저 표층퇴적물 입도분석 결과(25점)와 수집된 시료(37점)의 입도 분포 자료 비교 분석 ▪ FVCOM 라그랑지안 입자 추적 모델링 입력자료 개선 및 조수빙하 융빙수 유출시기에 따른 입자 이동패턴 비교 연구 수행 ▪ 입자 추적 선행연구 기반 조수빙하 기원 입자의 체류시간 분석 수행 ▪ 자연환경 및 인공적 요인에 의한 해수 유동 변화 관련 국외 학술지 1건 게재 완료 및 학술발표 1건 완료 ▪ 스발바르 융빙수의 수직적인 방류 위치 적용 관련 국외 학술지 (SCIE 상위 20% 이내)1건 게재 완료 ▪ 하구 환경에서의 담수 방류가 해수 유동에 미치는 영향 관련 국외 학술지(SCIE 상위 20% 이내) 1건 게재 완료	100	56. 콩스피오르드 표층퇴적물 시료 분석 결과 KPDC 등재(1건) (증빙 65) 57. FVCOM 라그랑지안 입자 추적 모델 분석 결과 KPDC 등재(2건) (증빙 66, 67) 58. 논문게재(3건) (증빙 68-70) 59. 콩스피오르드 표층퇴적물 시료 채취 관련 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.364-376] 항목 참조
			4차년도 (2단계)	▪ 3차원 입자 추적을 통한 스발바르 연안 내 물질들의 체류시간 규명 ▪ 조수빙하 융빙수 유출 관련 수온 및 염분 자료 수집 및 모델 검증 수행 ▪ 스발바르 연안 해역	▪ 스발바르 콩스피오르드 해역의 표층 퇴적물 시료 입도 분석 결과를 활용한 Sediment Trend Analysis (STA) 수행 ▪ FVCOM 입자 추적 모델 결과를 통해 스발바르	100	60. 최종보고서 내 [2. 연구결과 p.386-390] 항목 참조 61. 국내 학회발표(2건) (증빙 71, 72)

				중심의 모델 구축과 주변 해류 패턴 파악을 주제로한 학술대회 발표 1건 ▪ 스발바르 모델 결과 기반 '조수빙하 유출 물질 순환 기작' 주제의 국외학술지 1편(상위 20% 이내)	콩스피오르드 해역 내 입자 이동 패턴과 체류시간 분석 ▪ 융빙수 유출로 인한 해류 패턴 변화에 대한 [한국 해양학회] 학술 발표 1건 및 모델 구축 기술 관련 [한국해안해양공학회] 학술발표 1건을 수행함 ▪ Local Exposure Time 계산 기법 및 개선된 압자추적 모듈을 통한 스발바르 연안 내 물질들의 체류시간 규명		
합계	100						

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
1	극지연구소와 노르웨이 지질조사소 연구책임자 간의 협력연구 협약서

COLLABORATION AGREEMENT BETWEEN:

THE GEOLOGICAL SURVEY OF NORWAY
and
KOPRI – KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE, REPUBLIC OF KOREA
Project No. 328966

1 General provisions – relationship to the Research Council of Norway

The Research Council has awarded a grant for the implementation of the following R&D project "Impact of cryospheric melt-down on submarine slope stability and carbon release in a warmer Arctic (CRYOCARB), hereafter referred to as "the Project". A contract to this effect, has been signed between the Geological Survey of Norway (NGU), hereafter referred to as "Project Owner", and the Research Council.

The R&D Project Agreement establishes as a prerequisite for funding that the Partner must carry out the Project in collaboration with the Project Owner, and make the necessary resources available, cf. Section 2, and that the Project Owner is to sign a Collaboration Agreement with the Partner(s).

The R&D Project Agreement between the Research Council and the Project Owner shall apply accordingly to the relationship between the Project Owner and the partner, unless otherwise stated in the Collaboration Agreement. The R&D Project Agreement is attached here as Appendix 1.

The collaboration agreement shall establish the right of the Research Council to exercise the rights of the Project Owner set out in the collaboration agreement in so far as this is necessary for the exercise of the Research Council's rights as specified in the contract (including provisions relating to duty of secrecy, verification and auditing, etc.).

In the event of any contradiction between the R&D Project Agreement and this Collaboration Agreement, the R&D Project Agreement shall have precedence.

2 Contribution of the Partner to the Project

The Partner is under obligation to contribute to the implementation of the Project and the fulfilment of the R&D Project Agreement with the Research Council pursuant to the tasks and obligations stated in this Collaboration Agreement.

KOPRI, Business Registration Number 134-82-06870 – hereafter referred to as the "Partner"

is under obligation to the Project Owner to participate in/contribute to the Project as follows:

The Project Owner shall disburse payment to the Partner as follows:

- For agreed completed participation on the combined workshop and fieldwork on Svalbard, the Partner can bill the Project Owner up to an amount not exceeding 20.000 Norwegian kroner

(1/3)

(incl. VAT) in 2022. Field work activities and subsequent costs shall be discussed and agreed upon between the Project Owner and the Partner before implementation.

The Partner's total remuneration shall not exceed the budget and shall include all remuneration costs, reimbursable and profits, as well as any eventual tax obligations or duties that may be imposed on the Partner.

The Partner should bill the Project Owner in Norwegian kroner no later than November thirtieth (30) in 2022. The Project Owner shall pay invoices no later than 30 days of receipt.

The Project Owner will invoice the Partner on the following:

For agreed completion of the research cruise on RV Helmer Hansen in 2022, the Project Owner will bill the Partner the amount not exceeding ONE MILLION (1.000.000) Norwegian kroner to cover the costs of 5 days of ship time (cost per day: 200.000 Norwegian kroner).

The Project Owner should bill the Partner in Norwegian kroner no later than November thirtieth (30) in 2022. The Project Owner shall pay invoices no later than 30 days of receipt.

4 Implementation of the project

The Partner is under obligation to carry out all project activities in accordance with the provisions set out in the R&D Project Agreement.

The Partner has full responsibility for personnel and finances for internal staff associated with the Project. The Partner is also responsible for filing the required reports for all personal allocations and bears master-servant liability for internal employees involved in the Project.

The Partner is responsible for providing guidance and following up the work of internal employees involved in the Project and will cooperate closely with the Project Owner and any other Partners on details regarding the design, execution and follow-up of the collaborative effort.

The Partner is under obligation to ensure that the individuals carrying out project activities on its behalf respect the provisions set out in this agreement and shall among other things draw up the agreements needed to safeguard the entitlement of said Partner to assume all rights to project results as well as rights to the utilisation of these results.

5 Cost Accounting, etc.

The Partner shall keep and report cost accounts as a basis for the preparation of the project accounts, cf. Sections 3 and 5 of the General Terms and Conditions for R&D Projects. Project funding and project costs must appear in the Partner's formal accounts.

(2/3)

KOPRI 극지연구소

6. Ownership rights, utilisation rights, licensing, etc.

In general, the rights to project results and background will be regulated in accordance with Section 8.3 of the General Terms and Conditions for R&D Projects issued by the Research Council. When distributing or transferring ownership or access rights to project results, the parties are under obligation to ensure that the undertakings taking part in the project do not receive indirect state aid, as is set out in the EFTA Surveillance Authority's guidelines for state aid for research and development and innovation Sections 25 and 28.[1]

Date/Place

Dr. Seung-Il Nam

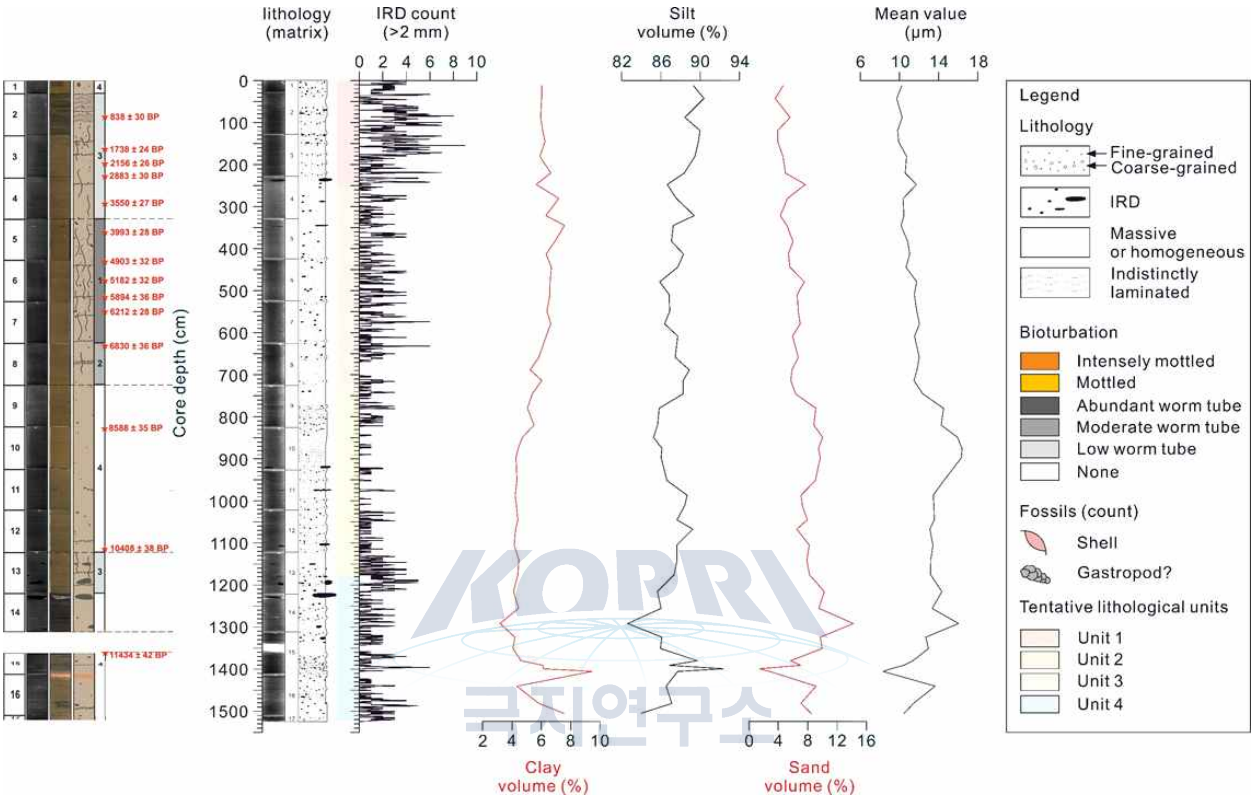
Signature of Partner
(person empowered to undertake
commitments on behalf of the company/institution)

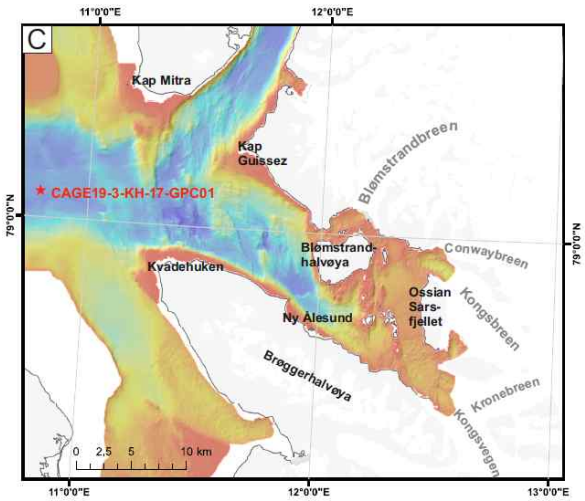
Project Owner (Project Administrator)

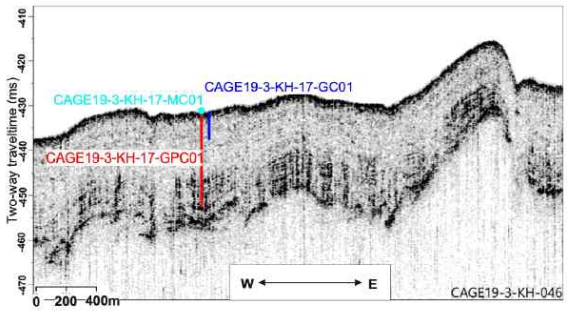
(3/3)

[1] http://www.eftasurv.int/media/state-aid-guidelines/Guidelines---State-aid-for-research-and-development-and-innovation.pdf

번호	관련증빙 명
2	KH-17-GPC01 퇴적 코어 주상도 및 입도분석 결과







Knies et al. (2019)

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
3-1	2022 제4차 한-노 스발바르 피오르드 국제공동탐사 보고서 및 확보한 퇴적코어 자료

CRUISE REPORT

MARINE-GEOSCIENTIFIC CRUISE TO WESTERN AND NORTHERN SVALBARD

on R/V Helmer Hanssen, July 20th – August 1st 2022

by

Matthias Forwick, Seung-Il Nam, Jochen Knies, Christian Engler, Bjørn Runar Olsen & Truls Hellan

DEPARTMENT OF GEOSCIENCES
UiT The Arctic University of Norway in Tromsø, N-9037 TROMSØ, NORWAY

2. Scientific objectives

The expedition was the 4th joint Korea-Norway cruise to Svalbard. It was carried out in the frame of the research projects *"Vulnerability and resilience of Arctic Svalbard to climate variability"* (project leader: Seung-Il Nam, Korea Polar Research Institute) and *"Impact of cryospheric melt-down on submarine slope stability and carbon release in a warmer Arctic"* (CRYOCARB; project leader: Astrid Lyså, Geological Survey of Norway).

The project *"Vulnerability and resilience of Arctic Svalbard to climate variability"* was supported by the Basic Core Technology Development Program for the Oceans and the Polar Regions (NRF-2021M1A5A1075512) from the NRF funded by MSIT, Republic of Korea. The goals of this project were to:

1) Recover new sediment cores along a N-S transect in the Hinlopen Strait in northern Svalbard with the purpose of reconstructing behaviours and dynamics of Svalbard glaciers, as well as sea-ice extent in northern Spitsbergen during the last deglaciation and the Holocene.
2) Perform paleo-proxy validation and application estimated from fjord sediments to synthesize high-resolution paleoenvironmental records from the Holocene by comparing various Svalbard fjord systems.
3) Understand Anthropocene interference, focusing on how fast and significantly the recent effects of global climate warming on the fjord environment are imprinted in glaciomarine sediments (focus areas: Isfjorden/Tempelfjorden, Kongsfjorden and Hinlopen Strait).
4) Compare fjord-sediment records from human-influenced areas (e.g., Isfjorden and Kongfjorden) vs Pristine areas (e.g., Hinlopen Strait) applying mercury isotopes and PHAs.

The project provided substantial financial resources for the hiring of R/V Helmer Hanssen, as well as to cover other expenses related to the expedition.

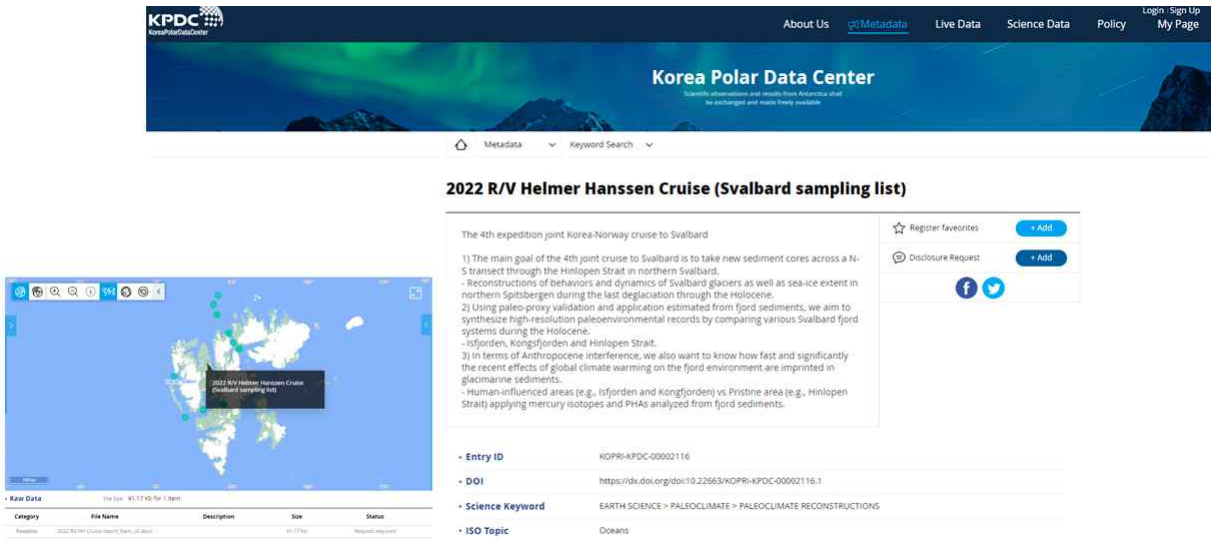
The expedition provided a platform for multiple members of the project *"Impact of cryospheric melt-down on submarine slope stability and carbon release in a warmer Arctic"* (CRYOCARB). The project received funding from the Research Council of Norway through the Svalbard Science Forum (project number: 328966; RiS-ID 11931). Project members participated in performing reconnaissance geoscientific studies in marine, terrestrial and lacustrine environments. The key hypothesis of the CRYOCARB project is that *cryospheric melt-down on Svalbard during warm times prior to the last glacial maximum caused an Arctic magnitude event north of Svalbard that released greenhouse gases stored in old carbon reservoirs to the atmosphere*. During the expedition, marine geo-scientific data were collected from the continental shelf offshore northern Svalbard, and excursions to selected locations to study terrestrial geological records and to retrieve lacustrine records were performed. This report will focus on marine-geoscientific work.

The expedition provided a platform for testing hydroacoustic equipment to listen to infrasound signals in the Arctic environment. The purpose of the field tests was twofold:

- To check the performance of the chosen measuring equipment in particular with regard to its frequency range and the signal to noise ratio at the different frequencies. Possible interferences on the collected acoustic signal, originating from water flow around the transducer, also had to be identified.
- To evaluate infrasonic signals collected in the water column and categorize them according to their origin, e.g., human-made or natural sounds.

KOPRI 극지연구소

3-2	KPDC 등록 증빙 자료



번호	관련증빙 명
4-1	천부지층 탄성파 자료

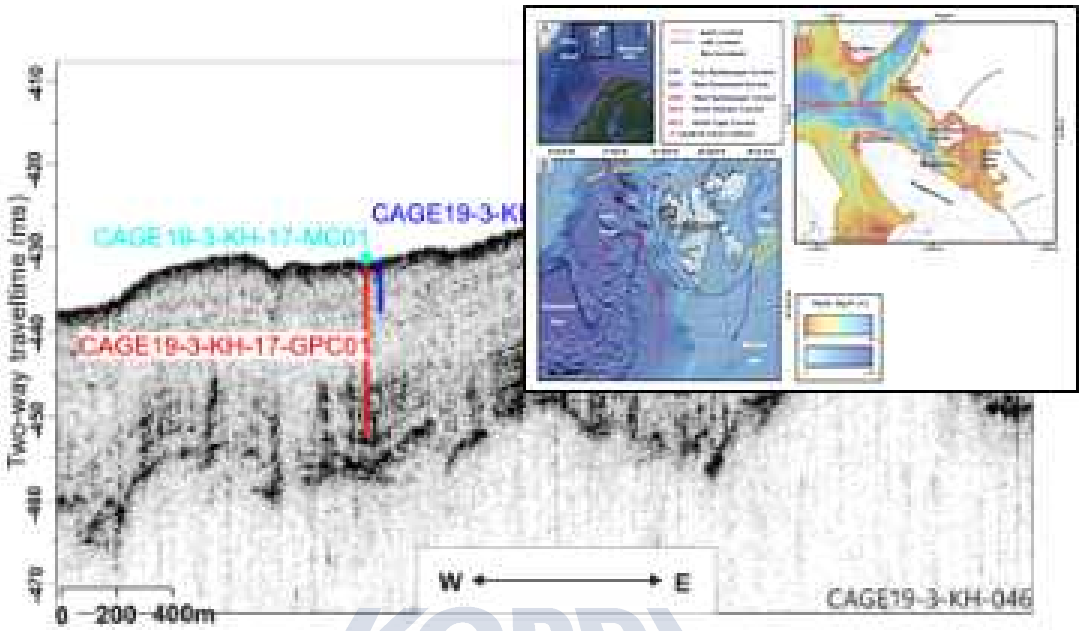


Figure 11. sub-bottom profile at CAGE 19-3-KH-17 showing the projected sampling locations. Penetration depth of the stations are converted to two-way traveltime using a constant velocity of 1500 m/s (Kries et al., 2018).

KOPRI 극지연구소

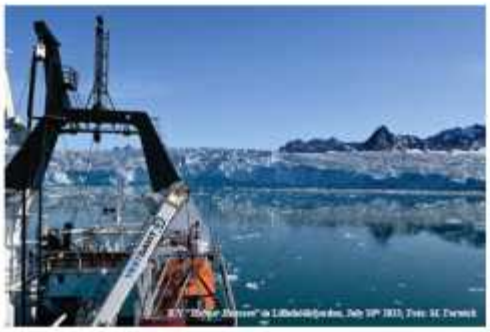
4-2	퇴적코어 이미지

Section #1	
Section #2	
Section #3	

번호	관련증빙 명
5	2023년 한-노 국제공동탐사 보고서

CRUISE REPORT

MARINE GEOSCIENTIFIC CRUISE TO WEST SPITSBERGEN FJORDS



on R/V Helmer Hanssen, July 7th – 12th 2023

by

Matthias Forwick, Seung-Il Nam, Jan Sverre Laberg, Truls Holm & Stormer Alexander Jensen

DEPARTMENT OF GEOSCIENCES
UiT The Arctic University of Norway in Tromsø, N-9037 TROMSØ, NORWAY

1. Summary

From the morning of July 7th to the afternoon of July 12th 2023, the Department of Geosciences of UiT The Arctic University of Norway in Tromsø (UiT), together with the Korea Polar Research Institute (KOPRI) in Incheon, South Korea, arranged the 5th joint Korea-Norway cruise to fjords on western Spitsbergen. The cruise was carried out on R/V "Helmer Hanssen" with Longyearbyen as port of departure and port of arrival, respectively. Investigated areas were Tempelfjorden, Sassenfjorden, Billefjorden, Nordfjorden, Ekmanfjorden, Dicksonfjorden, the Kongsfjorden-Krossfjorden system (including Kongsfjorden, Krossfjorden, Lilliehöökfjorden, Möllerfjorden and Trinityrebukta), as well as Magdalenefjorden (for locations see Fig. 1).
Thirty-four CTD (conductivity-temperature-depth) casts were performed, and 17 multi cores and 10 gravity cores were retrieved. Furthermore, 5 SBP profiles were acquired.

Figure 1. Map of Svalbard. The locations of working areas, as well as of the port of departure and arrival, Longyearbyen, and Ny-Ålesund are indicated.

2. Scientific objectives

The expedition was the 5th joint Korea-Norway cruise to Svalbard. It was carried out in the frame of the research project "*Vulnerability and resilience of Arctic Svalbard to climate variability*" (project leader: Seung-Il Nam, Korea Polar Research Institute).

The project "*Vulnerability and resilience of Arctic Svalbard to climate variability*" was supported by the Basic Core Technology Development Program for the Oceans and the Polar Regions (NRF-2021M1A5A1075512) from the NRF funded by MSIT, Republic of Korea. The goals of this project were to

1. Recover sediment cores from different fjord systems allowing paleo-environmental reconstructions from the last deglaciation until the present.
2. Validate and apply proxies from fjord sediments to synthesize high-resolution paleoenvironmental records since the last deglaciation and to compare different Svalbard fjord systems.
3. Identify how anthropogenic influence and the effects of recent global warming on fjord environments are imprinted in sediments.

The project provided substantial financial resources for the hiring of R/V Helmer Hanssen, as well as to cover other expenses related to the expedition.

5.2. Scientific participants:

Forwick, Matthias (Head of Department, chief scientist)	UiT DG
Nam, Seung-Il (PI Svalbard research, co-chief scientist)	KOPRI
Holm, Truls (Engineer)	UiT DG
Jensen, Stormer Alexander (Engineer)	UiT DG
Laberg, Jan Sverre (Scientist)	UiT DG
Ahn, Youngkyu (PhD student)	KOPRI IU
Cho, Hyeon (PhD student)	CNU
Gwak, Jiyoon (PhD student)	CNU
Han, Dokki (Scientist)	GWNU
Hong, Seongjin (Scientist)	CNU
Heeton, George-Marie (MSc student)	UiT DG
Kim, Dohee (PhD student)	KOPRI HU
Orlando, Joanna (Researcher)	RBI
Sim, Myeongsik (MSc student)	GWNU
Son, Yeong-Ju (Scientific assistant)	KOPRI

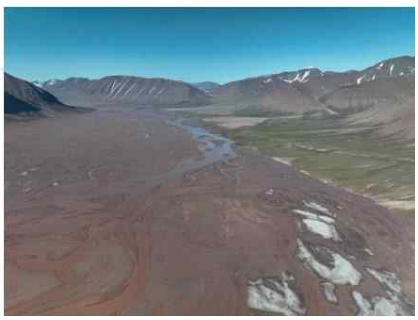
UiT DG	UiT The Arctic University of Norway, Department of Geosciences, Tromsø, Norway
CNU	Chungnam National University, Daejeon, South-Korea
GWNU	Gangneung-wonju National University, Gangneung, South-Korea
HU	Hanyang University, Ansan, South-Korea
IU	Inha University, Incheon, South-Korea
KOPRI	Korea Polar Research Institute, Incheon, South-Korea
RBI	Ruđer Bošković Institute, Department of Experimental Physics, Zagreb, Croatia

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
6-1	2023년 딕슨 피오르드 현장탐사 결과

순번	자료 리스트	획득 목적	개수
1	현장사진 및 동영상	피오르덴 점이지대 소환경 및 표층 퇴적상 및 층면구조 분석	874
2	무인항공기 사진 및 동영상	지형 변동성 모니터링 및 시계열 분석	2,060
3	불교란 주상시료	피오르덴 점이지대 수직 퇴적상 및 퇴적환경 해석	8
4	주상시료 사진	정밀 퇴적상 분석용	250
5	표층 퇴적물	피오르덴 점이지대 표층 퇴적상 분석	34
6	주상시료 퇴적물	입도분석 (평균입도, 왜도, 입도조성 등)	155
		퇴적률 및 연대측정(Pb-210) 분석	110
7	RTK GPS 활용 위/경도 및 고도 좌표	지상기준점 측량	100
		위경도 및 고도자료 보정용 기준점 및 참조점 측량	15
		지형변동성 및 퇴적률 분석용 측선 측량	710
		표층 퇴적물 및 불교란 주상시료 획득 정점 측량	20

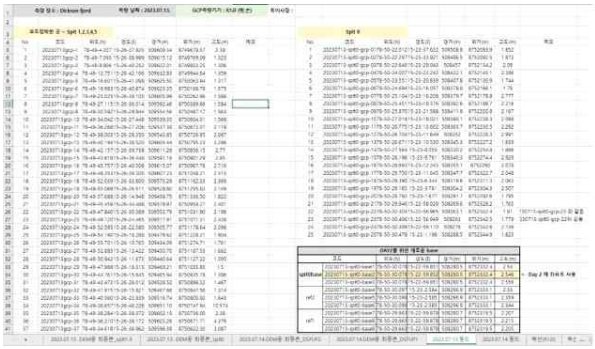
<딕슨 피오르드 점이지대 현장 조사 및 전경>

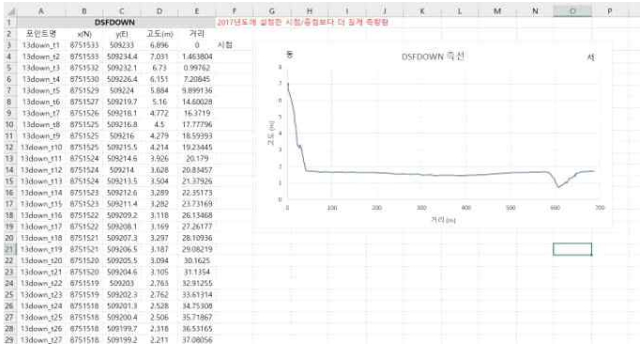


<딕슨 피오르드 퇴적물 시료 채취 및 시추 코어>

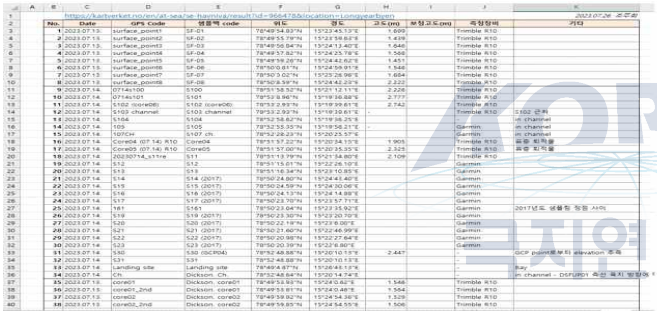
번호	관련증빙 명
6-2	2023년 딕슨 피오르드 현장탐사 결과

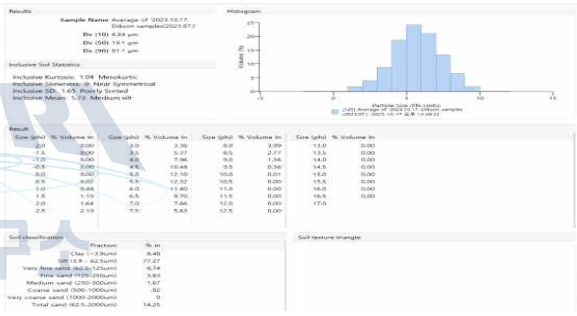
<RTK GPS 활용 위경도, 고도 및 지형 측량 정보>



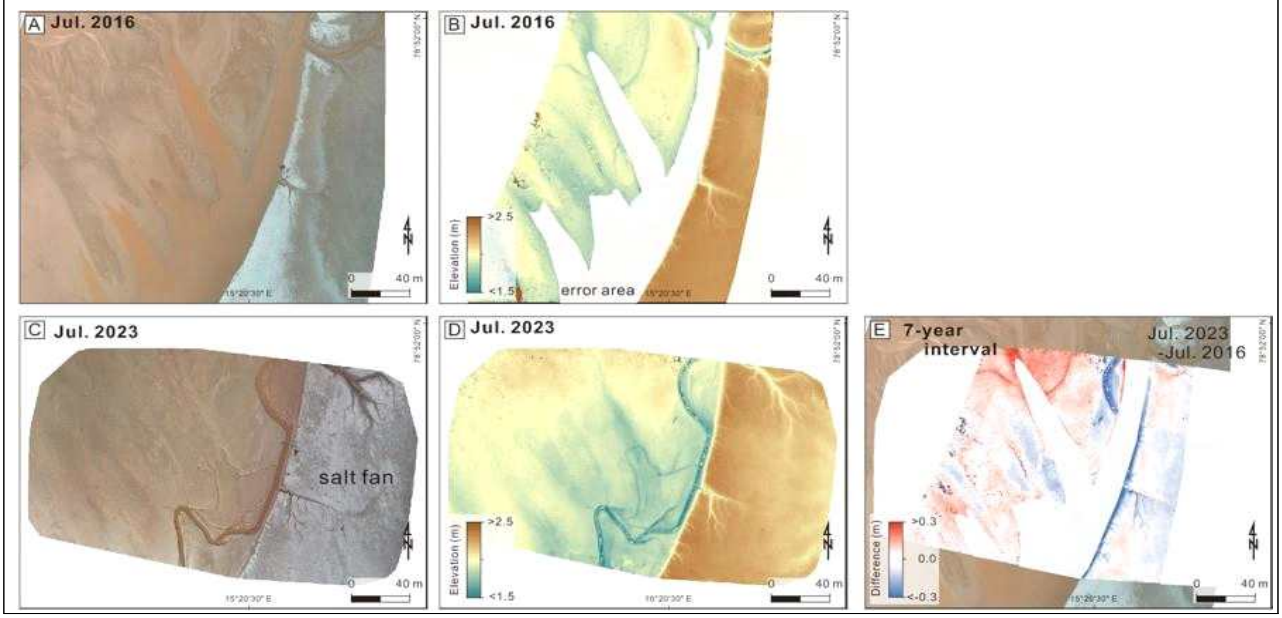


<표층퇴적물 및 코어 퇴적물 확보 정점 정보 및 표층퇴적물 입도분석 결과>





<고해상 무인항공기 사진 자료를 활용한 딕슨 피오르드 점이지대 시계열 지형 변동성 분석 결과>



번호	관련증빙 명
7-1	2021년 한국제4기학회 춘계학술대회 발표 초록(조영진; Depositional environment of Little Storfjorden in southern Spitsbergen since the Younger Dryas)

Depositional environment of Little Storfjorden in southern Spitsbergen since the Younger Dryas

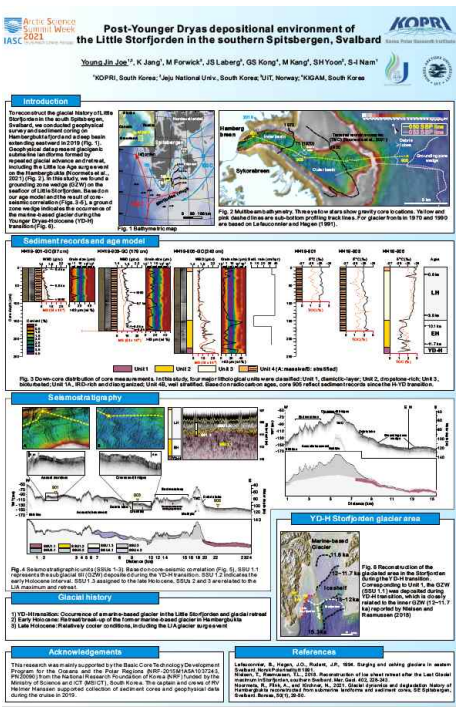
조영진[1,2*], 장광철[1], Matthias Forwick[3], Jan Sverre Laberg[3], 공기수[4], 강무희[4], 윤석훈[2], 남승일[1*],

[1]극지연구소
[2]제주대학교
[3]노르웨이 트롬소 북극대학교(UiT)
[4]한국지질자원연구원

*E-mail: yjjoe@kopri.re.kr

마지막 최대 빙하기 이후 스발바르 군도의 서 스피츠베르겐 남동부에 위치한 스토르피오르드의 빙하거동은 해수면 상승에 의한 따뜻한 북대서양해수의 유입과 해저지형의 지역적인 분포 특성과 밀접하게 관련 된 것으로 알려졌다. 스토르피오르드는 남북방향으로 확장된 "Mid Ridge"를 기준으로 동부와 서부로 구분되며 마지막 해빙기동안 동부 스토르피오르드에서 많은 연구가 수행되어온 반면, 서부 스토르피오르드(Little Storfjorden)에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 2019년 RV Helmer Hanssen을 이용하여 제 3차 한-노르웨이 스발바르 피오르드 탐사동안 획득한 다중빔 음향측심, 천부지층 반사파 및 퇴적물 시추코어 자료를 이용하여 영거 드라이아스-홀로세 전이구간(12-11.7 ka)까지 존재하였던 서부 스토르피오르드의 해양기저빙하의 증거를 확인한 동시에 홀로세 동안 서부 스토르피오르드와 인접한 햄버그북타 피오르드의 빙해양 퇴적환경 변화를 복원하였다. 또한, 퇴적물 기록과 천부지층 반사파 단면과의 대비를 통해 햄버그북타의 피오르드 입구(fjord mouth)에 발달된 말단 모레인(terminal moraine)이 소빙하기(Little Ice Age, LIA)동안 발생했던 조수빙하의 붕괴사건(surging event)에 의해 발달되었음을 보여준다.

7-2	2021년 Arctic Science Summit Week 발표 포스터(조영진; Post-Younger Dryas depositional environment of the Little -Storfjorden in the southern Spitsbergen, Svalbard)



번호	관련증빙 명
8	2021년 추계지질과학연합학술대회 발표 초록(안영규; 마지막 해빙기 이후 북극 스발바르 비데피오르드 퇴적 환경 변화)_구두발표

구두 4-8

마지막 해빙기 이후 북극 스발바르 비데피오르드 퇴적 환경 변화

Sedimentary environmental changes from Wijdefjorden, Arctic Svalbard since the last deglaciation

안영규[1,2,*], 조영진[1], 장광철[1], 김정현[1], 손영주[1], Matthias Forwick[3], 홍성민[2], 남승일[1]
Youngkyu Ahn[1,2,*], Young Jin Joe[1], Kwangchul Jang[1], Jung-Hyun Kim[1], Yeong Ju Son[1], Matthias Forwick[3], Sungmin Hong[2], Seung-Il Nam[1]

[1]극지연구소 빙하환경연구본부, youngq@kopri.re.kr
[2]인하대학교 해양과학과
[3]Department of Geosciences, UiT The Arctic University of Norway

북대서양과 북극 사이 관문에 위치한 스발바르 군도의 피오르드는 마지막 해빙기 이후 따뜻하고 염분도가 높은 북대서양 해류의 유입과 함께 최근 빠르게 진행되고 있는 지구온난화에 따른 대기온도 상승에 의해 조수 빙하가 빠르게 후퇴하면서 급격한 퇴적 환경 변화가 일어나고 있다. 스발바르 군도 중 가장 큰 스피츠베르겐 섬의 북부에 남북 방향으로 길게 뻗어 있으며 입구가 북극해와 맞닿아 있는 비데피오르드 빙해양 퇴적물에는 마지막 최대 빙하기 이후 빙하 작용 및 해빙의 영향에 의한 퇴적 과정의 변화가 잘 보존되어 있다. 본 연구에서는 마지막 해빙기 이후 비데피오르드의 퇴적 과정 변화를 연구하기 위해 2017년 노르웨이 탐사선 RV Helmer Hanssen을 이용하여 수행한 제 2차 한-노 국제 공동탐사등안 조수 빙하에 인접한 피오르드 head부터 북극해에 인접한 내대륙붕 해역에서 획득한 6점의 시추코어 퇴적물의 입도를 분석하여 입도 분포의 end-member (EM) 모델링을 적용하였다. EM 모델링은 퇴적물의 입도 분포 곡선에서 EM의 특성을 구분하여 퇴적 과정을 유추하는 방법으로 활용되고 있다. 비데피오르드 퇴적물에서는 모드 등의 입도 특징을 이용하여 네 개의 주요 EM (EMs1-4)을 분류하였다. 각각의 EM은 암상의 특징에 따라 구분된 6개의 퇴적상과 비교되어 퇴적 과정을 지시한다. EM1과 EM2는 단일 또는 이중 모드를 보이는데 EM1은 세립한 주요 모드(4.3-8.2 μm)를 특징으로 구분하였고 EM2는 조립한 주요 모드(11.9-55.3 μm)를 특징으로 구분하였다. EM1은 층리 구조가 우세한 암상 특징을 보이며, 이는 조수 빙하에서 유출되는 유빙수에 의해 재부유된 입자가 퇴적된 것으로 해석된다. 균질한 암상의 특징을 보이는 EM2는 융빙수보다 피오르드로 유입되는 해류에 의한 분급에 의한 것으로 보인다. EM1과 EM2는 각각 세 가지의 sub-EM으로 구분이 가능하다: EM1의 sub-EM은 융빙수의 세기, EM2의 sub-EM은 해류의 세기와 관련된 것으로 추정된다. 또한 본 연구에서는 EM2/EM1 비를 적용하여 시공간적으로 유입되는 해류와 유출되는 융빙수의 세기를 비교하였다. EM3와 EM4에서는 다중 모드가 나타나는데 EM3는 정형화된 입도 분포 곡선을 가지지 않은 반면, EM4는 분급이 매우 불량하게 나타난다. EM3는 유빙에 의해 운반된 입자가 퇴적된 것으로 해석되며, EM4는 조수 빙하 기저에서 퇴적된 것으로 보인다. 본 연구를 통해 비데피오르드에서 분석한 퇴적물 입도 분포의 EM 모델은 과거 빙하기-간빙기 동안 일어난 극지 피오르드 퇴적 과정을 이해하는데 활용할 수 있을 것으로 보인다.

번호	관련증빙 명
9	표층퇴적물 QXRD 분석 결과서

Results of X-ray diffraction analysis and quantification of mineral phases based on the full-pattern method QUAX Vers.2018 (© 2018 Christoph Vogt, Central Laboratory for Crystallography and Applied Material Science, ZEKAM, Geosciences, University Bremen), see Vogt et al. (2002) Clays and Clay Minerals, 50(3), 388-400.

Results of X-ray diffraction analysis and quantification of mineral phases based on the full-pattern method QUAX Vers.2018 (© 2018 Christoph Vogt, Central Laboratory for Crystallography and Applied Material Science, ZEKAM, Geosciences, University Bremen), see Vogt et al. (2002) Clays and Clay Minerals, 50(3), 388-400.

results are weight % if not stated differently values smaller than 1

Ratio of the integrated intensity of the Quartz 4.26 Å ngstroem (Å) and the sum of integrated intensities of K-feldspar 3.24 Å and

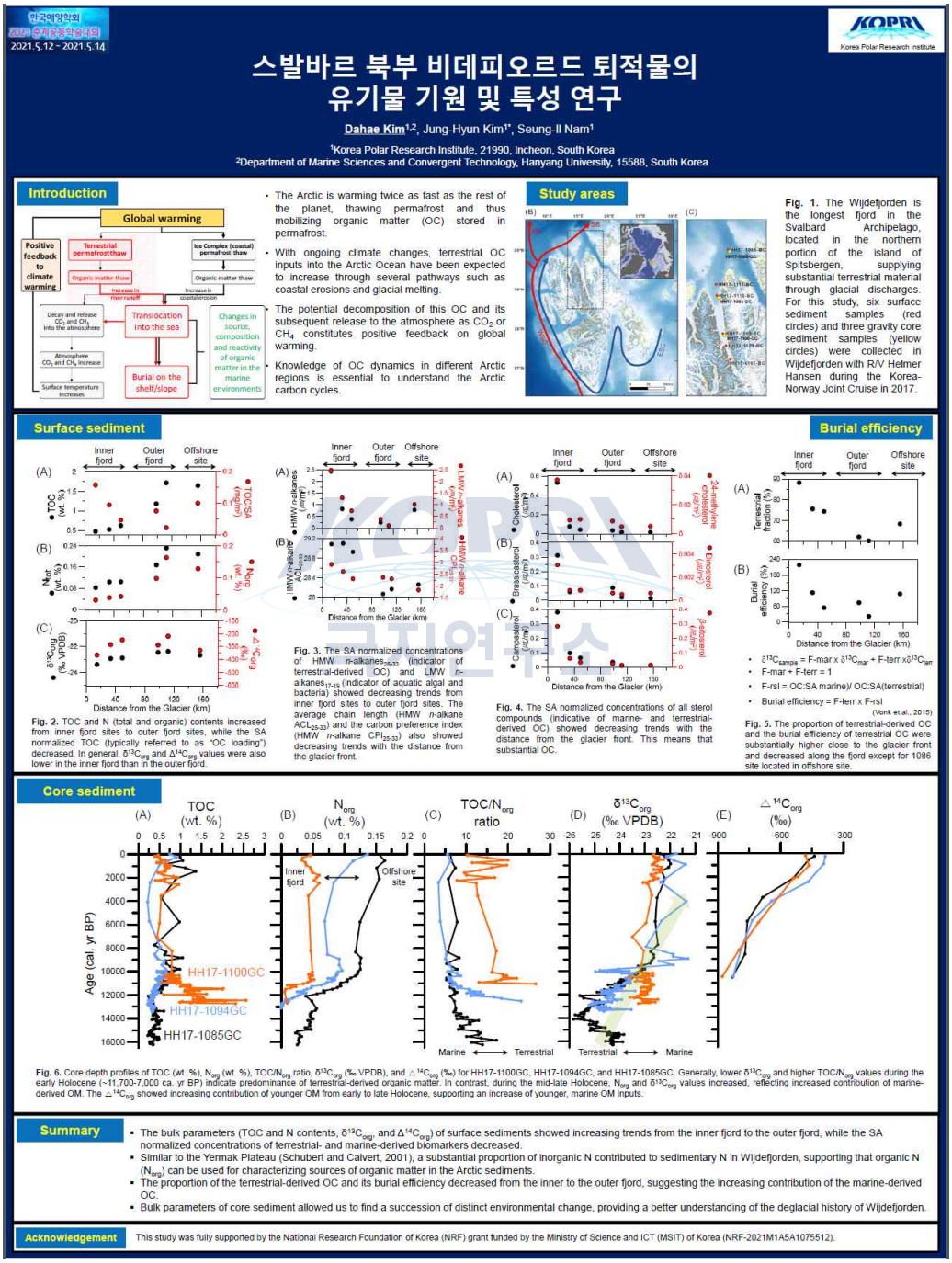
Ratio of the integrated intensities of K-feldspar 3.24 Å and plagioclase 3.19 Å

Ratio of the integrated intensities of calcite 3.035 Å and dolomite 2.889 Å

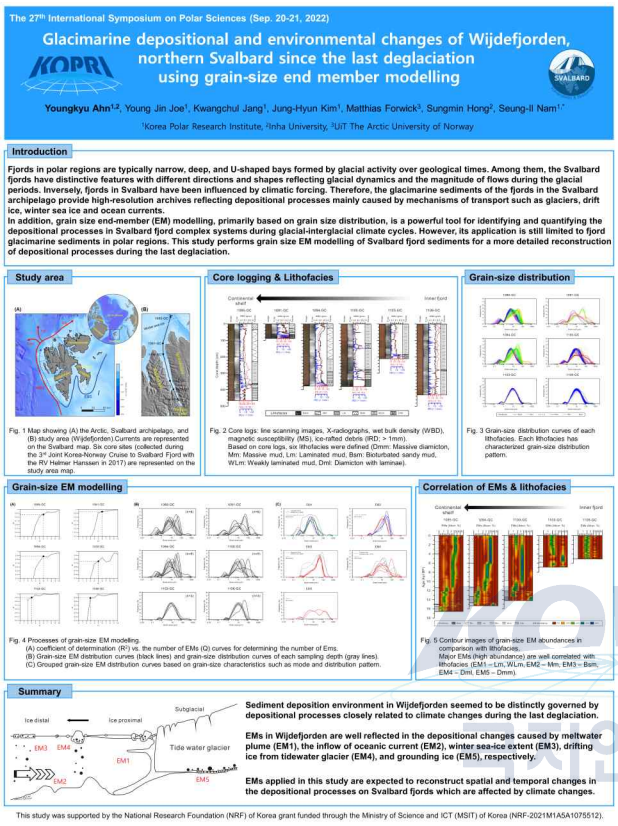
Sample	Sample	Internal File Name	Depth (cm)	Quartz	Qz/Fsp (IR)	Plagioclase	Kfs/Plg (IR)	K-feldspar	Calcite	Mg-rich Calcite	Aragonite	Calc/Dol (IR)	Dolomite	Ankerite	Summe Dol&Ank	Siderite/ Magnesite	Sum Carbonates
Error (rel%)	Error (rel%)		Depth (cmb	±1 Qz(%)	Qz/Fsp	±2-5 Plg(%)	Kfs/Plg	±2-5 Kfs(%)	±1 Calc(%)	±2-3 MgCalc	±2-3 Aragonite	Calc/Dol(Are	±1 Dol	±2-3 Ankerit	±2-3 Summe Dol(	±2-3 Sid/Mags	
HH15-1464	HH15-1464	HH151464(10-1-1)		26.4	0.89	7.8	0.40	1.1	9.4	0.0	0.0	1.4	5.1	0.0	5.1	0.00	14.5
HH15-1466	HH15-1466	HH151466(10-1-1)		19.3	0.55	6.8	0.40	1.3	0.2	0.1	0.0	2.2	2.5	0.0	2.5	0.32	11.1
HH15-1468	HH15-1468	HH151468(0-1-1)		33.2	1.18	6.4	0.09	0.8	5.6	0.0	0.0	0.2	3.2	0.0	3.2	0.00	8.8
HH15-1469	HH15-1469	HH151469(10-1-1)		19.9	0.80	5.3	0.31	0.9	7.7	0.0	0.0	2.2	1.7	0.0	1.7	0.18	9.5
HH15-1472	HH15-1472	HH151472(10-1-1)		20.2	0.63	7.9	0.11	0.4	1.6	0.0	0.0	2.3	0.5	0.0	0.5	0.00	2.1
HH15-1474	HH15-1474	HH151474(10-1-1)		25.4	0.91	7.1	0.13	0.4	0.0	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.3	0.44	1.1
HH15-1475	HH15-1475	HH151475(10-1-1)		22.4	0.86	6.9	0.15	0.5	0.2	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0	0.3	0.42	1.0
HH15-1476	HH15-1476	HH151476(10-1-1)		20.0	0.60	6.8	0.48	2.3	0.9	0.0	0.0	0.9	0.5	0.0	0.5	0.32	1.7
HH15-1478	HH15-1478	HH151478(10-1-1)		20.0	0.84	7.4	0.13	0.4	1.0	0.1	0.0	1.2	0.3	0.0	0.3	0.00	1.4
HH15-1479	HH15-1479	HH151479(10-1-1)		25.8	0.77	11.3	0.17	0.6	0.0	0.0	0.5	0.0	0.2	0.0	0.2	0.95	1.7
HH15-1480	HH15-1480	HH151480(10-1-1)		21.4	0.64	11.9	0.09	0.4	0.2	0.2	0.0	2.2	0.2	0.1	0.3	2.60	3.4
HH15-1482	HH15-1482	HH151482(10-1-1)		29.4	0.69	12.7	0.07	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.37	0.5
HH15-1484	HH15-1484	HH151484(10-1-1)		35.4	1.22	10.4	0.11	0.4	0.0	0.0	0.0	#DIV/0!	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
HH15-1485	HH15-1485	HH151485(10-1-1)		23.2	0.69	13.0	0.09	0.4	0.2	0.0	0.0	0.6	0.2	0.0	0.2	0.00	0.3
HH15-1486	HH15-1486	HH151486(9-1-1)		24.0	1.20	4.1	0.13	0.4	0.9	0.0	0.0	1.0	0.3	0.0	0.3	0.29	1.5
HH15-1488	HH15-1488	HH151488(10-1-1)		23.1	1.02	2.5	0.17	0.3	11.8	0.0	0.0	2.3	2.1	1.9	4.0	0.15	15.9
HH15-1489	HH15-1489	HH151489(9-1-1)		18.9	1.67	3.6	0.27	0.4	7.4	0.0	0.0	3.1	0.8	0.0	0.8	0.00	8.2
HH15-1498(Nr prüfen!)	HH15-1498(Nr prüfen!)	HH151498(9-1-1)		17.9	1.07	9.8	0.08	0.2	13.8	0.0	0.0	4.3	0.7	0.0	0.7	0.00	14.5
HH16-1223	HH16-1223	HH161223(10-1-1)		21.3	0.84	10.9	0.44	1.1	2.2	0.1	0.0	1.7	0.9	0.0	0.9	0.00	3.2
HH16-1227	HH16-1227	HH161227(10-1-1)		20.9	0.65	8.7	0.54	1.7	5.7	0.0	0.0	2.1	1.1	0.0	1.1	0.00	6.9
HH16-1230	HH16-1230	HH161230(10b-1-1)		19.4	0.76	5.9	0.07	1.2	2.4	0.0	0.0	2.1	0.4	0.0	0.4	0.22	3.1
HH17-1086	HH17-1086	HH171086(10-1-1)		31.0	0.50	16.9	0.34	3.9	1.1	0.0	0.0	0.4	3.8	0.0	3.8	0.00	4.9
HH17-1107	HH17-1107	HH171107(10-1-1)		19.7	0.51	7.1	0.40	5.0	1.7	0.0	0.0	0.9	3.7	0.0	3.7	0.00	5.4
HH17-1108	HH17-1108	HH171108(10-1-1)		15.8	0.58	7.2	0.11	0.5	2.2	0.0	0.0	2.2	0.6	0.0	0.6	1.71	4.5
HH17-1109	HH17-1109	HH171109(8-1-1)		20.9	0.50	12.1	0.18	1.3	1.8	0.0	0.0	1.1	0.4	0.4	0.8	0.12	2.7
HH17-1110	HH17-1110	HH171110(10-1-1)		31.1	0.70	13.5	0.22	0.3	0.0	0.4	0.0	0.4	0.8	0.2	1.0	0.00	1.4
HH17-1111	HH17-1111	HH171111(10-1-1)		31.8	0.37	22.3	0.44	5.0	2.4	0.1	0.0	0.8	3.5	0.0	3.5	0.18	6.2
HH15-1499	HH15-1499	HH151499(10-1-1)		13.8	0.23	16.7	0.38	5.2	0.1	0.2	0.0	0.4	1.1	0.0	1.1	0.00	1.4
HH16-1176	HH16-1176	HH161176(9-1-1)		20.2	1.53	3.0	0.11	0.7	12.3	0.2	0.0	0.0	20.7	0.0	20.7	0.16	33.3
HH16-1182	HH16-1182	HH161182(9-1-1)		21.0	0.61	8.7	0.18	0.9	7.5	0.0	0.0	5.7	1.0	0.0	1.0	0.00	8.4
HH16-1185	HH16-1185	HH161185(9-1-1)		20.0	0.60	11.0	0.29	1.4	7.0	0.0	0.0	3.3	1.5	0.0	1.5	0.00	8.5
HH16-1187	HH16-1187	HH161187(9-1-1)		17.1	0.79	8.3	0.35	0.9	5.7	0.1	0.0	0.9	6.1	0.0	6.1	0.00	11.9
HH16-1190	HH16-1190	HH161190(9-1-1)		12.9	0.65	5.5	0.29	0.7	4.6	0.0	0.0	0.6	7.6	0.0	7.6	0.00	12.3
HH16-1193	HH16-1193	HH161193(10-1-1)		14.7	0.58	5.8	0.34	0.9	5.8	0.0	0.0	0.6	8.6	0.0	8.6	1.06	15.5
HH16-1196	HH16-1196	HH161196(10-1-1)		16.2	0.48	8.0	0.58	1.7	10.7	0.0	0.0	4.3	1.0	0.0	1.0	3.03	14.8
HH16-1199	HH16-1199	HH161199(10-1-1)		17.0	0.62	5.9	0.46	1.4	6.1	0.0	0.0	1.1	3.8	0.0	3.8	6.54	16.5

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
10	2021년 국내학술대회 발표 포스터



번호	관련증빙 명
11	2022년 국제학술대회 발표 포스터 및 Early Career Poster Award 수상 증빙 자료



The 27th International Symposium on Polar Sciences (Sep. 20-21, 2022)

Glacimarine depositional and environmental changes of Wijdefjorden, northern Svalbard since the last deglaciation using grain-size end member modelling

Youngkyu Ahn[1,2], Young Jin Joe[1], Kwangchul Jang[1], Jung-Hyun Kim[1], Matthias Forwick[3], Sungmin Hong[2], Seung-Il Nam[1,*]

[1]Korea Polar Research Institute, [2]Inha University, [3]UiT The Arctic University of Norway

Introduction

Fjords in polar regions are typically narrow, deep, and U-shaped bays formed by glacial activity over geological times. Among them, the Svalbard fjords have distinctive features with different directions and shapes reflecting glacial dynamics and the magnitude of flows during the glacial periods. Inversely, fjords in Svalbard have been influenced by climatic forcing. Therefore, the glacimarine sediments of the fjords in the Svalbard archipelago provide high-resolution archives reflecting depositional processes mainly caused by mechanisms of transport such as glaciers, drift ice, winter sea ice and ocean currents.
In addition, grain size end-member (EM) modelling, primarily based on grain size distribution, is a powerful tool for identifying and quantifying the depositional processes in Svalbard fjord complex systems during glacial-interglacial climate cycles. However, its application is still limited to fjord glacimarine sediments in polar regions. This study performs grain size EM modelling of Svalbard fjord sediments for a more detailed reconstruction of depositional processes during the last deglaciation.

Study area

Fig. 1 Map showing (A) the Arctic, Svalbard archipelago, and (B) study area (Wijdefjorden).Currents are represented on the Svalbard map. Six core sites (collected during the 3rd Joint Korea-Norway Cruise to Svalbard Fjord with the RV Helmer Hanssen in 2017) are represented on the study area map.

Core logging & Lithofacies

Fig. 2 Core logs: line scanning images, X-radiographs, wet bulk density (WBD), magnetic susceptibility (MS), ice-rafted debris (IRD: > 1mm). Based on core logs, six lithofacies were defined (Dmm: Massive diamicton, Mm: Massive mud, Lm: Laminated mud, Bsm: Bioturbated sandy mud, WLm: Weakly laminated mud, Dml: Diamicton with laminae).

Grain-size distribution

Fig. 3 Grain-size distribution curves of each lithofacies. Each lithofacies has characterized grain-size distribution pattern.

Grain-size EM modelling

Fig. 4 Processes of grain-size EM modelling.
(A) coefficient of determination (R^2) vs. the number of EMs (Q) curves for determining the number of Ems.
(B) Grain-size EM distribution curves (black lines) and grain-size distribution curves of each sampling depth (gray lines).
(C) Grouped grain-size EM distribution curves based on grain-size characteristics such as mode and distribution pattern.

Correlation of EMs & lithofacies

Fig. 5 Contour images of grain-size EM abundances in comparison with lithofacies.
Major EMs (high abundance) are well correlated with lithofacies (EM1 – Lm, WLm, EM2 – Mm, EM3 – Bsm, EM4 – Dml, EM5 – Dmm).

Summary

Sediment deposition environment in Wijdefjorden seemed to be distinctly governed by depositional processes closely related to climate changes during the last deglaciation.

EMs in Wijdefjorden are well reflected in the depositional changes caused by meltwater plume (EM1), the inflow of oceanic current (EM2), winter sea-ice extent (EM3), drifting ice from tidewater glacier (EM4), and grounding ice (EM5), respectively.

EMs applied in this study are expected to reconstruct spatial and temporal changes in the depositional processes on Svalbard fjords which are affected by climate changes.

This study was supported by the National Research Foundation (NRF) of Korea grant funded through the Ministry of Science and ICT (MSIT) of Korea (NRF-2021M1A5A1075512).

ISPS-2022-P2-08

Korea Polar Research Institute

The 27th International Symposium on Polar Sciences

Two decades of Korean Arctic research: Looking back to look forward

September 20-21,2022 I Online

Early Career Poster Award Winner

presented to

Youngkyu Ahn

Inha University,
Republic of Korea

for the contribution entitled

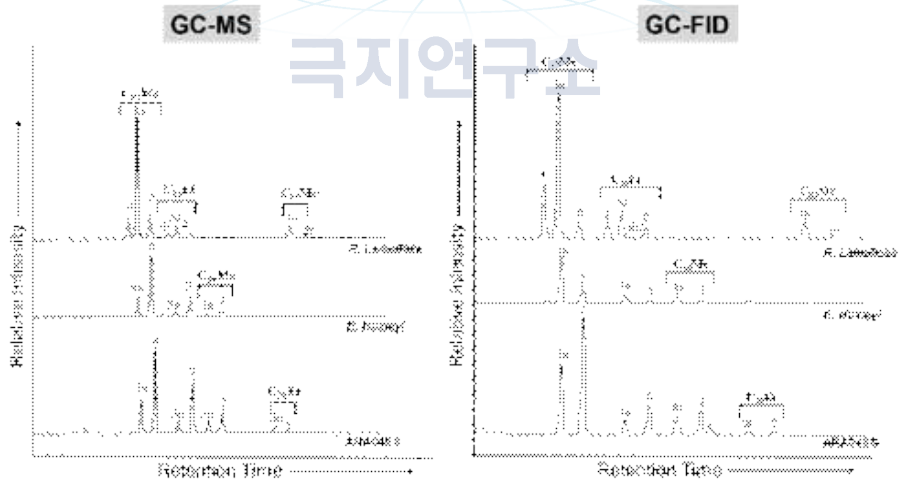
"Glacimarine depositional and environmental changes of Wijdefjorden, northern Svalbard since the last deglaciation using grain-size end member modelling"

September 21, 2022

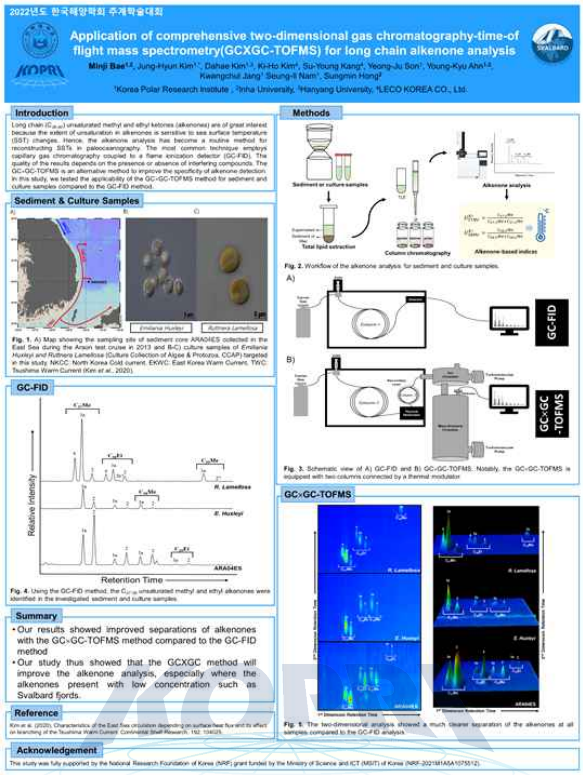
Dr. Sung-Ho Kang
President, Korea Polar Research Institute

번호	관련증빙 명
12	알케논 및 리그닌 페놀 분석 인프라 구축

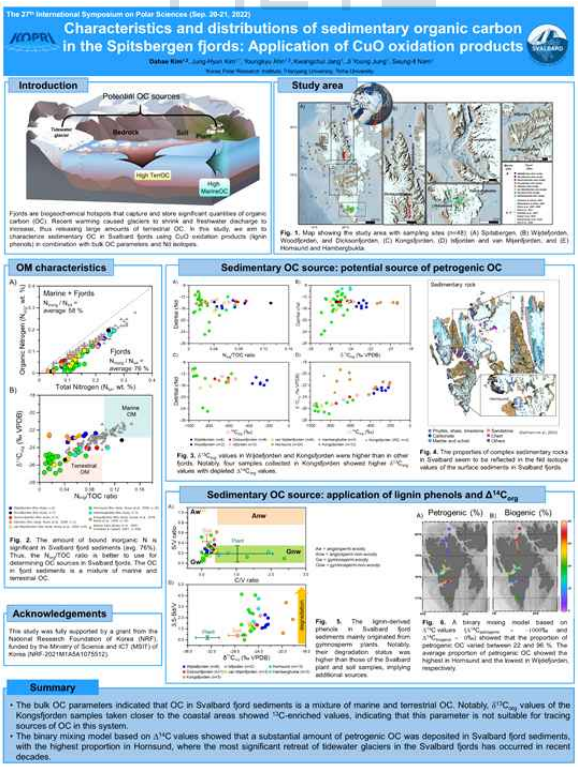
KOPRI
극지연구소



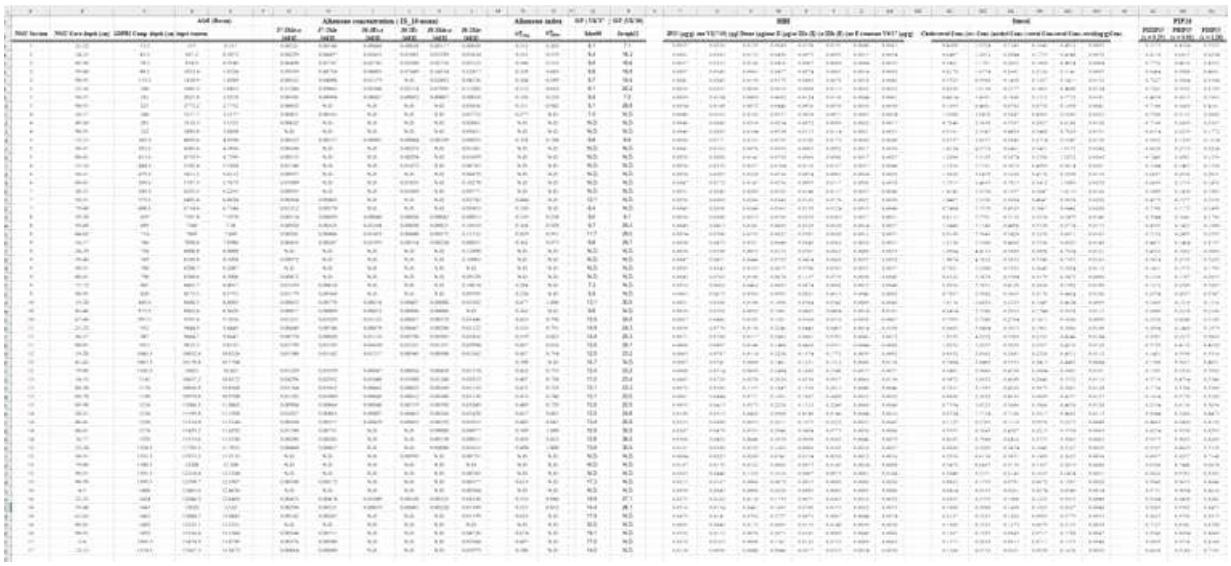
번호	관련증빙 명
13-1	국내 학술대회 발표 포스터



13-2	국제 학술대회 발표 포스터



번호	관련증빙 명
14	콩스피오르드 퇴적코어 유기분자생*체*지표(HBIs, sterols, 알케논 및 리그닌 페놀) 분석 결과



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1				S	V	C	Lambda	S/V	C/V	S/(S)	Vd/Vl	3.58d/V
2	Section	depth (cm)										
3	3	90	S3 90-91	0.06	0.14	0.08	0.28	0.46	0.58	1.65	1.01	1.51
4	4	16	S4 16-17	0.08	0.07	0.08	0.18	0.46	1.14	1.41	1.40	0.86
5	4	49	S4 49-50	0.03	0.05	0.06	0.20	0.62	0.87	0.97	2.44	0.64
6	4	90	S4 90-91	0.03	0.06	0.07	0.16	0.51	1.23	0.87	0.84	1.33
7	5	50	S5 50-51	0.04	0.06	0.06	0.20	0.46	1.03	0.76	1.49	1.32
8	5	80	S5 80-81	0.04	0.06	0.07	0.16	0.45	0.91	0.48	1.19	1.45
9	6	15	S6 15-16	0.08	0.06	0.07	0.17	0.51	1.17	0.49	1.07	1.45
10	6	50	S6 50-51	0.08	0.06	0.07	0.17	0.50	1.18	0.61	1.19	0.98
11	6	80	S6 80-81	0.04	0.07	0.07	0.18	0.56	0.93	1.02	1.51	1.24
12	7	20	S7 20-21	0.04	0.09	0.11	0.24	0.46	1.21	0.57	0.92	1.33
13	7	60	S7 60-61	0.03	0.08	0.08	0.19	0.38	1.05	0.55	1.06	1.12
14	7	79	S7 79-80	0.04	0.11	0.10	0.25	0.40	0.93	0.76	1.02	1.39
15	8	59	S8 59-60	0.05	0.06	0.06	0.15	0.53	1.05	0.51	0.49	1.65
16	8	84	S8 84-85	0.02	0.06	0.06	0.16	0.52	1.02	0.36	0.70	1.69
17	9	16	S9 16-17	0.06	0.11	0.09	0.25	0.52	0.89	0.60	0.72	1.65
18	9	28	S9 28-29	0.07	0.12	0.11	0.30	0.61	0.98	0.64	0.69	1.26
19	9	39	S9 39-40	0.06	0.18	0.12	0.37	0.35	0.67	0.69	0.72	0.80
20	9	60	S9 60-61	0.06	0.12	0.11	0.29	0.51	0.96	0.42	0.68	1.10
21	9	80	S9 80-81	0.04	0.08	0.10	0.23	0.52	1.14	0.68	0.72	1.17
22	9	71	S9 71-72	0.06	0.11	0.11	0.27	0.53	0.98	0.46	0.82	1.53
23	9	90	S9 90-91	0.04	0.07	0.07	0.18	0.51	0.94	0.55	0.89	1.29
24	10	19	S10 19-20	0.03	0.07	0.07	0.18	0.47	0.99	0.55	0.90	1.44
25	10	67	S10 67-68	0.03	0.09	0.08	0.19	0.33	0.86	0.24	8.47	1.73
26	11	21	S11 21-22	0.02	0.06	0.06	0.14	0.44	1.09	0.48	0.88	2.72
27	11	56	S11 56-57	0.02	0.08	0.05	0.14	0.27	0.59	0.46	2.23	1.90
28	11	80	S11 80-81	0.01	0.06	0.04	0.13	0.18	0.48	0.82	2.66	1.71
29	12	19	S12 19-20	0.02	0.04	0.05	0.11	0.44	1.26	0.63	1.14	2.34
30	12	79	S12 79-80	0.02	0.06	0.04	0.14	0.25	0.54	0.46	3.19	1.88
31	13	14	S13 14-15	0.02	0.06	0.06	0.14	0.44	1.26	0.22	1.62	2.96
32	13	49	S13 49-50	0.03	0.05	0.04	0.11	0.53	0.79	0.55	1.45	1.90
33	13	69	S13 69-70	0.03	0.08	0.05	0.16	0.31	0.61	0.33	3.08	2.00
34	13	89	S13 89-90	0.03	0.07	0.06	0.16	0.42	0.88	0.51	2.98	1.83
35	14	20	S14 20-21	0.03	0.05	0.07	0.15	0.54	1.48	0.26	1.16	2.48
36	14	40	S14 40-41	0.03	0.08	0.07	0.18	0.33	0.95	0.17	2.28	1.44
37	14	60	S14 60-61	0.02	0.07	0.04	0.12	0.24	0.57	0.92	2.81	1.08
38	14	76	S14 76-77	0.01	0.02	0.01	0.04	0.26	0.49	0.00	0.81	8.06
39	15	23	S15 23-24	0.00	0.01	0.02	0.04	0.27	1.60	0.00	1.61	2.86
40	15	50	S15 50-51	0.00	0.02	0.01	0.03	0.10	0.41	0.00	1.41	1.99
41	15	90	S15 90-91	0.01	0.01	0.01	0.03	0.40	0.90	0.68	1.91	3.06
42	15	98	S15 98-99	0.01	0.02	0.03	0.06	0.54	1.45	0.00	1.80	1.76
43	16	4	S16 4-5	0.01	0.03	0.03	0.08	0.37	1.12	0.00	1.72	1.55
44	16	22	S16 22-23	0.01	0.06	0.07	0.14	0.24	1.22	0.00	2.04	1.99
45	16	39	S16 39-40	0.00	0.02	0.01	0.03	0.16	0.46	0.00	1.82	1.94
46	16	61	S16 61-62	0.01	0.03	0.03	0.07	0.30	0.97	0.48	1.86	2.27
47	16	90	S16 90-91	0.01	0.02	0.03	0.06	0.52	1.70	0.00	2.44	5.16
48	17	3	S17 3-4	0.01	0.06	0.03	0.10	0.09	0.59	0.00	2.02	1.18
49	18	12	S17 12-13	0.01	0.01	0.01	0.03	0.51	0.97	0.00	1.90	4.66
50			min	0.002	0.013	0.007	0.026	0.086	0.415	0.000	0.490	0.642
51			max	0.071	0.182	0.121	0.367	0.613	1.704	1.647	3.474	5.158
52			average	0.026	0.067	0.061	0.157	0.405	0.948	0.477	1.543	1.867
53			stdev	0.018	0.035	0.031	0.080	0.130	0.303	0.363	0.779	0.983

번호	관련증빙 명
15	2022년 국내학술대회 발표 포스터

퇴적물 내 광물조성 분석을 통한 과거 북극 스발바르 환경 이해

Mineralogical approach for paleoenvironmental reconstruction in Svalbard

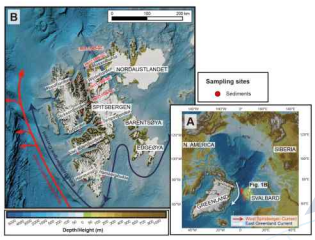
장광철[1*], 안영규[1,2], 김다해[1,3], 손영주[1], 배민지[1,2], 조영진[1], 김정현[1], 남승일[1]

[1]kjang@kopri.re.kr (*presenting author), [1]극지연구소 빙하환경연구본부

[2]인하대학교 해양과학과, [3]한양대학교 해양융합과학과

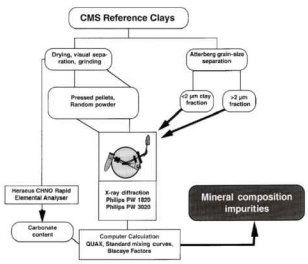
퇴적물 내 광물조성은 환경에 따라 광물들이 고유의 거동을 보이기 때문에 고환경 복원 연구에 있어 다양한 방식으로 활용된다. 본 연구에서는 북극 스발바르군도의 가장 큰 섬인 스피츠베르겐에 발달된 피오르드에서 획득한 시추 퇴적물 내 광물조성을 활용한 두 가지 고환경 연구 사례를 소개 한다. 첫 번째는 퇴적물 기원지 추적자로서의 전통적 활용 사례이다. 북대서양과 북극해가 연결된 관문에 위치한 스발바르군도는 지질학적으로 고원생대(Palaeoproterozoic) 변성암부터 신생대 신제3기(Neogene) 퇴적암에 이르기까지 다양한 연령 및 종류의 암석으로 이루어져 있어, 퇴적물 내 특정 광물들은 그들의 기원지에 대한 정보를 제공한다. 이러한 관점에서, 스발바르 북부 비데피오르드 대륙붕에서 획득한 코어 퇴적물(HH17-1085-GC, 수심 322 m)에서 약 12,100년 전 급격한 돌로마이트 및 해록석의 함량이 증가하는 것은 스발바르군도 북동쪽에 위치한 Nordaustlandet 섬 남서부 Wahlenbergfjorden 집수지역(catchment area)의 석탄기 및 페름기 퇴적암 층으로부터 유래된 것으로 추정된다. 두 번째는 빙하 분포(glacier extent) 추적자로서 활용되는 사례이다. 이는 융빙수로부터 해수로 전이되는 빙하 경계부(glacier front) 환경에서 배타적으로 퇴적되는 특정 광물 특성에 기반한다. HH17-1085-GC코어 내 철산화광물 함량의 경우 12,300년 전 이후로 급격히 감소하는 특징을 보이는데, 퇴적물 기원지의 의미있는 변화가 없다는 점을 고려할 때, 마지막 최대 빙하기 동안 유라시아 대륙 및 스발바르군도 주변의 대륙붕을 뒤덮었던 거대빙상(Svalbard-Barents Sea Ice Sheet)이 후퇴하면서 빙하 경계부가 충분히 멀어지기 때문에 발생한 결과로 해석될 수 있다.

◆ Study area



▲본 연구에서는, 2017년 한국-노르웨이 스발바르 피오르드 국제공동탐사 동안 스발바르 북부 대륙붕 지역(case-1) 및 비데피오르드(case-2)에서 확보한 코어퇴적물을 대상으로 분석을 수행함

◆ Analytica methods



(From Vogt et al., 2002)

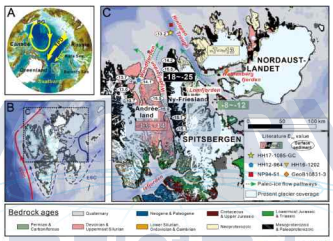
▲확보한 코어퇴적물은 파우더링(<20 μm) 후, 브레멘 대학에서 X-ray 회절분석법(Philips X'Pert Pro multipurpose diffractometer)으로 정성 분석되었으며, 이 후 Vogt et al. (2002)에서 소개된 QUAX full pattern method를 통해 정량화함

▲Clay 성분이 20% 이상인 경우 분석결과는 약 5% 범위 내에서 재현되었으며, 주요 광물의 경우 1-3%의 오차 범위를 가짐

▲총 100여점의 퇴적물 부시료 내 광물조성을 정량화하여, case-1 연구에서는 돌로마이트(dolomite)와 해록석(glauconite)이, case-2 연구에서는 철산화광물(Fe-(oxyhyr)oxide minerals)이 고환경 복원에 활용됨

◆ Case-1 : Sediment provenance indicators

▶ Background



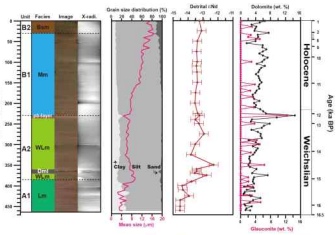
(From Jang et al., 2021)

▲Core HH17-1085-GC (462 cm, ~16,300 kyr)

▲네오디뮴 동위원소 및 광물조성 등 분석

▲주요 퇴적물 기원지는 스발바르 북부 피오르드(우드 및 비데피오르드)와 동북부 노르아우스트라네(Nordaustlandet) 섬으로, 후자의 경우 상대적으로 네오디뮴 동위원소 비가 높고, 돌로마이트가 풍부한 지괴로 이루어짐

▶ Results and discussion



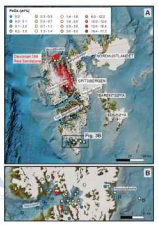
(Modified from Jang et al., 2021)

▲엽리구조(laminiation)가 발달한 최하부층에서는 네오디뮴 동위원소 비와 돌로마이트 함량이 상대적으로 낮게 나타나는 반면, 상부로 갈수록 엽리구조가 사라지고 네오디뮴 및 돌로마이트 함량이 증가함. 과거 스발바르 북부 대륙붕지역을 뒤덮었던 거대빙상이 후퇴하면서 스발바르 서북부에서 동북부 지역의 순으로 발생한 것으로 해석됨

▲또한, 12,100년 전, 네오디뮴 동위원소 비의 큰 변화 없이 급격한 돌로마이트와 해록석 피크가 관찰되는 것은 Nordaustlandet 섬 남서부 Wahlenbergfjorden 집수지역(catchment area)의 석탄기 및 페름기 퇴적암 층으로부터 유래된 것으로 추정됨

◆ Case-2: Tracking for glacier fluctuation

▶ Background

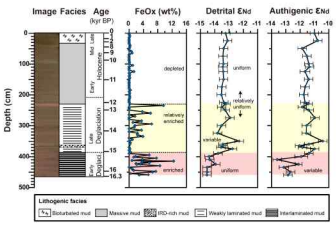


▲스발바르 표층퇴적물 내 철산화광물 함량은 철이 풍부한 데본기 사암층이 주변에 분포한 비데, 우드 및 딕슨 피오르드에서 높게 나타남

▲하지만, 같은 피오르드 내에서도 빙하로부터 거리가 멀어지면 함량이 급격히 낮아지는 것이 관찰됨

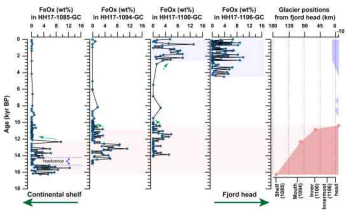
▲빙하의 융빙수와 해수가 섞이는 과정에서 급격한 철의 침전/흡착 작용과 관련 있을 것으로 추측

▶ Results and discussion



(Jang et al., under review)

▲HH17-1085의 경우, 거대빙상이 대륙붕 지역으로부터 충분히 후퇴한 12,300년전 이후로 철산화광물 함량이 급격히 감소 → 가설 부합



(Jang et al., under review)

▲스발바르 북부 대륙붕에서 비데피오르드 내부까지 연속적인 코어퇴적물 내 철산화광물 함량 변화를 통해 거대빙상의 경계부 위치 추측 가능

▲이에 따르면, 10,800년 전 빙하 후퇴 속도가 급격히 가속화되었음을 추측할 수 있음

본 연구는 정부(과학기술정통부)의 재원으로 한국연구재단 해양·극지기초원천기술개발사업의 일환으로 수행된 "북극 스발바르 피오르드 지형변화연구(2015.06-2021.03)" 및 "북극 스발바르 기후환경 취약성과 회복력 이해(2021.04-2024.12)" 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

과학기술정보통신부 NRF 한국연구재단

번호	관련증빙 명
16	모델링, 희토류 및 광물 분석 결과

<코어 1085 퇴적물 내 자생성분에서 분석한 희토류 원소 분석 결과표>

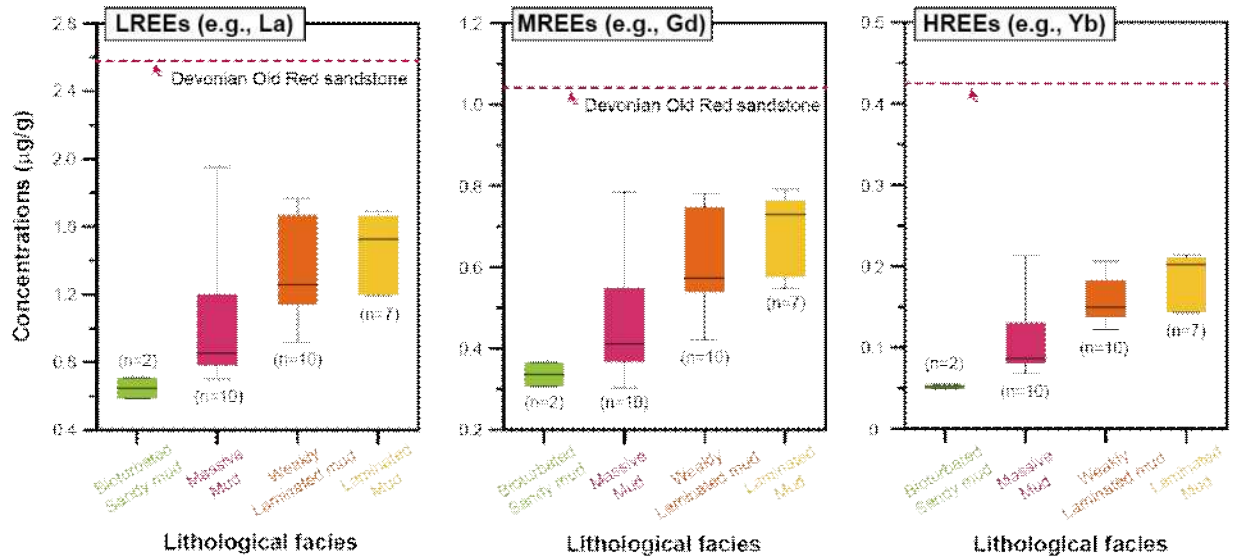
Supplementary Table S1. REE concentrations in leached phases of the Devonian Old Red Sandstone and sediments at site HH17-1085

Sample ID	Depth (cm)	La (μg/g)	Ce (μg/g)	Pr (μg/g)	Nd (μg/g)	Sm (μg/g)	Eu (μg/g)	Gd (μg/g)	Tb (μg/g)	Dy (μg/g)	Ho (μg/g)	Er (μg/g)	Tm (μg/g)	Yb (μg/g)	$(Gd/Yb)_N$	$(La/Gd)_N$	CI
HH17-1085-GC	0.5	0.71	1.766	0.21	0.925	0.235	0.058	0.366	0.044	0.186	0.034	0.078	0.011	0.055	3.86	0.27	3.81
	24.5	0.584	1.379	0.176	0.779	0.195	0.049	0.306	0.036	0.161	0.029	0.068	0.009	0.049	3.62	0.26	3.71
	49.5	0.7	1.458	0.191	0.819	0.194	0.049	0.303	0.037	0.173	0.032	0.085	0.012	0.068	2.58	0.32	2.83
	74.5	0.827	1.747	0.232	0.99	0.244	0.06	0.377	0.046	0.222	0.042	0.107	0.014	0.086	2.54	0.30	2.88
	99.5	0.781	1.706	0.219	0.96	0.235	0.059	0.366	0.044	0.212	0.04	0.099	0.014	0.077	2.76	0.29	3.04
	109.5	0.741	1.635	0.212	0.928	0.232	0.057	0.362	0.044	0.209	0.039	0.099	0.014	0.08	2.62	0.28	3.02
	124.5	0.847	1.871	0.239	1.047	0.257	0.064	0.404	0.048	0.233	0.043	0.108	0.015	0.087	2.69	0.29	3.03
	149.5	0.861	1.954	0.244	1.078	0.255	0.064	0.417	0.048	0.234	0.044	0.109	0.015	0.086	2.81	0.28	3.12
	174.5	0.927	2.125	0.261	1.141	0.278	0.068	0.444	0.053	0.254	0.048	0.123	0.018	0.098	2.63	0.29	2.99
	199.5	1.201	2.694	0.331	1.413	0.334	0.082	0.549	0.066	0.319	0.06	0.156	0.022	0.131	2.43	0.30	2.81
	224.5	1.559	3.278	0.419	1.762	0.418	0.097	0.679	0.081	0.389	0.072	0.189	0.026	0.154	2.56	0.32	2.82
	229.5	1.951	3.353	0.5	2.162	0.504	0.123	0.784	0.097	0.484	0.095	0.256	0.036	0.213	2.13	0.34	2.47
	239.5	1.138	2.542	0.317	1.351	0.329	0.077	0.538	0.063	0.304	0.056	0.149	0.020	0.122	2.56	0.29	2.93
	249.5	1.297	2.859	0.342	1.421	0.327	0.078	0.561	0.062	0.317	0.06	0.164	0.023	0.136	2.39	0.32	2.72
	274.5	1.672	3.768	0.461	1.936	0.457	0.112	0.758	0.089	0.424	0.081	0.22	0.031	0.183	2.40	0.30	2.78
	299.5	1.767	3.738	0.478	2.04	0.48	0.121	0.781	0.094	0.444	0.085	0.232	0.033	0.199	2.28	0.31	2.67
	324.5	1.688	3.594	0.47	1.957	0.458	0.12	0.747	0.09	0.445	0.083	0.226	0.034	0.206	2.10	0.31	2.56
	349.5	1.116	2.522	0.312	1.364	0.333	0.085	0.544	0.067	0.326	0.062	0.16	0.023	0.139	2.27	0.28	2.79
	359.5	1.3	2.886	0.361	1.512	0.366	0.092	0.595	0.073	0.36	0.067	0.179	0.026	0.157	2.20	0.30	2.66
	364.5	0.919	2.001	0.251	1.055	0.251	0.067	0.42	0.049	0.242	0.048	0.135	0.021	0.142	1.72	0.30	2.33
	369.5	1.222	2.707	0.352	1.488	0.37	0.092	0.585	0.071	0.349	0.067	0.184	0.026	0.161	2.11	0.29	2.66
	374.5	1.138	2.469	0.31	1.309	0.311	0.079	0.526	0.063	0.31	0.06	0.159	0.023	0.137	2.23	0.30	2.69
	389.5	1.527	3.308	0.446	1.901	0.472	0.121	0.729	0.09	0.437	0.084	0.225	0.032	0.203	2.08	0.29	2.64
	399.5	1.63	3.465	0.471	1.969	0.472	0.123	0.752	0.093	0.455	0.086	0.235	0.035	0.214	2.04	0.30	2.57
	409.5	1.509	3.248	0.423	1.744	0.409	0.1	0.674	0.081	0.397	0.072	0.197	0.029	0.182	2.15	0.31	2.60
	424.5	1.19	2.664	0.349	1.47	0.351	0.086	0.575	0.067	0.333	0.06	0.162	0.023	0.143	2.33	0.28	2.82
	434.5	1.196	2.654	0.339	1.39	0.331	0.082	0.548	0.065	0.309	0.058	0.159	0.024	0.143	2.22	0.30	2.68
	449.5	1.692	3.724	0.489	2.036	0.485	0.12	0.791	0.095	0.451	0.086	0.235	0.034	0.211	2.17	0.29	2.67
	459.5	1.667	3.634	0.471	1.962	0.453	0.117	0.765	0.091	0.438	0.083	0.225	0.032	0.202	2.20	0.30	2.67
080302#		2.579	6.459	0.771	4.622	1.075	0.222	1.041	0.117	0.815	0.120	0.432	0.050	0.425	1.42	0.34	1.99
WRAS†		37.8	77.7	8.77	32.69	6.15	1.188	5.19	0.819	4.95	1.019	2.97	-	3.01	-	-	-

#Devonian Old Red Sandstone collected from the Wood Bay Formation (79.39°N, 13.62°E)

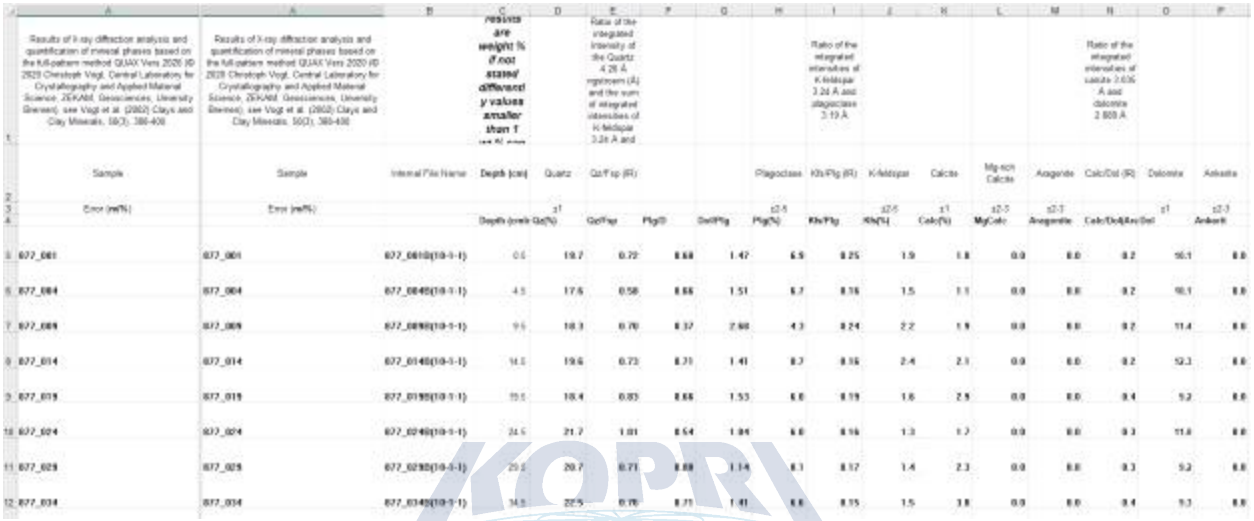
†World River Average Silt; ref. *48*

<코어 1085 퇴적물 내 암상(lithological facies)별 주요 희토류 원소 농도 비교>

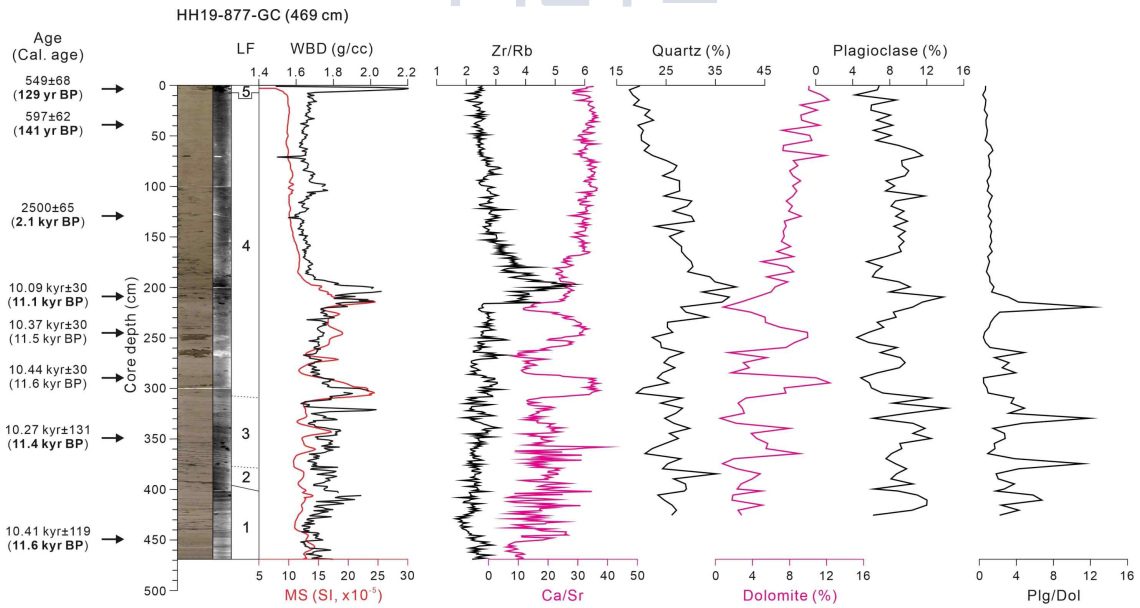


번호	관련증빙 명
17	벨준트 XRD 분서 결과

<코어 877 퇴적물 내 XRD 광물 분석 결과표>



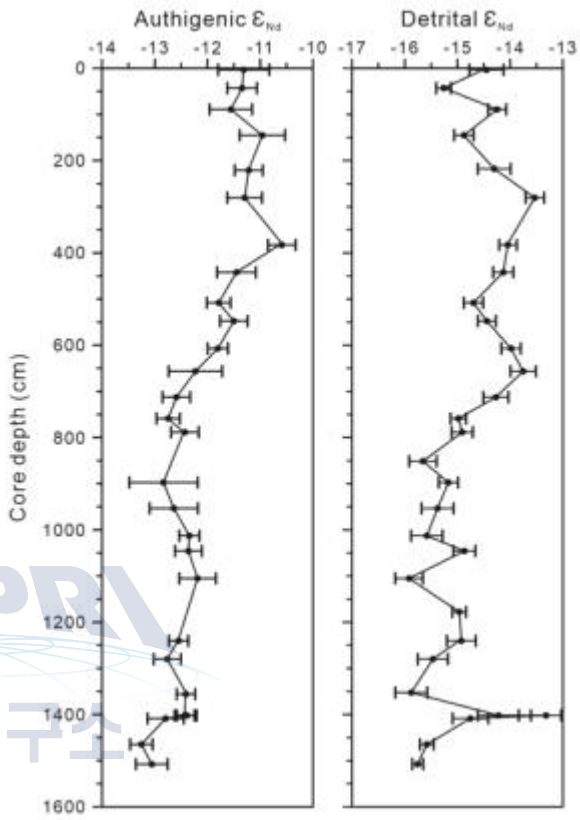
<코어 877 퇴적물 내 층서, 지화학 조성, 주요 광물 함량 비교>



KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
18	Kongsfjorden Nd isotopes 분석 결과

Depth (cm)	Age (ka BP)	Authigenic eNd	Detrital eNd
0.5	0.06	-11.311859	-14.451955
42	0.36	-11.344834	-15.263778
87	0.98	-11.553544	-14.248052
143.5	1.66	-10.961536	-14.876789
218.5	2.73	-11.215531	-14.303354
278	3.50	-11.295816	-13.534390
380	4.35	-10.586125	-14.043090
441	5.06	-11.453348	-14.133574
506	5.73	-11.788120	-14.696349
547	6.20	-11.498474	-14.440558
606	6.70	-11.801672	-13.982340
657	7.09	-12.226757	-13.755084
712	7.59	-12.584394	-14.267420
756.5	7.99	-12.745725	-14.980357
788.5	8.29	-12.445694	-14.906155
896.5	9.10	-12.837432	-15.171936
951.5	9.44	-12.635850	-15.378073
1010.5	9.81	-12.343701	-15.580683
1045.5	10.03	-12.355879	-14.869025
1105.5	10.43	-12.189179	-15.918283
1237.5	11.25	-12.547701	-14.923364
1277.5	11.50	-12.760843	-15.462429
1353	12.10	-12.410651	-15.877913
1401	12.65	-12.430799	-14.221272
1402	12.66	-12.391075	-13.320584
1407	12.72	-12.790147	-14.748435
1464	13.38	-13.248156	-15.584305
1506.5	13.97	-13.051981	-15.753124



KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
19	Ahn et al. (2024) published in Marine Geology

Marine Geology 472 (2024) 107306

Contents lists available at ScienceDirect

Marine Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/margo

Post-glaciation depositional changes in Wijdefjorden, northern Svalbard, using grain-size end-member modelling

Youngkyu Ahn [a,b], Young Jin Joe [a], Kwangchul Jang [a,c], Jung-Hyun Kim [a], Yeong Ju Son [a], Matthias Forwick [d], Sungmin Hong [b], Seung-Il Nam [a,*]

[a] Division of Glacier and Earth Sciences, Korea Polar Research Institute, 21990 Incheon, Republic of Korea
[b] Department of Ocean Sciences, Inha University, 22212 Incheon, Republic of Korea
[c] Department of Earth System Sciences, Yonsei University, 03722 Seoul, Republic of Korea
[d] Department of Geosciences, UiT The Arctic University of Norway, 9037 Tromsø, Norway

ARTICLE INFO

Editor: Michele Rebesco

Keywords:
Svalbard
Fjord
Tidewater glacier
Grain-size end-member modelling
Depositional process

ABSTRACT

Grain-size end-member (EM) modelling is a robust statistical approach for identifying and quantifying dominant grain-size distributions. This approach provides a novel perspective for understanding the impact of interactions between depositional processes in complex sedimentary environments. This study examines grain-size distributions of six glacimarine sediment cores collected along an N–S transect from the continental shelf to the Wijdefjorden system in northern Svalbard. In addition, we integrate grain-size EMs with lithologic and acoustic facies, allowing us to identify three distinct groups of EMs (EM1–3), each closely associated with specific depositional processes: turbid meltwater discharge (EM1), sediment winnowing by bottom currents (EM2), and the deposition of ice-rafted debris in glacimarine conditions and subglacial till (EM3). An analysis of the three EM groups reveals that the glacial retreat during the last deglaciation and the Atlantic Water inflow significantly impacted depositional changes within the Wijdefjorden system. In contrast, a decrease in the Atlantic Water inflow during the late Holocene corresponds to glacial re-advance, resulting in shifts in the depositional environment. This study demonstrates the utility of EM modelling in deciphering complex grain-size distributions and reconstructing different climate-driven depositional processes in glacimarine sediments in Svalbard fjords. This integrated approach enhances our understanding of the intricate interplay among climate change, glacier dynamics, and oceanic forcing in polar fjord environments.

other. EM modelling represents a valuable tool for improving the reconstruction of spatiotemporal sedimentary processes and depositional environments in Svalbard fjords. Furthermore, applying EM modelling to grain-size analysis enables identifying the primary drivers of sediment transport in Svalbard fjords, thereby enhancing our comprehension of the complex depositional processes induced by climate change since the last deglaciation.

CRediT authorship contribution statement

Youngkyu Ahn: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Young Jin Joe:** Writing – review & editing, Visualization, Conceptualization. **Kwangchul Jang:** Writing – review & editing, Visualization, Conceptualization. **Jung-Hyun Kim:** Writing – review & editing, Visualization, Conceptualization. **Yeong Ju Son:** Writing –

Data availability

The original data supporting this study can be available in the Korea Polar Data Center at https://dx.doi.org/10.22663/KOPRI-KPDC-00002444.1.

Acknowledgements

We thank the captain and crew of R/V *Helmer Hanssen* and all cruise participants, especially Steinar Iversen and Truls Holm, for their support at sea. We also thank Dahae Kim and Minji Bae for their analytical support in the laboratory at KOPRI. This study was fully supported by a grant from the National Research Foundation of Korea (NRF), funded through the Ministry of Science and ICT (NRF-2021M1A5A1075512; KOPRI-PN24013 to SIN). We extend our heartfelt appreciation to Dr. Michele Rebesco, the chief editor of the Istituto Nazionale di

번호	관련증빙 명
20-1	IGC 국제학술대회 구두 발표

Impact of current flow on the depositional environment in Kongsfjorden trough of Arctic Svalbard

Youngkyu AHN[1]*, Korea Polar Research Institute (youngq@kopri.re.kr)
Young Jin JOE[2], Korea Polar Research Institute
Kwangchul JANG[3], Yonsei University
Jochen KNIES[4], Geological Survey of Norway
Jung-Hyun KIM[5], Korea Polar Research Institute
Yeong Ju SON[6], Korea Polar Research Institute
Sungman HONG[7], Inha University
Seung-Il NAM[8], Korea Polar Research Institute

Abstract

The Atlantic Water plays an important role in regulating the climate system associated with depositional environments in Arctic Svalbard fjords. In troughs off Svalbard fjords, the inflowing Atlantic Water can be steered by seafloor topography. This study examines the impact of topographically steered currents on depositional patterns in the trough off Kongsfjorden by analyzing multi-proxies on a glaciomarine sediment core (KH17-GPC01). Additionally, we compared sediment records between the center of the trough and its outer rim, near the glacier front. Our results present that sediment input to the Kongsfjorden trough has been primarily influenced by the interaction between glacier melting, current sorting, and sea ice drifting. Interestingly, core KH17-GPC01 from the center of the trough exhibits a relatively higher sedimentation rate compared to sediment cores from the outer rim. Despite their proximity to the glacier front, the relatively low sedimentation rate in the outer rim possibly resulted from sediment sorting by the enhanced current flows, suggesting that this depositional pattern was contributed by rapid current flow along the outer rim of the trough. Conversely, the center of the Kongsfjorden trough appears to act as a depocenter. These findings provide the importance of considering the effects of current-induced sediment transport for reconstructing depositional environments around the complex Svalbard fjord systems.

Keyword

Svalbard, Fjord, Kongsfjorden trough, Oceanic current, Sedimentation

KOPRI 극지연구소

20-2	IGC 국제학술대회 구두 발표

Glacier-induced provenance changes in Bellsund, Svalbard, during the Holocene

Young Jin Joe[1]*, Korea Polar Research Institute (yjjoe@kopri.re.kr)
Kwangchul Jang[2], Yonsei University
Youngkyu Ahn[3], Korea Polar Research Institute
Jung-Hyun Kim[4], Korea Polar Research Institute
Xin Wan[5], Ministry of Education Ocean University of China
Yeongju Son[6], Korea Polar Research Institute
Matthias Forwick[7], UiT The Arctic University of Norway, Tromso
Jan Sverre Laberg[8], UiT The Arctic University of Norway, Tromso
Xiaotong Xiao[9], Ministry of Education Ocean University of China
Seung-Il Nam[10], Korea Polar Research Institute

Abstract

Bellsund is a fjord system connected to the van Mijenfjorden (northeastern), van Keulenfjorden (eastern), and Recherchefjorden (southern) in southern Spitsbergen, Svalbard. This study investigates changes in provenance in response to the past behavior of fjord glaciers by analyzing lithology and mineralogy in a sediment core (HH19-877-GC) from Bellsund. Our results reveal variability in depositional environments and terrestrial sediment input after ca. 12,000 years BP. From 12,400 to 9,500 years BP, turbidity currents and meltwater discharges dominated Bellsund, with strong variations in plagioclase and dolomite. This depositional pattern suggests terrestrial inputs to Bellsund from its tributaries in a rapid phase of glacial retreat. The early to middle Holocene (9,500 to 3,500 years BP) has been identified as a sediment deficit with increased sand content under open marine conditions. The late Holocene (after 3,500 years BP) was characterized by hemipelagic deposition with tidewater glacial influences in the tributaries, with relatively low and constant plagioclase and a gradual increase in dolomite. Plagioclase and dolomite may have been derived from siliciclastic rocks of van Mijenfjorden/van Keulenfjorden and various carbonate rocks of Bellsund/Recherchefjorden, respectively. In this context, the terrestrial input to Bellsund during the late Holocene was likely mainly from the Bellsund coasts and Recherchefjorden. Furthermore, we expect that the ratio of plagioclase to dolomite can serve as a geological proxy for estimating provenance changes in southern Spitsbergen based on the regional distribution of bedrock geology.

Keyword

Bellsund, Holocene, Provenance, Lithology, Mineralogy

번호	관련증빙 명
21	햄버그북타/리틀 스토르피오르드 빙하역사 및 퇴적환경변화 복원 관련 논문 게재 승인 증빙

REVIEW FORUM Submitting Author — Need Help? Contact us

✓ 1. Initial Validation ✓ 2. Editorial Assignment ✓ 3. Independent Review 4. Interactive Review 5. Review Finalized 6. Final Validation 7. Final Decision

Glacial history and depositional environments in Little Storfjorden and Hambergbukta of Arctic Svalbard since the Younger Dryas

Young Jin Joe, Kwangchul Jang, Matthias Forwick, Jan Sverre Laberg, Gee Soo Kong, Moo-Hee Kang, Seok-Hoon Yoon and Seung-Il Nam*

Original Research, Front. Earth Sci. - Quaternary Science, Geomorphology and Paleoenvironment

Received on: 12 Aug 2022, Edited by: Benedict Reinardy

Manuscript ID: 1017594

Research Topic: Past Ice Sheet and Ice-Ocean Interactions from Deglaciated Continental Margins

Keywords: Little Storfjorden, Hambergbukta, Younger Dryas, Little Ice Age, Grounding zone wedge, Terminal moraine

Download latest manuscript
Supplementary materials
View submitted files history
Request extension
View invoice

ON TIME

Submit your comments to the Reviewer(s) and re-submit a new version of your manuscript. Manuscript quality indicators are available to all participants in the AIRA tab to facilitate the peer review process.

You are pending to respond to Reviewer 1 and Reviewer 2 and/or resubmit a new version of your manuscript.

History | Editor Active | Reviewer 1 Active | Reviewer 2 Active | •A•I•R•A•

Date	Updates
03 Oct 2022	Interactive review forum activated.
12 Aug 2022	Submitting Author Young Jin Joe submitted manuscript.

frontiers

Glacial history and depositional environments in Little Storfjorden and Hambergbukta of Arctic Svalbard since the Younger Dryas

Young Jin Joe[1,2], Kwangchul Jang[1], Matthias Forwick[3], Jan Sverre Laberg[3], Gee Soo Kong[4], Moo-Hee Kang[4], Seok-Hoon Yoon[2], Seung-Il Nam[1]*

[1]Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea
[2]Jeju National University, Jeju Special Self-Governing Province 63243, Republic of Korea
[3]UiT The Arctic University of Norway in Tromsø, Department of Geosciences, NO-9037 Tromsø, Norway
[4]Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

*** Correspondence:**
Seung-Il Nam
sinam@kopri.re.kr

Keywords: Little Storfjorden, Hambergbukta, Younger Dryas, Little Ice Age, grounding zone wedge5 terminal moraine

Number of words: 7248
Number of figures: 11
Number of tables: 3

Abstract

Geophysical and lithological data provide crucial information for the understanding of glacial history in Arctic Svalbard. In this study, we reconstructed the glacier-induced depositional environments of Little Storfjorden and its tributary, Hambergbukta, over the last 13 ka to better understand the glacial history of southeastern Svalbard. The combined uses of swath-bathymetry and high-resolution seismostratigraphy, and multiple-proxy measurements of sediment cores allowed us to define five steps of glacier-induced depositional environments: 1) deposition of massive, semi-consolidated gravelly sandy mud (Facies 1) during re-advance or stand-still of the marine-based glaciers/ice streams in Little Storfjorden during Younger Dryas (13–12 ka); 2) deposition of massive mud to gravelly sandy mud (Facies 2A and B), during glacial retreat until the earliest Holocene (12–10.1 ka); 3) sediment winnowing by enhanced bottom currents during the early to middle Holocene (10.1–3.7 ka); 4) deposition of bioturbated sandy mud (Facies 3) with high productivity under seasonal sea ice conditions during the late Holocene (3.7–0.7 ka); and 5) deposition of (slightly) bioturbated sandy to gravelly mud (Facies 4) affected by glacier surges since Little Ice Age (LIA) (Facies 4). In addition to seismostratigraphic relation, depositional patterns of IRD in Little Storfjorden indicate that the glacier surges in Hambergbukta occurred only after ~700 years BP. This suggests that the terminal moraine complex (TMC) represents the maximum extent of the LIA surges, which argues against the recent inference for the TMC formation during pre-LIA. This study shows the importance of multiple parameters to better understand the recent behavior of tidewater glaciers in the Svalbard fjords in response to climate change.

KOPRI 극지연

번호	관련증빙 명
22-1	2022년 한국해양학회 춘계학술대회 구두 발표 초록(좌) (조영진; Past glacier's behavior in hambergbukta and Little Storfjorden in Arctic Svalbard based on seismic and lithostratigraphy)
22-2	2022년 The 27th ISPS 발표 포스터(우) (조영진; Glacial history and attendant depositional environments in southern Svalbard since the Younger Dryas)

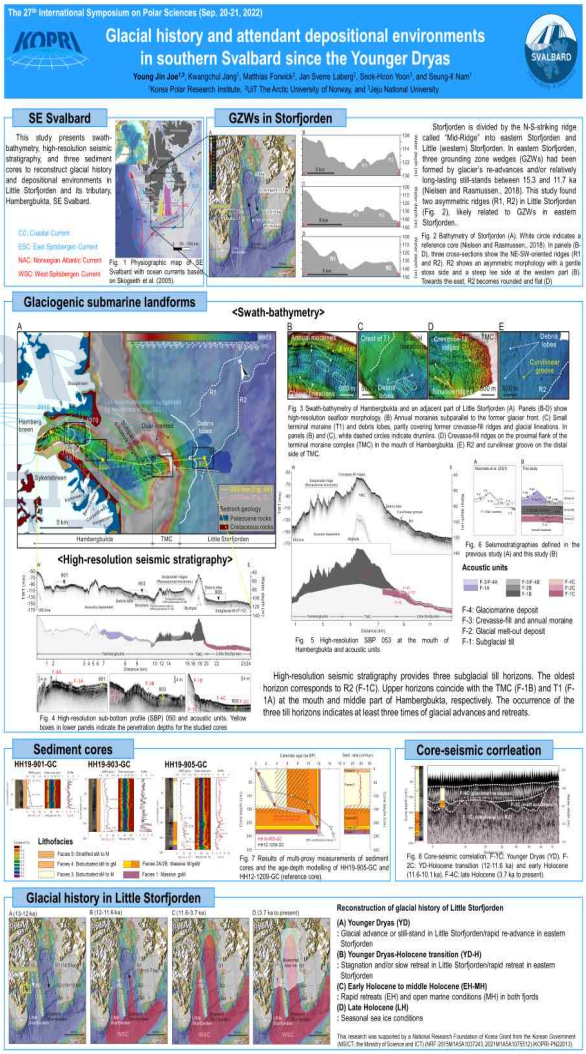
Past glacier's behavior in Hambergbukta and Little Storfjorden in Arctic Svalbard based on seismic and lithostratigraphy

조영진[1,2*], 장광철[1], Matthias Forwick[3], Jan Sverre Laberg[3], 공기수[4], 강무희[4], 윤석훈[2], 남승일[1*],

[1]극지연구소
[2]제주대학교
[3]노르웨이 트롬소 북극대학교(UiT)
[4]한국지질자원연구원

*E-mail: yjjoe@kopri.re.kr

햄버그북타는 스발바르 군도의 서 스피츠베르겐 남동부 연안에 위치한 소규모의 피오르드이다. 스발바르 연안에 발달된 여러 피오르드를 포함하여, 햄버그북타는 소빙기(Little Ice Age)동안 조수빙하의 급격한 서지(surge)를 통해 다양한 빙하기원 지형들이 발달된 것으로 보고되었다. 특히, 햄버그북타의 피오르드 입구(fjord mouth)에서는 강한 조수빙하(tidewater glacier)의 서지로 인하여 형성된 말단 빙퇴석(terminal moraine)이 특징적으로 관찰된다. 하지만, 이러한 말단 빙퇴석의 형성 시기는 아직까지 정확하게 규명되지 않은 상황이며, 이는 기존 햄버그북타에 국한된 지구물리탐사와 부족한 연대 정보에 의한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 2019년 노르웨이 트롬소 북극대학(UiT)의 조사선 RV Helmer Hanssen을 이용하여 제 3차 한국-노르웨이 스발바르 피오르드 국제공동탐사동안 연구 지역을 확장하여 햄버그북타를 비롯하여 서 스토르피오르덴 지역으로부터 다중빔 음향측심, 천부지층 반사파 및 퇴적물 시추코어 자료를 확보하였으며, 확장된 연구지역에 대한 탄성파 및 암층서 분석을 수행함으로써 영거 드라이아스(~12 ka) 이후 연구지역의 빙해양 퇴적환경 변화를 보다 정확하게 복원하였다. 분석결과를 바탕으로, 햄버그북타는 홀로세 전후로 최소 세 차례의 조수빙하/해양기저빙하(marine-based glacier)의 전진이 있었으며, 이는 본 연구에서 정의된 탄성파 층서단위에서 뚜렷하게 확인된다. 탄성파 층서자료와 함께 퇴적물 코어의 암층서 기록은 햄버그북타의 피오르드 입구에 형성된 말단 빙퇴석이 소빙기동안 발생했던 조수빙하 서지에 의해 발달되었음을 보여준다.



번호	관련증빙 명
23	퇴적물 내 광물조성 활용 스발바르 과거 빙하 거동 복원 연구 관련 논문 투고 증빙 자료 (Jang et al., under review; Non-linear response of glacier melting to Holocene warming in Svalbard recorded by sedimentary iron oxyhydroxides: a new proxy for glacier dynamics): XRD 활용 스발바르 북부 연구 논문 투고

Earth and Planetary Science Letters

Non-linear response of glacier melting to Holocene warming in Svalbard recorded by sedimentary iron oxyhydroxides: a new proxy for glacier dynamics

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Article Type:	Letters
Keywords:	iron oxyhydroxides; high Arctic environments; glacier retreat; tipping point; accelerated glacier melting; rare earth elements
Corresponding Author:	Seung-Il Nam, PhD Korea Polar Research Institute Incheon, KOREA, REPUBLIC OF
First Author:	Kwangchul Jang, Ph.D.
Order of Authors:	Kwangchul Jang, Ph.D.
	Germain Bayon
	Christoph Vogt
	Matthias Forwick
	Youngkyu Ahn, Master
	Jung-Hyun Kim, Ph.D.
	Seung-Il Nam, Ph.D.
Abstract:	The recent acceleration of ice-sheet loss with its direct impact on sea-level rise and coastal ecosystems is of major environmental and societal concern. However, the effect of atmospheric temperature increases on long-term glacier retreat remains poorly defined due to limited historical observations and uncertainties in numerical ice-sheet models, which challenges climate change adaptation planning. Here, we investigate the time-transgressive response of Arctic glaciers since the last deglaciation using glacially-derived Fe-oxyhydroxide layers preserved in glacimarine sediments from a large fjord system in Svalbard. Glacial weathering releases large amounts of Fe, resulting in the deposition of Fe-oxyhydroxide particulates in nearby marine sediments, which can serve as fossil indicators of past glacial melting events. Our results indicate that the rate of ice-sheet loss increased from 18 to 41 m/yr between 16.3 and 10.8 kyr BP, synchronously with the progressive rise in atmospheric and oceanic temperatures. From 10.8 kyr BP, glacier retreat markedly accelerated (up to ~116 m/yr) when regional atmospheric temperatures exceeded modern values. Coupled with field observations, this finding directly supports a non-linear response of glacial melting to summer air temperature increases. In addition to suggesting that ice-sheet loss and sea-level rise may further accelerate in the near future, this study paves the way for the use of sedimentary Fe oxyhydroxide layers in subarctic environments for reconstructing past glacial dynamics.
Suggested Reviewers:	Mark J. Hopwood, phD Southern University of Science and Technology mark@sustech.edu.cn He is knowledgeable about the glacially-derived nutrient cycle, including iron.
	Robert Raiswell, phD Prof., University of Leeds r.w.raiswell@leeds.ac.uk He is knowledgeable about iron behavior in glacial systems.
	Luke D. Trusel, phD Prof., The Pennsylvania State University trusel@psu.edu He is knowledgeable about the impacts of climate variability and change on the Antarctic and Greenland ice sheets.
	Jochen Knies, phD

KOPRI 극지연구소

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

번호	관련증빙 명
24	Jang et al. (2023) published in Earth and Planetary Science Letters

Contents lists available at ScienceDirect

Earth and Planetary Science Letters

journal homepage: www.elsevier.com/locate/epsl

Non-linear response of glacier melting to Holocene warming in Svalbard recorded by sedimentary iron (oxyhydr)oxides

Kwangchul Jang[a], Germain Bayon[b], Christoph Vogt[c], Matthias Forwick[d], Youngkyu Ahn[a], Jung-Hyun Kim[a], Seung-Il Nam[a,*]

[a] Division of Glacial Environment Research, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea
[b] Univ Brest, CNRS, Ifremer, Geo-Ocean, F-29280 Plouzané, France
[c] Crystallography & Geomaterials, FB05 Geosciences & MARUM, University of Bremen, 28359 Bremen, Germany
[d] Department of Geosciences, UiT The Arctic University of Norway, NO-9037 Tromsø, Norway

ARTICLE INFO

Article history:
Received 23 August 2022
Received in revised form 9 February 2023
Accepted 12 February 2023
Available online xxxx
Editor: A. Jacobson

Keywords:
iron (oxyhydr)oxides
high Arctic environments
glacier retreat
tipping point
accelerated glacier melting
neodymium isotopes

ABSTRACT

The recent acceleration of ice-sheet loss with its direct impact on sea-level rise and coastal ecosystems is of major environmental and societal concern. However, the effect of atmospheric temperature increases on long-term glacier retreat remains poorly defined due to limited historical observations and uncertainties in numerical ice-sheet models, which challenges climate change adaptation planning. Here, we present a novel approach for investigating the time-transgressive response of Arctic glaciers since the last deglaciation using glacially-derived Fe-(oxyhydr)oxide layers preserved in glaciomarine sediments from a large fjord system in Svalbard. Glacial weathering releases large amounts of Fe, resulting in the deposition of Fe-(oxyhydr)oxide particulates in nearby marine sediments, which can serve as fossil indicators of past glacial melting events. Our results indicate that Svalbard glaciers retreated at a rate of 18 to 41 m/yr between 16.3 and 10.8 kyr BP, synchronously with the progressive rise in atmospheric and oceanic temperatures. From 10.8 kyr BP, glacier retreat markedly accelerated (up to ~116 m/yr) when regional atmospheric temperatures exceeded modern values. Coupled with field observations, this finding directly supports a non-linear response of glacial melting to summer air temperature increases. In addition to suggesting that ice-sheet loss and sea-level rise may further accelerate in the near future, this study paves the way for the use of sedimentary Fe-(oxyhydr)oxide layers in subarctic environments for reconstructing past glacial dynamics.

© 2023 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Global warming significantly impacts the cryosphere in modern Earth surface environments, resulting in the cumulative volume loss of ice sheets, glaciers, and sea ice (Howat and Eddy, 2011; Kochtitzky et al., 2022; Lindsay and Schweiger, 2015; Shepherd et al., 2018; Zemp et al., 2019). For instance, in Greenland, the average retreat rate of marine-terminating glaciers accelerated from 22 m/yr between 1985 and 2000 to 103 m/yr between 2000 and 2010 (Howat and Eddy, 2011). The mass loss of marine-terminating glaciers in the Northern Hemisphere further increased from 44.47 ± 8.23 Gt/yr between 2000 and 2010 to 51.98 ± 4.62 Gt/yr between 2010 and 2020 (Kochtitzky et al., 2022). This current global trend towards accelerating glacier mass loss leads to positive albedo feedback amplifying global warming (Flanner et al., 2011), as well as to massive freshwater runoff into the oceans, affecting sea-level rise (Rye et al., 2014), physical oceanography (Williams et al., 2016) and marine ecosystems (Fuentes et al., 2016).

Future climate projections based on general circulation models and various greenhouse gas emission scenarios (referred to as representative concentration pathways; RCPs) predict that ongoing ice melting will cause a global sea-level rise between 0.12–0.22 m (RCP2.6; i.e., a low emission pathway yielding a radiative forcing of 2.6 W/m^2 by 2100), and 0.15–0.26 m (RCP8.5; high emission pathway) by 2050, relative to the 1986–2005 period with a contribution by thermal expansion (Church et al., 2013; Oppenheimer et al., 2019). Such predictions on short timescales are associated with relatively small uncertainties, meaning that they can serve as an effective basis for establishing climate change adaptation strategies (Oppenheimer et al., 2019). However, over the long term, the projected sea-level rise varies substantially depending on RCPs, for instance, 0.30–0.65 m (RCP 2.6) and 0.63–1.32 m (RCP 8.5) by 2100

* Corresponding author.
E-mail address: seaice@kopri.re.kr (S.-I. Nam).

https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118054
0012-821X/© 2023 The Author(s). Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

shift towards increasing oceanic and atmospheric temperatures. However, all reconstructed temperature proxy records indicate instead a gradual deglacial warming (Supplementary Fig. S3), hence ruling out a linear response of glacier melting to increasing temperatures. A similar case comes from modern Greenland, where the retreat of hundreds of marine-terminating glaciers markedly accelerated from mean rates of 22 m/yr between 1985 and 2000 to 103 m/yr for the 2000–2010 period (Howat and Eddy, 2011), with no evidence for any dramatic temperature increase (Fig. 8). Collectively, our FeOx proxy record for early Holocene glacier retreat in Svalbard and recent decadal observations imply a non-linear relationship between glacier melting and temperature increases (Trusel et al., 2018).

5.6. Accelerated glacier melting beyond a temperature tipping point?

A striking feature of our results is that the early Holocene event of rapid deglaciation at 10.8 kyr BP occurred when summer air temperatures at the location of the North Greenland Ice Core Project (NGRIP) were comparable to AD 2000 (~1.8 °C above pre-industrial values; Buizert et al., 2018) (Fig. 8). Since the melting of the Greenland ice sheet largely occurs during the summer season (Van den Broeke et al., 2009), summer air temperature records in polar regions, rather than global temperature records such as the global mean surface temperature (e.g., Osman et al., 2021), appear to be best suited for evaluating the impact of global warming on Arctic glacier melting. One could possibly argue that the summer air temperature record from central Greenland (i.e., NGRIP; Supplementary Fig. S3F) cannot be representative of the evolution of atmospheric temperature in the maritime environment of Svalbard. Given the absence of any air temperature record for Svalbard over the last 16 kyr, other records from coastal Eastern Greenland (e.g., Zachariae Isstrom; Supplementary Fig. S3G) could be more appropriate for comparison with our proxy records. However, the hydrological setting along Eastern Greenland is strongly affected by the cold southward-flowing East Greenland Current (Fig. 1A), which results in a spatial SST distribution pattern that is decoupled from that of the West Spitsbergen Current-dominated region around Svalbard (Romanovsky et al., 2010) (Fig. 1A). Because the temperature records inferred from Eastern Greenland ice cores are likely to have been influenced by variations in the relative strength of the East Greenland Current over time (Bonnet et al., 2010), these records are probably less appropriate than the NGRIP record for comparison with Svalbard.

Based on the above, our results provide direct support that Arctic glacier melting increased markedly during the early Holocene, when summer temperatures in central Greenland reached the AD 2000 value, i.e., approximately +1.8 °C above pre-industrial values. This particular atmospheric temperature coincides with the threshold value over which irreversible mass loss of the Greenland ice sheet has been suggested to occur at present (Pattyn et al., 2018). Such a non-linear response of glacier melting beyond a specific temperature tipping point could potentially relate to the larger exposure of ice-sheet surfaces as a result of reduced ice-sheet height led by warmer temperatures, i.e., the so-called positive melt-elevation feedback (Boers and Rypdal, 2021; Pattyn et al., 2018). Since regional summer temperatures in Greenland have already crossed that postulated tipping point and are projected to rise in the near future (Rantanen et al., 2022), our findings hence re-emphasize the prediction that global warming could cause a massive loss of glaciers and other ice masses in the Northern Hemisphere during the coming decades or centuries (Pattyn et al., 2018).

6. Conclusion

In this study, we showed that sedimentary iron (oxyhydr)oxide layers (FeOx) preserved in coastal glaciomarine sediments can serve as diagnostic features of past glacial melting events. When glacial meltwater discharges into seawater, the export of glacially-derived iron fed by subglacial weathering appears to result in massive FeOx deposition in ice-proximal marine environments. The application of this new proxy to four sediment cores recovered along an ~150 km long transect in the longest fjords system on northern Svalbard enabled us to reconstruct the evolution of glaciers during the past 16 kyr. Our results indicate an overall increase in glacier melting rates from 18 to 41 m/yr between 16.3 and 10.8 kyr BP, attributed to the gradual rise of temperature recorded in marine sediments and ice cores. A pronounced acceleration of glacier melting rate (up to 116 m/yr) occurred in northern Svalbard after 10.8 kyr BP, which did not coincide with any change in temperature gradients. This finding implies a non-linear response of glacier melting to regional warming, which echoes what has been recently observed in Greenland, when the average retreat rates of marine-terminating glaciers abruptly increased after AD 2000. Given that both past and recent cases of accelerated glacier melting in both Svalbard and Greenland occurred when the summer air temperature in central Greenland reached ~1.8 °C above pre-industrial values, this value could represent a temperature tipping point above which glacier melting accelerates. Considering that the Arctic near-surface air temperatures currently stand at ~3 °C above pre-industrial values (Rantanen et al., 2022), the future projections for massive loss of Arctic ice masses would be re-emphasized.

CRediT authorship contribution statement

Kwangchul Jang: Conceptualization, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Germain Bayon:** Conceptualization, Supervision, Writing – review & editing. **Christoph Vogt:** Investigation, Methodology, Writing – review & editing. **Matthias Forwick:** Project administration, Resources, Writing – review & editing. **Youngkyu Ahn:** Investigation, Writing – review & editing. **Jung-Hyun Kim:** Visualization, Writing – review & editing. **Seung-Il Nam:** Funding acquisition, Project administration, Resources, Supervision, Writing – review & editing.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

The data that support the findings of this study are available in Supplementary Information.

Acknowledgements

This study was supported mainly by the Basic Core Technology Development Program for the Oceans and the Polar Regions (NRF-2021M1A5A1075512) (K9981/N2081) and the Basic Science Research Program (2017R1A6A3A01076729) from a National Research Foundation of Korea Grant from the Korean Government (MSIT: the Ministry of Science and ICT). We would like to thank all the participants of the cruises on RV *Helmer Hanssen* for their support of the core sampling, as well as D. Kim, K. Park, Y. Jue, Y. J. Joo, and Y. Son for laboratory assistance. We also thank the XRD lab crew of the Crystallography & Geomaterials group at Geosciences

25	Joe et al. (2023) published in Frontiers in Earth Science

frontiers | Frontiers in Earth Science

Commentary: Reply to commentary by Noormets and Kirchner on "Glacial history and depositional environments in little Storfjorden and Hambergbukta of Arctic Svalbard since the younger dryas" [Frontiers in Earth Science, (2022), 2211]

Young Jin Joe[1], Kwangchul Jang[1], Matthias Forwick[2], Jan Sverre Laberg[2] and Seung-Il Nam[1]*

A Commentary on
Commentary: Glacial history and depositional environments in little Storfjorden and Hambergbukta of Arctic Svalbard since the younger dryas

The main concern of the comment raised by Noormets and Kirchner is our interpretation of the Terminal Moraine Complex (TMC) formation at the Hambergbukta fjord mouth proposed by Joe et al. (2022). Noormets and Kirchner argue that the complex morphological features of the TMC likely resulted from multiple glacier advances and retreats after the Younger Dryas. They also point out that insufficient geophysical data sets and age uncertainty of core JM 11BIO19 005-GC obtained from the distal side of TMC led to an incomplete assessment of the TMC formation in Joe et al.

subbottom profiling data. However, the additional subbottom profile of the 051 line (Figure 1) clearly show that DFL 2 and DLF 3 lie above F-3C (Figure 3), which encompasses the period from the IRD-rich earliest Holocene to the middle Holocene characterized by the pronounced decrease in sedimentation rates (Figure 9 in Joe et al., 2022). This suggests that DFL-2 and DLF-3 were formed at least after the middle Holocene, thus during the late Holocene. However, we cannot determine how much earlier DFL 1 formed than DFL-2 and DFL 3 because our data set does not cover the DFL-1 area. A further geophysical and geological investigation is necessary to evaluate this speculation.

Regarding the complex morphology of TMC, Noormets and Kirchner argued that the flattened crest areas and terraces at depths up to 78 m on the distal flank of TMC were likely formed by large tabular icebergs scouring. Considering the shallow depth of most Storfjorden and the submarine ridge (e.g., Mid-ridge), and the northwards increasing gradient of the glacier outflux response of the Storfjorden area (Forwick et al., 2010 and references therein), they suggested that the large tabular icebergs possibly originated from the Storfjorden ice stream (or potentially its shelf) that existed during the last deglaciation (cf. Andrews and Komuniecki, 2018), rather than during the Holocene. If these icebergs would had formed earlier than the Holocene, we would expect to identify a distinct glaciomarine sediment cover on the top of the flattened features, as exemplified in an acoustic unit F-4C on the distal side of TMC. However, the absence of glaciomarine sediment cover, such as an F-4 type acoustic unit, on top of flattened features (Figure 9 in Joe et al., 2022) argues against the possibility of pre-Holocene iceberg scouring. Furthermore, these flattened features on the distal flank of TMC appear morphologically to be synchronous with or after the formation of DFL 2 (Figure 3) during the late Holocene. In this context, the flattened features can be formed by large icebergs originating from Hambergbukta since the Little Ice Age (LIA). Such huge icebergs existed during LIA and even after AD1900 in the Hambergbukta, as identified by iceberg scours at depths of 70–90 m on the proximal flank of TMC (Figure 10). We speculate that large icebergs overturned after passing TMC, potentially and then formed flattened features, such as kettle holes (cf. Ottesen et al., 2017) on the distal flank of TMC (Figure 14).

In summary, our study aimed to understand the glacial history and depositional environments of Little Storfjorden and its tributary, Hambergbukta, since the Younger Dryas. Joe et al. (2022) suggested that the entire TMC was formed by multiple glacial advances (or surges) in agreement with Noormets and Kirchner's interpretation. However, our geophysical and geological records support the conclusion that the entire TMC formed at least during the late Holocene. In particular, multiple significant advances (or surges) of Hambergbreen occurred after ~1 ka, leading to the formation of TMC during the latest Holocene, including LIA, similar to northern Spitsbergen (Werner, 1993; Rasch et al., 2021; Rasch et al., 2019). Given the limited radiocarbon age dating and geophysical data set, there is a need for further investigation of the oldest set of debris lobes (DFL-1) on the distal flank of TMC to obtain reliable age data that shed more light on the behavior of Hambergbreen during the late Holocene.

Author contributions

YJJ and SIN primarily wrote the reply to Noormets and Kirchner's commentary. YJJ carried out the sedimentological analysis. KJ, MF, and JSL have contributed to editing the reply. All authors contributed to the article and approved the submitted version.

Funding

This research was supported by a National Research Foundation of Korea Grant from the Korean Government (MSIT: the Ministry of Science and ICT) (NRF-2021M1A5A1075512, K9981/N2081).

Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
26	Kim et al. (2023) published in Scientific Reports

scientific reports

Check for updates

OPEN

Large contributions of petrogenic and aged soil-derived organic carbon to Arctic fjord sediments in Svalbard

Dahae Kim[1,2], Jung-Hyun Kim[1✉], Youngkyu Ahn[1,3], Kwangchul Jang[1], Ji Young Jung[1], Minji Bae[1,3] & Seung-Il Nam[1]

Svalbard fjords are recognized as hotspots for organic carbon (OC) burial and storage due to their high sedimentation rates, which effectively trap terrestrial sediments and inhibit extensive OC remineralization. In this study, we investigated surface sediments (n = 48) from eight Svalbard fjords, along with bedrock (n = 17), soil (n = 28), and plant (n = 12) samples, to identify the sources of sedimentary OC in these fjords using geochemical parameters. All examined surface sediments from the fjords showed a depletion in $^{14}C_{org}$ (− 666.9 ± 240.3‰), indicating that recently fixed terrestrial and marine biomass alone cannot account for the entire sedimentary OC pool. Conventional bulk indicators such as N_{org}/TOC ratio and $\delta^{13}C_{org}$ were insufficient for fully determining the sources of sedimentary OC. Therefore, we employed a four-end-member approach, using $\Delta^{14}C_{org}$, $\delta^{13}C_{org}$, and lignin phenols to assess the relative contributions of petrogenic, soil-derived, plant-derived, and marine OC to the sedimentary OC pool. The analyzed fjord sediments consisted, on average, of 59.0 ± 28.1% petrogenic OC_r 16.8 ± 12.1% soil-derived OC_s 2.5 ± 2.2% plant-derived OC_p and 21.8 ± 18.5% marine OC. This approach highlights the substantial contributions of petrogenic and aged soil-derived OC to present-day sedimentary OC in Svalbard fjords. Considering predicted global warming, accelerated inputs of petrogenic and soil-derived OC into fjords due to rapid glacier retreat may significantly impact the active carbon cycle and potentially contribute to CO_2 emissions to the atmosphere, depending on burial efficiency.

In recent decades, the 'land-to-ocean aquatic continuum' between 'terra firme' terrestrial ecosystems and the open ocean has received considerable attention as aquatic critical zones in regulating the global carbon cycle on annual to centennial timescales[1,2]. Among these aquatic critical zones, fjords, mainly located in the mid-high latitudes, represent a relatively small fraction of the global continental margin (< 0.1%)[3]. Nevertheless, they serve as biogeochemical hotspots that effectively trap and store substantial amounts of organic carbon (OC)[1,4,5]. Annually, approximately 18 million tons of marine and terrigenous OC are buried in glacially depressed basins within fjords, accounting for approximately 11% of the global marine OC burial[6] and 17 ± 12% of the global terrestrial OC burial[7]. As a result, the OC burial per unit area in fjords largely exceeds the global ocean average, making

60. Galy, V., Peucker-Ehrenbrink, B. & Eglinton, T. Global carbon export from the terrestrial biosphere controlled by erosion. *Nature* **521**, 204–208 (2015).
61. Nuth, C. *et al.* Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard. *Cryosphere* **7**, 1603–1621 (2013).
62. Moskalik, M. *et al.* Spatiotemporal changes in the concentration and composition of suspended particulate matter in front of Hansbreen, a tidewater glacier in Svalbard. *Oceanologia* **60**, 446–463 (2018).
63. Wei, B. *et al.* The nature, timescale, and efficiency of riverine export of terrestrial organic carbon in the (sub)tropics: Insights at the molecular level from the Pearl River and adjacent sea. *Earth Planet. Sci. Lett.* **565**, 116934 (2021).
64. Meire, L. *et al.* Glacier retreat alters downstream fjord ecosystem structure and function in Greenland. *Nat. Geosci.* **16**, 671–674 (2023).
65. Kim, Y. J. *et al.* Chronological changes in soil biogeochemical properties of the glacier foreland of Midtre Lovenbreen, Svalbard, attributed to soil-forming factors. *Geoderma* **415**, 115777 (2022).
66. Jung, J. Y. *et al.* Soil organic carbon characteristics relating to geomorphology near Vestre Lovenbreen moraine in Svalbard. *Ecol. Environ.* **37**, 69–79 (2014).
67. Folk, R. L. & Ward, W. C. Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.* **27**, 3–26 (1957).
68. Stuiver, M. & Polach, H. A. Discussion: Reporting of ^{14}C data. *Radiocarbon* **19**, 355–363 (1977).
69. Yunker, M. B. *et al.* Tracing the inputs and fate of marine and terrigenous organic matter in Arctic Ocean sediments: A multivariate analysis of lipid biomarkers. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* **52**, 3478–3508 (2005).
70. Jakobsson, M. *et al.* The international bathymetric chart of the Arctic Ocean Version 4.0. *Sci. Data* **7**, 176 (2020).
71. Gobi, M. A., Yunker, M. B., Macdonald, R. W. & Eglinton, T. I. Distribution and sources of organic biomarkers in arctic sediments from the Mackenzie River and Beaufort Shelf. *Mar. Chem.* **71**, 23–51 (2000).

Acknowledgements

We are extremely grateful to Stephanie Kusch and one anonymous reviewer whose valuable comments and suggestions greatly contributed to the improvement of our manuscript. Our heartfelt appreciation goes to the captain and crew of *R/V Helmer Hansen* for their invaluable support during our research expeditions at sea. We would also like to acknowledge the invaluable assistance of Yeong-Ju Son and Young Jin Joe in sample preparation and analytical work at the KOPRI laboratory, as well as Juhee Lee, Jihyun Cha, and Seongjin Hong in conducting coal sampling. We would also like to express our gratitude to Ingeborg Levin and Samuel Hammer for making available the $\Delta^{14}C$-CO_2 data from the Alert station at the ICOS-ERIC Carbon Portal. This study was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Ministry of Science and ICT (NRF-2021M1A5A1075512 and KOPRI-PN23013).

Author contributions

D.K. and J.-H.K. designed and coordinated the study and wrote the manuscript. D.K. and J.-H.K. interpreted the majority of the data. S.-I.N. and J.J. contributed to the sample acquisition. D.K. and M.B. conducted the biomarker analyses. Y.A. and K.J. analyzed the Nd isotopes. All authors commented on the manuscript and contributed to its writing.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Supplementary Information The online version contains supplementary material available at https://doi.org/10.1038/s41598-023-45141-z.

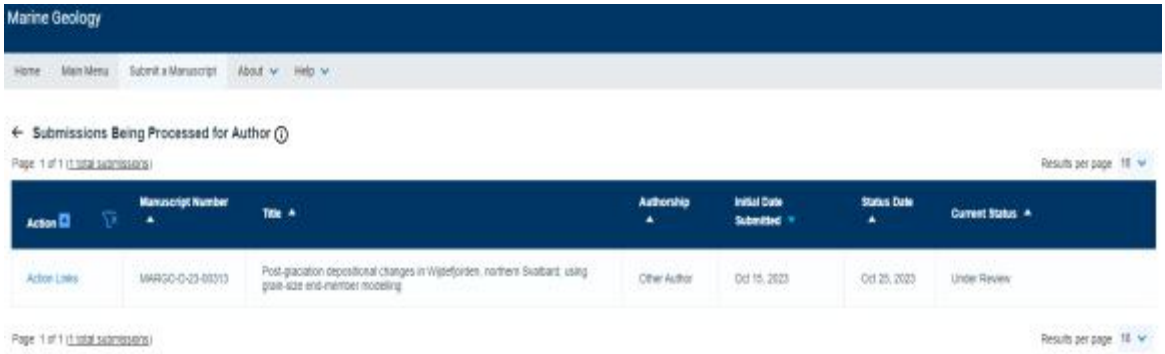
Correspondence and requests for materials should be addressed to J.-H.K.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
27	Ahn et al. (in review) submitted to Marine Geology



Marine Geology

Post-glaciation depositional changes in Wijdefjorden, northern Svalbard, using grain-size end-member modelling

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	MARGO-D-23-00313
Article Type:	Research Paper
Keywords:	Svalbard, fjord, tidewater glacier, grain-size end-member modelling, depositional process
Corresponding Author:	Seung-Il Nam Korea Polar Research Institute Incheon, KOREA, REPUBLIC OF
First Author:	Youngkyu Ahn
Order of Authors:	Youngkyu Ahn
	Young Jin Joe, Ph.D.
	Kwangchul Jang, Ph.D.
	Jung-Hyun Kim, Ph.D.
	Yeong Ju Son
	Matthias Forwick, Ph.D.
	Sungmin Hong, Ph.D.
	Seung-Il Nam, Ph.D.
Abstract:	Grain-size end-member (EM) modelling is a robust statistical approach for identifying and quantifying dominant grain-size distributions, providing a novel perspective on sediment transport and depositional processes. However, its application to polar fjord sediment studies has been relatively limited. This study examines grain-size distributions of six glacimarine sediment cores collected along an N–S transect from the continental shelf to the Wijdefjorden system in northern Svalbard. In addition, we integrate grain-size EMs with lithologic and acoustic facies, allowing us to identify three distinct groups of EMs, each closely associated with specific depositional processes: turbid meltwater discharge (EM1), sediment winnowing by bottom currents (EM2), and the deposition of ice-rafted debris and subglacial till (EM3). By analysing these three EM groups, we elucidate how glacial retreat from the last deglaciation to the early Holocene and Atlantic Water (AW) inflow significantly influenced depositional changes within the Wijdefjorden system. In contrast, a decrease in the AW inflow during the late Holocene corresponds to glacial re-advance, resulting in shifts in the depositional environment. This study demonstrates the utility of EM modelling in deciphering complex grain-size distributions and reconstructing different climate-driven depositional processes in glacimarine sediments of the Svalbard fjords. This integrated approach enhances our understanding of the intricate interplay among climate change, glacier dynamics, and oceanic forcing in polar fjord environments.

KOPRI
극지연구소

600 **Acknowledgements**

601 We thank the captain and crew of R/V *Helmer Hanssen* and all cruise participants,
602 especially Steinar Iversen and Truls Holm, for their support at sea. We also thank Dahae Kim
603 and Minji Bae for their analytical support in the laboratory at KOPRI. This study was fully
604 supported by a grant from the National Research Foundation of Korea (NRF), funded through
605 the Ministry of Science and ICT (NRF-2021M1A5A1075512; KOPRI-PN23013 to SIN).

606

607 **References**

608 Adakudlu, M., Andersen, J., Bakke, J., Beldring, S., Benestad, R., Bilt, W.V.D., Bogen, J.,
609 Borstad, C.P., Breili, K., Breivik, Ø., Børsheim, K.Y., Christiansen, H.H., Dobler, A.,
610 Engeset, R., Frauenfelder, R., Gerland, S., Gjelten, H.M., Gundersen, J., Isaksen, K.,
611 Jaedicke, C., Kierulf, H., Kohler, J., Li, H., Lutz, J., Melvold, K., Mezghani, A., Nilsen,
612 F., Nilsen, I.B., Nilsen, J.E.Ø., Pavlova, O., Ravndal, O., Risebrobakken, B., Saloranta, T.,
613 Sandven, S., Schuler, T.V., Simpson, M.J.R., Skogen, M., Smedsrud, L.H., Sund, M.,
614 Vikhamar-Schuler, D., Westermann, S., Wong, W.K., 2019. Climate in Svalbard 2100–A

번호	관련증빙 명
28	희토류 농도 활용 과거 황철석 풍화 추적 연구 논문 투고 증빙(Jang et al. under review)

<투고 논문 현황 – 23.10.24. 투고, 2023.11.01. 리뷰중>

Chemical Geology

A distinctive rare earth element signature for pyrite oxidation and glacial weathering

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	CHEMGE16556
Article Type:	Research paper
Section/Category:	Section 3 - Christian France-Lanord
Keywords:	rare earth elements; iron oxyhydroxides; sulfide weathering; sulfur cycle; Arctic coastal environments; glacier retreat
Corresponding Author:	Kwangchul Jang Korea Polar Research Institute KOREA, REPUBLIC OF
First Author:	Kwangchul Jang
Order of Authors:	Kwangchul Jang
	Germain Bayon
	Olivier Pourret
	Young Jin Joe
	Jung-Hyun Kim
	Eunji Byun
	Matthias Forwick
	Rafael Ladn
	Seung-Il Nam
Abstract:	The application of rare earth elements (REE) and neodymium (Nd) isotopes to authigenic Fe-(oxyhydr)oxide phases leached from marine sediments can be used for reconstructing past ocean circulation and chemical weathering patterns on nearby continental landmasses. To explore the behaviour of REE during chemical weathering in glacial environments, we analyzed the authigenic fraction of glacimarine sediments from the continental shelf off northern Svalbard (Arctic Ocean), where the evolution of ice sheet dynamics since the last deglaciation is well constrained. Our results show that leached authigenic fractions in Svalbard sediments exhibit shale-normalized REE patterns characterized by anomalously high mid-REE enrichments relative to both light- and heavy-REE, as expressed by concavity index values (CI > 2.5) that significantly depart from typical REE signatures for corresponding leached fractions in marine and river sediments worldwide (with 1.0 < CI < 2.5). Using a compilation of literature data, we provide compelling evidence that the occurrence of such pronounced mid-REE enrichments in leached authigenic fractions links to preferential oxidation of sedimentary pyrite during glacial weathering. While geochemical modelling will be required to further understand the detailed mechanism accounting for the observed REE decoupling following sedimentary pyrite oxidation, our results suggest that sustained sulfide weathering has proceeded in Svalbard since the last deglaciation. Our findings pave the way for the use of authigenic REE in the sedimentary record for tracing glacial weathering and associated biogeochemical sulfur and iron cycling across geological times.
Suggested Reviewers:	Michael Bau, PhD Professor, Constructor University Bremen gGmbH mbau@constructor.university He is expertised in biogeochemistry (including REE) of the Earth's surface environment.
	Marcus Gutjahr, PhD Helmholtz Centre for Ocean Research mgutjahr@geomar.de He is expertised in development and usage of geochemical tools for

Powered by Editorial Manager® and Production Manager® from Aries Systems Corporation

436 **Data Availability**

437 Datasets related to this article can be found in Supplementary Table S1.

438

439 **Acknowledgements**

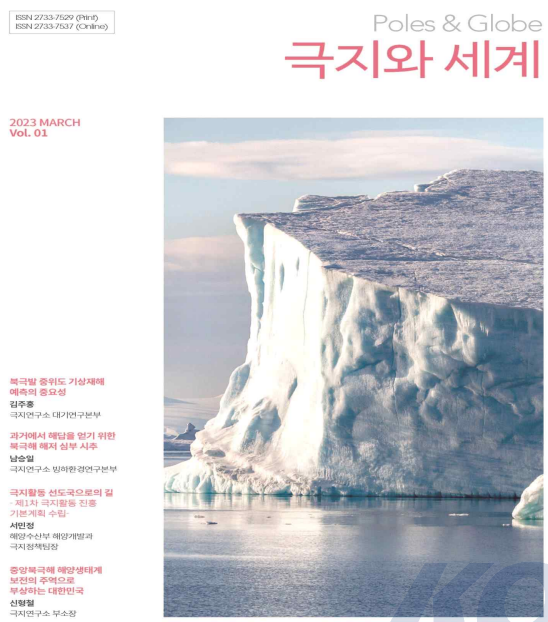
440 This study was supported mainly by the Basic Core Technology Development Program for
441 the Oceans and the Polar Regions (NRF-2021M1A5A1075512) from the NRF funded by MSIT,
442 Republic of Korea. Additionally, this research was partly supported by the Basic Science Research
443 Program of National Research Foundation of Korea (NRF-2017R1A6A1A07015374). We would like
444 to thank all the participants of the cruises on RV *Helmer Hanssen* for their support of the core
445 sampling, as well as D. Kim and Y. Son for laboratory assistance.

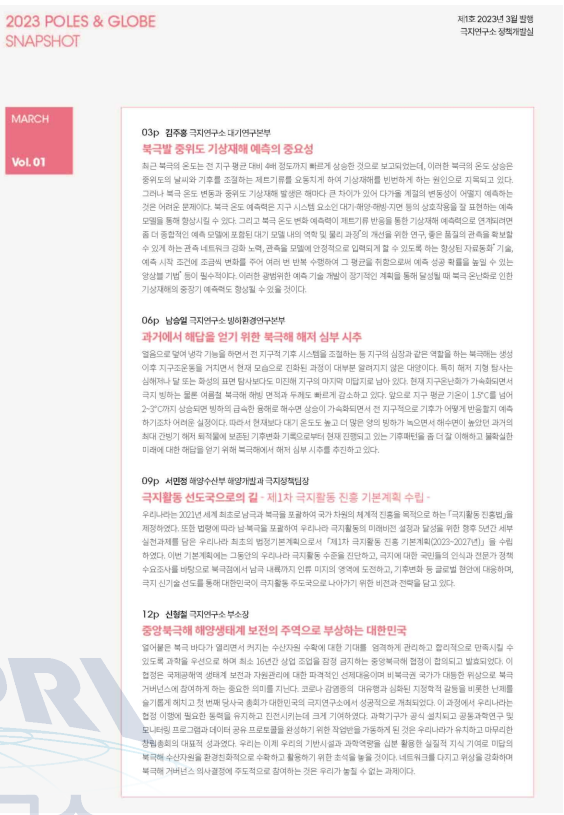
446

447

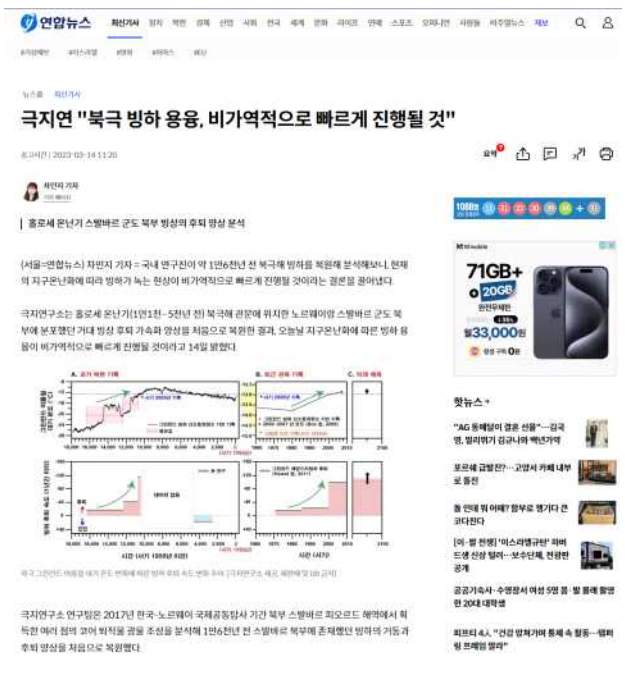
KOPRI 극지연구

번호	관련증빙 명
29	언론 홍보기사_극지와 세계 웹진





번호	관련증빙 명
30	언론 홍보기사_북극 빙하의 비가역적 빠른 융해 예고



번호	관련증빙 명
31	2023년 한국제4기학회 춘계학술대회 (안영규; 입도 분포 엔드멤버 모델링을 활용한 마지막 해방기 이후 북극 스발바르 북구 비데피오르드 퇴적 환경 변화 연구)

한국제4기학회 2023년 춘계학술대회 발표초록집 및 필드가이드북

입도 분포 엔드멤버 모델링을 활용한 마지막 해빙기 이후 북극 스발바르 북부 비데피오르 퇴적 환경 변화 연구

안영규[1,2,*], 조영진[1], 장광철[1], 김정현[1], 손영주[1], 홍성민[2], 남승일[1]

[1]극지연구소 빙하환경연구본부
[2]인하대학교 해양과학과

*E-mail: youngq@kopri.re.kr

북극해와 북대서양 관문에 위치하는 스발바르 군도는 주요 9개의 섬으로 이루어져 있으며, 전체 면적의 약 57%가 빙하로 덮여있다. 스발바르 군도에서 가장 큰 스피츠베르겐섬에는 빙하기 동안 빙하침식 작용으로 형성된 다양한 규모와 형태의 특징을 갖는 주요 피오르가 발달하고 있으며, 따뜻한 북대서양 수괴의 지류인 서스피츠베르겐 해류가 서쪽 해안을 따라 흐른다. 스발바르로 유입되는 따뜻한 해류는 피오르의 겨울철 결빙(freezing)과 여름철 해빙(melting) 변화에 의한 생태계 변화뿐만 아니라 피오르 안쪽에 존재하는 조수빙하 및 육상의 빙하 거동에 상당한 영향을 미친다. 특히 스발바르 군도는 최근 지구온난화에 의한 기후 변화에 가장 빠르게 반응하고 있는 북극 지역의 하나이다. 따라서, 스발바르 피오르에 쌓여있는 빙·해양 퇴적물에는 마지막 최대 빙하기 이후 해빙기를 거쳐 홀로세 동안 진행된 기후 변화에 의한 빙하 거동을 파악할 수 있는 퇴적 환경 변화에 대한 기록이 잘 보존되어 있다.

본 연구는 마지막 해빙기 이후 스피츠베르겐 북부에 있는 비데피오르의 빙하 거동과 빙·해양 퇴적층에 기록된 퇴적 기작 및 퇴적 환경을 복원하기 위해 지난 2017년 한국-노르웨이 RV Helmer Hanssen 국제공동탐사(HH17) 동안 획득한 총 6점의 중력 시추 코어를 대상으로 퇴적상 분석과 퇴적물의 입도를 활용한 엔드멤버 모델링(end member modelling) 분석연구를 수행하였다. 퇴적물의 색상과 입도, 퇴적 구조 및 물성 자료를 바탕으로 분류된 총 6개의 퇴적상은 빙하 기저 침식, 융빙수 유출, 해류의 유입, 유빙과 빙산의 거동 등에 의한 퇴적 과정을 반영하였다. 퇴적물 입도의 EM은 입도의 특징적인 분포 양상을 기반으로 총 3개(EM1-3)로 정의되었다. 입도의 EM 간의 상대적 비율의 차이는 퇴적상의 변화(전이)와 관계되어 비데피오르의 시·공간적인 빙·해양 퇴적 환경의 변화를 반영하는 것으로 보인다. 융빙수 유출이 우세한 환경은 높은 비율의 EM1으로 구성된 엽리 층리 퇴적상이 나타나며, 빙하 기저 침식 및 빙산의 거동에 의한 빙퇴적(diamicton) 층은 EM3의 비율이 높게 나타난다. 또한 북대서양 수괴의 유입으로 강한 해류의 영향을 받는 퇴적 환경에서는 주로 괴상의 퇴적상이 나타나며, 괴상의 퇴적상 내에서 EM2의 상대적 비율의 변화는 해류의 세기 변화를 반영하는 것으로 해석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 퇴적물 입도의 분포에서 도출된 EM은 스발바르 피오르 환경에서 복잡한 빙·해양 퇴적 기작 및 환경 변화를 복원하기 위한 프록시로 활용이 가능할 것으로 보인다.

번호	관련증빙 명
32	2023년 한국제4기학회 춘계학술대회 (배민지; Long-chain alkenone-based paleothermometry for reconstructing sea temperature in Svalbard fjord)

Long-chain alkenone-based paleothermometry for reconstructing sea surface temperature in Svalbard fjord

배민지[1,2,*], 김정현[1], 김다해[1,3], 임운혁[4], 하성용[4], Jocen Knies[5], 홍성민[2], 남승일[1]

[1]Korea Polar Research Institute
[2]Inha University
[3]Hanyang University
[4]Korea Institute of Ocean Science & Technology, Ecological Risk Research Department
[5]Geological Survey of Norway, Norway

*E-mail: bjo971120@kopri.re.kr

Our research aimed at assess the feasibility of employing comprehensive two-dimensional gas chromatography (GCXGC) as an alternative to the conventional one-dimensional gas chromatography (GC) for high-resolution reconstruction of long-chain alkenones (LCAs) in fjords of the Arctic Svalbard archipelago. LCAs have long been utilized as indicators for reconstructing sea surface temperatures. Haptophytes, the organisms responsible for LCAs production can be divided into 3 groups based on their habitat salinity range, each group exhibiting different LCAs distributions. Therefore, it is crucial to identify suitable indices for different environmental condition. While the $U^{K'}_{38Me}$ index has been widely used in brackish and marine environments, its analytical application has still proven challenging. Although we successfully separated C_{38}Me in the East Sea using GC with an Rtx-200 column, accurate quantification in Svalbard fjord was challenging due to the low instrument sensitivity and co-elution with other compounds. Nonetheless, by employing GCXGC with Rxi-17sil ms and Rtx-200 columns, we achieved a high-resolution separation of LCAs in glacial marine sediments taken from the Svalbard fjords. To establish suitable indices and calibration equations specific to Svalbard fjord environments, we combined surface sediment data from Svalbard fjord and North Atlantic with previously published data. By utilizing these indices and calibration equations, we reconstructed paleotemperatures from the KH17-GPC01 sediment core collected at the mouth of Svalbard Kongsfjord. Overall, this study successfully demonstrated the effectiveness of GCXGC

번호	관련증빙 명
33	2023년 EGU 구두 발표 (김다해; 스발바르 표층퇴적물 시료 대상 분자 수준의 리그닌 바이오마커 분석을 통해 유기물 기원 규명 및 상대적 기여도 제시에 관한 연구)

EGU23-10699, updated on 07 Jun 2023
https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10699
EGU General Assembly 2023
© Author(s) 2023. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Large contributions of aged organic carbon to Arctic fjord sediments in Svalbard

Dahae Kim, Jung-Hyun Kim, Youngkyu Ahn, Kwangchul Jang, Ji Young Jung, and Seung-Il Nam
Korea Polar Research Institute, Division of Glacial Environment Research, Incheon-si, South Korea (dhkim@kopri.re.kr)

Svalbard fjords are hotspots of organic carbon (OC) burial because of their high sedimentation rates. To identify sedimentary OC sources in Arctic fjords, we investigated surface sediments collected from eight Svalbard fjords using bulk and molecular geochemical parameters. All fjord surface sediments investigated were depleted in $\Delta^{14}C_{org}$ (–666.9±240.3‰, n=28), suggesting that more recently fixed terrestrial and marine biomass is not the only contribution to the sedimentary OC. However, the source could not be determined by the most commonly used bulk indicators (i.e., N_{org}/TOC ratio and $\delta^{13}C_{org}$) in the Arctic realm. Thus, we applied a three-endmember model based on $\Delta^{14}C_{org}$ and lignin phenols to disentangle the relative contributions of petrogenic, subglacial, and marine OC to the sedimentary OC pool. The fjord sediments (n=48) comprised on average of 79.3±26.1% petrogenic OC, 17.7±26.2% subglacial OC, and 3.0±2.5% marine OC. This three-end-member approach highlights the substantial contribution of petrogenic and subglacial OC to the present-day sedimentary OC in Svalbard fjords. Accordingly, under predicted warming worldwide, accelerated contributions of petrogenic and subglacial OC to fjords can be expected as a consequence of rapid glacier retreat, which may play an important role in the active carbon cycle as a potential CO_2 source to the atmosphere.

번호	관련증빙 명
34	2023년 한국제4기학회 추계학술대회 (조은아; 스발바르 피오르드의 퇴적물 유래 고대 DNA(aDNA)를 이용한 과거 유기체 군집구조 및 해빙 변화 복원 연구)

스발바르 피오르드의 퇴적물 유래 고대 DNA(aDNA)를 이용한 과거 유기체 군집구조 및 해빙 변화 복원 연구

조은아[1,*], 강승현[1], 배민지[2], 안영규[2], 손영주[2], 장광철[2], 김정현[2], 남승일[2]

[1]극지연구소 생명과학연구본부, [2]극지연구소 빙하연구본부

*E-mail: eunajo@kopri.re.kr

KOPRI 극지연구소

모든 생물체는 환경과 상호작용함에 따라 DNA를 배출하고 이러한 DNA는 대부분 환경에 축적된다. 이 중에서도 고환경 또는 고생물 시료에서 분리된 DNA는 고대 DNA (ancient DNA, aDNA)라고 일컬으며, aDNA 분석은 유기체의 과거 생물학적 역사를 재구성할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 스발바르 피오르드의 과거 퇴적 환경에 서식하던 유기체 군집구조 및 해빙 변화를 복원하기 위하여 이스 피오르드의 세 개 정점에서 멀티코어(MUC)를 이용하여 획득한 퇴적물 시료를 기반으로 깊이별 aDNA 분석을 수행하였다. 박테리아 군집구조 분석 결과, 세 개 코어의 대부분의 깊이에서 Proteobacteria가 높은 비율을 차지하고 있으며, Desulfobacterota 및 Cyanobacteria도 비교적 높은 비율을 차지하고 있었다. 진핵생물 군집구조 분석 결과, 세 개 코어 전반적으로 Stramenopiles(부등편모조류), Rhizaria(리자리아 – 아메바편모충류 포함), Alveolata(피하낭류)가 대다수의 비율을 차지하고 있는 것을 확인하였다. 이어서 해빙 관련 지표종을 분석한 결과, 세 개 코어의 일부 깊이에서 와편모조류인 *Polarella glacialis*, *Islandinium minutum*와 규조류인 *Haslea spicula* 등 3종의 해빙 지표종이 확인되었다. 본 연구 결과에서 확인된 3종의 해빙 연관 지표종 관련하여 향후 digital PCR을 이용한 정량분석을 진행하여, 이를 유기분자생체지표(IP25) 등 다른 해빙 프록시 결과와 비교를 통해 과거의 정확한 해빙 분포 변화를 해석할 예정이다. 본 연구 결과는 aDNA 접근 방식이 기후환경 복원 프록시로써 가능성이 있음을 보여주고 있으며, 향후 스발바르 피오르드에서 일어났던 과거 기후환경변화를 재구성하는 데 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

번호	관련증빙 명
35-1	콩스피오르드 멀티코어 퇴적물의 탄소-질소함량, 안정동위원소비 및 방사성 동위원소 분석 결과

Core name	Top depth (cm)	TOC (wt. %)	N_{tot} (wt. %)	$\delta^{13}C_{org}$ (‰ VPDB)	$\Delta^{14}C_{act}$ (‰)
IHI22-1159MUC	0	2.34	0.23	-22.8	-410.1
(inner)	1	2.42	0.23	-22.5	-
	2	1.95	0.22	-22.6	-
	3	2.31	0.23	-22.5	-
	4	2.49	0.23	-22.4	-
	5	2.44	0.22	-22.6	-428.9
	6	2.20	0.22	-22.4	-
	7	2.16	0.23	-22.5	-
	8	2.15	0.22	-22.5	-
	9	1.89	0.23	-22.4	-
	10	2.50	0.22	-22.6	-433.9
	11	2.65	0.25	-22.5	-
	12	2.09	0.22	-22.6	-
	13	2.12	0.22	-22.5	-
	14	2.18	0.23	-22.4	-
	15	2.58	0.23	-22.5	-469.3
	16	1.98	0.23	-22.5	-
	17	2.35	0.22	-22.4	-
	18	1.99	0.22	-22.7	-
	19	1.95	0.25	-22.5	-
	20	2.29	0.23	-22.6	-449.1
	21	2.34	0.23	-22.6	-
	22	2.30	0.23	-22.5	-
	23	1.87	0.23	-22.7	-
	24	2.22	0.23	-22.7	-
	25	2.28	0.23	-22.9	-448.5
	26	2.22	0.22	-22.8	-
	27	2.24	0.22	-22.9	-
	28	1.99	0.23	-22.7	-
	29	2.26	0.23	-23.5	-
	30	1.88	0.23	-22.8	-439.5
	31	2.05	0.23	-22.8	-
	32	2.05	0.23	-23.1	-
	33	1.89	0.23	-23.0	-
	34	2.46	0.24	-23.1	-
	35	2.03	0.23	-23.0	-425.3
	36	2.10	0.23	-22.8	-
	37	2.06	0.24	-23.2	-
	38	2.26	0.25	-23.1	-
	39	2.19	0.26	-22.9	-396.7
	40	2.10	0.23	-22.8	-
	41	0.29	0.02	-24.0	-
	42	0.25	0.02	-23.4	-
	43	0.25	0.02	-23.8	-
	44	0.29	0.02	-24.5	-
	45	0.24	0.02	-23.9	-792.9

Core name	Top depth (cm)	TOC (wt. %)	N_{tot} (wt. %)	$\delta^{13}C_{org}$ (‰ VPDB)	$\Delta^{14}C_{act}$ (‰)
IHI22-1161MUC	0	1.14	0.12	-22.6	-405.7
(middle)	1	1.22	0.13	-22.6	-
	2	1.37	0.12	-22.3	-
	3	1.27	0.12	-22.3	-
	4	1.30	0.12	-22.5	-
	5	1.34	0.10	-23.6	-479.2
	6	1.14	0.10	-23.4	-
	7	1.02	0.10	-23.2	-
	8	1.42	0.10	-23.2	-
	9	1.29	0.11	-23.4	-
	10	1.07	0.10	-23.2	-477.9
	11	1.14	0.11	-25.0	-
	12	1.23	0.10	-23.0	-
	13	1.33	0.10	-23.1	-
	14	1.21	0.09	-23.4	-
	15	1.32	0.10	-23.4	-488.0
	16	1.01	0.10	-23.4	-
	17	1.11	0.09	-23.1	-
	18	0.96	0.09	-23.0	-
	19	1.22	0.10	-23.3	-
	20	0.94	0.10	-23.4	-555.9
	21	0.96	0.11	-23.0	-
	22	1.48	0.10	-23.2	-
	23	0.91	0.11	-22.8	-
	24	1.20	0.11	-22.9	-
	25	1.16	0.11	-23.4	-513.0
	26	1.20	0.11	-23.4	-
	27	1.07	0.11	-23.2	-
	28	1.10	0.09	-23.2	-
	29	1.14	0.09	-23.2	-
	30	1.17	0.09	-23.0	-546.4
	31	1.17	0.09	-22.7	-
	32	1.26	0.10	-23.0	-
	33	1.30	0.09	-23.0	-
	34	1.29	0.09	-23.1	-
	35	1.30	0.09	-22.9	-523.6
	36	1.08	0.09	-23.1	-
	37	1.19	0.09	-23.5	-
	38	1.03	0.08	-23.6	-
	39	1.08	0.08	-23.7	-
	40	1.12	0.09	-23.4	-533.0
	41	0.87	0.09	-23.4	-
	42	1.08	0.10	-23.5	-
	43	1.20	0.10	-23.6	-
	44	1.19	0.09	-23.9	-525.6

Core name	Top depth (cm)	TOC (wt. %)	N_{tot} (wt. %)	$\delta^{13}C_{org}$ (‰ VPDB)	$\Delta^{14}C_{org}$ (‰)
IHI22-1159MUC	0	2.34	0.23	-22.8	-410.1
(outer)	1	2.42	0.23	-22.5	-
	2	1.95	0.22	-22.6	-
	3	2.31	0.23	-22.5	-
	4	2.49	0.22	-22.4	-
	5	2.44	0.22	-22.6	-428.9
	6	2.20	0.22	-22.4	-
	7	2.16	0.22	-22.5	-
	8	2.15	0.22	-22.5	-
	9	1.89	0.23	-22.4	-
	10	2.50	0.22	-22.6	-433.9
	11	2.65	0.25	-22.5	-
	12	2.09	0.22	-22.6	-
	13	2.12	0.22	-22.5	-
	14	2.18	0.23	-22.4	-
	15	2.58	0.23	-22.5	-469.3
	16	1.98	0.23	-22.5	-
	17	2.35	0.22	-22.4	-
	18	1.99	0.22	-22.7	-
	19	1.95	0.25	-22.5	-
	20	2.29	0.23	-22.6	-449.1
	21	2.34	0.23	-22.6	-
	22	2.30	0.23	-22.5	-
	23	1.87	0.23	-22.7	-
	24	2.22	0.23	-22.7	-
	25	2.28	0.23	-22.9	-448.5
	26	2.22	0.22	-22.8	-
	27	2.24	0.22	-22.9	-
	28	1.99	0.23	-22.7	-
	29	2.26	0.23	-23.5	-
	30	1.88	0.23	-22.8	-439.5
	31	2.05	0.23	-22.8	-
	32	2.05	0.23	-23.1	-
	33	1.89	0.23	-23.0	-
	34	2.46	0.24	-23.1	-
	35	2.03	0.23	-23.0	-425.3
	36	2.10	0.23	-22.8	-
	37	2.06	0.24	-23.2	-
	38	2.26	0.25	-23.1	-
	39	2.19	0.26	-22.9	-396.7
	40	2.10	0.23	-22.8	-

35-2	콩스피오르드 멀티코어 퇴적물의 유기분자생체지표(리그닌 페놀) 분석 결과

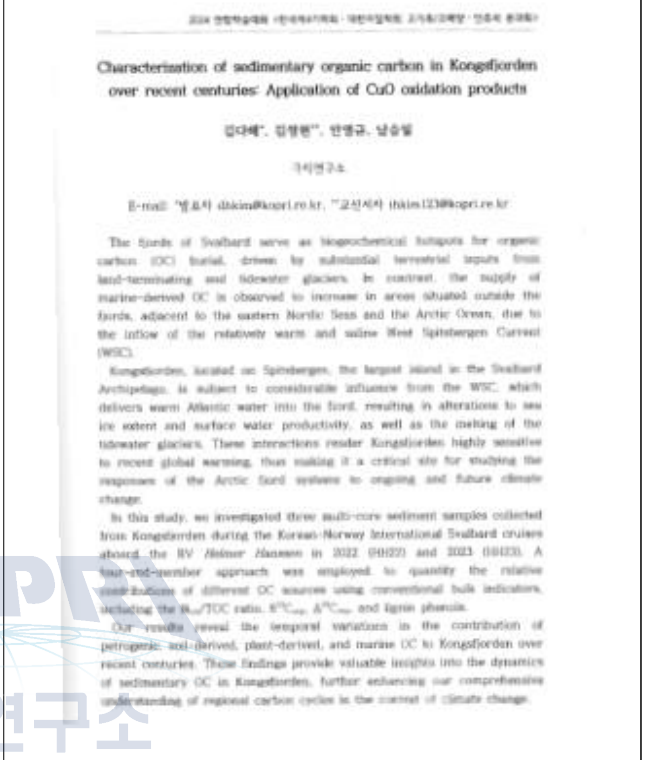
Core name	Top depth (cm)	Lignin phenols (mg/gOC)	S/V ratio	C/V ratio	3,5-Bd/V ratio	(Ad/Al)v ratio
IHI23-1050MUC	0	0.66	0.55	0.55	0.55	0.09
(inner)	1	0.24	0.19	0.08	0.09	0.22
	2	0.49	0.63	0.24	0.52	0.25
	5	0.61	0.32	0.28	0.50	0.76
	7	0.36	0.04	0.01	0.06	0.44
	10	0.38	0.30	0.14	0.13	0.50
	12	0.25	0.01	0.04	0.12	0.77
	15	0.38	0.22	0.22	0.15	0.53
	17	0.38	0.05	0.13	0.19	0.55
	20	0.36	0.13	0.24	0.39	0.68
	22	0.26	0.01	0.05	0.27	0.65
	25	0.29	0.01	0.05	0.10	0.77
	30	0.42	0.10	0.06	0.07	0.50
	35	0.46	0.13	0.08	0.33	0.48
	40	0.46	0.13	0.06	0.33	0.48
	45	0.42	0.10	0.06	0.07	0.50

Core name	Top depth (cm)	Lignin phenols (mg/gOC)	S/V ratio	C/V ratio	3,5-Bd/V ratio	(Ad/Al)v ratio
IHI23-1161MUC	0	0.07	0.16	0.03	2.59	0.17
(middle)	1	0.19	0.34	0.19	1.38	0.52
	2	0.17	0.19	0.17	1.48	0.48
	5	0.08	0.21	0.06	1.79	1.42
	7	0.14	0.13	0.22	1.93	0.71
	8	0.14	0.24	0.17	1.18	0.50
	10	0.12	0.12	0.26	1.03	0.42
	12	0.15	0.18	0.16	0.55	0.44
	15	0.18	0.07	0.25	1.98	1.60
	17	0.14	0.19	0.08	0.54	0.46
	20	0.18	0.23	0.19	1.54	0.54
	22	0.11	0.14	0.08	0.47	0.58
	25	0.14	0.10	0.29	0.73	0.40
	30	0.10	0.10	0.06	1.08	0.53
	35	0.17	0.11	0.22	1.44	0.58
	40	0.17	0.11	0.22	1.44	0.58
	44	0.28	0.18	0.21	1.80	1.35

Core name	Top depth (cm)	Lignin phenols (mg/gOC)	S/V ratio	C/V ratio	3,5-Bd/V ratio	(Ad/Al)v ratio
IHI22-1159MUC	0	0.06	0.40	0.14	1.86	0.81
(outer)	1	0.08	0.22	0.25	1.38	1.35
	2	0.11	0.28	0.41	1.82	0.41
	5	0.09	0.25	0.30	2.15	0.37
	7	0.09	0.29	0.40	2.46	1.74
	8	0.14	0.24	0.26	1.39	1.71
	10	0.09	0.24	0.36	1.39	0.53
	12	0.09	0.13	0.18	0.49	0.44
	15	0.12	0.17	0.24	1.31	1.16
	17	0.12	0.17	0.22	0.59	1.14
	20	0.09	0.20	0.24	1.92	0.54
	22	0.13	0.16	0.21	0.67	0.59
	25	0.14	0.23	0.15	0.81	0.67
	30	0.12	0.31	0.33	1.46	0.72
	35	0.22	0.19	0.23	1.87	1.38
	40	0.12	0.17	0.22	1.20	1.14

KORI 극지연구소

번호	관련증빙 명
35-3	2024 추계 한국제4기학회 구두 발표



Characterization of sedimentary organic carbon in Kongsfjorden over recent centuries: Application of CuO oxidation products

김다혜*, 김형환**, 안영규, 남승일

극지연구소

E-mail: *범호자 dhkim@kopri.re.kr, **교신저자 hhkim123@kopri.re.kr

The fjords of Svalbard serve as biogeochemical hotspots for organic carbon (OC) burial, driven by substantial terrestrial inputs from land-terminating and tidewater glaciers. In contrast, the supply of marine-derived OC is observed to increase in areas situated outside the fjords, adjacent to the eastern Nordic Seas and the Arctic Ocean, due to the inflow of the relatively warm and saline West Spitsbergen Current (WSC).

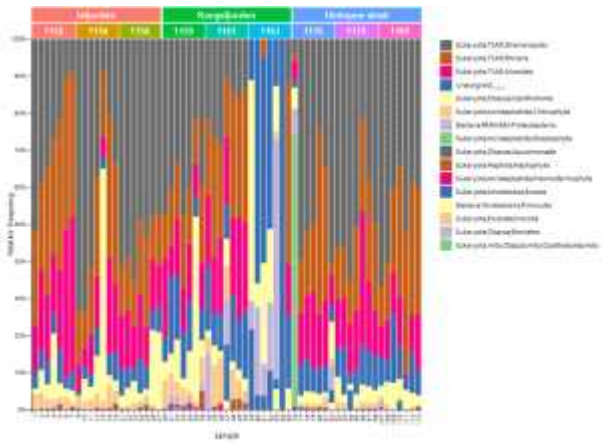
Kongsfjorden, located on Spitsbergen, the largest island in the Svalbard Archipelago, is subject to considerable influence from the WSC, which delivers warm Atlantic water into the fjord, resulting in alterations to sea ice extent and surface water productivity, as well as the melting of the tidewater glaciers. These interactions render Kongsfjorden highly sensitive to recent global warming, thus making it a critical site for studying the responses of the Arctic fjord systems to ongoing and future climate change.

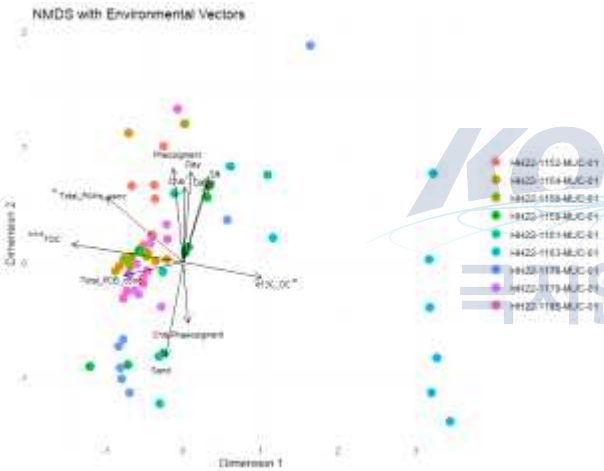
In this study, we investigated three multi-core sediment samples collected from Kongsfjorden during the Korean-Norway International Svalbard cruises aboard the RV Helmer Hanssen in 2022 (HH22) and 2023 (HH23). A four-end-member approach was employed to quantify the relative contributions of different OC sources using conventional bulk indicators, including the R_{OC}/TOC ratio, $\delta^{13}C_{OC}$, $\Delta^{14}C_{OC}$, and lignin phenols.

Our results reveal the temporal variations in the contribution of petrogenic soil-derived, plant-derived, and marine OC to Kongsfjorden over recent centuries. These findings provide valuable insights into the dynamics of sedimentary OC in Kongsfjorden, further enhancing our comprehensive understanding of regional carbon cycles in the context of climate change.

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
36-1	DNA 분석 결과



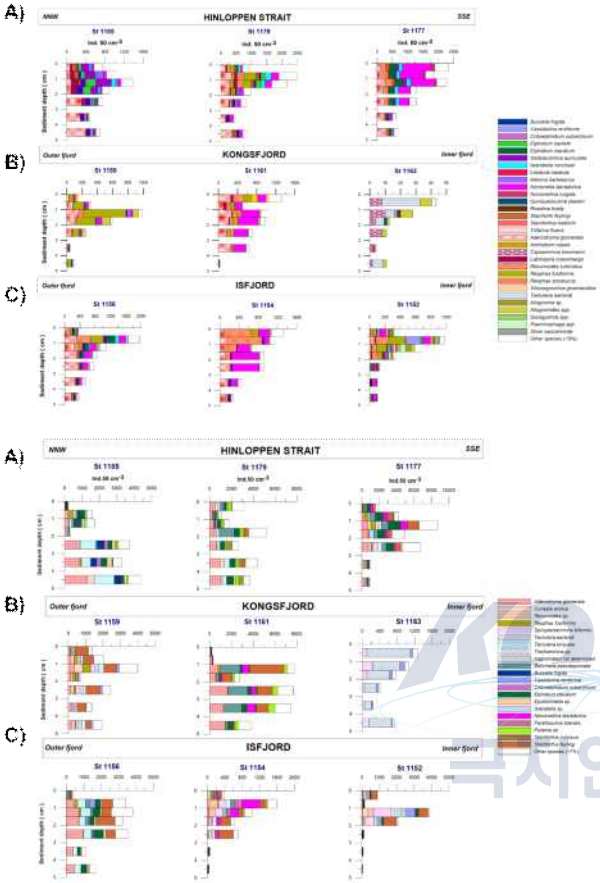


· 스발바르 이스피오르드, 콩스피오르드 및 힌로펜해협 시추 퇴적물 시료 9점의 표층(0-5cm) 깊이별 DNA 분석

· 피오르드 내 지점 및 깊이 별 진핵생물 다양성 및 환경요인 분석

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
36-2	저서성 유공충 분석 결과



· 힌로펜 해협, 콩스피오르드, 이스피오르드 멀티 코어 상부 5 cm 조립질 퇴적물 내 저서성 유공충 수직 분포도

· 힌로펜 해협, 콩스피오르드, 이스피오르드 멀티 코어 상부 5 cm 세립질 퇴적물 내 저서성 유공충 수직 분포도

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
37	Jang et al. (2024) published in Chemical Geology

Chemical Geology 660 (2024) 122167

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/chemgeo

A distinctive rare earth element signature for pyrite oxidation and glacial weathering

Kwangchul Jang [a,b], Germain Bayon [c], Olivier Pourret [d], Young Jin Joe [a], Jung-Hyun Kim [a], Eunji Byun [b], Matthias Forwick [e], Rafael León [f], Seung-Il Nam [a,*]

[a] Division of Glacier and Earth Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea
[b] Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea
[c] Univ Brest, CNRS, Ifremer, Geo-Ocean, Plouzané F-29280, France
[d] AGHYLE, UniLaSalle, Beauvais, France
[e] Department of Geosciences, UiT The Arctic University of Norway, Tromsø NO-9037, Norway
[f] Department of Earth Sciences and Research Center on Natural Resources, Health and the Environment, University of Huelva, Huelva E-21071, Spain

ARTICLE INFO

Editor: Dr. Christian France-Lanord

Keywords:
Rare earth elements
Iron oxyhydroxides
Sulfide weathering
Sulfur cycle
Arctic coastal environments
Glacier retreat

ABSTRACT

The application of rare earth elements (REE) and neodymium (Nd) isotopes to authigenic Fe-(oxyhydr)oxide phases leached from marine sediments can be used for reconstructing past ocean circulation and chemical weathering patterns on nearby continental landmasses. To explore the behaviour of REE during chemical weathering in glacial environments, we analyzed the authigenic fraction of glacimarine sediments from the continental shelf off northern Svalbard (Arctic Ocean), where the evolution of ice sheet dynamics since the last deglaciation is well constrained. Our results show that leached authigenic fractions in Svalbard sediments exhibit shale-normalized REE patterns characterized by anomalously high mid-REE enrichment relative to both light- and heavy-REE, as expressed by concavity index values (CI > 2.5) that significantly depart from typical REE signatures for leached fractions in marine and river sediments worldwide. Using a compilation of literature data, we provide compelling evidence that the occurrence of pronounced mid-REE enrichment in authigenic fractions of Svalbard marine sediments links to terrestrial oxidation of pyrite following glacial weathering. While future investigation will be required to further understand the detailed mechanism accounting for the observed REE decoupling and its link to pyrite oxidation, we propose that preferential dissolution of mid-REE-enriched rock-bearing minerals such as apatite following glacial erosion, sulfide weathering and subsequent release of sulfuric acid could release a distinctive REE signature in glacial surface environments. Our findings suggest that the use of authigenic REE in the sedimentary record could provide a means for tracing glacial weathering and associated biogeochemical sulfur and iron cycling across geological times.

Data availability

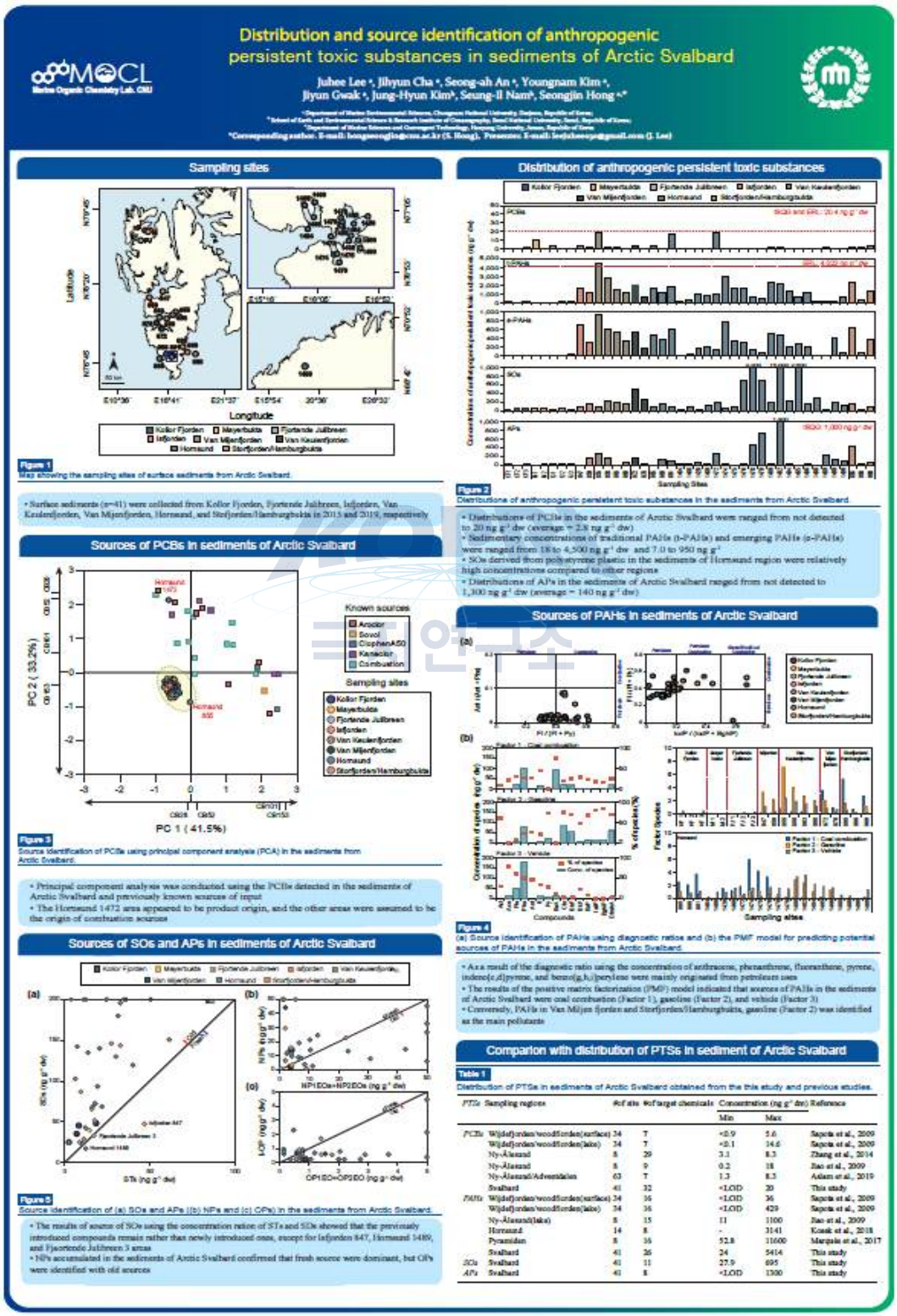
Datasets related to this article can be found in Table 1.

Acknowledgements

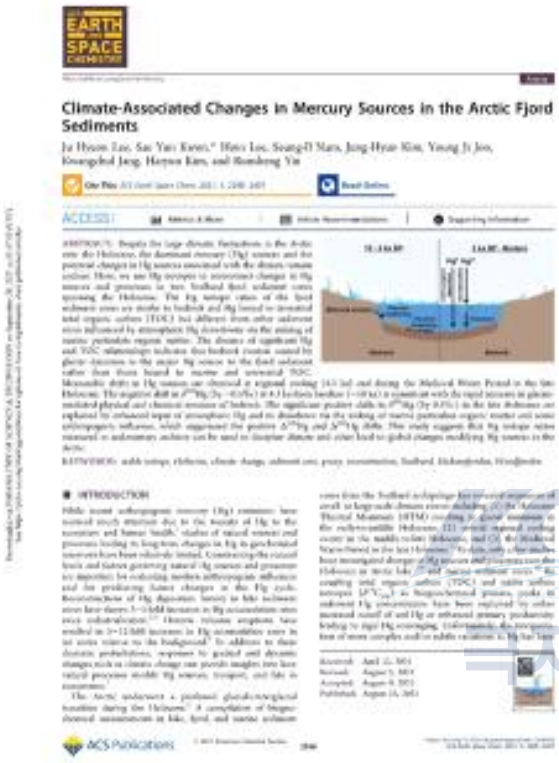
This study was supported mainly by the Basic Core Technology Development Program for the Oceans and the Polar Regions (NRF-2021M1A5A1075512) from the NRF funded by MSIT, Republic of Korea. Additionally, this research was partly supported by the Basic Science Research Program of National Research Foundation of Korea (NRF-2017R1A6A1A07015374). We would like to thank all the participants of the cruises on RV *Helmer Hanssen* for their support of the core sampling, as well as D. Kim and Y. Son for laboratory assistance. Lastly, we express our gratitude to the Editor, Christian France-Lanord, and to the anonymous reviewers for their highly valuable and constructive feedbacks on this manuscript.

Bölm, E., Lippold, J., Gutjahr, M., Frank, M., Blaser, P., Antz, B., Fohlmeister, J., Frank, N., Andersen, M., Deininger, M., 2015. Strong and deep Atlantic meridional overturning circulation during the last glacial cycle. Nature 517, 73–76.
Calmels, D., Gaillardet, J., Brenot, A., France-Lanord, C., 2007. Sustained sulfide oxidation by physical erosion processes in the Mackenzie River basin: Climatic perspectives. Geology 35, 1003–1006.
Casse, M., Montero-Serrano, J.-C., St-Onge, G., Poirier, A., 2019. REE distribution and Nd isotope composition of estuarine waters and bulk sediment leachates tracing lithogenic inputs in eastern Canada. Mar. Chem. 211, 117–130.
Charbonnier, G., Puceat, E., Bayon, G., Deniaud, D., Deca, G., Durlet, C., Decommark, J.-F., Amédro, F., Gourlan, A.T., Pellenard, P., 2013. Reconstruction of the Nd isotope composition of seawater on epicontinental seas: Testing the potential of Fe-Mn oxyhydroxide coatings on foraminifera tests for deep-time investigations. Geochim. Cosmochim. Acta 99, 39–56.
Chigira, M., Oyama, T., 2000. Mechanism and effect of chemical weathering of sedimentary rocks. In: Kanaori, Y., Tanaka, K., Chigira, M. (Eds.), Developments in Geotechnical Engineering. Elsevier, pp. 267–278.
Dallmann, W., Elvevold, S., 2015. Bedrock Geology, Geoscience Atlas of Svalbard. Norsk Polarinstitutt, Tromsø 148, 133–173.
Dausmann, V., Gutjahr, M., Frank, M., Kouzmanov, K., Schaltegger, U., 2019. Experimental evidence for mineral-controlled release of radiogenic Nd, Hf and Pb isotopes from granitic rocks during progressive chemical weathering. Chem. Geol.

번호	관련증빙 명
38	2021년 Yellow Sea symposium 발표 포스터(차지현; Distribution and sources of anthropogenic persistent toxic substances in sediments of Arctic Svalbard)

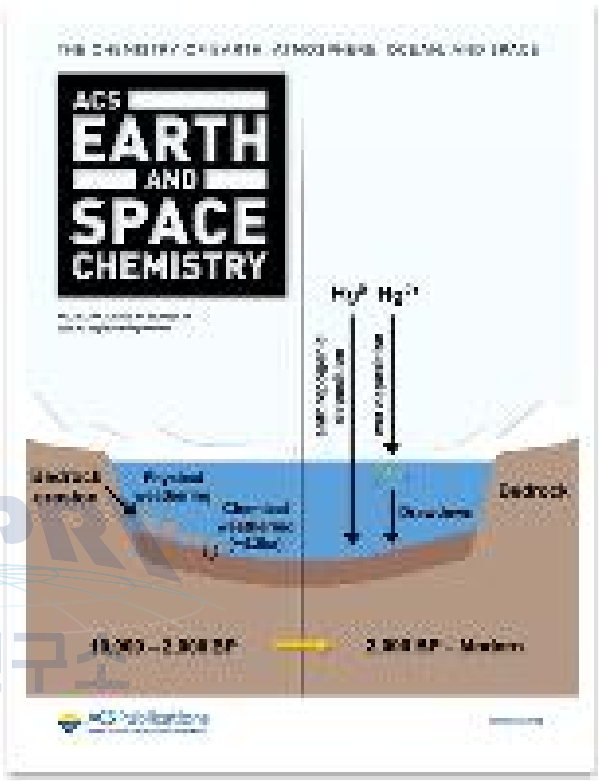


번호	관련증빙 명
39	2021년 수은 관련 자료 활용 게재 논문(Lee et al., 2021; Climate-Associated Changes in Mercury Sources in the Arctic Fjord Sediments) 및 Supplementary Cover Art 선정



Climate-Associated Changes in Mercury Sources in the Arctic Fjord Sediments

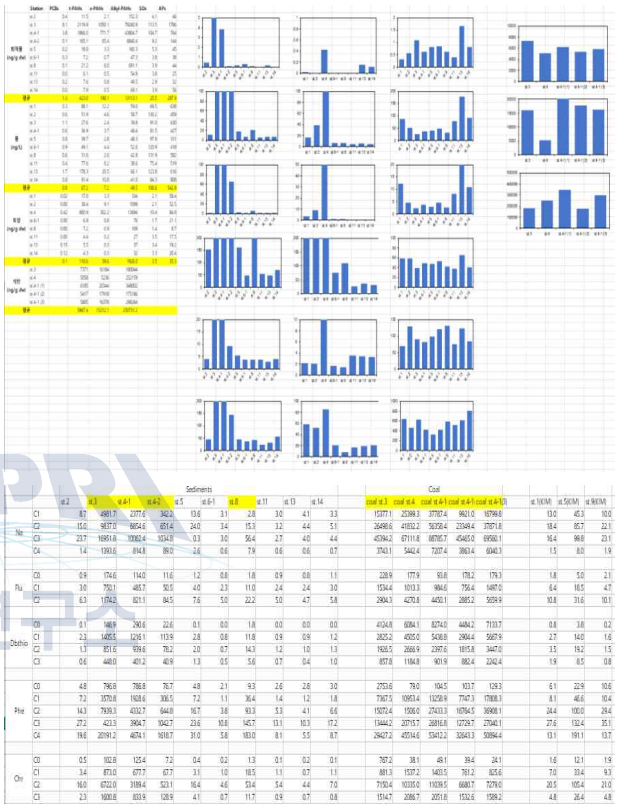
SCI(E)급 국제 학술지 ACS Earth and Space Chemistry 논문 게재 (첫 페이지)



SCI(E)급 국제 학술지 *ACS Earth and Space Chemistry*의 Supplementary Cover Art 선정

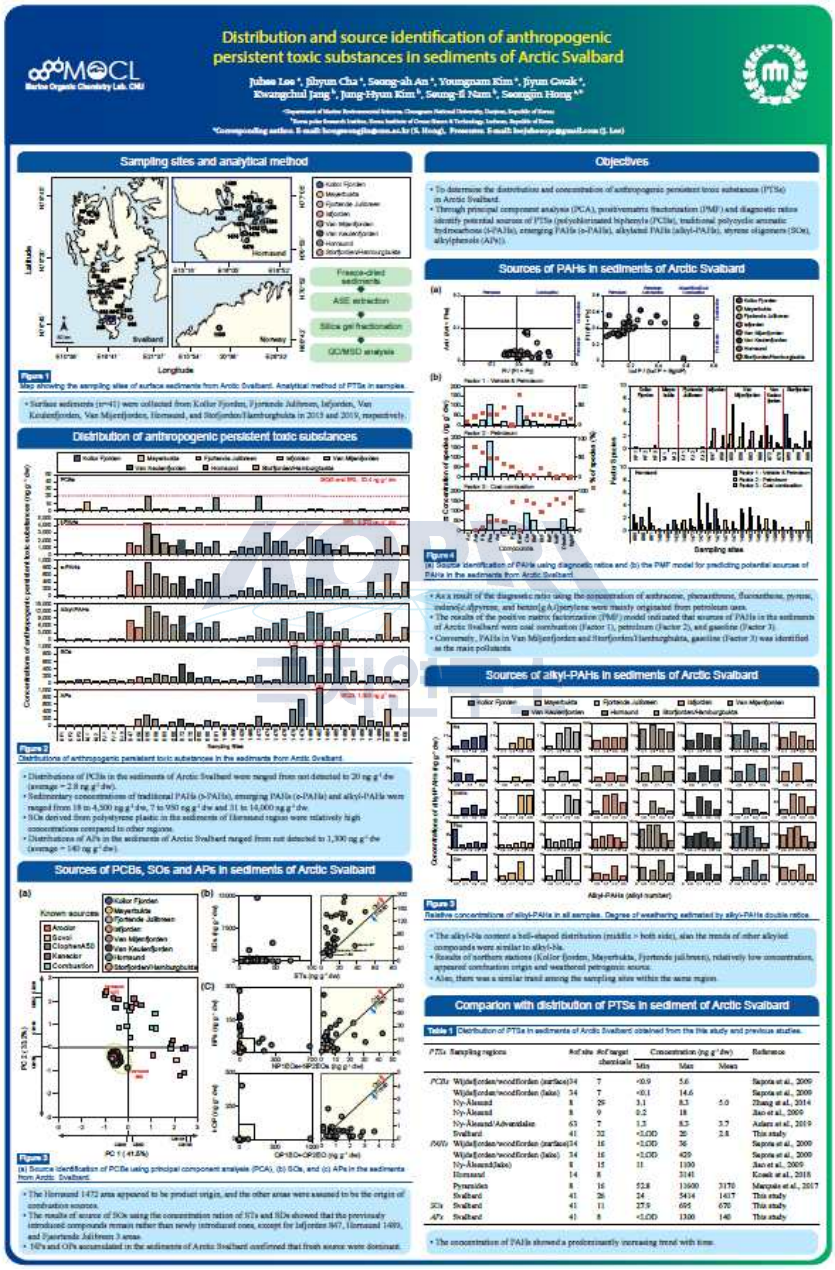
KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
40	스발바르 토양 시료(좌) 및 다산과학기지 주변 다매체 시료(우) 내 지속성 유기독성물질 분석 결과

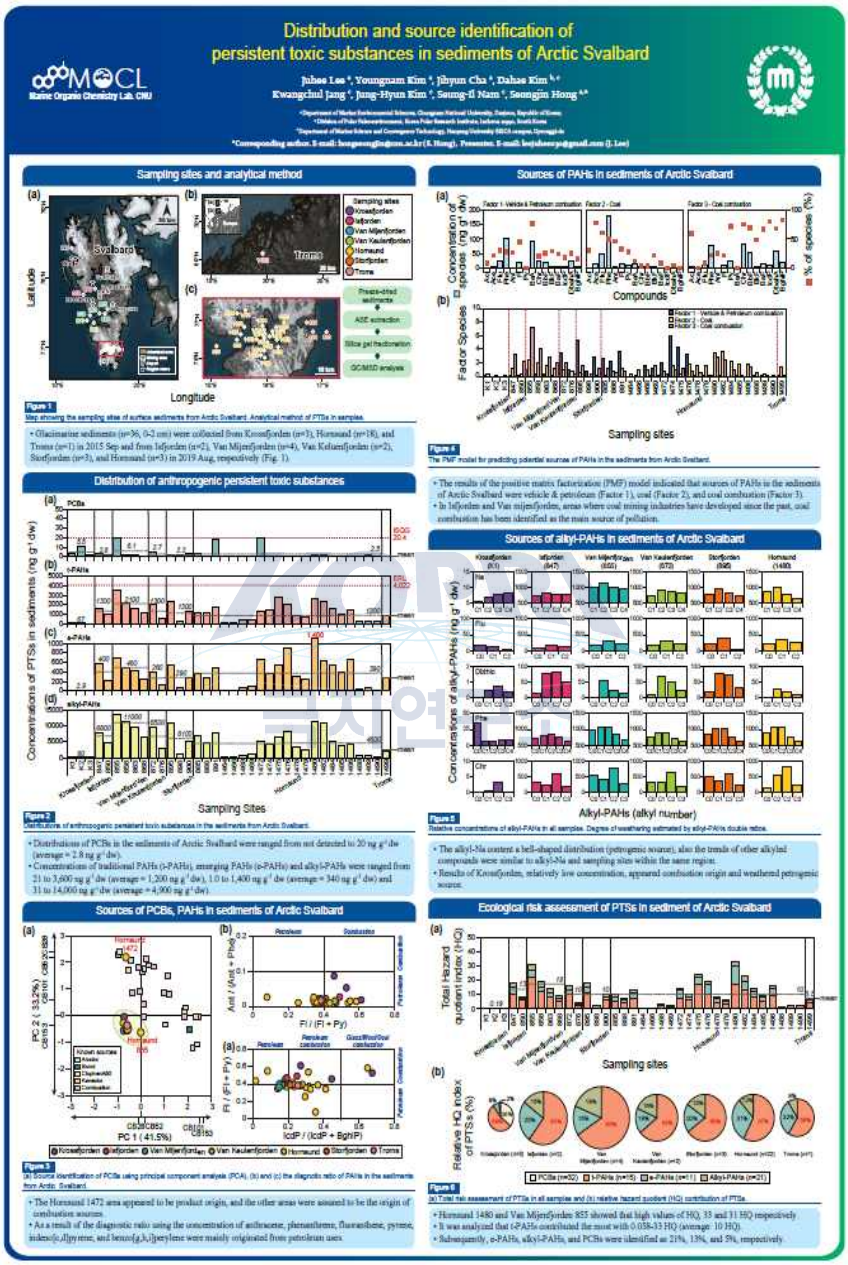


KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
41	2022년 KAOSTS 춘계공동학술대회 발표 포스터(좌) (이주희; Distribution and source identification of anthropogenic persistent toxic substances in sediments of Arctic Svalbard)



번호	관련증빙 명
42	2022년 The 27th ISPS 발표 포스터(우) (이주희; Distribution and source identification of persistent toxic substances in sediments of Arctic Svalbard)



번호	관련증빙 명
43-1	스발바르 퇴적코어 수은 농도 및 안정동위원소 분석 결과(딕슨, 우드, 호르준드 피오르드)

No.	sample	depth (m)	202Hg	202/198	201/198	200/198	199/198	204/198	d204	d202	d201	d200	d199	D204	D201	D200	D199	THg (ppb)	1/THg	TOC	Hg/TOC	Year	Age
1	JM05-046GC-4cm	4	1.6586	2.9625	1.3122	2.3052	1.6876	0.6791	-1.57	-1.04	-0.89	-0.51	-0.32	-0.02	-0.11	0.01	-0.06	25.65	0.04	1.064	24.105	1837	113
2	JM05-046GC-10cm	10	2.3062	2.9637	1.3122	2.3046	1.6869	0.6797	-1.41	-0.94	-0.84	-0.46	-0.35	0.00	-0.13	0.01	-0.11	21.82	0.05	0.926	23.551	1668	282
3	JM05-046GC-14cm	14	1.8010	2.9626	1.3122	2.3052	1.6875	0.6791	-1.24	-0.80	-0.67	-0.39	-0.31	-0.05	-0.07	0.02	-0.11	18.98	0.05	0.986	19.255	1556	394
4	JM05-046GC-22cm	22	1.6711	2.9635	1.3126	2.3056	1.6877	0.6794	-1.55	-1.08	-0.91	-0.53	-0.35	0.06	-0.10	0.01	-0.08	19.01	0.05	1.324	14.365	1331	619
5	JM05-046GC-36cm_1	36	2.0121	2.9629	1.3120	2.3043	1.6869	0.6795	-1.73	-1.12	-0.90	-0.52	-0.34	-0.07	-0.07	0.05	-0.07	20.04	0.05	1.292	15.513	937	1014
6	JM05-046GC-40cm	40	2.0583	2.9635	1.3126	2.3056	1.6877	0.6794	-1.70	-1.12	-0.95	-0.56	-0.35	-0.03	-0.11	0.00	-0.06	20.55	0.05	1.472	13.967	824	1126
7	JM05-046GC-42cm	42	1.7905	2.9640	1.3127	2.3057	1.6877	0.6795	-1.37	-0.88	-0.69	-0.44	-0.30	-0.05	-0.03	0.00	-0.07	18.19	0.05	1.483	12.271	768	1182
8	JM05-046GC-50cm_1	50	2.4094	2.9632	1.3120	2.3044	1.6869	0.6796	-1.56	-1.05	-0.89	-0.53	-0.36	0.01	-0.10	0.01	-0.09	17.88	0.06	1.445	12.376	542	1408
9	JM05-046GC-56cm	56	1.3668	2.9630	1.3124	2.3055	1.6876	0.6792	-1.95	-1.26	-1.01	-0.61	-0.43	-0.06	-0.06	0.03	-0.11	24.18	0.04	2.421	9.987	373	1577
10	JM05-046GC-58cm	58	3.1669	2.9642	1.3125	2.3047	1.6871	0.6799	-1.84	-1.24	-1.13	-0.65	-0.42	0.01	-0.20	-0.03	-0.11	19.27	0.05	2.498	7.714	317	1633
11	JM05-046GC-60cm	60	2.2895	2.9634	1.3121	2.3044	1.6868	0.6796	-1.57	-1.03	-0.92	-0.52	-0.39	-0.03	-0.14	0.00	-0.13	21.22	0.05	2.386	8.895	261	1689
12	JM05-046GC-72cm	72	2.6913	2.9596	1.3104	2.3039	1.6870	0.6784	-1.96	-1.31	-1.16	-0.66	-0.45	0.00	-0.17	0.00	-0.12	19.64	0.05	2.864	6.856	-77	2027
13	JM05-046GC-86cm	86	3.2417	2.9619	1.3118	2.3048	1.6874	0.6789	-1.75	-1.19	-1.01	-0.59	-0.38	0.02	-0.12	0.00	-0.08	22.20	0.05	2.158	10.286	-615	2565
14	JM05-046GC-90cm	90	3.2227	2.9620	1.3119	2.3049	1.6873	0.6790	-1.79	-1.19	-1.02	-0.59	-0.40	-0.01	-0.12	0.01	-0.10	16.36	0.06	2.617	6.252	-769	2719
15	JM05-046GC-92cm	92	3.8807	2.9617	1.3117	2.3047	1.6873	0.6789	-1.95	-1.31	-1.08	-0.65	-0.38	0.02	-0.09	0.01	-0.05	20.47	0.05	2.316	8.840	-846	2796
16	JM05-046GC-98cm	98	3.6563	2.9620	1.3118	2.3048	1.6874	0.6790	-1.77	-1.18	-1.02	-0.59	-0.36	-0.01	-0.13	0.00	-0.06	18.14	0.06	2.104	8.619	-1077	3027
17	JM05-046GC-128cm	128	2.7859	2.9608	1.3113	2.3044	1.6872	0.6786	-1.93	-1.24	-1.00	-0.61	-0.36	-0.07	-0.07	0.02	-0.05	22.66	0.04	2.574	8.803	-2231	4181
18	JM05-046GC-132cm	132	3.3335	2.9603	1.3114	2.3042	1.6872	0.6784	-2.53	-1.72	-1.38	-0.88	-0.47	0.04	-0.09	-0.01	-0.04	30.28	0.03	2.266	13.364	-2384	4334
19	JM05-046GC-136cm	136	3.5781	2.9604	1.3114	2.3042	1.6872	0.6784	-2.52	-1.68	-1.33	-0.84	-0.44	-0.01	-0.07	0.00	-0.02	26.23	0.04	1.170	22.416	-2538	4488
20	JM05-046GC-140cm	140	2.7749	2.9608	1.3113	2.3044	1.6872	0.6786	-1.98	-1.30	-1.08	-0.64	-0.40	-0.04	-0.10	0.01	-0.07	20.41	0.05	1.278	15.977	-2692	4642
21	JM05-046GC-156cm	156	2.7458	2.9610	1.3114	2.3045	1.6872	0.6786	-1.93	-1.26	-1.04	-0.63	-0.39	-0.05	-0.09	0.00	-0.07	18.36	0.05	1.201	15.287	-3307	5257
22	JM05-046GC-160cm	160	2.6559	2.9610	1.3114	2.3046	1.6872	0.6787	-1.92	-1.28	-1.08	-0.62	-0.38	-0.02	-0.12	0.02	-0.06	17.75	0.06	1.648	10.765	-3461	5411
23	JM05-046GC-178cm	178	3.4632	2.9619	1.3118	2.3048	1.6873	0.6789	-1.78	-1.19	-1.05	-0.60	-0.38	0.00	-0.15	0.00	-0.07	18.29	0.05	1.364	13.402	-4153	6103
24	JM05-046GC-190cm	190	3.3296	2.9618	1.3117	2.3047	1.6873	0.6789	-1.95	-1.33	-1.14	-0.67	-0.43	0.04	-0.14	-0.01	-0.10	20.47	0.05	1.321	15.499	-4615	6565
25	JM05-046GC-194cm	194	3.3212	2.9622	1.3119	2.3049	1.6874	0.6791	-1.68	-1.14	-0.98	-0.56	-0.35	0.01	-0.12	0.01	-0.07	18.03	0.06	1.544	11.675	-4769	6719
26	JM05-046GC-204cm	204	3.3212	2.9620	1.3119	2.3048	1.6874	0.6790	-1.78	-1.20	-1.00	-0.61	-0.36	0.01	-0.10	0.00	-0.05	22.19	0.05	1.444	15.361	-5153	7103
27	JM05-046GC-212cm	212	3.5459	2.9619	1.3118	2.3048	1.6873	0.6789	-1.83	-1.24	-1.08	-0.62	-0.39	0.01	-0.15	0.01	-0.08	20.84	0.05	2.523	8.259	-5461	7411
28	JM05-046GC-220cm	220	3.5267	2.9617	1.3118	2.3048	1.6874	0.6789	-1.83	-1.21	-1.00	-0.60	-0.34	-0.02	-0.09	0.01	-0.04	22.08	0.05	1.750	12.619	-5769	7719
29	JM05-046GC-222cm	222	3.5755	2.9624	1.3120	2.3050	1.6874	0.6791	-1.52	-1.04	-0.91	-0.52	-0.31	0.03	-0.12	0.01	-0.05	20.20	0.05	1.733	11.656	-5845	7795
30	JM05-046GC-226cm	226	3.2920	2.9619	1.3119	2.3048	1.6874	0.6789	-1.84	-1.24	-1.01	-0.61	-0.36	0.00	-0.08	0.01	-0.05	18.61	0.05	1.727	10.774	-5999	7949
31	JM05-046GC-238cm	238	3.5706	2.9616	1.3118	2.3047	1.6874	0.6788	-1.91	-1.28	-1.04	-0.65	-0.39	0.01	-0.08	0.00	-0.06	19.24	0.05	1.455	13.226	-6515	8465
32	JM05-046GC-244cm	244	3.2931	2.9619	1.3119	2.3048	1.6874	0.6789	-1.82	-1.20	-0.97	-0.61	-0.37	-0.02	-0.06	0.00	-0.06	17.99	0.06	1.158	15.533	-6799	8749
33	JM05-046GC-262cm	262	5.1452	2.9622	1.3120	2.3050	1.6874	0.6790	-1.83	-1.23	-1.01	-0.62	-0.38	0.01	-0.09	0.00	-0.07	15.46	0.06	1.507	10.260	-7560	9510

딕슨피오르드 퇴적물 코어 시료 수은 농도 및 안정동위원소 분석 데이터
(총 33개 시료 분석 완료)

No.	sample	depth (m)	202Hg	202/198	201/198	200/198	199/198	204/198	d204	d202	d201	d200	d199	D204	D201	D200	D199	THg (ppb)	1/THg	TOC	Hg/TOC	Year	Age
1	HH12-964GC-0cm	0	1.9919	2.9650	1.3130	2.3061	1.6879	0.6799	-0.97	-0.70	-0.63	-0.37	-0.27	0.07	-0.11	-0.02	-0.09	39.30	0.03	3.442	11.418	1950	0
2	HH12-964GC-5cm	5	1.6357	2.9650	1.3131	2.3062	1.6879	0.6799	-0.95	-0.65	-0.60	-0.33	-0.27	0.02	-0.11	0.00	-0.11	39.90	0.03	3.640	10.960	1950	0
3	HH12-964GC-15cm	15	3.0446	2.9647	1.3127	2.3050	1.6872	0.6801	-1.61	-1.11	-1.03	-0.59	-0.40	0.05	-0.20	-0.03	-0.13	19.67	0.05	3.725	5.281	1596	354
4	HH12-964GC-25cm	25	1.4494	2.9640	1.3127	2.3058	1.6877	0.6795	-1.45	-0.96	-0.85	-0.49	-0.36	-0.01	-0.13	-0.01	-0.12	17.63	0.06	3.684	4.786	888	1062
5	HH12-964GC-30cm	30	1.7323	2.9627	1.3123	2.3052	1.6875	0.6792	-1.10	-0.76	-0.58	-0.38	-0.30	0.03	-0.01	0.01	-0.11	17.06	0.06	3.909	4.366	534	1416
6	HH12-964GC-35cm	35	1.7471	2.9632	1.3124	2.3054	1.6876	0.6793	-1.00	-0.61	-0.48	-0.30	-0.28	-0.08	-0.02	0.00	-0.13	16.92	0.06	4.170	4.059	180	1770
7	HH12-964GC-45cm_1	45	3.2454	2.9619	1.3118	2.3048	1.6872	0.6789	-1.71	-1.16	-1.05	-0.58	-0.47	0.02	-0.17	0.01	-0.18	16.74	0.06	4.186	3.999	-131	2081
8	HH12-964GC-80cm	80	5.2343	2.9622	1.3120	2.3049	1.6873	0.6791	-1.87	-1.26	-1.10	-0.63	-0.46	0.00	-0.15	0.01	-0.14	14.79	0.07	3.481	4.248	-1872	3822
9	HH12-964GC-85cm	85	5.6576	2.9628	1.3122	2.3052	1.6873	0.6793	-1.57	-1.06	-0.95	-0.54	-0.41	0.01	-0.16	0.00	-0.14	12.15	0.08	2.072	5.861	-2163	4113
10	HH12-964GC-95cm	95	5.3523	2.9625	1.3121	2.3051	1.6873	0.6791	-1.73	-1.16	-1.02	-0.58	-0.42	0.00	-0.15	0.01	-0.13	11.57	0.09	2.074	5.576	-2745	4695
11	HH12-964GC-100cm	100	1.8485	2.9605	1.3112	2.3043	1.6870	0.6785	-1.96	-1.32	-1.08	-0.65	-0.44	0.00	-0.09	0.01	-0.10	12.08	0.08	2.303	5.248	-3036	4986
12	HH12-964GC-105cm	105	5.4498	2.9623	1.3120	2.3050	1.6873	0.6791	-1.84	-1.24	-1.07	-0.62	-0.44	0.01	-0.14	0.00	-0.12	12.67	0.08	2.176	5.821	-3327	5277
13	HH12-964GC-110cm	110	2.7035	2.9611	1.3111	2.3045	1.6870	0.6788	-1.48	-1.00	-0.88	-0.48	-0.44	0.01	-0.13	0.02	-0.19	14.57	0.07	2.561	5.689	-3618	5568
14	HH12-964GC-120cm	120	2.4489	2.9607	1.3108	2.3043	1.6870	0.6787	-1.66	-1.09	-1.06	-0.53	-0.45	-0.04	-0.24	0.02	-0.18	14.31	0.07	2.173	6.586	-4200	6150
15	HH12-964GC-135cm	135	2.2070	2.9608	1.3110	2.3043	1.6870	0.6788	-1.45	-1.01	-0.91	-0.51	-0.40	0.06	-0.15	0.00	-0.15	13.37	0.07	1.792	7.462	-5073	7023
16	HH12-964GC-145cm	145	3.4003	2.9622	1.3119	2.3049	1.6873	0.6790	-1.65	-1.12	-0.99	-0.57	-0.44	0.03	-0.15	-0.01	-0.16	12.64	0.08	1.769	7.142	-5655	7605
17	HH12-964GC-150cm	150	3.3769	2.9623	1.3119	2.3049	1.6873	0.6791	-1.52	-1.03	-0.94	-0.53	-0.41	0.02	-0.17	-0.01	-0.15	14.91	0.07	1.630	9.142	-5946	7896
18	HH12-964GC-165cm	165	2.5932	2.9611	1.3109	2.3044	1.6870	0.6789	-1.41	-0.99	-0.96	-0.51	-0.46	0.06	-0.22	-0.01	-0.21	10.33	0.10	1.475	7.004	-6818	8768
19	HH12-964GC-170cm	170	2.4134	2.9618	1.3112	2.3047	1.6872	0.6791	-1.00	-0.67	-0.68	-0.34	-0.35	0.00	-0.17	-0.01	-0.18	11.46	0.09	2.050	5.591	-7109	9059
20	HH12-964GC-185cm	185	2.4167	2.9609	1.3109	2.3044	1.6871	0.6788	-1.31	-0.91	-0.86	-0.47	-0.38	0.04	-0.18	-0.02	-0.16	10.62	0.09	1.298	8.184	-7982	9932

우드피오르드 퇴적 코어 시료 수은 농도 및 안정동위원소 분석 데이터
(총 20개 시료 분석 완료)

No.		Depth (cm)	202Hg	202/198	201/198	200/198	199/198	204/198	d204	d202	d201	d200	d199	D204	D201	D200	D199	CONC [ug/kg]
1	HH19-878-GC-0	0	2.387143	2.963029	1.312034	2.305251	1.687419	0.679375	-1.21	-0.83	-0.74	-0.40	-0.30	0.03	-0.12	0.02	-0.09	48.365
2	HH19-878-GC-5	5	2.315621	2.964663	1.312735	2.305962	1.68768	0.679895	-1.38	-0.91	-0.81	-0.45	-0.36	-0.02	-0.12	0.01	-0.13	48.302
3	HH19-878-GC-10	10	2.14591	2.963193	1.312174	2.305299	1.687429	0.67938	-1.64	-1.09	-0.91	-0.55	-0.40	-0.01	-0.09	0.00	-0.13	46.628
4	HH19-878-GC-20	20	2.416851	2.963932	1.312414	2.305601	1.687514	0.679659	-1.79	-1.21	-1.10	-0.63	-0.47	0.01	-0.19	-0.03	-0.17	42.862
5	HH19-878-GC-25	25	2.351613	2.962345	1.311802	2.304971	1.687241	0.679146	-1.62	-1.12	-0.95	-0.56	-0.43	0.04	-0.11	0.00	-0.15	42.903
6	HH19-878-GC-30	30	2.283014	2.964356	1.312576	2.305846	1.687599	0.679816	-1.50	-1.03	-0.95	-0.51	-0.40	0.03	-0.18	0.01	-0.14	45.978
7	HH19-878-GC-35	35	2.3969	2.963775	1.312431	2.305649	1.687574	0.679598	-1.85	-1.26	-1.07	-0.62	-0.44	0.02	-0.13	0.01	-0.12	43.669
8	HH19-878-GC-40	40	1.97838	2.963264	1.31219	2.30536	1.687417	0.679401	-1.62	-1.09	-0.95	-0.55	-0.42	0.01	-0.13	0.00	-0.15	42.832
9	HH19-878-GC-50	50	2.15823	2.96415	1.312513	2.305691	1.687541	0.67975	-1.87	-1.30	-1.09	-0.67	-0.50	0.07	-0.11	-0.02	-0.18	39.796
10	HH19-878-GC-55	55	2.247405	2.962799	1.311963	2.305179	1.687316	0.67928	-1.50	-1.00	-0.90	-0.50	-0.38	-0.01	-0.15	0.00	-0.13	38.454
11	HH19-878-GC-60	60	2.067422	2.963302	1.312279	2.305398	1.687605	0.679428	-2.47	-1.72	-1.34	-0.86	-0.52	0.09	-0.05	0.01	-0.08	36.922
12	HH19-878-GC-65	65	2.084409	2.963502	1.3123	2.305485	1.687545	0.679495	-2.25	-1.57	-1.28	-0.78	-0.52	0.09	-0.10	0.01	-0.13	38.618
13	HH19-878-GC-70	70	1.954333	2.962478	1.311864	2.304991	1.687336	0.679139	-2.01	-1.36	-1.20	-0.71	-0.47	0.03	-0.18	-0.03	-0.12	40.526
14	HH19-878-GC-80	80	2.227745	2.963978	1.312449	2.305759	1.687622	0.679646	-1.76	-1.15	-1.04	-0.54	-0.38	-0.04	-0.17	0.04	-0.09	42.581
15	HH19-878-GC-90	90	2.146468	2.961536	1.311406	2.304625	1.687112	0.678854	-1.94	-1.25	-1.04	-0.62	-0.47	-0.07	-0.10	0.01	-0.15	42.788
16	HH19-878-GC-100	100	1.890898	2.962509	1.311878	2.305081	1.687317	0.679151	-1.99	-1.33	-1.15	-0.66	-0.48	-0.01	-0.15	0.01	-0.15	41.613
17	HH19-878-GC-110	110	1.991289	2.96369	1.312327	2.305546	1.687513	0.679554	-2.17	-1.48	-1.26	-0.74	-0.53	0.04	-0.14	0.01	-0.16	41.447
18	HH19-878-GC-120	120	2.041528	2.96206	1.311755	2.304876	1.687293	0.678973	-2.22	-1.44	-1.18	-0.71	-0.47	-0.06	-0.09	0.01	-0.11	41.163
19	HH19-878-GC-140	140	2.197121	2.961425	1.311485	2.304553	1.687106	0.678816	-2.04	-1.34	-1.09	-0.68	-0.49	-0.04	-0.09	-0.01	-0.16	42.524
20	HH19-878-GC-150	150	1.992545	2.962101	1.31162	2.304834	1.687272	0.679015	-2.15	-1.42	-1.26	-0.72	-0.49	-0.02	-0.18	0.00	-0.13	41.204
21	HH19-878-GC-170	170	2.227612	2.961381	1.31153	2.304599	1.687112	0.678779	-2.15	-1.41	-1.12	-0.69	-0.51	-0.04	-0.06	0.02	-0.15	39.147

호르준드 퇴적 코어 시료 수은 농도 및 안정동위원소 분석 데이터
(총 21개 시료 분석 완료)

번호	관련증빙 명
43-2	스발바르 퇴적코어 수은 농도 및 안정동위원소 분석 결과(콩스, 스토르피오르드, 기반암)

				1st measurements	2nd measurements	Average
No.	NAME	CORE_N	Depth (cm)	CONC [ug/kg]	CONC [ug/kg]	CONC [ug/kg]
	Kongsfjorden					
1	KH1-21	1	13	56.478		56.48
2	KH2-14		43	32.783		32.78
3	KH2-49	2	78	30.803	29.87	30.34
4	KH2-59		88	29.92		29.92
5	KH2-90		119	31.41		31.41
6	KH3-15		145.5	31.183		31.18
7	KH3-50	3	180.5	27.541	27.713	27.63
8	KH3-90		220.5	29.986	30.115	30.05
9	KH4-16		247.5	24.077	24.839	24.46
10	KH4-49	4	280.5	30.243	29.617	29.93
11	KH4-90		321.5	26.98	27.193	27.09
12	KH5-12		345	25.725		25.73
13	KH5-50	5	383	31.397		31.40
14	KH5-80		413	27.24		27.24
15	KH6-15		444	28.541		28.54
16	KH6-50	6	479	26.248		26.25
17	KH6-80		509	27.914	28.26	28.09
18	KH7-20		549	26.741		26.74
19	KH7-50	7	579	25.181		25.18
20	KH7-79		608	25.171		25.17
21	KH8-29		658.5	25.646		25.65
22	KH8-59	8	688.5	25.144		25.14
23	KH8-84		713.5	22.881		22.88
24	KH9-16		745.5	22.1		22.10
25	KH9-50	9	779.5	25.355	25.263	25.31
26	KH9-90		819.5	21.734		21.73
27	KH10-19		849	18.801		18.80
28	KH10-45	10	875	19.368		19.37
29	KH10-67*		897	20.596		20.60
30	KH11-21*		951.5	22.45		22.45
31	KH11-56*	11	986.5	22.245		22.25
32	KH11-80*		1010.5	22.527	22.932	22.73
33	KH12-19		1045	26.699		26.70
34	KH12-41	12	1067	26.203		26.20
35	KH12-79		1105	26.747		26.75
36	KH13-14		1140.5	28.478	27.449	27.96
37	KH13-49	13	1175.5	32.896		32.90
38	KH13-89		1215.5	33.073		33.07
39	KH14-40	14	1255.5	32.758		32.76
40	KH14-76		1291.5	32.256		32.26
41	KH15-23		1324	30.415	28.663	29.54
42	KH15-50		1351	32.425		32.43
43	KH15-79	15	1380	32.793		32.79
44	KH15-90		1391	32.656		32.66
45	KH15-98		1399	28.873		28.87
46	KH16-4		1405.5	22.389		22.39
47	KH16-39	16	1440.5	27.442		27.44
48	KH16-80		1481.5	26.338		26.34
49	KH17-3	17	1505	23.587	23.349	23.47

콩스피오르드 퇴적 코어 시료 수은 농도 분석 데이터 (총 49개 시료 분석 완료)

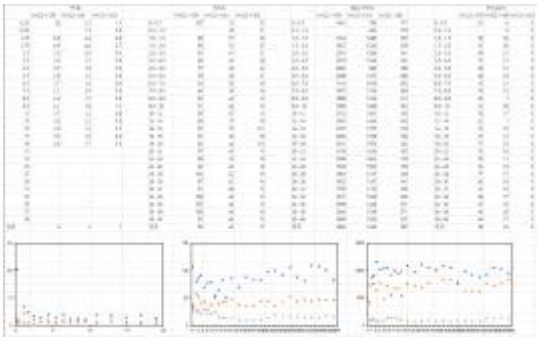
No.	NAME	Depth (cm)	1st measurement CONC [ug/kg]	2nd measurement CONC [ug/kg]	Average CONC [ug/kg]
	Storfjorden				
1	HH19-905-0cm	0	48.56		
2	HH19-905-5cm	5	50.80		
3	HH19-905-10cm	10	49.06		
4	HH19-905-20cm	20	49.60		
5	HH19-905-30cm_1	30	49.32	48.799	49.06
6	HH19-905-40cm	40	50.21		
7	HH19-905-50cm	50	49.56		
8	HH19-905-60cm	60	48.78		
9	HH19-905-75cm	75	49.27		
10	HH19-905-90cm	90	49.74		
11	HH19-905-105cm	105	49.72		
12	HH19-905-120cm	120	46.93		
13	HH19-905-135cm	135	45.58		
14	HH19-905-150cm	150	39.81		
15	HH19-905-165cm_1	165	41.14	41.98	41.56

스토르피오르드 퇴적 코어 시료 수은 농도 분석 데이터 (총 49개 시료 분석 완료)

Sample ID	Location	Fjorden	SVOL [mg]	MEAS [ng]	CONC [ug/kg]	Rock type	Age
080111	Festningen	Isfjorden-Grønfjorden	103.7	2.36	22.76	Black mudston	Triassic
080109	Festningen	Isfjorden-Grønfjorden	104.9	1.702	16.23	Black mudston	Permian
KIGAM#16	Festningen	Isfjorden-Grønfjorden	105.6	1.586	15.02	Shale	Mid.Jurassic-Early Cretaceous
20150901-02	Janusfjellet	Isfjorden-Adventfjorden	112.4	0.817	7.27	Oolitic ironston	Jurassic
KIGAM#25	Rotundafjellet	Isfjorden-Billefjorden	135.4	0.957	7.07	Shale	Early-Mid Triassic
080302	Halvdanpiggen	Woodfjorden	114.8	0.574	5.00	Red sandston	Devonian
080114	Festningen	Isfjorden-Grønfjorden	112.5	0.464	4.12	Sandston	Cretaceous
SK01	Skansen	Isfjorden-Billefjorden	134.2	0.436	3.25	Sandston	Devonian

스발바르 기반암 시료 수은 농도 분석 데이터
(총 8개 시료 농도 분석 완료)

번호	관련증빙 명
44	유기독성물질분석 실험 결과 raw data



		C2/C3 (Naph)	C2/C3 (DBTHs)	C2/C3 (Phe)	C2/C3 (Chr)
	HH22-1159	1.0	0.9	1.0	2.81
	HH22-1161	0.8	1.5	0.6	3.16
	HH22-1163	0.7	1.0	0.4	2.06
Lignites and subbituminous coals	Lig A-11	0.3	1.3	0.8	3.5
	Lig A-25	0.3	1.4	0.9	3.2
	Sub C-8	0.3	1.2	6.2	2.5
	Sub C-1	0.2	1.2	1.0	2.1
	Sub B-9	0.4	1.7	0.4	1.5
	Sub B-26	0.5	1.5	0.1	2.1
	Sub A-27	0.3	1.2	0.6	1.6
Bituminous coals	HVC-4	0.5	2.0	1.1	1.5
	HVB-33	1.1	1.4	1.3	1.6
	HVA-16	0.5	1.4	1.2	2.1
	HVA-12	1.2	1.5	1.3	1.4
	MV-3	1.0	2.1	1.8	1.9
	LV-19	3.3	2.8	2.7	1.8
Anthracites	SEMI-1511	2.0	5.2	4.3	4.3
	ANTH-21	0.9	1.6	1.3	
Abandoned coals	st.3	0.6	2.2	1.1	4.7
	st.4	0.6	2.3	0.1	5.0
	st.4-1 (1)	0.6	2.7	1.0	5.4
	st.4-1 (2)	0.5	2.1	1.3	4.4
	st.4-1 (3)	0.5	1.5	1.4	4.6

· 스발바르 콩스피오르드 시추 퇴적물 시료 3점(총 시료 80개) 유기독성물질 분석

· 콩스피오르스 시추 퇴적물 내 유기독성물질의 잠재적 오염원 파악

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
45	Lee et al. (2023) published in Marine Pollution Bulletin

Marine Pollution Bulletin

journal homepage

Baseline

Distributions and potential sources of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in the glacimarine sediments of Arctic Svalbard

Juhee Lee [a,1], Youngnam Kim [a,1], Jihyun Cha [a], Dahae Kim [b,c], Kwangchul Jang [b], Jung-Hyun Kim [b], Seung-Il Nam [b], Seongjin Hong [a,*]

ABSTRACT

Distributions and sources of polychlorinated biphenyls (PCBs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the glacimarine sediments (35 sites) of Svalbard were investigated. PCBs (32 congeners), unalkylated PAHs (15 homologs), nonalkylated PAHs (11 homologs), and alkylated PAHs (16 homologs) were widely distributed in the Svalbard sediments (ranges: below method detection limit to 22, 21 to 3600, 1.0 to 1400, and 31 to 15,000 ng g^{-1} dry weight, respectively). Compositional analysis indicated that PCBs mainly originated from combustion sources, with PAHs being strongly influenced by local sources. Positive matrix factorization analysis showed that PAHs were associated with vehicle and petroleum combustion, coal, and coal combustion. Coal-derived PAHs contributed significantly to the sediments of Van Mijenfjorden. Remnants of coal mining activity trapped in the permafrost appear to enter the coastal environments as ground ice melts. Consequently, PAHs are currently emerging as the most significant contributors to potential risks in the Svalbard ecosystem.

Svalbard archipelago, located at the gateway to the Arctic Ocean, has permafrost covering 60% of its terrestrial area, as well as a large number of glacial fjords (Hanssen-Bauer et al., 2019). The environment in the Arctic region is characterized by low mean annual temperatures (−1.2 to 5.2 °C), low precipitation, and drought (Ulanowski et al., 2006; Førland et al., 2011). The Arctic region is generally considered less polluted due to its remoteness from pollution sources and limited anthropogenic activity (Ahrentsen et al., 2011; Macdonald et al., 2005). However, toxic substances generated by anthropogenic activity in the northern hemisphere are introduced to the Arctic region through long-range transport via the oceanic current and the atmosphere (Ottar and Mankes, 1983). Gradually increasing local human activity has also been considered as a source of pollution in recent years (Destouni and Kvarnäs, 2019; Goerz, 2021). Consequently, environmental pollution in the Arctic region is gradually increasing, which could adversely affect the ecosystem (Ono et al., 2002; Rose et al., 2004; Zagorski et al., 2000). Pollutants introduced into the Arctic region are more conserved and accumulative than in other environments due to the low temperature (Wang et al., 2021).

At present, the Arctic region is subjected to remarkable environmental changes related to global climate changes (Arnscheidt et al., 2021; Bogoyavlenskiy et al., 2020). For example, permafrost cover gradually decreases, and glacial variability increases. Seasonal permafrost thawing increases the mobilization and downstream transport of organic matter and pollutants trapped in soils, transporting them to the marine environment (AMAP, 2017). These changes trigger the remobilization of persistent toxic substances (PTSs) in permafrost; consequently, research in this region increasingly focuses on the behavior and fate of PTSs (Bogoyavlenskiy et al., 2020; Cochran et al., 2012). In recent decades, coal mines in Svalbard have been closed, and projects for regeneration are underway (Viken, 2006). However, the effects of the coal industry are still visible. In addition, the number of tourists is gradually increasing, and its environmental impact is a concern. Despite these concerns and increasing interest, few studies have investigated the contamination and ecological risks of PTSs in the Svalbard fjords.

PTSs originate from various anthropogenic activities, including the

* Corresponding author.
E-mail address: hongseongjin@inha.ac.kr (S. Hong).
[1] These authors contributed equally to this work.

https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114740
Received 12 January 2023; Received in revised form 9 February 2023; Accepted 15 February 2023
Available online 23 February 2023
0025-326X/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.

번호	관련증빙 명
46	2023년 한국해양학회 추계학술대회 구두 발표 (차지현; 북극 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴 지역의 토양 시료 내 유기독성물질의 분포 특성)

북극 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 시료 내 유기독성물질의 분포 특성

차지현[1], 김정현[2], 정지영[3], 남승일[2], 홍성진[1,*]

[1]충남대학교 해양환경과학과, [2]극지연구소 빙하환경연구본부,
[3]극지연구소 생명과학연구본부

본 문 : 본 연구에서는 북극 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 시료 내 유기독성물질(persistent toxic substances, PTSs)의 공간 분포 및 잠재적 오염원을 확인하고자 하였다. 스발바르 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 시료(n=45)는 2014년 7월 빙하의 융해로 대기 중에 노출된 시료를 연대별로 채취하였다. 토양 시료의 연대는 80-100년(n=7), 60-80년(n=12), 40-60년(n=16), 20-40년(n=7), <20년(n=3)이었다. 32종의 폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyls, PCBs), 28종의 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), 17종의 alkyl-PAHs, 총 77종의 PTSs를 분석하였다. 중앙로벤 빙하후퇴지역의 토양 시료 내 PCBs의 평균 농도는 80-100년에서 0.74 ng g^{-1} dw, 60-80년에서 0.55 ng g^{-1} dw, 40-60년에서 0.61 ng g^{-1} dw, 20-40년에서 0.42 ng g^{-1} dw, <20년에서 0.29 ng g^{-1} dw로 검출되었다. 토양 시료 내 PAHs의 농도는 80-100년, 60-80년, 40-60년, 20-40년, <20년에서 각각 69, 80, 45, 43 및 21 ng g^{-1} dw로 나타났다. 또한, 토양 시료 내 alkyl-PAHs의 농도는 80-100년에서 420 ng g^{-1} dw, 60-80년에서 410 ng g^{-1} dw, 40-60년에서 230 ng g^{-1} dw, 20-40년에서 160 ng g^{-1} dw, <20년에서 73 ng g^{-1} dw로 확인되었다. 토양 시료 내 PTSs의 농도는 대기에 노출된지 오래될수록상대적으로 높은 경향을 보였다. 주성분 분석 결과 본 연구지역의 토양 시료 내 PCBs는 연대와 관계없이 제품 기원으로부터 기인하였을 것으로 추정되었다. PAHs의 기원은 PMF 모델 분석을 이용하여 확인하였으며, 다핵 연소, 석탄 연소, 석유 연소 및 석탄으로부터 기인하는 것으로 나타났다. 토양 시료 내 PAHs의 오염원은 연대가 80-100년에서 다핵 연소, 석탄 연소, 석유 연소 및 석탄 기원이 혼합된 결과를 보여주며, <20년에 대기 중에 노출된 토양 시료는 석탄 기원의 영향이 우세한 것으로 나타났다. 토양 시료 내 alkyl-PAHs는 석탄 기원과 관련 있는 것으로 나타났고, 역청탄과 유사한 조성을 보였다. 본 연구 결과는 스발바르 지역의 환경 보전 및 오염 관리에 대한 중요한 정보를 제공하며, 향후 극지 환경을 보호하고 개선하는 데 이용될 것으로 기대된다.

*Corresponding author: hongseongjin@cnu.ac.kr

번호	관련증빙 명
47	수은 분석 결과 raw data

Sample	n	THg (ng/L)	δ^{204}Hg (‰)	2σ (‰)	δ^{202}Hg (‰)	2σ (‰)	δ^{201}Hg (‰)	2σ (‰)	δ^{200}Hg (‰)	2σ (‰)	δ^{199}Hg (‰)	2σ (‰)	Δ^{204}Hg (‰)	2σ (‰)	Δ^{201}Hg (‰)	2σ (‰)	Δ^{200}Hg (‰)	2σ (‰)	Δ^{199}Hg (‰)	2σ (‰)
Field blank	3	0.30±0.16																		
Procedural blank	4	0.28±0.24																		
Procedural standards (NIST RM 8610)	5		-0.83	0.25	-0.56	0.11	-0.42	0.13	-0.29	0.07	-0.14	0.08	0.02	0.11	0.01	0.10	0.00	0.03	0.00	0.0
NIST RM8610 standard (UM Almadén)	55		-0.81	0.15	-0.54	0.09	-0.44	0.12	-0.27	0.06	-0.17	0.04	0.00	0.07	-0.03	0.11	0.01	0.03	-0.03	0.0
Surface snow																				
970m_Day1		15.1	-0.33	0.50	-0.12	0.32	-0.49	0.19	0.05	0.15	-0.31	0.05	-0.15	0.01	-0.40	0.05	0.11	0.01	-0.28	0.0
970m_Day1		17.0	-0.34	0.63	-0.11	0.44	-0.37	0.33	0.07	0.24	-0.20	0.07	-0.18	0.02	-0.29	0.00	0.12	0.02	-0.18	0.0
1700m_Day1		10.3	-0.20	0.11	0.01	0.06	-1.34	0.09	0.15	0.06	-1.25	0.10	-0.22	0.02	-1.35	0.05	0.14	0.03	-1.25	0.0
1700m_Day1		18.1	-0.18		0.02		-0.84		0.15		-0.71		-0.21		-0.86		0.14		-0.72	
1700m_Day2		15.2	0.35	0.39	0.35	0.23	-0.21	0.19	0.29	0.11	-0.22	0.03	-0.17	0.04	-0.47	0.02	0.12	0.01	-0.31	0.0
1700m_Day2		19.7	0.03	0.03	0.13	0.00	-0.10	0.04	0.16	0.00	-0.04	0.01	-0.16	0.03	-0.20	0.03	0.10	0.00	-0.08	0.0
1700m_Day3		22.1	0.38	0.13	0.36	0.08	0.09	0.03	0.28	0.05	0.13	0.01	-0.15	0.02	-0.17	0.08	0.11	0.01	0.04	0.0
1700m_Day3		17.8	0.32	0.04	0.32	0.02	0.11	0.05	0.27	0.01	0.09	0.01	-0.16	0.01	-0.13	0.06	0.11	0.02	0.01	0.0
1700m_Day3		14.9	0.45	0.35	0.38	0.23	0.14	0.17	0.27	0.11	0.05	0.06	-0.11	0.00	-0.15	0.01	0.08	0.01	-0.05	0.0
970m		16.6	-0.66	0.24	-0.31	0.19	-2.06	0.28	-0.03	0.05	-1.99	0.02	-0.20	0.05	-1.82	0.14	0.12	0.05	-1.92	0.0
970m		16.2	-1.12	0.29	-0.62	0.25	-2.37	0.17	-0.16	0.11	-1.98	0.14	-0.19	0.08	-1.90	0.01	0.15	0.01	-1.82	0.0
1400m		7.7	-0.31		-0.05		-1.62		0.13		-1.56		-0.23		-1.58		0.15		-1.55	
1400m		14.4	-0.36	0.98	-0.13	0.73	-0.83	0.56	0.10	0.34	-0.63	0.09	-0.17	0.12	-0.73	0.01	0.16	0.03	-0.60	0.2
1400m		4.5	-0.66	1.37	-0.20	0.96	-1.58	0.50	-0.02	0.30	-1.39	0.26	-0.36	0.06	-1.43	0.22	0.08	0.18	-1.34	0.0
380m		5.0	-0.30		-0.10		-1.00		0.03		-0.81		-0.15		-0.92		0.08		-0.78	
Flux chamber experiment																				
1400m_pre-snow_A		7.17	-1.13	0.03	-0.57	0.09	-0.23	0.03	-0.09	0.02	0.10	0.06	-0.28	0.17	0.20	0.04	0.20	0.02	0.24	0.0
1400m_pre-snow_B		7.77	-0.66	0.58	0.14	0.32	-0.78	0.02	0.30	0.01	-0.88	0.06	-0.27	0.10	-0.88	0.22	0.23	0.08	-0.91	0.0
1400m_post-snow_A		3.90	-0.80		-0.36		0.12		0.03		0.35		-0.27		0.39		0.21		0.44	
1400m_post-snow_A		5.27	-0.34		-0.04		0.29		0.22		0.35		-0.28		0.32		0.24		0.36	
1400m_post-snow_B		5.21	-0.49		-0.17		-0.58		0.15		-0.43		-0.25		-0.46		0.23		-0.39	
1400m_post-snow_B		6.95	0.27		0.40		-0.67		0.39		-0.79		-0.32		-0.97		0.19		-0.89	
970m_pre-snow_A		12.03	-0.46		-0.20		-0.59		0.02		-0.54		-0.16		-0.44		0.13		-0.49	
970m_post-snow_A		11.40	1.50		1.10		1.66		0.68		1.24		-0.15		0.83		0.13		0.96	
970m_post-snow_A		11.66	0.06		0.33		0.14		0.37		-0.38		-0.44		-0.11		0.20		-0.46	
970m_pre-snow_B		10.84	3.95		3.55		2.60		2.05		0.74		-1.36		-0.07		0.26		-0.15	
970m_post-snow_B		14.73	1.97		1.41		1.76		0.81		1.20		-0.14		0.70		0.11		0.85	
970m_post-snow_B		15.07	1.25		0.92		1.26		0.56		0.99		-0.13		0.57		0.10		0.76	

KOPRI 극지연구

번호	관련증빙 명
48	2023년도 국제 골드슈미트 학회 (Goldschmidt Conference 2023) 초록

Atmospheric mercury depletion and mercury photoreduction in snowpack at a mid-latitude coastal island

ORAL PRESENTATION

Presented by Ju Hyeon Lee

Monday, 10 July 2023

11:00 - 11:15

R17 (Building B, Level 2, Lyon Congress Center)

Subsession: 12aO1 - Mercury cycling in the context of global change

Session: 12a - Mercury cycling in the context of global change

Theme: Theme 12: Environmental geochemistry and human health

Abstract: 11 - Atmospheric mercury depletion and mercury photoreduction in snowpack at a mid-latitude coastal island

Abstract: 11 - Atmospheric mercury depletion and mercury photoreduction in snowpack at a mid-latitude coastal island

KOPRI 극지연구소

Abstract

During polar springtime, the atmospheric mercury depletion event (AMDE) is considered an important mechanism driving photo-oxidation of elemental mercury (Hg^0) via halogens and subsequent deposition (Hg^{2+}) and re-emission (Hg^0) from snowpack. While this atmospheric-snowpack interaction for mercury has been extensively studied in the coastal regions of the Arctic and Antarctic, only a few studies have characterized Hg exchange at mid-latitude coastal regions. We collected surface snow and atmospheric total gaseous Hg (TGM) at Mountain Halla, located at a coastal island of Jeju, South Korea, to characterize sources and mechanisms responsible for atmospheric-snowpack Hg exchange at mid-latitudes. Our TGM exhibited a $\delta^{202}Hg$ range of –2.33 to –0.80‰, consistent with TGM evaded from the oceanic surface [1]. The snow samples collected at multiple elevations exhibited surprisingly consistent Hg isotope ratios ($\delta^{202}Hg$ = -0.26 ± 0.33‰, $\Delta^{199}Hg$ = -1.06 ± 0.74‰, 1SD) with fresh snowfall ($\delta^{202}Hg$ = 0.25 ± 0.42‰, $\Delta^{199}Hg$ = -1.08 ± 0.18‰) and aged snow affected by the AMDE in the Arctic ($\delta^{202}Hg$ = 0.04 ± 0.61‰, $\Delta^{199}Hg$ = -2.51 ± 0.11‰) (Figure 1). Our snow halogen concentrations (Br^- = 1.00 ± 0.72μM, Cl^- = 476 ± 559μM, Na^+ = 547 ± 603μM, 1SD) reveal levels that are

번호	관련증빙 명
49	실험 결과 raw data 제출

	PCBs				PAHs		
	HH22-1152	HH22-1154	HH22-1156		HH22-1152	HH22-1154	HH22-1156
0.25	0.39	0.36	0.11	0~0.5	304	280	234
0.75	0.26		0.08	0.5~1.0	544		266
1.25	0.14	0.82	0.19	1.0~1.5	359	252	237
1.75	0.20	0.82	0.08	1.5~2.0	361	252	184
2.5	0.07	0.15	0.03	2.0~3.0	335	327	316
3.5	0.22	0.09	0.21	3.0~4.0	182	425	242
4.5	0.12	0.23	0.05	4.0~5.0	398	330	250
5.5				5.0~6.0	230	183	144
6.5				6.0~7.0	221	262	137
7.5				7.0~8.0	206	174	138
8.5				8.0~9.0	229	192	152
9.5				9.0~10	210	172	121
11				10~12	309	285	203
13				12~14	325	293	171
15				14~16	360	234	188
17				16~18	300	280	110
19				18~20	350	234	165
평균	0.20	0.41	0.11	평균	307	261	192

· 이스피오르드 시추 퇴적물 3점 (총 시료: 50개) 및 힌로펜 해협 3점 (총 시료: 21개) 유기독성물질 분석 완료

번호	관련증빙 명
50	실험 결과 raw data 제출

		2 rings	2 rings	2 rings	3 rings	3 rings	3 rings	3 rings	3 rings	3 rings	3 rings	4
	Depth (cm)	Acl	Ace	Flu	Phe	Ant	Fl	BbNF	BjNF	BkNF	BbNT	Py
HH22-1152	0-0.5	2.8	5.6	17.5	108.4	1.4	16.3	2.1	8.0	3.7	4.8	
	0.5-1.0	4.8	9.6	30.3	203.0	2.5	28.4	5.3	11.3	9.9	11.8	
	1-1.5	2.8	5.5	20.8	126.9	1.0	18.5	3.0	11.5	6.3	5.1	
	1.5-2	2.8	6.1	20.5	134.0	1.1	20.4	3.7	8.0	6.2	6.2	
	2-3	2.6	5.7	19.7	126.3	1.3	17.3	3.2	6.9	5.7	5.3	
	3-4	1.2	3.6	10.2	66.9	0.9	11.9	1.8	3.0	3.1	4.2	
	4-5	3.7	8.1	24.9	147.5	2.2	25.5	3.7	6.7	7.2	10.5	
	5-6	4.2	7.9	24.3	97.4	2.4	12.1	1.8	5.2	3.9	3.8	
	6-7	4.1	7.4	24.0	93.1	2.3	11.2	1.7	5.1	2.9	3.6	
	7-8	3.5	6.3	21.1	82.8	1.6	11.6	1.7	5.2	3.1	3.3	
	8-9	3.4	6.6	21.8	94.6	1.9	13.4	2.3	7.2	4.0	4.4	
	9-10	3.4	6.4	21.4	87.6	1.8	12.0	2.2	6.2	3.7	3.9	
	10-12	5.0	9.5	31.2	134.1	3.1	19.6	2.6	8.9	5.8	5.5	
	12-14	5.3	10.9	35.3	152.6	3.5	20.4	2.9	8.8	5.7	5.0	
	14-16	5.2	10.6	34.0	160.0	3.2	23.5	4.0	11.9	7.1	6.9	
	16-18	5.0	10.0	29.6	132.7	3.2	19.2	3.2	9.7	5.6	5.4	
	18-20	5.1	10.2	30.5	150.3	3.7	21.5	4.1	11.6	7.0	6.6	

· 이스피오르드 시추 퇴적물 내 분석된 화합물 그룹의 모델링 분석 및 진단비 분석을 통한 잠재적 오염원 분석

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
51	논문게재(2건)

Environmental Pollution

Chronological distribution and potential sources of persistent toxic substances in soils from the glacier foreland of Midtre Lovénbreen, Svalbard

· 표층 퇴적물 유기독성물질 분석 결과 Environmental Pollution 논문 게재

번호	관련증빙 명
52	논문게재(2건)

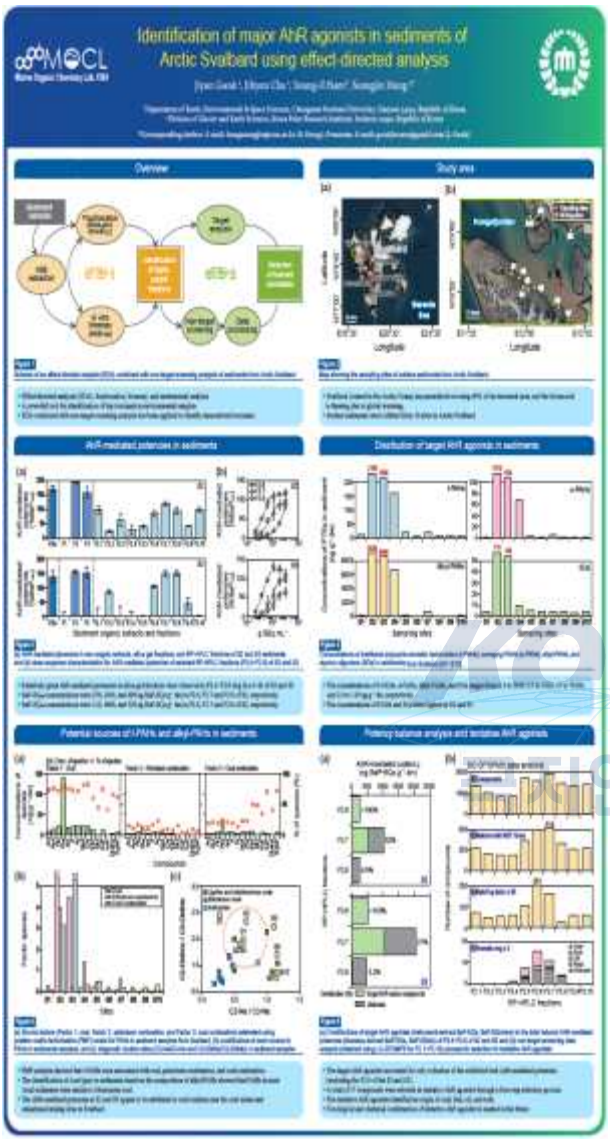
Chemosphere

Characterization of AhR-mediated potency in sediments from Kongsfjorden, Svalbard: Application of effect-directed analysis and nontarget screening

· 표층 퇴적물 석탄 기원 유기독성물질 분석 결과 Chemosphere 논문 게재

KOPRI 극지연구소

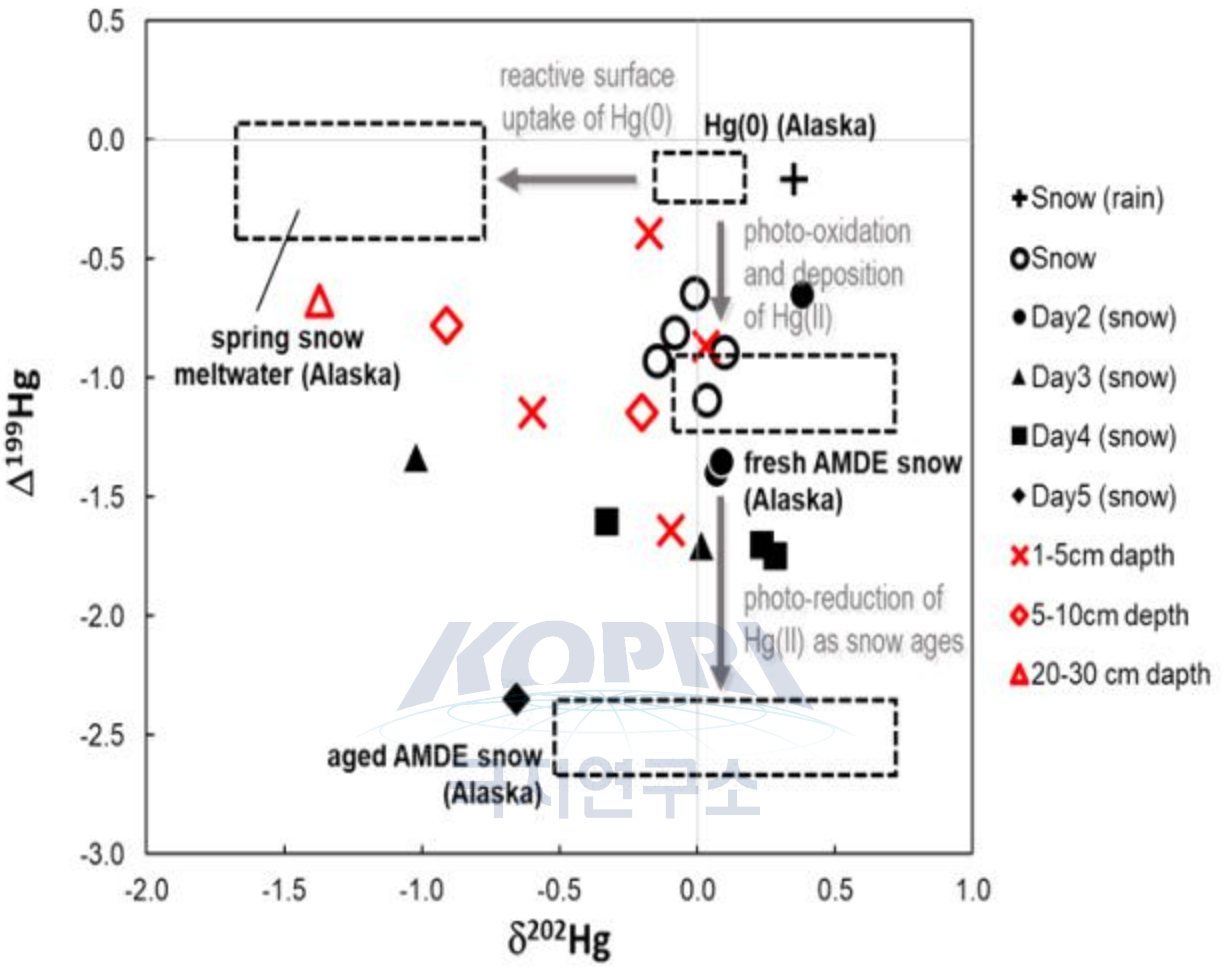
번호	관련증빙 명
53	학술발표(1건)



· 표층 퇴적물 석탄 기원 유기독성물질 분석 결과 환경분석학회 춘계학술대회 포스터 발표

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
54	스발바르 스노우팩 수은 안정동위원소 분석



스발바르 스노우팩 시료 수은 안정동위원소 분석 데이터 그래프

번호	관련증빙 명
55	2021년 기후적 해류 변동성 관련 게재 논문 (Kim et al., 2021; Occurrence of pressure-forced meteotsunami events in the eastern Yellow Sea during 2010-2019)

Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21, 3323–3337, 2021
https://doi.org/10.5194/nhess-21-3323-2021
© Author(s) 2021. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Natural Hazards and Earth System Sciences
Open Access
EGU

Occurrence of pressure-forced meteotsunami events in the eastern Yellow Sea during 2010–2019

Myung-Seok Kim[1], **Seung-Buhm Woo**[1], **Hyunmin Eom**[2], **and Sung Hyup You**[2]

[1]Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon, Republic of Korea
[2]Marine Meteorology Division, Korea Meteorological Administration, Seoul, Republic of Korea

Correspondence: Seung-Buhm Woo (sbwoo@inha.ac.kr)

Received: 26 April 2021 – Discussion started: 4 May 2021
Revised: 18 August 2021 – Accepted: 4 October 2021 – Published: 5 November 2021

KOPRI 극지연구소

Disclaimer. Publisher's note: Copernicus Publications remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Acknowledgements. The co-authors would like to express their thanks to three referees for their careful reading and valuable comments. This article has been substantially improved compared to the initial submission. We also thank Hee Jung Kim for assisting with administrative tasks.

Financial support. This research was part of the project titled "Improvements of ocean prediction accuracy using numerical modeling and artificial intelligence technology", funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea. In addition, this research was supported by the National Research Foundation of Korea grant from the Korean Government (MSIT; the Ministry of Science and ICT) (grant no. NRF-2021M1A5A1075516) (KOPRI-PN21013).

Denamiel, C., Huan, X., Šepić, J., and Vilibić, I.: Uncertainty propagation using polynomial chaos expansions for extreme sea level hazard assessment: The case of the eastern Adriatic meteotsunamis, J. Phys. Oceanogr., 50, 1005–1021, https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0147.1, 2020.

Dusek, G., DiVeglio, C., Licate, L., Heilman, L., Kirk, K., Paternostro, C., and Miller, A.: A meteotsunami climatology along the U.S. East Coast, B. Am. Meteorol. Soc., 100, 1329–1345, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0206.1, 2019.

Eom, H.-M., Seung, Y.-H., Woo, S.-B., and You, S.-H.: Analysis of abnormal wave at the west coast on 31 March 2007, J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng., 24, 217–227, https://doi.org/10.9765/kscoe.2012.24.3.217, 2012.

Hibiya, T. and Kajiura, K.: Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay, J. Oceanogr. Soc. Japan, 38, 172–182, https://doi.org/10.1007/BF02110288, 1982.

Jansa, A., Monserrat, S., and Gomis, D.: The rissaga of 15 June 2006 in Ciutadella (Menorca), a meteorological tsunami, Adv. Geosci., 12, 1–4, https://doi.org/10.5194/adgeo-12-1-2007, 2007.

Kim, H., Kim, Y.-K., Woo, S.-B., and Kim, M.-S.: Atmospheric

번호	관련증빙 명
56	2021년 한국해안 · 해양공학회 학술발표 초록(최재윤; 항 내조간대가 퇴적물공급 및 수송에 미치는 영향)

한국해안·해양공학회 학술발표논문집(2021)
2021년 10월 28일(목)-29일(금)

항 내 조간대가 퇴적물 공급 및 수송에 미치는 영향

Sediment Source and Transport Due to the Intertidal Flat within Semi-Closed Harbor

최재윤[1], 김종욱[2], 이혜민[3], 윤병일[4], 우승범[5]

Jae Yoon Choi[1], Jong Wook Kim[2] ,Hye Min Lee[3], Byung Il Yoon[5] and Seung-Buhm Woo[6]

KORRI 국지연구소

항만에서의 퇴적 프로세스 재현과 분석은 안전한 항행 유지 및 효율적인 항만 운영 때문에 중요하다. 특히, 대형 크루즈 여객선과 같은 대형 선박은 사고 시 인명피해가 발생할 수 있어 여객터미널에서의 꾸준한 수심관리가 필요하다. 인천 신국제 여객터미널은 중국으로부터의 관광 수요를 충족시키기 위하여 2020년 7월 개장하였지만, 개장 전 수심 확보를 위한 준설 민원이 제기되었다. 신국제 여객터미널에서의 퇴적 프로세스를 재현하기 위해 비구조격자 수치모델을 인천 신국제 여객터미널을 포함한 경기만 해역에 적용하였다. 2020년 2월 1일부터 3월 17일, 8월 17일부터 9월 27일까지 신국제 여객터미널에서 수층별 유속관측과 염분, 부유사 관측을 수행하였다. 수치모델은 관측 자료와 비교 검정을 위해 동일기간을 모의하였다. 2019년 국립해양조사원에서 제공하는 수치해도와 2021년 8월 수행한 수심측량 자료에서, 신국제 여객터미널 입구, 인천 남항의 입구에서 약 20 cm/year이상의 가장 높은 퇴적률이 산출되었다. 수치모델의 결과로 산출된 부유사 순 수송량은 항 입구에서 19.4 kg/s가 유입되었으며, 인천 남항과 신국제 여객터미널에 각각 12.8, 7.8 kg/s이 유입되었다. 조간대를 기준으로 북쪽에 위치한 인천 남항은 제 1항로로부터 유입된 부유사의 유출을 차단시키고, 남쪽에 위치한 신국제 여객터미널에서는 조류의 흐름에 따라 조간대 상부와 사면 경사로 침식된 퇴적물이 항 내로 유입된다. 유입된 부유사는 잔차류와 회전성 흐름을 통해 항 입구에 주로 집적되어 수심이 감소되는 것으로 계산되었다. 항 내 조간대에 의한 퇴적물 수송 프로세스는 향후 항만 개발에서 항구의 지리적인 위치와 준설계획을 수립하는데 도움이 될 것으로 예측된다.

번호	관련증빙 명
57	2021년 추계해양학회 발표 초록(이혜민; 경기만 하구에서의 한강 유량에 따른 물질 순환 메커니즘)

[PO20]

경기만 하구에서의 한강 유량에 따른 물질 순환 메커니즘

이혜민[1] ,김종욱[1] ,최재윤[1] ,윤병일[1] ,우승범[1*]
[1]인하대학교 해양과학과

본 연구에서는 해수의 유동에 관한 3차원 수치모델을 사용하여 경기만 한강 하구에서의 물질 순환에 대한 메커니즘을 분석하였다. 하구 및 연안에서 물질 이동에 대한 대표적인 척도로 이용되는 염분을 활용하였다. 수치모델의 모의 기간은 갈수기와 홍수기를 포함하는 2020년 1월 20일부터 9월 20일까지 약 245일이며, 모델 결과와 관측 자료의 비교를 통해 해수의 유동 및 염분 변화에 관한 수치모델의 재현성을 입증하였다. 한강 하구에서 염의 교환이 활발하게 이루어지는 염하수로의 북단과 남단 지역에 대해서 염 수송량(Fs)을 산출하였다. 염 수송에 대한 발생 기작을 세부적으로 분석하기 위해 Fs를 담수의 순압성 흐름에 의한 염 수송(QfS0), 수평 및 수직적인 유속 차이에 의한 염 수송(Fe), 조석 변동성을 가진 유속과 염분의 위상 차이에 의한 염 수송(Ft)으로 분해하였다. 갈수기와 홍수기의 월평균 염 수송량에 의하면, 두 기간 모두 외해로부터 한강 하구 지역으로 유입되는 염의 대부분은 Ft에 의하여 강화도 남부 수로를 통해 수송된다. 반면에, 한강 하구로부터 외해로 유출되는 염의 대부분은 QfS0에 의하여 영종도 동부 수로를 통해 수송된다. 한강 하구에서 평균적인 염 수송은 갈수기 동안 Ft에 의하여 한강 하구의 상류 방향으로 수송되며, 홍수기 동안 QfS0에 의하여 외해 방향으로 수송된다. 결과적으로, 경기만 한강 하구에서의 물질 순환은 외해 방향의 수송을 발생시키는 QfS0와 한강 상류 방향의 수송을 발생시키는 Ft의 상호작용에 의하여 지배되며, 담수 유출량의 크기에 따라 수송 방향이 결정된다.

번호	관련증빙 명
58	[KPDC 자료 업로드] 2007년 7월에 대한 FVCOM 수위 모델링 결과

2022 FVCOM results for sea level in Svalbard Kongsfjorden

FVCOM sea level results obtained using Svalbard 800 model, TPXO8 atlas tide model, and ECMWF.

Register faveorites + Add

Disclosure Request + Add

- **Entry ID** KOPRI-KPDC-00002156
- **DOI** https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002156.1
- **Science Keyword** EARTH SCIENCE > OCEANS > COASTAL PROCESSES > FJORDS
- **ISO Topic** Oceans
- **Personnel** Seung-Il Nam (sinam@kopri.re.kr)
  Seung-Buhm Woo (sbwoo@inha.ac.kr), Inha University
  Jong Wook Kim (kaonesis@gmail.com), Inha University
  Hye Min Lee (hmlee960125@gmail.com), Inha University
- **Project** **PN22013**, Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability. **PI.Nam, Seung-Il** NTIS Connect
- **Research period** 2007-07-27 ~ 2007-07-31
- **Create/Update Date** 2022-11-07 / 2022-11-07
- **Location** OCEAN > ATLANTIC OCEAN > NORTH ATLANTIC OCEAN > SVALBARD AND JAN MAYEN > Kongsfjorden
- **Citation** The data(KOPRI-KPDC-00002156) used in this work was provided by the Korea Polar Research Institute.
- **Spatial Coverage** POINT lat:79.000000, lon:12.000000

KOPRI 극지연구소

- **Raw Data** File Size 90.33 Mb for 5 items

Category	File Name	Description	Size	Status
Rawdata	Sea_level_20070727.nc	FVCOM results of sea level	18.07 Mb	Request required
Rawdata	Sea_level_20070728.nc	FVCOM results of sea level	18.07 Mb	Request required
Rawdata	Sea_level_20070729.nc	FVCOM results of sea level	18.07 Mb	Request required
Rawdata	Sea_level_20070730.nc	FVCOM results of sea level	18.07 Mb	Request required
Rawdata	Sea_level_20070731.nc	FVCOM results of sea level	18.07 Mb	Request required

번호	관련증빙 명
59	[KPDC 자료 업로드] 2007년 7월에 대한 FVCOM 염분 모델링 결과

2022 FVCOM results for salinity in Svalbard Kongsfjorden

FVCOM salinity results obtained using Svalbard 800 model, TPXO8 atlas tide model, and ECMWF.

Register faveorites + Add

Disclosure Request + Add

- **Entry ID** KOPRI-KPDC-00002157
- **DOI** https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002157.1
- **Science Keyword** EARTH SCIENCE > OCEANS > COASTAL PROCESSES > FJORDS
- **ISO Topic** Oceans
- **Personnel** Seung-Il Nam (sinam@kopri.re.kr)
  Seung-Buhm Woo (sbwoo@inha.ac.kr), Inha University
  Jong Wook Kim (kaonesis@gmail.com), Inha University
  Hye Min Lee (hmlee960125@gmail.com), Inha University
- **Project** **PN22013**, Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability. **PI.Nam, Seung-Il** NTIS Connect
- **Research period** 2007-07-27 ~ 2007-07-31
- **Create/Update Date** 2022-11-07 / 2022-11-07
- **Location** OCEAN > ATLANTIC OCEAN > NORTH ATLANTIC OCEAN > SVALBARD AND JAN MAYEN > Kongsfjorden
- **Citation** The data(KOPRI-KPDC-00002157) used in this work was provided by the Korea Polar Research Institute.
- **Spatial Coverage** POINT lat:79.000000, lon:12.000000

KOPRI 극지연구소

- **Raw Data** File Size 2.83 Gb for 5 items

Category	File Name	Description	Size	Status
Rawdata	Salinity_20070727.nc	FVCOM results of salinity	566.81 Mb	Request required
Rawdata	Salinity_20070728.nc	FVCOM results of salinity	566.81 Mb	Request required
Rawdata	Salinity_20070729.nc	FVCOM results of salinity	566.81 Mb	Request required
Rawdata	Salinity_20070730.nc	FVCOM results of salinity	566.81 Mb	Request required
Rawdata	Salinity_20070731.nc	FVCOM results of salinity	566.81 Mb	Request required

번호	관련증빙 명
60	[KPDC 자료 업로드] 2007년 7월에 대한 FVCOM 수온 모델링 결과

2022 FVCOM results for temperature in Svalbard Kongsfjorden

FVCOM temperature results obtained using Svalbard 800 model, TPXO8 atlas tide model, and ECMWF.

Register faveorites + Add

Disclosure Request + Add

- **Entry ID** KOPRI-KPDC-00002158
- **DOI** https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002158.1
- **Science Keyword** EARTH SCIENCE > OCEANS > COASTAL PROCESSES > FJORDS
- **ISO Topic** Oceans
- **Personnel** Seung-Il Nam (sinam@kopri.re.kr)
  Seung-Buhm Woo (sbwoo@inha.ac.kr), Inha University
  Jong Wook Kim (kaonesis@gmail.com), Inha University
  Hye Min Lee (hmlee960125@gmail.com), Inha University
- **Project** **PN22013**, Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability. **PI.Nam, Seung-Il** NTIS Connect
- **Research period** 2007-07-27 ~ 2007-07-31
- **Create/Update Date** 2022-11-07 / 2022-11-07
- **Location** OCEAN > ATLANTIC OCEAN > NORTH ATLANTIC OCEAN > SVALBARD AND JAN MAYEN > Kongsfjorden
- **Citation** The data(KOPRI-KPDC-00002158) used in this work was provided by the Korea Polar Research Institute.
- **Spatial Coverage** POINT lat:79.000000, lon:12.000000

KOPRI 극지연구소

- **Raw Data** File Size 2.83 Gb for 5 items

Category	File Name	Description	Size	Status
Rawdata	Temperature_20070727.nc	FVCOM results of temperature	566.81 Mb	Request required
Rawdata	Temperature_20070728.nc	FVCOM results of temperature	566.81 Mb	Request required
Rawdata	Temperature_20070729.nc	FVCOM results of temperature	566.81 Mb	Request required
Rawdata	Temperature_20070730.nc	FVCOM results of temperature	566.81 Mb	Request required
Rawdata	Temperature_20070731.nc	FVCOM results of temperature	566.81 Mb	Request required

번호	관련증빙 명
61	[KPDC 자료 업로드] 2007년 7월에 대한 FVCOM 유속 모델링 결과

2022 FVCOM results for current in Svalbard Kongsfjorden

FVCOM current results obtained using Svalbard 800 model, TPXO8 atlas tide model, and ECMWF.

Register faveorites + Add

Disclosure Request + Add

- **Entry ID** KOPRI-KPDC-00002161
- **DOI** https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002161.1
- **Science Keyword** EARTH SCIENCE > OCEANS > COASTAL PROCESSES > FJORDS
- **ISO Topic** Oceans
- **Personnel** Seung-Il Nam (sinam@kopri.re.kr)
  Seung-Buhm Woo (sbwoo@inha.ac.kr), Inha University
  Jong Wook Kim (kaonesis@gmail.com), Inha University
  Hye Min Lee (hmlee960125@gmail.com), Inha University
- **Project** **PN22013**, Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability. **PI.Nam, Seung-Il** NTIS Connect
- **Research period** 2007-07-27 ~ 2007-07-31
- **Create/Update Date** 2022-11-07 / 2022-11-07
- **Location** OCEAN > ATLANTIC OCEAN > NORTH ATLANTIC OCEAN > SVALBARD AND JAN MAYEN > Kongsfjorden
- **Citation** The data(KOPRI-KPDC-00002161) used in this work was provided by the Korea Polar Research Institute.
- **Spatial Coverage** POINT lat:79.000000, lon:12.000000

KOPRI 극지연구소

- **Raw Data** File Size 10.64 Gb for 5 items

Category	File Name	Description	Size	Status
Rawdata	Current_20070727.nc	FVCOM results of the current	2.13 Gb	Request required
Rawdata	Current_20070728.nc	FVCOM results of the current	2.13 Gb	Request required
Rawdata	Current_20070729.nc	FVCOM results of the current	2.13 Gb	Request required
Rawdata	Current_20070730.nc	FVCOM results of the current	2.13 Gb	Request required
Rawdata	Current_20070731.nc	FVCOM results of the current	2.13 Gb	Request required

번호	관련증빙 명
62	[KPDC 자료 업로드] 2007년 5월에 대한 FVCOM 입자추적 모델링 결과

2022 FVCOM results for particle tracking (2007/05) in Svalbard Kongsfjorden

FVCOM particle tracking results (2007/05) obtained using Svalbard 800 model, TPXO8 atlas tide model, and ECMWF.

Register faveorites + Add

Disclosure Request + Add

- **Entry ID** KOPRI-KPDC-00002159
- **DOI** https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002159.1
- **Science Keyword** EARTH SCIENCE > OCEANS > COASTAL PROCESSES > FJORDS
- **ISO Topic** Oceans
- **Personnel** Seung-Il Nam (sinam@kopri.re.kr)
  Seung-Buhm Woo (sbwoo@inha.ac.kr), Inha University
  Jong Wook Kim (kaonesis@gmail.com), Inha University
  Hye Min Lee (hmlee960125@gmail.com), Inha University
- **Project** **PN22013**, Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability. **PI.Nam, Seung-Il** NTIS Connect
- **Research period** 2007-05-21 ~ 2007-06-20
- **Create/Update Date** 2022-11-07 / 2022-11-07
- **Location** OCEAN > ATLANTIC OCEAN > NORTH ATLANTIC OCEAN > SVALBARD AND JAN MAYEN > Kongsfjorden
- **Citation** The data(KOPRI-KPDC-00002159) used in this work was provided by the Korea Polar Research Institute.
- **Spatial Coverage** POINT lat:79.000000, lon:12.000000

KOPRI 극지연구소

- **Raw Data** File Size 1.77 Gb for 1 item

Category	File Name	Description	Size	Status
Rawdata	Particle_tracking_200705.nc	FVCOM results of particle tracking (2007/05)	1.77 Gb	Request required

번호	관련증빙 명
63	[KPDC 자료 업로드] 2007년 7월에 대한 FVCOM 입자추적 모델링 결과

2022 FVCOM results for particle tracking (2007/07) in Svalbard Kongsfjorden

FVCOM particle tracking results (2007/07) obtained using Svalbard 800 model, TPXO8 atlas tide model, and ECMWF.

Register faveorites + Add

Disclosure Request + Add

- **Entry ID** KOPRI-KPDC-00002160
- **DOI** https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002160.1
- **Science Keyword** EARTH SCIENCE > OCEANS > COASTAL PROCESSES > FJORDS
- **ISO Topic** Oceans
- **Personnel** Seung-Il Nam (sinam@kopri.re.kr)
  Seung-Buhm Woo (sbwoo@inha.ac.kr), Inha University
  Jong Wook Kim (kaonesis@gmail.com), Inha University
  Hye Min Lee (hmlee960125@gmail.com), Inha University
- **Project** **PN22013**, Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability. **PI.Nam, Seung-Il** NTIS Connect
- **Research period** 2007-07-01 ~ 2007-07-31
- **Create/Update Date** 2022-11-07 / 2022-11-07
- **Location** OCEAN > ATLANTIC OCEAN > NORTH ATLANTIC OCEAN > SVALBARD AND JAN MAYEN > Kongsfjorden
- **Citation** The data(KOPRI-KPDC-00002160) used in this work was provided by the Korea Polar Research Institute.
- **Spatial Coverage** POINT lat:79.000000, lon:12.000000

KOPRI 극지연구소

- **Raw Data** File Size 1.77 Gb for 1 item

Category	File Name	Description	Size	Status
Rawdata	Particle_tracking_200707.nc	FVCOM results of particle tracking (2007/07)	1.77 Gb	Request required

번호	관련증빙 명
64-1	2022년 한국해양과학기술협의회 발표 초록(김종욱; 영산강 하구에서 수로 분기와 관련된 흐름 구조에 관한 관측 연구)

2022년 한국해양과학기술협의회 공동학술대회
6월 2일(목)~4일(토) 제주 국제컨벤션센터

[PO05]

영산강 하구에서 수로 분기와 관련된 흐름 구조에 관한 관측 연구

김종욱 [1], 우승범 [1*], 송진일 [1]
[1] 인하대학교 해양과학과

하나 이상의 수로가 있는 경우, 두 수로 간의 담수원 연결성에 따라 잔차류의 수직 구조 차이가 발생할 수 있으며, 이로 인하여 하구 내 물질 순환에 제어요인이 될 수 있다. 영산강 하구둑의 서쪽 해역은 하구둑의 방류에 의해 유동흐름이 크게 영향을 받는 해역으로써, 서쪽 외해와 연결되는 주수로와 남쪽 외해와 연결되는 수로가 존재하고, 상대적으로 남쪽 수로와 관련된 연구가 적었다. 이러한 영산강 하구의 두 수로 간의 잔차 흐름 구조를 이해하기 위하여, 2011 년 8 월 10 일 소조기 방류 시와 2011 년 8 월 15 일 대조기 미방류 시에 동일한 정선에서 수층별 유속 및 염분 관측을 수행하였다. 2 개의 종 방향 acoustic Doppler current profiler (ADCP) 정선 관측은 1 시간 간격으로 한 조석 주기 동안 총 13 회 왕복 관측으로 수행되었고, 14 개의 정점에서 CTD 프로파일링을 통하여 연직 수온과 염분 자료가 수집되었다. 소조기 방류 시, 하구둑 담수 방류에 의해서 전형적인 2 층 잔차류 구조가 발달한다. 담수 유출과 관련되어 표층에서 강한 외해 방향의 잔차 흐름이 발생되고, 흐름은 주수로와 남쪽 수로를 통해 분기된다. 반면, 밀도 경사에 의해서 저층에서 하구둑을 향한 잔차류가 발달하게 되며, 이 때, 남쪽 수로의 저층 잔차류가 하구둑을 향한 흐름에 주수로보다 더 큰 영향을 미친다. 대조기 미방류 시, 소조기의 2 층 잔차 흐름 구조와 다르게 다층 잔차흐름구조가 발달한다. 상층 0~10 m 에서 외해방향 및 하구둑 방향의 흐름이 각각 분리되어 발생하며, 이는 주수로의 하구둑방향 잔차류 유입에 의해 지배된다. 반면, 하층 10~20 m 내에서도 외해방향 및 하구둑 방향 흐름이 분리되며, 이는 남쪽 수로의 수직·수평 밀도 차이가 증가함에 따라 저층 잔차류 발달하면서 하구둑 방향으로 흐름이 유입된다. 따라서, 대조기와 소조기에 걸쳐 영산강 하구둑 인근 해역의 잔차류 구조 발달은 주수로보다 남쪽 수로의 흐름 유입에 의한 기여도가 더 클 수 있으며, 물질순환과 관련되어 주요 제어 요인으로써 중요한 의미가 될 수 있다.

번호	관련증빙 명
64-2	2022년 한국해양학회 추계학술발표대회 발표 초록(이혜민; 스발바르 콩스피오르드 빙하 영향에 따른 해류 패턴 분석 연구)

[PP39]

Numerical study of glacier runoff effect on the current patterns in Kongsfjorden, Svalbard

이혜민[1], 김종욱[2], 임채욱[2], 김정현[3], 우승범[1]*

[1]Department of Ocean Sciences, College of Natural Science, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Republic of Korea, [2]Artificial Intelligence Convergence Research Center, Inha University, Incheon 22212, Republic of Korea, [3]Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Republic of Korea

KOPRI 극지연구소

Kongsfjorden, an Arctic fjord in Svalbard, has tidewater glaciers that have been retreating in recent decades. The glacier runoff from the tidewater glaciers changes the current patterns in the inner fjord. This study investigated the hydrodynamic characteristics affected by glacier runoff in Kongsfjorden, Svalbard using a numerical model. A 3-D numerical model, Finite Volume Coastal Ocean Model (FVCOM), is applied in Kongsfjorden. The modeling domain is widely constructed to simulate two major currents of Svalbard; It is West Spitsbergen Current (WSC) and East Spitsbergen Current (ESC). The main input conditions of the numerical model for oceanic and meteorological factors are constructed through Svalbard 800 model results (S800) and European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). The reproducibility of the numerical model about current patterns in Svalbard is validated by comparing model results and observation data. The glacier runoff from the inner fjord reduces the positive vorticity and strengthens the estuarine exchange flow. The enhanced estuarine exchange flow increases the inflow of warm current from the outer fjord. Therefore, the glacier runoff could increase the water temperature in the inner fjord, melting more tidewater glaciers.

번호	관련증빙 명
65	[KPDC 자료 업로드] 스발바르 콩스피오르드 해저 표층퇴적물 시료 분석 결과

Data Registration Confirmation

KPDC

2023 Near-bed sediment analysis results in Svalbard Kongsfjorden

Near-bed sediment analysis results obtained Van Veen grab sampler in Kongsfjorden, Svalbard

Identifier

Entry ID	KOPRI-KPDC-00002399
DOI	doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002399.1

Metadata

Science Keyword	EARTH SCIENCE > OCEANS > COASTAL PROCESSES > FJORDS
ISO Topic	Oceans
Personnel	Dahae Kim (dhkim@kopri.re.kr) Seung-Il Nam (sinam@kopri.re.kr) Jong Wook Kim (kaonesis@gmail.com), Inha university Yun Ji Song (yunjisong724@gmail.com), Inha university
Project	**PN23013**, Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability.
Research period	2023-07-08 ~ 2023-07-10
Registration Date	2023-11-14
Location	OCEAN > ARCTIC OCEAN
Spatial Coverage	**POINT** lat:78.89183333, lon:12.40798333 lat:78.902495, lon:12.45631667 lat:78.90060333, lon:12.34631667 ... (34 more)
Data Center	Korea Polar Data Center

This document is published for research data registered in the Korea Polar Data Center(KPDC). Please refer to the DOI or KPDC for more information.

Korea Polar Data Center | kpdc@kopri.re.kr
26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Korea
COPYRIGHT © KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE ALL RIGHTS RESERVED

KOPRI

번호	관련증빙 명
66	[KPDC 자료 업로드] 2007년 5월에 대한 FVCOM 입자추적 모델링 분석 결과

Data Registration Confirmation

KPDC

2023 FVCOM results for particle tracking in Svalbard Kongsfjorden (2007.05)

FVCOM particle tracking results obtained Lagrangian particle modules in Kongsfjroden, Svalbard

Identifier

Entry ID	KOPRI-KPDC-00002398
DOI	doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002398.1

Metadata

Science Keyword	EARTH SCIENCE > OCEANS > COASTAL PROCESSES > FJORDS
ISO Topic	Oceans
Personnel	Dahae Kim (dhkim@kopri.re.kr) Seung-Il Nam (sinam@kopri.re.kr) Jong Wook Kim (kaonesis@gmail.com), Inha university Yun Ji Song (yunjisong724@gmail.com), Inha university
Project	**PN23013**, Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability.
Research period	2007-05-01 ~ 2007-05-31
Registration Date	2023-11-14
Location	OCEAN > ARCTIC OCEAN > Svalbard, Kongsfjorden
Spatial Coverage	**POINT** lat:79.00000, lon:12.00000
Data Center	Korea Polar Data Center

This document is published for research data registered in the Korea Polar Data Center(KPDC). Please refer to the DOI or KPDC for more information.

Korea Polar Data Center | kpdc@kopri.re.kr
26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Korea
COPYRIGHT © KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE ALL RIGHTS RESERVED

번호	관련증빙 명
67	[KPDC 자료 업로드] 2007년 7월에 대한 FVCOM 입자추적 모델링 분석 결과

Data Registration Confirmation

KPDC

2023 FVCOM results for particle tracking in Svalbard Kongsfjorden (2007.07)

FVCOM particle tracking results obtained Lagrangian particle modules in Kongsfjorden, Svalbard

Identifier

Entry ID	KOPRI-KPDC-00002400
DOI	doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002400.1

Metadata

Science Keyword	EARTH SCIENCE > OCEANS > COASTAL PROCESSES > FJORDS
ISO Topic	Oceans
Personnel	Dahae Kim (dhkim@kopri.re.kr) Seung-Il Nam (sinam@kopri.re.kr) Jong Wook Kim (kaonesis@gmail.com), Inha university Yun Ji Song (yunjisong724@gmail.com), Inha university
Project	**PN23013**, Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability.
Research period	2007-07-01 ~ 2007-07-31
Registration Date	2023-11-14
Location	OCEAN > ARCTIC OCEAN
Spatial Coverage	**POINT** lat:79.0000, lon:12.0000
Data Center	Korea Polar Data Center

This document is published for research data registered in the Korea Polar Data Center(KPDC). Please refer to the DOI or KPDC for more information.

Korea Polar Data Center | kpdc@kopri.re.kr
26 Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon 21990, Korea
COPYRIGHT © KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE ALL RIGHTS RESERVED

KOPRI

번호	관련증빙 명
68	Kim et al. (2023) published in Renewable Energy

Renewable Energy
Available online 1 October 2023, 119408
In Press, Journal Pre-proof

A numerical approach to the treatment of submerged water exchange processes through the sluice gates of a tidal power plant

J.W. Kim [a], S.-B. Woo [b]

Show more
+ Add to Mendeley Share Cite

https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119408

Abstract

Tidal power generation is a sustainable technology for electricity generation and is regulated by water exchange through the hydraulic structures of the tidal power plant (TPP). In the numerical modeling of tidal power generation, the water exchange rate through the sluice gate has previously been estimated based on the water level difference and was input for the entire water column as a two-dimensional boundary condition. However, in this study, a three-dimensional simulation method for the water exchange rate, including submerged hydrological conditions and the momentum of the surrounding flow, was applied. A new numerical approach to water exchange was applied in the idealized tests, and the subsequent model results showed high reproducibility for the orifice velocity field results from laboratory experiments. To verify the hydrodynamics with the actual region, a numerical model was configured for the Sihwa TPP and evaluated through comparison with observation data. The model not only accurately reproduced the temporal variability of the current velocity results, but also reliably reproduced the spatiotemporal flow patterns related to the jet-like and anticlockwise rotating flows. Therefore, to explain the complex, spatiotemporal, and asymmetric flow structure around TPP, high-resolution grid-based 3D modeling technology associated with the submerged sluice gate is needed.

Keywords

Tidal power generation; Sluice gate; Water exchange; FVCOM; Sihwa tidal power plant

preserved for both inflow and outflow processes through the submerged sluice gate under the free-surface condition. In the idealized tests, the current velocity of the FVCOM model showed an error of less than 5% from the current velocity calculated by the orifice equation. On the other hand, as the water exchange was concentrated in the lower layer according to the height of the sluice gate, a stronger flow was calculated in the condition of low gate height than in the high gate height condition.

(ii) Comparing observation data with the model results of the new model for the application of the Sihwa TPP, it can be seen that solving the kinematic boundary condition with a high-resolution grid for the submerged gate was important for reproducing realistic patterns of flow and mass transport in the tidal power generation system. The Sihwa TPP model using the new module associated with the water exchange of the TPP, comprehensively reproduces the temporal variability of observed current velocity.

(iii) The water exchange processes create the jet-like flow structure in the main axis of the channel, all seawater during the drain phase exit through a section of BC. On the other hand, a large-scale rotational mean flow induced a flow along the Sihwa tide embankment, resulting in a flux converging on the jet-like flow. This jet-like flow and the entrainment flow on both sides of the jet suggested that it could be the mechanism for generating the spatiotemporal asymmetric mass transport structure suggested by Kim et al. [15,34].

(iv) In the operation of the plant, the flow pattern around the TPP is dominated by jets and currents due to water exchange, and the nonlinear interaction between the two flows makes the flow characteristics very complicated. Since this behavior is most affected by the water exchange process generated at the sluice gate, it is possible to reproduce the actual flow and material transport pattern only when the momentum and current velocity with a cross-sectional area of the sluice gates are accurately calculated during water exchange. Therefore, to explain the complex, spatiotemporal, and asymmetric flow structure around TPP, it is necessary to concentrate the momentum associated with submerged water flow and consider the characteristics of the related jet-like flow, vortex formation, and mass exchange.

CRediT authorship contribution statement

J.W. Kim: Conceptualization, Methodology, Investigation, Software, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization. **S.-B. Woo:** Supervision, Conceptualization, Methodology, Project administration, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2021R1I1A1A01060397). Also, this research was supported by a National Research Foundation of Korea Grant from the Korean Government (MSIT; the Ministry of Science and ICT) (NRF-2021M1A5A1075516) (KOPRI-PN22013).

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
69	Kim et al. (2023) published in Journal of Geophysical Research: Oceans

JGR Oceans

RESEARCH ARTICLE

Effect of Freshwater Discharge From Estuary Dam on Residual Circulation in Bifurcated Channel

J. W. Kim[1], J. I. Song[2], B. I. Yoon[1], and S.-B. Woo[1]

[1]Artificial Intelligence Convergence Research Center, Inha University, Incheon, Republic of Korea, [2]Yeongsan-Sagyecheon Sea Grant Center, Inha University, Incheon, Republic of Korea, [3]Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon, Republic of Korea

Abstract The residual structure of the inner part of the Yeongsan River estuary has been reported to be a multi-layer vertical structure, unlike the two-layer vertical structure of a typical estuary, due to irregular freshwater discharge. The inner estuary has a main channel connected to the open sea, and a bifurcated channel system (sub-channel) in its central part, which can affect the residual current. In this study, field observations of three-dimensional velocity and salinity were conducted to understand the discharge effects on the residual current at bifurcated channels. The residual flows were estimated using least-squares harmonic analysis. The relative contributions of advection acceleration and friction terms to nonlinear effects were evaluated using along-channel momentum balance. In the absence of freshwater discharge, the flow patterns were dominated by tidal dynamics in the sub-channel rather than the main channel, whereas most flow patterns during freshwater discharge were dominated by near-surface strong velocity in the main channel. A multi-layer vertical residual structure was observed during the non-discharge period in the main channel, which was caused by the insertion of upstream residual flow from the sub-channel. Nonlinear effects occurred at the bifurcation point of the two channels. During the non-discharge period, the advection term was most dominant, whereas the vertical friction term was dominant during the discharge period. Moreover, the magnitude of the horizontal friction term was larger than that of the advection term. Therefore, freshwater discharge can lead to an increase in the friction term, which in turn can markedly affect the residual circulation.

Plain Language Summary Residual circulation is a common and influential process in the major estuaries and coastal regions of the world, and understanding this is of great significance with respect to marine material transport, water quality, and ecological processes. The tidal propagation and residual flow patterns through the bifurcated narrow channel of the inner part of the Yeongsan River estuary are connected to the center of the main channel, which can significantly contribute to the formation of a vertical residual flow structure. Residual circulation shows a noticeable change due to the strong flow caused by the freshwater discharge from the estuary dam. Nonlinear effects occurred largely at the bifurcation point of the two channels, and in this regard, the major mechanisms of residual circulation differed between the two channels. Channel bifurcations are artificially or naturally formed along various coasts, and our research results provide a good example of identifying the causes of environmental changes.

1. Introduction

Residual circulation in estuaries is an important process for the distribution and movement of salt, sediment, pollutants, and plankton (Chen et al., 2009). Particularly in tidal-dominated estuaries, the instantaneous fluxes of materials are governed by (flood and ebb currents, but the net exchange is predominantly determined by residual current patterns induced by tidal asymmetry, freshwater discharge, wind, and topography (Aubrey & Speer, 1985; Hoitjo et al., 2009). Therefore, understanding the spatiotemporal patterns of residual currents and their major controlling factors is an important consideration in the long-term management of the estuarine environment.

Most prior studies on the residual circulation have been conducted in natural estuaries, and classical theories were presented on the basis of studies in the Hudson River estuary (Dyer, 1997). In studies of the two-layer structure of residual circulation, it has been shown that seaward outflow at the surface layer is induced by the baroclinic pressure gradient, while the landward inflow of more saline water near the bottom layer is induced by the barotropic pressure gradient (Geyer et al., 2000). Hansen and Rattray (1965) successfully predicted the strength of residual circulation using the linear theory that the residual estuarine circulation is controlled by the balance

© 2023. American Geophysical Union. All Rights Reserved.

Key Points
- Multi-layer vertical residual structure is due to induction of upstream residual flow from a narrow bifurcated channel
- Nonlinear effects occur at the bifurcation point of the channels
- The advection term dominated during non-discharge periods, whereas the vertical friction term dominated during discharge periods

Supporting Information
Supporting Information may be found in the online version of this article.

Correspondence to
S.-B. Woo,
sbwoo@inha.ac.kr

Citation
Kim, J. W., Song, J. I., Yoon, B. I., & Woo, S.-B. (2023). Effect of freshwater discharge from estuary dam on residual circulation in bifurcated channel. Journal of Geophysical Research: Oceans, 128, e2022JC019338. https://doi.org/10.1029/2022JC019338

Received 5 OCT 2022
Accepted 5 MAY 2023

Author Contributions
Conceptualization: J. W. Kim, B. I. Yoon, S.-B. Woo
Data curation: J. W. Kim
Formal analysis: J. W. Kim, J. I. Song
Investigation: J. W. Kim, J. I. Song, S.-B. Woo
Methodology: J. W. Kim, J. I. Song, B. I. Yoon, S.-B. Woo
Project Administration: S.-B. Woo
Resources: J. W. Kim
Software: J. W. Kim
Supervision: S.-B. Woo
Validation: J. W. Kim
Visualization: J. W. Kim
Writing – original draft: J. W. Kim, S.-B. Woo
Writing – review & editing: J. W. Kim, J. I. Song, B. I. Yoon, S.-B. Woo

channels through proper monitoring. In this study, field observations were performed at the inner part of the Yeongsan River estuary to analyze the residual flow structure and its mechanisms in the main channel, transect I, and the subchannel, transect II, which were affected by the freshwater discharge. The following conclusions are drawn from this study:

(1) During the non-discharge period, meaningful changes in the hydrodynamics of the inner part of the estuary occurred in transect II rather than transect I. The magnitudes of the maximum flood and ebb currents in transect II were greater than those in transect I. In addition, the velocity shear in transect II was 1.3 times greater than that in transect I. The low salinity of 15 or less remaining in the surface layer did not change in transect I over time, whereas in transect II, it increased by more than five, which was related to the velocity shear in transect II.

(2) During the discharge period, the change in the hydrodynamics in transect I was greater than that in transect II. A distinct jet-like-flow with a velocity of more than 1.5 m s^{-1} toward the open sea and a salinity close to zero was observed within the top 12 m of the water column in transect I. At the same time, a current flow toward the estuary dam at the bottom layer was significantly developed in transect I with a velocity of 0.47 m s^{-1} or higher. However, in transect II, a jet-like-flow toward the open sea within the top 5 m of the water column was developed similarly to that of transect I, but salinity changes in transect II were insignificant. These results suggest that the freshwater discharge effect of the estuary has a limited effect on transect I, and the residual circulation between the two channels and its major mechanisms may be different.

(3) For the residual flow of transect I, a multi-layer vertical structure was observed during the non-discharge period, whereas a two-layer vertical structure was observed during the discharge period. The multi-layer vertical structure of transect I during the non-discharge period was attributed to the residual flow of the bottom layer introduced from transect II. During discharge, the surface and bottom layers were clearly divided into two layers due to the effect of freshwater discharge, but flow exchange through the bottom layer between transects I and II was insignificant.

(4) The highest overtides of D4 and D6 associated with bottom friction were distributed on the steep slope, where water depth rapidly changed, adjacent to the estuary dam of transect I. In addition, D4/D2 ratios at the western end of transect I, which were greater than 0.5, were highly associated with overtides formed at the shoal region of transect II. The development of these overtides indicates domination of nonlinear effects during the absence of freshwater discharge from the estuary dam, and hence, the nonlinear acceleration terms may be the major mechanism behind momentum balance.

(5) The major mechanisms of along-channel momentum balance with and without freshwater discharge were completely different. During non-discharge period, the advection term was most dominant, whereas the vertical friction term was most dominant during the discharge period. It is noteworthy that the horizontal friction term, as well as the vertical friction term, was relatively larger than the advection term during the discharge period. Therefore, controlled discharges from the estuary dam can determine the major mechanisms underlying the residual flow dynamics of the estuary system. The installation of marine infrastructure on various conditions is increasing; hence, our research results provide a good example for the future identification of the causes of environmental changes.

Data Availability Statement

The observational data and codes of tide level, ADCP and CTD used in this paper are available in the Zenodo database (Kim, Woo, Song, & Yoon, 2022, https://doi.org/10.5281/zenodo.7648373).

Acknowledgments
This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2021R1A6A1A03039277).
This research was also supported by a National Research Foundation of Korea Grant from the Korean Government (MIST, the Ministry of Science and ICT) (NRF-2021M6A2A2057436) (KOPRI-PN23013).

References

Aubrey, D., & Speer, P. E. (1985). A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems Part I: Observations. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 21(2), 185–205. https://doi.org/10.1016/0272-7714(85)90096-6

Bang, B.-C., Kim, T. I., Jung, Y. S., Lee, J. H., Kim, I. W., Cho, J.-G., et al. (2013). Numerical modeling of sediment transport during the 2011 summer flood in the Yeongsan River Estuary, Korea. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 25(2), 74–92. https://doi.org/10.9765/KSCOE.2013.25.2.74

Boorman, P. A., Fenlon, A. J. P., van der Vegt, M., & Hoekstra, P. (2010). Subtidal flow division at a shallow tidal junction. Water Resources Research, 46(12), W12515. https://doi.org/10.1029/2010WR009256

Cheong, H., Yuhr Lee-Joseon, A., & Adamson, L. (2003). Observations of cross-channel structure of flow in an energetic tidal channel. Journal of Geophysical Research, 108(C4), 3114. https://doi.org/10.1029/2001JC001084

Chen, S. N., Sanford, L. P., & Hudson, D. R. (2009). Lateral circulation and sediment transport driven by axial winds in an idealized, partially mixed estuary. Journal of Geophysical Research, 114(C12), C12006. https://doi.org/10.1029/2008JC005014

번호	관련증빙 명
70	Lee et al. (2023) published in Journal of Marine Science and Engineering

Journal of Marine Science and Engineering

MDPI

Article

Mechanisms of Advective and Tidal Oscillatory Salt Transport in the Hypertidal Estuary: Yeomha Channel in Gyeonggi Bay

Hye Min Lee [1], Jang Wook Kim [2] and Seung-Buhm Woo [1,*]

[1] Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Republic of Korea
[2] Artificial Intelligence Convergence Research Center, Inha University, Incheon 22212, Republic of Korea
* Correspondence: sbwoo@inha.ac.kr

Abstract: Many estuaries have been damaged by such material movements as marine debris, suspended sediment, and pollutants. Understanding the estuarine circulation system is necessary to solve such problems. Salt transport analysis provides an insight into hydrodynamic processes about material circulation in the estuary. In this study, to understand the mechanisms of salt transport, a three-dimensional hydrodynamic model was applied to the hypertidal estuary system—Yeomha Channel in Gyeonggi Bay. The simulation period of the model was a total of 240 days (28 January to 28 September 2020), including the dry and wet seasons. The model results for the temporal variation in tide, current velocity, and salinity were validated by comparing them with the observed in situ data. The total salt transport (Fs) was calculated in three cross sections of the Yeomha Channel and was decomposed into three components (Qs: advective salt transport; Fs_1: steady shear dispersion; Fs_2: tidal oscillatory salt transport). During the dry season with strong tidal forces, the total salt transport patterns were mainly dominated by Qs. During the wet season with high river discharge, the total salt transport patterns were determined by the balance between Qs, Fs_1, and Fs_2. The long-term tidal constituents (MS_f and M_4) were the main mechanisms causing Qs with the spring–neap variation during the dry season. The tidal trapping effect, caused by a phase difference of less than 90° between tidal current and salinity, generated landward Fs_2 in the dry and wet seasons. In addition, the high river discharge during the wet season decreased the phase difference between tidal current and salinity to less than 70°, resulting in a much stronger landward Fs_2. This study suggests that the long-term tidal constituents and tidal trapping effect are unique characteristics that contribute to material circulation in the hypertidal estuary.

Keywords: salt transport; Eulerian decomposition; numerical model; tide; river discharge

Citation: Lee, H.M.; Kim, J.W.; Woo, S.-B. Mechanisms of Advective and Tidal Oscillatory Salt Transport in the Hypertidal Estuary: Yeomha Channel in Gyeonggi Bay. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 287. https://doi.org/10.3390/jmse11020287

Academic Editor: Alberto I. Antolínez

Received: 16 December 2022
Revised: 17 January 2023
Accepted: 25 January 2023
Published: 27 January 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

An estuary is where the interaction between seawater flowing from the open sea and freshwater discharged from rivers occurs. A wide range of salinity and rich nutrients at the estuary provide high biodiversity [1]. However, these eco-friendly systems have been damaged by human activities in recent decades. Factories related to the chemical industry built around the estuary emit oil pollutants and debris into the coastal area, causing various damage to the estuarine ecosystem [2,3]. In addition, the outflow of urban sewage, which contains such hazardous chemical substances as PAHs, TBT, and heavy metals, reduces the growth and survival rate of the organisms [4]. These marine pollutants in the seawater could be transported to other regions due to the estuarine circulation system [2,5]. Therefore, understanding the characteristics of material circulation in estuaries is a critical topic.

Subtidal salt transport using the Eulerian decomposition method has been studied in many estuaries to understand the mechanisms of material circulation [5–10]. These studies showed various mechanisms for estuarine circulation through salt transport

Therefore, to accurately predict material transport mechanisms, it is necessary to conduct modeling of various scenarios of salt transport characteristics that change according to wide freshwater discharge ranges.

Author Contributions: Conceptualization, H.M.L., J.W.K. and S.-B.W.; methodology, H.M.L. and J.W.K.; software, visualization, and validation, H.M.L.; formal analysis, H.M.L. and J.W.K.; investigation, H.M.L., J.W.K., S.-B.W.; resources, H.M.L. and S.-B.W.; data curation, H.M.L. and S.-B.W.; writing—original draft preparation, H.M.L., J.W.K. and S.-B.W.; writing—review and editing, H.M.L., J.W.K. and S.-B.W.; supervision, S.-B.W.; project administration, S.-B.W.; funding acquisition, S.-B.W. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2022-00155915, Artificial Intelligence Convergence Innovation Human Resources Development (Inha University)). This research was supported by a National Research Foundation of Korea Grant from the Korean Government (MSIT; the Ministry of Science and ICT) NRF-2021M1A5A1075116 (KOPRI PN22013).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Model results can be requested by contacting the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Nelson, B.W.; Cronin, L.E. *Estuaries and Nutrients*; Humana Press: Clifton, NJ, USA, 1981.
2. John, S.; Muraleedharan, K.R.; Ravichandran, C.; Aiswet, S.A.; Seenu, G.; Cameraye, P.W. What controls the flushing efficiency and particle transport pathways in a tropical estuary? Cochin estuary, southwest coast of India. *Water* 2020, *12*, 908. https://doi.org/10.3390/w12030908.
3. Narvaiman, N.C.; Vierst, J.P. Drivers of Change in Fragile Environments: Challenges to Governance in Indian Wetlands. *Nat. Resour. Forum* 2009, *33*, 320–333. https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2009.01255.x.
4. Jeong, H.; Kang, S.; Jung, H.; Jeong, D.; Oh, J.; Choi, S.; An, Y.; Choo, H.; Choi, S.; Kim, S.; et al. The Current Status of Eutrophication and Suggestions of the Purification & Restoration on Suction Sediment in the Northwestern Gamak Bay, Korea, 2017. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy* 2019, *22*, 105–113. https://doi.org/10.7846/jkosmee.2019.22.2.105.
5. Kim, C.K.; Park, K. A Modeling Study of Water and Salt Exchange for a Micro-Tidal, Stratified Northern Gulf of Mexico Estuary. *J. Mar. Syst.* 2012, *96–97*, 103–115. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.02.006.
6. Devkota, J.; Fang, X. Quantification of Water and Salt Exchanges in a Tidal Estuary. *Water* 2015, *7*, 1769–1791. https://doi.org/10.3390/w7051769.
7. Gong, W.; Shen, J. The Response of Salt Intrusion to Changes in River Discharge and Tidal Mixing during the Dry Season in the Modaomen Estuary, China. *Cont. Shelf Res.* 2011, *31*, 769–788. https://doi.org/10.1016/j.csr.2011.01.011.
8. Lerczak, J.A.; Geyer, W.R.; Chant, R.J. Mechanisms Driving the Time-Dependent Salt Flux in a Partially Stratified Estuary. *J. Phys. Oceanogr.* 2006, *36*, 2296–2311. https://doi.org/10.1175/JPO2959.1.
9. Li, F.; Gan, L.; Pan, C.; Pang, Y. Detecting the Mechanisms of Longitudinal Salt Transport during Spring Tides in Qiantang Estuary. *J. Integr. Environ. Sci.* 2019, *16*, 123–140. https://doi.org/10.1080/1943815X.2019.1632190.
10. Wang, T.; Geyer, W.R.; Engel, P.; Jiang, W.; Feng, S. Mechanisms of Tidal Oscillatory Salt Transport in a Partially Stratified Estuary. *J. Phys. Oceanogr.* 2018, *48*, 2775–2799. https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0091.1.
11. Monismith, S.G.; Kimmerer, W.; Burau, J.R.; Stacey, M.T. Structure and flow-induced variability of the subtidal salinity field in northern San Francisco Bay. *J. Phys. Oceanogr.* 2002, *32*, 3003–3019. https://doi.org/10.1175/1520-0485(2002)032%3C3003:SAFVOT%3E2.0.CO;2.
12. Fischer, H.B.; List, J.E.; Koh, C.R.; Imberger, J.; Brooks, N.H. *Mixing in Inland and Coastal Waters*; Academic Press: San Diego, CA, USA, 1979.
13. Gasol, E.; Zhang, P.; Cai, H. Dynamics of Fortnightly Water Level Variations along a Tide-Dominated Estuary with Negligible River Discharge. *Ocean Sci.* 2021, *17*, 1605–1621. https://doi.org/10.5194/os-17-1605-2021.
14. Suh, S.W.; Lee, H.Y.; Kim, H.J. Spatio-Temporal Variability of Tidal Asymmetry Due to Multiple Coastal Constructions along the West Coast of Korea. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 2014, *151*, 336–346. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.09.007.
15. Woo, S.B.; Il Yoon, B. Numerical Simulation of Fortnightly Modulations of the Convergence Zone by Residual Volume Transport in a Macrotidal Estuary. *J. Coast. Res.* 2008, *45*, 116–120. https://doi.org/10.2112/SI45-122.1.
16. Yoon, B.; Woo, S.-B. Tidal Asymmetry and Flood/Ebb Dominance around the Yeomha Channel in the Han River Estuary, South Korea. *J. Coast. Res.* 2013, *165*, 1242–1246. https://doi.org/10.2112/si65-210.1.

번호	관련증빙 명
71	[학술발표] Impact of meltwater discharge on current flow patterns and seawater exchange processes in Kongsfjorden of Arctic Svalbard

[붙임 02]

Impact of meltwater discharge on current flow patterns and seawater exchange processes in Kongsfjorden of Arctic Svalbard

송은지[1], 김종욱[2], 우승범[1,*], 이혜민[3], 김기환[4], 김정현[3], 남승일[5]

[1]인하대학교 해양과학과, [2]경기·인천씨그랜트센터,

[3](주)유에스티 21, [4]인하대학교 인공지능융합연구센터,

[5]극지연구소 빙하지각연구본부

북극 스발바르군도의 서스피츠베르겐 서쪽 만안에 위치한 콩스피오르드는 최근 급격히 진행되고 있는 온난화 영향과 더불어 북대서양 해류의 지류인 서스피츠베르겐 해류 유입의 영향을 받는 대표적인 지역으로써, 해년 조수범하기 후빙기으로써 융해 비율이 증가하고 있다. 조수범하기 후빙기로써 다량의 융빙수가 피오르드의 주변 해역으로 유출되면서 수괴의 성층화를 야기시킬 수 있기 때문에, 피오르드 내의 해류 및 물질들의 순환과정을 이해하기 위해서는 관련된 연구가 필요하다. 기존 연구에서는 주로 정압계지 기반의 Regional Ocean Modelling System (ROMS) 모델을 사용하여 바람이 콩스피오르드 해역의 수리학적 특성들에 미치는 영향을 주로 분석하였지만, 융빙수 유출이 주로 해류 패턴 및 해수 수송량 변동에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다. 비정압 격자 기반 Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM)이 2007년 해류 유동특성에 대해 융빙수 영향을 현실적으로 파악하기 위해 콩스피오르드에 적용되었다. 공액모델인 SB00위 폐노콤팩 결계 및 초기조건으로 사용되었으며, 노르웨이 극지연구소(NPI)로부터 제공받은 SnowModel 기반의 융빙수 유출 위치와 유출량이 모델에 입력되었다. 수치모델

5월 23일(목)

룸1

장소 : 이벤트홀 09:00~12:00

좌장: 곽종성(부경대)

09:00-09:15 룸1I01 Occurrence of a cooling core north of the Ross Sea after rapid Sea ice decline in 2015

조은별, 김태균[2], 문재홍[1,3], 조정민[4], 배세진[4], 남승일[5], 이재학[4]

[1]부경대학교 극지해양과학과, [2]부경대학교 해양연구원 연구센터, [3]극지연구소 빙하지각연구부

09:15-09:30 룸1I02 Impact of meltwater discharge on current flow patterns and seawater exchange processes in Kongsfjorden of Arctic Svalbard

송은지, 김종욱[2], 우승범[1*], 이혜민[3], 김기환[4], 김정현[3], 남승일[5], 이재학[4], 배세진[4]

[1]인하대학교 해양과학과, [2]경기·인천씨그랜트센터, [3](주)유에스티21, [4]인하대학교 인공지능융합연구센터,

[5]극지연구소 빙하지각연구부

09:30-09:45 룸1I03 Linkage between the recent robust Sea Ice variability and Dense Shelf Water salinity rebound in Ross Sea

조은별, 김태균[2], 문재홍[1,3], 조정민[4], 배세진[4], 남승일[5], 이재학[4]

[1]부경대학교 극지해양과학과, [2]부경대학교 해양연구원 연구센터, [3]극지연구소 빙하지각연구부, [4]인하대학교 인공지능융합연구센터, [5]극지연구소 빙하지각연구부

09:45-10:00 룸1I04 Uneven Indian Ocean Warming in the future climate

Sabid Chamma[1], Kyoung-Ja Ha[1,2], Byoung-Kwon Yeo[1], Keith Rodgers[1,3], Axel Timmermann[1,2], Eun-Seok Chang[1]

[1]IBS Center for Climate Physics, Busan, Republic of Korea,

[2]Pusan National University, Busan, Republic of Korea,

[3]Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokosuka, Japan,

[4]Division of Atmospheric Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Republic of Korea

10:00-10:15 룸1I05 2024년 여름 기록적인 남극 해빙 감소의 시공간적 분포 특징

고시현, 조덕경[1,2], [1]부경대학교 극지해양과학과 극지해빙연구실,

[2]부경대학교 극지해양과학과, [3]부경대학교 해양연구원 연구센터

실험은 1년동안 모의되었으며, 융빙수 유출 적용(With Meltwater Discharge, WMD)과 융빙수 유출 미적용(No Meltwater Discharge, NMD)의 두 가지 시나리오가 수행되었다. WMD 에서, 융빙수 유출량이 적은 시기(3.8 m^3/s)에는 피오르드 입구와 안쪽의 내부 해역의 표층에서 반시계 방향으로 회전하는 수평적인 해류 패턴이 발생되었다. 반면, 융빙수 유출량이 높은 시기(19.9 m^3/s)에는 회전성 흐름이 소멸되고, 북서쪽을 향하는 해류 흐름이 우세하였다. NMD의 수평적인 흐름에서, 피오르드 입구에서 거의 대부분 시간 동안 회전성 흐름이 유지되었다. NMD 의 잔여 잔차류(residual current) 분포에서, 콩스피오르드 입구 해역의 수직 흐름 구조가 표층 중앙에서 유입되고, 저층에서 북쪽 해안선을 따라 유출되는 경향으로 나타났다. 반면에, WMD 의 피오르드 입구 근처 잔차류 패턴은 융빙수 유출로 인해 표층에서 유출되고, 저층에서 유입되는 수직 흐름 구조로 반전되었다. 저층에서 피오르드 내부로 유입되는 염해수 수송량이 NMD보다 WMD 에서 더 증가하였다. 이는 융빙수가 유출되면서 피오르드 내부와 외부 사이 물질 교환을 증가시키는 역할을 할 수 있음을 시사한다.

번호	관련증빙 명
72	[학술발표] 시간 적분 기법에 따른 sigma 좌표계 내의 수평 압력 경사 오차 분석

한국해안·해양공학회 학술발표논문집(2024)
2024년 11월 7일(목)-8일(금)

시간 적분 기법에 따른 sigma 좌표계 내의 수평 압력 경사 오차 분석
Analysis of sigma coordinate pressure gradient error based on time integration method

박민우[1], 임채욱[2], 서지명[3], 정윤성[4], 우승범[5,*]
Minwoo Park[1], Chaewook Lim[2], Ji Myeong Seo[3], Yoon Sung Jung[4] and Seung-Buhm Woo[5]

Sigma 좌표계를 사용하는 모델에서 급격한 수심 경사가 포함된 영역을 모의할 때 발생하는 pressure gradient error 를 감소시키는 방법에 대해 분석하였다. Sigma 좌표계로 구성된 격자들은 급격한 수심 경사로 인해 모양이 불안정해지고, 해당 불안정성으로 인해 error 가 발생하게 된다. 본 연구에서는 sigma 좌표계를 사용하는 대표적인 모델 중 하나인 Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM)을 사용하였다. 해당 모델에서 사용하는 시간 적분 기법 중 mode splitting 과 semi-implicit 를 적용하여 각 case 별로 발생하는 error 의 크기에 대해 비교 및 분석을 진행하였다. Mode splitting 방법은 external(수심 평균) 모드와 internal(3 차원) 모드로 구성되어 barotropic 한 성분과 baroclinic 한 성분을 나누어서 수치 적분한다. 각 모드별로 time step 이 다르기 때문에 발생하는 오차는 매 internal time step 마다 조정한다. Semi-implicit 방법은 일부 항을 암시적으로, 일부 항을 명시적으로 수치 적분한다. 본 연구는 급격한 수심경사를 재현할 수 있는 ideal 격자에서 진행되었다. 해당 격자는 비구조형 형식으로 구성되었으며 수직 격자는 uniform sigma 좌표계를 사용하였다. 모델 모의에는 모든 영역에 걸쳐 일정한 vertical temperature gradient 를 입력하였으며 그 외의 외부/내부 강제력을 입력하지 않았다. 모델 모의 결과, 모의 시작부터 급격한 수심에 위치한 격자에서 작은 값의 error 가 발생하였으며 모의가 진행됨에 따라 error 가 축적되었다. Mode splitting 방법은 semi-implicit 방법보다 급격한 수심이 있는 격자에서 상대적으로 더 많은 error 가 나타났다. Mode splitting 에서 상대적으로 큰 error 가 발생하는 원인은 external 모드와 internal 모드의 다른 time step 으로 인해 발생하는 계산 값 차이를 조정하기 때문으로 판단되었다. Mode splitting 에서 두 모드의 time step 을 같게 설정하고 모의하였을 경우, time step 을 다르게 설정한 경우보다 상대적으로 error 가 줄어든 모습을 확인할 수 있었다. Sigma 좌표계를 사용하는 모델에서 급격한 수심 경사를 가진 영역을 모의할 때는 mode splitting 방법보다 semi-implicit 방법을 사용하는 것이 정확성과 안정성을 향상시킬 수 있다는 것을 제시한다.

이 논문은 2024 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (NO.RS-2022-00155915, 인공지능융합혁신인재양성사업 (인하대학교))

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 해양·극지기초원천기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 한국연구재단 NRF-2021M1A5A1075516) (KOPRI-PN24013)

[1] 발표자: 인하대학교 해양과학과 / 석사과정 / mwpark@mpl.inha.ac.kr
[2] 인하대학교 인공지능융합연구센터 / 선임연구원 / lichwo@mpl.inha.ac.kr
[3] 인하대학교 해양과학과 / 박사과정 / tjwlaud4@mpl.inha.ac.kr
[4] 인하대학교 해양과학과 / 석사과정 / ysjung@mpl.inha.ac.kr
[5] 인하대학교 해양과학과 / 교수 / sbwoo@mpl.inha.ac.kr

첨부2 연구개발결과 활용계획서

연구개발결과 활용계획서			
사업명	① 부처사업명(대) 원천기술개발사업 ② 사업명(중) 해양극지기초원천기술개발사업 ③ 세부사업명(소) 해양극지기초원천기술개발사업		
과제명	북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해		
주관연구기관명	극지연구소	주관연구책임자 성명	남승일
총 연구기간	'21.04.27.~ '25.03.31.	자체평가 해당 연구기간	'21.04.27. ~ '25.03.31.

1. 연구성과 및 활용 현황

※ 연구성과는 최종보고서 작성 시 각 전문기관 연구관리시스템(ex. 한국연구재단 연구사업통합지원시스템, http://ernd.nrf.re.kr)에 입력했던 내용 중에서 해당 항목을 내려 받아 그대로 붙이거나 글자 크기 등을 편집하여 첨부함
※ accepted/in press인 논문은 필요하다고 판단되면 추가로 작성가능

2. 연구개발결과 활용 계획 (해당항목에 "○" 표시)

기술이전	기업화	후속연구 추진	타 사업 활용	그 밖의 목적 활용	연구결과 활용 중단
		○	○	○	

가. 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

- 본 연구과제에서 추진/수행한 한국-노르웨이 국제공동탐사 퇴적물 시료는 극지연구소, 포항공대, 충남대, 서울대, 노르웨이 트롬소 대학(UiT), 노르웨이 지질조사소(NGU), 노르웨이 베르겐대학 NORCE 연구소, 프랑스 보르도 대학 연구팀에 공유되어 다학제간 공동연구에 활용되고 있음
- 또한, 같은 기간 동안 획득한 중력 코어 퇴적물 시료는 현재 UiT에 보관되어 있어, 추후 UiT 방문을 통해 후속 연구를 위한 기초자료 분석 및 부시료 획득을 진행할 예정임. 획득한 부시료는 우선적으로 극지연구소 및 2개 위탁기관(포항공대, 충남대)에 공유되어 지속적으로 다중프록시 분석에 활용될 예정임
- 본 연구가 수행되는 동안 극지연구소 내 새로 구축된 리그닌 페놀 및 알케논 분석 인프라는, 상기 획득한 퇴적물 등을 대상으로 지속적인 분석을 통해 과거 수온 및 해빙 등 고환경 복원에 활용될 계획임

나. 활용방법

- 각 정점에서 확보한 멀티코어 퇴적물 시료는 0.5-1 cm 간격으로 채취되어, 극지연구소 및 위탁과제(포항공대, 충남대) 연구팀에 의해 입도, 유무기 동위원소, 유기분자생체지표, aDNA, 수은 동위원소, 지속성 유기독성물질 등 분석에 활용되며 상대적으로 최근 스발바르 환경 모니터링 및 복원 연구에 활용
- 멀티코어 상층부 시료 중 일부는 극지연구소 김한우 박사 연구팀(세부과제-4 책임)에 제공되어, 미생물 유전체 분리 활용 환북극권 미생물 유전체 라이브러리 제작 연구에 활용 중
- 멀티코어 표층 퇴적물 일부는 서울대학교 약학대학 오동찬 교수 연구팀에 제공되어 신약 개발 연구에 활용
- 멀티코어 일부는 영상 4도와 영하 20도에서 보관된 상태로 노르웨이 베르겐대학 NORCE 연구소의 슈타

KOPRI 극지연구소

인 교수팀에 제공되어 aDNA 분석에 활용
- 멀티코어 상부 20 cm 퇴적물은 0.5-1 cm 간격으로 채취된 후, rose bengal 전처리하여 프랑스 보르도 대학교 연구팀(EPOC)에 제공되어 pigment 및 저서성 유공충 연구에 활용
- 확보한 중력코어는 노르웨이 트롬소 북극 대학교 인프라를 바탕으로 X-radiograph, MSCL, XRF-linescanning 등의 기초자료 분석을 수행중
- 각 중력코어는 부시료 채취 이후, 극지연구소 및 위탁과제(포항공대, 충남대) 연구팀에 의해 입도, 유무기 동위원소, 유기분자생체지표, aDNA, 수은 동위원소, 지속성 유기독성물질 등 분석에 활용되며, 고해상도 과거 스발바르 환경 복원 연구에 활용

3. 기대효과

- 과학기술적 기대효과
  - ✓ 북극권 연구에 교두보 역할을 하는 노르웨이와 국제공동연구탐사를 통한 수월성 높은 북극연구 추진에 필요한 과학네트워크 구축 및 강화
  - ✓ 북극 및 스발바르 지역 국제공동해저시추사업 참여를 통해 북극에서 수행되는 거대지구과학연구 프로그램에 참여함으로써 지구과학분야 발전 및 국가 위상 제고
  - ✓ 아북극권 피오르드 환경 초고해상의 기후변화 기록 복원자료 제시를 통한 미래예측에 필요한 모델 자료 제공
  - ✓ 스발바르종합관측망구축(SIOS)사업 참여 및 SIOS-KC(지식센터) 자료 제공을 통한 스발바르 과학연구 활성화 및 과학적 성과제고
  - ✓ 극지 환경 다매체 시료 내 유기독성물질 분석 기술 향상
  - ✓ 극지 피오르드 특성에 적합한 해수 유동모델 구축을 통한 극지해역 물질 순환 및 환경 수질 생태 변화 예측 및 합리적 대안 제시 가능

- 경제 · 산업적 기대효과
  - ✓ 향후 북동항로 이용에 필요한 급유 및 생필품 등 보급에 필요한 허브 항구 활용을 위한 자료
  - ✓ 북극권 국가와의 거대과학 연구를 통한 국제협력 네트워크 구축과 이를 활용한 자원 확보 경쟁에 대비
  - ✓ 극지 해역 오염 및 위해성 저감관리에 기초자료 제공
  - ✓ 수치모델 기반 정량적인 예측 자료 제시를 통한, 경제적인 극지환경 개발 및 보존 방안 수립용이
- 사회적 기대효과
  - ✓ 기후변화에 민감한 북극 스발바르 지역에서 글로벌 이슈인 지구온난화의 영향이 전 지구적 규모의 파급효과 예측을 위한 기초자료 제공 등 국제사회 역할 이행
  - ✓ 2013년 5월 인정받은 옵저버 국가로서 북극권 이슈인 환경변화 공동대응으로 북극이사회 옵저버 국가 지위 유지에 기여
  - ✓ UN 국제수은협약에 대응 가능한 극지 수은 분석 자료 확보

  ▪ 성과확산 시나리오
  - ✓ 스발바르 지역 홀로세 및 인류세 고기후환경 복원 연구 자료 구축
    - ◆ 논문 및 학술발표를 통한 지식 성과확산
    - ◆ 극지역 기후환경변화 복원 적용 가능한 다중프록시 개발 및 분석 전문가 배출
    - ◆ 지구온난화에 의한 조수빙하 후퇴와 융빙수 및 퇴적물 유입에 의한 미래 스발바르 피오르드 지형변화 양상 예측자료 활용
  - ✓ 극지환경 수치모델링 개발 기술
    - ◆ 표준화된 수치모델링 예측 기술을 통해 분산되어 있던 극지환경 유동 정보의 접근성이 용이해짐에 따라, 극지연구에 대한 원동력 제공

4. 문제점 및 건의사항

※ 연구성과의 제고를 위한 제도.규정 및 연구관리 등의 개선점

사업명	해양극지기초원천기술개발사업	연구책임자	남승일	주관기관	한국해양과학기술원 부설 극지연구소
과제번호	2021M1A5A1075512	과제명	북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해		

※산학강좌,기술이전 및 기술평가는 현재 입력 받지 않는 항목입니다.

과학기술/학술적 연구성과(단위 : 건)

전문학술지 논문게재				초청강연실적	학술대회 논문발표		지식재산권				수상실적	출판실적		표준		신기술지정	기술제품인증
국내논문		국외논문					출원		등록								
SCI	비SCI	SCI	비SCI		국내	국제	국내	국외	국내	국외		저역서	보고서	국내	국제		
0	1	27	0	1	27	23	0	0	0	0	5	0	1	0	0	0	0

인력양성 및 연구시설(단위 : 명,건)

학위배출		국내외 연수지원				산학강좌	연구기자재
박사	석사	장기		단기			
		국내	국외	국내	국외		
5	1	0	0	0	0	0	1

국제협력(단위 :명,건)

과학자교류		국제협력기반			학술회의개최
국내과학자 해외파견	외국과학자 국내유치	MOU체결	국제공동연구	국제사업참여	학술회의개최(국내,국제 통합)
43	5	1	0	0	0

산업지원 및 연구성과 활용(단위 : 건)

기술확산			연구성과활용(사업화 및 후속연구과제 등)						
기술실시계약(기술이전 등)	기술지도	기술무역	후속연구추진	사업화추진중	사업화완료	기타목적활용	기술마케팅	시험제품	사업화계획
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

기타 성과(단위 : 건)

언론보도 성과	생명자원/신품종/화합물	원자력연구개발사업실적(원자력연구개발사업에한함)				법령반영	정책활용내용	설계기준
		기술보고서	설계문서	장비구축 및 개발	분석방법개발			
7	0	0	0	0	0	0	0	0

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1075512	202105	Climate-Associated Changes in Mercury Sources in the Arctic Fjord Sediments	Lee, Ju Hyeon; Kwon, Sae Yun; Lee, Hoin; Nam, Seung-Il; Kim, Jung-Hyun; Joo, Young Ji; Jang, Kwangchul; Kim, Haryun; Yin, Runsheng;	SCI	ACS EARTH AND SPACE CHEMISTRY	(0)	국외	SCI등재	3.475	예	40
2021M1A5A1075512	202105	Occurrence of pressure-forced meteotsunami events in the eastern Yellow Sea during 2010-2019	Kim, Myung-Seok; Woo, Seung-Buhm; Eom, Hyunmin; You, Sung Hyup;	SCI	NATURAL HAZARDS AND EARTH SYSTEM SCIENCES	21(0)	국외	SCI등재	4.580	아니오	100
2021M1A5A1075512	202106	Geochemical and Microbial Signatures of Siboglinid Tubeworm Habitats at an Active Mud Volcano in the Canadian Beaufort Sea	Lee, Dong-Hun; Kim, Jung-Hyun; Lee, Yung Mi; Kim, Ji-Hoon; Jin, Young Keun; Paull, Charles; Ryu, Jong-Sik; Shin, Kyung-Hoon;	SCI	FRONTIERS IN MARINE SCIENCE	8(0)	국외	SCI등재	4.912	예	30

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1075512	202112	Spatiotemporal Characterization of Mercury Isotope Baselines and Anthropogenic Influences in Lake Sediment Cores	Lee, Ju Hyeon; Kwon, Sae Yun; Yin, Runsheng; Motta, Laura C.; Kurz, Aaron Y.; Nam, Seung-Il;	SCI	GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES	()	국외	SCI등재	5.703	예	33
2021M1A5A1075512	202202	Ocean Productivity in the Gulf of Cadiz Over the Last 50 kyr	Penaud, A.; Eynaud, F.; Etourneau, J.; Bonnin, J.; de Vernal, A.; Zaragosi, S.; Kim, J-H; Kang, S.; Gal, J-K; Oliveira, D.; Waelbroeck, C.;	SCI	PALEOCEANOGRAPHY AND PALEOCLIMATOLOGY	(0)	국외	SCI등재	3.992	예	30
2021M1A5A1075512	202202	An observational study of hydrodynamic impact on water mass transport due to tidal power generation	Kim, J. W.; Woo, S-B; Song, J., I; Kwon, H-K;	SCI	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	807(0)	국외	SCI등재	10.753	아니오	50

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1075512	202209	Changes in the burial efficiency and composition of terrestrial organic carbon along the Mackenzie Trough in the Beaufort Sea	Kim, Dahae; Kim, Jung-Hyun; Tesi, Tommaso; Kang, Sujin; Nogarotto, Alessio; Park, Kwangkyu; Lee, Dong-Hun; Jin, Young Keun; Shin, Kyung-Hoon; Nam, Seung-Il;	SCI	ESTUARINE COASTAL AND SHELF SCIENCE	(0)	국외	SCI등재	3.229	예	50
2021M1A5A1075512	202209	The composition and abundance of phytoplankton after spring bloom in the Arctic Svalbard fjords	Bae, Seongjun; Kim, Haryun; Nam, Seung-Il; Choi, Keun-Hyung; Kim, Tae-Wook; Yun, Sung Tae; Kim, Hye Seon; Kim, Tae-Hoon; Han, Dukki; Ko, Young Ho; Kim, Ju-Hyoung; Lim, Young Kyun; Park, Joo Myun;	SCI	ESTUARINE COASTAL AND SHELF SCIENCE	(0)	국외	SCI등재	3.229	아니오	40

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1075512	202209	Towards observation- and atmospheric model-based early warning systems for meteotsunami mitigation: A case study of Korea	Kim, Myung-Seok; Woo, Seung-Buhm; Eom, Hyunmin; You, Sung Hyup; Lee, Hye Min;	SCI	WEATHER AND CLIMATE EXTREMES	(0)	국외	SCI등재	7.761	아니오	50
2021M1A5A1075512	202210	Metalloenzyme signatures in authigenic carbonates from the Chukchi Borderlands in the western Arctic Ocean	Lee, Dong-Hun; Kim, Jung-Hyun; Lee, Yung Mi; Bayon, Germain; Kim, Dahae; Joe, Young Jin; Wang, Xudong; Shin, Kyung-Hoon; Jin, Young Keun;	직접입력	SCIENTIFIC REPORTS	12(1)	국외	SCI등재	4.997	예	30
2021M1A5A1075512	202211	Glacial history and depositional environments in little Storfjorden and Hambergbukta of Arctic Svalbard since the younger dryas	Joe, Young Jin; Jang, Kwangchul; Forwick, Matthias; Laberg, Jan Sverre; Kong, Gee Soo; Kang, Moo-Hee; Yoon, Seok-Hoon; Nam, Seung-Il;	SCI	FRONTIERS IN EARTH SCIENCE	()	국외	SCI등재	3.661	예	100

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1075512	202211	Deglacial release of petrogenic and permafrost carbon from the Canadian Arctic impacting the carbon cycle	Wu, Junjie; Mollenhauer, Gesine; Stein, Ruediger; Kohler, Peter; Hefter, Jens; Fahl, Kirsten; Grotheer, Hendrik; Wei, Bingbing; Nam, Seung-Il;	직접입력	NATURE COMMUNICATIONS	()	국외	SCI등재	17.694	예	35
2021M1A5A1075512	202301	Millennial-scale oscillations and an environmental regime shift around the Middle to Late Holocene transition in the North Atlantic region based on a multiproxy record from Isfjorden, West Spitsbergen	Brice, Camille; de Vernal, Anne; Francus, Pierre; Forwick, Matthias; Nam, Seung-Il;	SCI	BOREAS	52(1)	국외	SCI등재	2.2	예	30
2021M1A5A1075512	202301	Mechanisms of Advective and Tidal Oscillatory Salt Transport in the Hypertidal Estuary: Yeomha Channel in Gyeonggi Bay	Lee, Hye Min; Kim, Jong Wook; Woo, Seung-Buhm;	직접입력	JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND ENGINEERING	11(2)	국외	SCI등재	2.9	아니오	50
2021M1A5A1075512	202302	Arctic deep-water anoxia and its potential role for ocean carbon sink during glacial periods	Jang, Kwangchul; Woo, Kyung Sik; Kim, Jin-Kyoung; Nam, Seung-Il;	SCI	COMMUNICATIONS EARTH & ENVIRONMENT	4(1)	국외	SCI등재	7.9	아니오	95

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1075512	202303	Non-linear response of glacier melting to Holocene warming in Svalbard recorded by sedimentary iron (oxyhydr)oxides	Jang, Kwangchul; Bayon, Germain; Vogt, Christoph; Forwick, Matthias; Ahn, Youngkyu; Kim, Jung-Hyun; Nam, Seung-Il;	SCI	EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS	607(0)	국외	SCI등재	5.3	예	85
2021M1A5A1075512	202304	Distributions and potential sources of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in the glacimarine sediments of Arctic Svalbard	Lee, Juhee; Kim, Youngnam; Cha, Jihyun; Kim, Dahae; Jang, Kwangchul; Kim, Jung-Hyun; Nam, Seung-Il; Hong, Seongjin;	SCI	MARINE POLLUTION BULLETIN	189(0)	국외	SCI등재	5.8	아니오	50
2021M1A5A1075512	202305	Effect of Freshwater Discharge From Estuary Dam on Residual Circulation in Bifurcated Channel	Kim, J. W.; Song, J. I.; Yoon, B. I.; Woo, S.-B.;	SCI	JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-OCEANS	128(5)	국외	SCI등재	3.6	아니오	50

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1075512	202306	Commentary: Reply to commentary by Noormets and Kirchner on Glacial history and depositional environments in little Storfjorden and Hambergbukta of Arctic Svalbard since the younger dryas [Frontiers in Earth Science, (2022), 2211]	Joe, Young Jin; Jang, Kwangchul; Forwick, Matthias; Laberg, Jan Sverre; Nam, Seung-Il;	SCI	FRONTIERS IN EARTH SCIENCE	11()	국외	SCI등재	2.9	예	100
2021M1A5A1075512	202310	Large contributions of petrogenic and aged soil-derived organic carbon to Arctic fjord sediments in Svalbard	Kim, Dahae; Kim, Jung-Hyun; Ahn, Youngkyu; Jang, Kwangchul; Jung, Ji Young; Bae, Minji; Nam, Seung-Il;	SCI	SCIENTIFIC REPORTS	13(1)	국외	SCI등재	4.6	아니오	100
2021M1A5A1075512	202312	A numerical approach to the treatment of submerged water exchange processes through the sluice gates of a tidal power plant	Kim, J. W.; Woo, S.-B.;	직접입력	RENEWABLE ENERGY	219()	국외	SCI등재	8.7	아니오	50

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1075512	202404	Interaction between phytoplankton and heterotrophic bacteria in Arctic fjords during the glacial melting season as revealed by eDNA metabarcoding	Han, Dukki; Park, Ki-Tae; Kim, Haryun; Kim, Tae-Hoon; Jeong, Man-Ki; Nam, Seung-Il	SCI	FEMS MICROBIOLOGY ECOLOGY	100(5)	국외	SCI등재	3.5	아니오	30
2021M1A5A1075512	202406	Post-glaciation depositional changes in Wijdefjorden northern Svalbard using grain-size end-member modelling	Youngkyu Ahn; Young Jin Joe; Kwangchul Jang; Jung-Hyun Kim; Yeong Ju Son; Matthias Forwick; Sungmin Hong; Seung-Il Nam	SCI	MARINE GEOLOGY	472(0)	국외	SCI등재	2.6	예	100
2021M1A5A1075512	202408	A distinctive rare earth element signature for pyrite oxidation and glacial weathering	Jang, Kwangchul; Bayon, Germain; Pourret, Olivier; Joe, Young Jin; Kim, Jung-Hyun; Byun, Eunji; Forwick, Matthias; Leon, Rafael; Nam, Seung-Il;	SCI	CHEMICAL GEOLOGY	660(0)	국외	SCI등재	3.6	예	85

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1075512	202408	Near surface oxidation of elemental mercury leads to mercury exposure in the Arctic Ocean biota	Lim, Seung Hyeon; Kim, Younggwang; Motta, Laura C.; Yang, Eun Jin; Rhee, Tae Siek; Hong, Jong Kuk; Han, Seunghee; Kwon, Sae Yun;	SCI	NATURE COMMUNICATIONS	15(1)	국외	SCI등재	14.7	예	40
2021M1A5A1075512	202409	Chronological distribution and potential sources of persistent toxic substances in soils from the glacier foreland of Midtre Lovnbreen Svalbard	Jihyun Cha; Jung-Hyun Kim; Ji Young Jung; Seung-Il Nam; Seongjin Hong	SCI	ENVIRONMENTAL POLLUTION	357(0)	국외	SCI등재	7.6	아니오	100
2021M1A5A1075512	202411	Characterization of AhR-mediated potency in sediments from Kongsfjorden Svalbard: Application of effect-directed analysis and nontarget screening	Jiyun Gwak; Jihyun Cha; Seung-Il Nam; Jung-Hyun Kim; Junghyun Lee; Hyo-Bang Moon; Jong Seong Khim; Seongjin Hong	SCI	Chemosphere	368(0)	국외	SCI등재	8.1	아니오	33
2021M1A5A1075512	202306	퇴적물의 네오디뮴 동위원소 비를 활용한 북극 고환경 복원	장광철;남승일	KCI	Ocean and Polar Research	45(2)	국내	SCI미등재		아니오	50

KOPRI 극지연구소

국제학술대회 초청강연실적 성과정보						
과제번호	발표연월	학술대회명	발표자	강연주제	개최국	온라인개최
2021M1A5A1075512	202207	Goldschmidt Conference 2022	이주현	Atmospheric Mercury Depletion Event and Mercury Photoreduction in Snowpack of Mid latitude Coastal island	미국	

KOPRI
극지연구소

학술대회 논문발표 성과정보

과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5A1075512	202105	2021년 한국해양과학기술협의회 공동학술대회	이혜민, 송진일, 김종옥, 우승범, 김태민	경기만 염하수로에서의 한강 유량과 담수 영향 범위의 상관관계	국내학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1075512	202105	춘계해양학회	김다해, 김정현, 남승일	Source of sedimentary organic carbon in Wijdefjorden in the Svalbard Archipelago	국내학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1075512	202106	한국제4기학회 춘계학술대회	조영진, 장광철, Matthias Forwick, Jan Sverre Laberg, 공기수, 강무희, 윤석훈, 남승일	Depositional environment of Little Storfjorden in southern Spitsbergen since the Younger Dryas	국내학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1075512	202110	2021년 한국해안·해양공학회 추계학술대회	최재윤, 김종욱, 이혜민, 윤병일, 우승범	항 내 조간대가 퇴적물 공급 및 수송에 미치는 영향	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202110	추계지질과학연합 학술대회	안영규, 조영진, 장광철, 김정현, 손영주, Matthias Forwick, 홍성민, 남승일	마지막 해빙기 이후 북극 스발바르 비데피오르드 퇴적 환경 변화	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202111	2021년 한국해양학회 추계학술대회	이혜민, 김종욱, 최재윤, 윤병일, 우승범	경기만 하구에서의 한강 유량에 따른 물질 순환 메커니즘	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202111	추계해양학회	장광철, 남승일, 김정현, 손영주	네오디뮴 동위원소를 활용한 과거 16,300년간의 북부 스발바르 빙퇴적환경 복원	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202204	2022년도 한국기상학회 봄학술대회	이주현,김영광, 임승현,조문경, 윤지원,권세윤	Atmospheric Mercury Depletion Event and Mercury Photoreduction in Snowpack of Mid latitude Coastal island	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202206	KAOST 춘계 공동학술대회	이주희,차지현, 안성아,김영남, 곽지윤,장광철, 김정현,남승일, 홍성진	북극 스발바르 주변 해역 퇴적물 내 지속성 유기독성물질의 분포 특성	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202206	한국해양학회 춘계학술대회	조영진,장광철,Matthias Forwick,Jan Sverre Laberg, 공기수,강무희, 윤석훈,남승일	Past glacier's behavior in Hambergbukta and Little Storfjorden in Arctic Svalbard based on seismic and lithostratigraphy	국내학술대회	대한민국	

학술대회 논문발표 성과정보							
과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5A1075512	202206	한국해양학회 춘계학술대회	장광철,남승일,김정현,김다해,배민지,손영주,안영규,조영진	Vulnerability and resilience of the Arctic Svalbard to climate variability	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202206	한국해양학회 춘계학술대회	김다해,김정현,장광철,손영주,안영규,배민지,남승일	Source of surface sedimentary organic matter in the Svalbard Archipelago using lignin-derived biomarker	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202206	한국해양학회 춘계학술대회	김종욱, 우승범, 송진일	영산강 하구에서 수로 분기와 관련된 흐름 구조에 관한 관측 연구	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202210	대한지질학회 추계학술대회	남승일,장광철,우경식,조영진,손영주	북극해 대륙빙하와 빙붕 존재 및 그 시기에 관한 논쟁	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202211	한국해양학회 추계학술대회	이혜민,김종욱,임채욱,김정현,우승범	Numerical study of glacier runoff effect on the current patterns in Kongsfjorden, Svalbard	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202211	한국해양학회 추계학술대회	배민지, 김정현, 김다해, 김기호, 강수영, 손영주, 안영규, 장광철, 남승일, 홍성민	Application of comprehensive two dimensional Gas chromatography-time-of-flights mass spectrometry for long chain alkenones analysis	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202211	한국해양학회 추계학술대회	장광철,안영규,김다해,손영주,배민지,조영진,김정현,남승일	퇴적물 내 광물조성 분석을 통한 과거 북극 스발바르 환경 이해	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202306	2023년 한국제4기학회 춘계학술대회	배민지, 김정현, 김다해, 임운혁, 하성용, Jocen Knies, 홍성민, 남승일	Long-chain alkenone-based paleothermometry for reconstructing sea surface temperature in Svalbard fjord	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202306	2023년 한국제4기학회 춘계학술대회	안영규, 조영진, 장광철, 김정현, 손영주, 홍성민, 남승일	입도 분포 엔드멤버 모델링을 활용한 마지막 해방기 이후 북극 스발바르 북부 비데피오르드 퇴적 환경 변화 연구	국내학술대회	대한민국	

KOPRI 극지연구소

학술대회 논문발표 성과정보

과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5A1075512	202311	2023년도 한국해양학회 추계학술대회	차지현,김정현, 정지영, 남승일, 홍성진	북극 스발바르 중앙로벤빙하후퇴지역의 토양 시료 내 유기독성물질의 분포 특성	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202312	2023년 한국제4기학회 추계학술대회	조은아, 강승현, 배민지, 안영규, 손영주, 장광철, 김정현, 남승일	Research on past organism community structure and sea ice change reconstruction using ancient DNA derived from sediments of Svalbard Fjords	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202404	2024 춘계한국환경분석학회	곽지윤	생물영향동정평가 기법을 이용한 북극 스발바르 퇴적물 내 아릴 탄화수소 수용체 활성 화합물 확인	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202405	2024 춘계해양학회	송윤지	Impact of meltwater discharge on current flow patterns and seawater exchange processes in Kongsfjorden of Arctic Svalbard	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202411	2024 추계해양학회	손은진	지질 시대에 따른 해양 퇴적물 내 수은 침적 변화 : 에오세, 플라이스토세, 홀로세의 기록	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202411	2024 추계 한국해안·해양공학회	박민우	시간 적분 기법에 따른 sigma 좌표계 내의 수평 압력 경사 오차 분석	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202412	한국제4기학회	김다해	Characterization of sedimentary organic carbon in Kongsfjorden over recent centuries: Application of CuO oxidation products	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202412	한국제4기학회	남승일	하인리히 사건(Heinrich Events): 지질학적 현상에 대한 우연한 발견과 기후학적 의미	국내학술대회	대한민국	

KOPRI 극지연구소

학술대회 논문발표 성과정보							
과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5A1075512	202110	CRYOCARB First Virtual Workshop - October 2021	남승일	KOPRI research activities on Svalbard: Understanding current- and paleo-environmental changes in Arctic fjord system in response to climate changes	국제학술대회	노르웨이	Y
2021M1A5A1075512	202111	Svalbard Science Conference 2021	남승일	CRYOCARB-Impact of cryospheric melt-down on submarine slope stability and carbon release in a warmer Arctic	국제학술대회	노르웨이	Y
2021M1A5A1075512	202112	2021 YES	차지현,안성아,김영남,곽지윤,김정현,남승일,홍성진	Distribution and source identification of anthropogenic persistent toxic substances in sediments of Arctic Svalbard	국제학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202203	Ocean Sciences Meeting 2022	이혜민,김종욱,송진일,최재윤,구본호,윤병일,우승범	Mechanisms of salt transport by Han River discharge in the hyper-tidal estuary, Gyeonggi Bay	국제학술대회	미국	Y
2021M1A5A1075512	202209	ISPS 2022	이주희,김영남,차지현,김다해,장광철,김정현,남승일,홍성진	Distribution and source identification of anthropogenic persistent toxic substances in sediments of Arctic Svalbard	국제학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1075512	202209	ISPS 2022	조영진, 장광철, Matthias Forwick, Jan Sverre Laberg, 윤석훈, 남승일	Glacial history and attendant depositional environments in southeastern Svalbard since the Younger Dryas	국제학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1075512	202209	ISPS 2022	손은진,권세윤,이주현	Mercury Sources Reflecting the Holocene Climate Change:Records from the Arctic Fjord Sediments	국제학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1075512	202209	ISPS 2022	장광철,김정현,남승일	Vulnerability and resilience of Arctic Svalbard to climate variability	국제학술대회	대한민국	Y

KOPRI 극지연구소

학술대회 논문발표 성과정보							
과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5A1075512	202209	ISPS 2022	김다해, 김정현, 안영규, 장광철, 정지영, 남승일	Characteristics and distributions of sedimentary organic carbon in the Spitsbergen fjords: application of CuO oxidation products	국제학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1075512	202209	ISPS 2022	장광철,안영규, 조영진,김정현, 남승일	Multi proxies approach for reconstructing glacimarine environmental changes in northern Svalbard since the last deglacial period	국제학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1075512	202209	ISPS 2022	안영규, 조영진, 장광철, 김정현, Matthias Forwick, 홍성민, 남승일	Glacimarine depositional and environmental changes of Wijdefjorden, northern Svalbard since the last deglaciation using grain-size end member modelling	국제학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1075512	202209	ISPS 2022	배민지, 김정현, 김다해, 김기호, 강수영 Jochen Knies, 남승일	Analysis of long chain alkenones with comprehensive two dimensional Gas chromatography-Time-of-fight Mass Spectrometry: implication for reconstructing sea surface temperatures in Svalbard fjords	국제학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1075512	202304	EGU General Assembly 2023	김다해, 김정현, 안영규, 장광철, 정지영, 남승일	Large contributions of aged organic carbon to Arctic fjord sediments in Svalbard	국제학술대회	오스트리아	
2021M1A5A1075512	202307	2023년도 국제 골드슈미트 학회 (Goldschmidt Conference 2023)	이주현, 김영광, 임승현, 조문경, 김기태, 한영철, 권세윤	Atmospheric Mercury Depletion and Mercury Photoreduction in Snowpack at a Mid-latitude Coastal Island	국제학술대회	프랑스	
2021M1A5A1075512	202404	EGU General Assembly 2024	남승일	Depositional and paleoenvironmental changes in Arctic Svalbard fjords during the last deglaciation: Insights from Grain Size EndMember Modeling	국제학술대회	오스트리아	

학술대회 논문발표 성과정보							
과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5A1075512	202404	EGU General Assembly 2024	장광철	Tracing glacial weathering and pyrite oxidation using rare earth elements in sedimentary iron oxides	국제학술대회	오스트리아	
2021M1A5A1075512	202405	2024 5th International PalaeoArc Conference	남승일	Improved stratigraphic framework of sediment cores for reconstructing mid to late Quaternary western Arctic glacial history	국제학술대회	스웨덴	
2021M1A5A1075512	202408	37th International Geological	김다해	Variations in aged-soil derived organic carbon input into the Kongsfjord over recent centuries: application of CuO oxidation products	국제학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202408	37th International Geological Congress (IGC 2024)	장광철	Brackish and anoxic environments in the western Arctic Ocean during the last glacial period: insights from authigenic calcites	국제학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202408	37th International Geological Congress (IGC 2024)	안영규	Impact of current flow on the depositional environment in Kongsfjorden trough of Arctic Svalbard	국제학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202408	37th International Geological Congress (IGC 2024)	조영진	Glacier-induced provenance change in Bellsund, Svalbard, during the Holocene	국제학술대회	대한민국	
2021M1A5A1075512	202410	ArcSTRAT-Arctic Ocean Stratigraphic and Paleoclimate Conference	남승일	Quaternary cryospheric and oceanographic change in the Makarov Basin, Western Arctic	국제학술대회	노르웨이	
2021M1A5A1075512	202410	ArcSTRAT-Arctic Ocean Stratigraphic and Paleoclimate Conference	조영진	Mid-Quaternary lithostratigraphy of the Chukchi Basin in the western Arctic Ocean and its significance for the reconstruction of a better-defined glacial history	국제학술대회	노르웨이	

KOPRI 극지연구소

수상실적 성과정보

과제번호	수상연월	수상명	수상자		시상기관	시상국가	수상사유
			성명	소속기관			
2021M1A5A1075512	202105	미래해양과학기술인상 우수상	조영진	한국해양학회	한국해양학회	대한민국	우수 논문
2021M1A5A1075512	202111	젊은과학자 상	장광철	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	한국해양학회	대한민국	우수 논문
2021M1A5A1075512	202209	우수포스터 (ISPS2022 Early Career Poster Award)	안영규	인하대학교	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	대한민국	우수 포스터 상
2021M1A5A1075512	202304	전재규 젊은과학자상	김다해	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	대한민국	우수한 연구성과에 대해 극지연구소에서 수상한 실적
2021M1A5A1075512	202312	연수생 우수논문상	김다해	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	대한민국	우수한 연구성과에 대해 극지연구소에서 수상한 실적

보고서 성과정보

과제번호	제출일자	제목	주저자
2021M1A5A1075512	202310	북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해(단계보고서)	남승일

KOPRI 극지연구소

학위배출인력 성과정보

과제번호	학위취득연월	학위구분	학위취득자				진로
			성명	성별	대학	학과	
2021M1A5A1075512	202208	박사	조영진	남성	제주대학교	지구해양과학	박사후연구원
2021M1A5A1075512	202202	박사	김도형	남성	서울대학교	지구환경과학부	취업(박사후연구원 포함)
2021M1A5A1075512	202308	박사	조은아	여성	고려대학교	생명공학과	취업(박사후연구원 포함)
2021M1A5A1075512	202308	박사	이주현	여성	포항공과대학교	환경공학	취업(박사후연구원 포함)
2021M1A5A1075512	202308	석사	배민지	여성	인하대학교	해양과학과	취업(박사후연구원 포함)
2021M1A5A1075512	202408	박사	조주희	여성	서울대학교	지구환경과학부	박사후연구원

연구기자재 구입 성과정보

과제번호	구입연월	기자재명	규격	수량	제조국	구매금액	활용용도	설치장소
2021M1A5A1075512	202207	가스크로마토그래피 질량분석기(Gas chromatograp hy mass spectrometry)		1	미국	104,942,108	북극 스발바르 지역에서 획득한 해양 및 호소 퇴적물 시료 내 분포하는 lignin phenols 분석을 통한 북극 스발바르지역의 과거 환경 변화 복원에 활용	극지연구소 연구동 R0-117호(고환경유기지화학실험실)

극지연구소

국내외 과학자교류 성과정보

과제번호	파견유치 기간	인력교류구분	파견유치 연구자					파견국가 유치자국적	파견유치 목적
			성명	소속기관	직위	최종학위	전공		
2021M1A5A1075512	20220310~20220325	해외파견	남승일	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	고환경	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20220310~20220325	해외파견	손영주	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원	석사	수학교육	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20220310~20220325	해외파견	장광철	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수연수원	박사	지구환경과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20220711~20220722	해외파견	최경식	서울대학교	교수	박사	퇴적학	노르웨이	기타
2021M1A5A1075512	20220711~20220722	해외파견	조주희	서울대학교	박사과정	석사	지구환경과학	노르웨이	기타
2021M1A5A1075512	20220711~20220722	해외파견	김도형	서울대학교	연수연구원	박사	퇴적학	노르웨이	기타
2021M1A5A1075512	20220713~20220805	해외파견	남승일	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	고해양	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20220719~20220805	해외파견	배민지	인하대학교	석사과정 외부 참여 연구원	학사	해양과학과	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20220719~20220805	해외파견	안영규	인하대학교	박사과정 외부 참여 연구원	석사	해양과학과	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20220719~20220805	해외파견	조은아	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	박사과정 연수생	석사	생물정보	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20220719~20220805	해외파견	손영주	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원	석사	수학교육	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20220719~20220805	해외파견	장광철	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수연구원	박사	지구환경과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20220803~20220831	국내유치	Changsheng Chen	University of Massachusetts Dartmouth SMAST	교수	박사	물리해양학	미국	정보교환
2021M1A5A1075512	20221119~20221212	해외파견	손영주	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원	석사	수학교육	노르웨이	공동연구

국내외 과학자교류 성과정보

과제번호	파견유치 기간	인력교류구분	파견유치 연구자					파견국가 유치자국적	파견유치 목적
			성명	소속기관	직위	최종학위	전공		
2021M1A5A1075512	20221119~20221212	해외파견	김다해	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	박사과정	석사	해양학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20221119~20221212	해외파견	안영규	인하대학교	박사과정 외부 참여연구원	석사	해양과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20221124~20221212	해외파견	남승일	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	고해양	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20230418~20230515	해외파견	남승일	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	고해양학	독일	공동연구
2021M1A5A1075512	20230421~20230505	해외파견	이혜민	인하대학교	박사과정	석사	해양과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20230504~20230515	해외파견	장광철	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수연구원	박사	지구환경과학	독일	공동연구
2021M1A5A1075512	20230504~20230515	해외파견	손영주	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	수학교육	독일	공동연구
2021M1A5A1075512	20230627~20230717	해외파견	김기환	인하대학교	석사과정	학사	해양과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20230627~20230717	해외파견	김종욱	인하대학교	연수연구원	박사	해양학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20230704~20230716	해외파견	손영주	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	수학교육	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20230704~20230716	해외파견	김다해	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	박사과정	석사	해양학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20230704~20230716	해외파견	안영규	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	박사과정	석사	해양과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20230704~20230716	해외파견	곽지윤	충남대학교	박사과정	석사	해양학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20230704~20230716	해외파견	차지현	충남대학교	박사과정	석사	해양학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20230704~20230716	해외파견	홍성진	충남대학교	교수	박사	화학해양	노르웨이	공동연구

국내외 과학자교류 성과정보

과제번호	파견유치 기간	인력교류구분	파견유치 연구자					파견국가 유치자국적	파견유치 목적
			성명	소속기관	직위	최종학위	전공		
2021M1A5A1075512	20230704~20230721	해외파견	남승일	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	고해양학	노르웨이	기타
2021M1A5A1075512	20230710~20230721	해외파견	김도형	서울대학교	연수연구원	박사	퇴적학	노르웨이	기타
2021M1A5A1075512	20230710~20230721	해외파견	조주희	서울대학교	박사과정	석사	지구환경과학	노르웨이	기타
2021M1A5A1075512	20230710~20230721	해외파견	손승연	서울대학교	박사과정	석사	지구환경과학	노르웨이	기타
2021M1A5A1075512	20230710~20230721	해외파견	최경식	서울대학교	교수	박사	퇴적학	노르웨이	기타
2021M1A5A1075512	20231021~20231025	해외파견	남승일	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	고해양학	중국	정보교환
2021M1A5A1075512	20231106~20231126	해외파견	남승일	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	고해양학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20231111~20231126	해외파견	안영규	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	박사과정	석사	해양과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20231111~20231126	해외파견	조영진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수연구원	박사	지구해양과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20231111~20231126	해외파견	손영주	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	수학교육	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20240305~20240321	해외파견	손은진	포항공과대학교	석박통합과정	학사	동위원소지구화학	노르웨이	기타
2021M1A5A1075512	20240321~20240329	국내유치	Matthias Forwick	Arctic University of Norway	Prof. Dr	박사	해양지질	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20240322~20240326	국내유치	Xiaotong Xiao	Ocean University of China	Prof. Dr	박사	유기지화학	중국	공동연구
2021M1A5A1075512	20240508~20240513	해외파견	남승일	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	고해양학	중국	정보교환
2021M1A5A1075512	20240810~20240822	해외파견	남승일	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	고해양학	독일	공동연구

KOPRI 극지연구소

국내외 과학자교류 성과정보

과제번호	파견유치 기간	인력교류구분	파견유치 연구자					파련국가 유치자국적	파견유치 목적
			성명	소속기관	직위	최종학위	전공		
2021M1A5A1075512	20241008~20241012	국내유치	Xiaotong Xiao	Ocean University of China	Prof. Dr	박사	유기지화학	중국	공동연구
2021M1A5A1075512	20241016~20241020	국내유치	Gerrit Lohmann	Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research	Prof. Dr	박사	물리	독일	정보교환
2021M1A5A1075512	20241021~20241102	해외파견	남승일	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	고해양학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1075512	20241021~20241102	해외파견	조영진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수연구원	박사	지구해양과학	노르웨이	공동연구

MOU 체결 성과정보

과제번호	체결연월	체결명	대상국	대상기관
2021M1A5A1075512	202108	연구책임자 당사자간 스발바르협력연구	노르웨이	GEOLOGICAL SURVEY OF NORWAY

KOPRI 극지연구소

언론보도성과			
과제번호	2021M1A5A1075512		
보도게재일자	20220816	보도및게재처	KBS 9시 뉴스 연중기획
기사제목	기후는 말한다(1부).		
관련연구업적	북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해		

과제번호	2021M1A5A1075512		
보도게재일자	20220823	보도및게재처	KBS 10시 시사기획 창
기사제목	고장 난 심장, 북극의 경고		
관련연구업적	북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해		

과제번호	2021M1A5A1075512		
보도게재일자	20230218	보도및게재처	Korea Joong Ang Daily 영자신문
기사제목	Scientists look to the past for clues about the Arctic's future		
관련연구업적	2022년 한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사연구 홍보		

과제번호	2021M1A5A1075512		
보도게재일자	20230314	보도및게재처	연합뉴스
기사제목	극지연 "북극 빙하 용융, 비가역적으로 빠르게 진행될 것"		
관련연구업적	연구성과 홍보기사		

과제번호	2021M1A5A1075512		
보도게재일자	20230314	보도및게재처	동아사이언스
기사제목	"북극 빙하, 더 빠르게 녹을 것…용융 임계점 넘어"		
관련연구업적	연구성과 홍보 기사		

과제번호	2021M1A5A1075512		
보도게재일자	20230314	보도및게재처	SBS 뉴스
기사제목	극지연 "북극 빙하 용융, 비가역적으로 빠르게 진행될 것"		
관련연구업적	연구 업적 홍보 기사		

과제번호	2021M1A5A1075512		
보도게재일자	20230331	보도및게재처	극지와 세계 웹진
기사제목	과거에서 해답을 얻기 위한 북극해 해저 심부시추		
관련연구업적	언론 홍보기사		

KOPRI 극지연구소

첨부3 자체평가의견서

Ⅰ. 연구개발 실적

※ 다음 각 평가 항목에 따라 자체 평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

1. 연구개발성과의 우수성/창의성

■ 등급: (**아주 우수**, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 노르웨이 트롬소 북극대학교(UiT) 조사선 RV Helmer Hanssen을 임차하여 2022년과 2023년 한-노 국제공동 스발바르 피오르드 탐사를 통해 시추코어 및 탐사자료를 확보하여 지구온난화에 가장 민감한 스발바르에서 마지막 해빙기 이후 홀로세 및 인류세 기후환경변화 연구기반 구축
- 국제공동탐사를 통해 획득한 퇴적물 시료를 분석하여 구축한 퇴적상, 입도 end-member, Nd 동위원소, 철산화광물, 희토류, 유기분자생체지표 등 기후환경 프록시 분석 연구를 통해 빙하 후퇴 등 거동 파악이 가능하여 남북극 피오르드 연구에 필요한 중요한 정보 제공
- 한라산 대기 수은 침적 현상 및 스노우팩 수은 광환원 현상 연구결과를 통한 중위도 연안 산 스노우팩으로의 수은 침적 기작을 파악하여 스발바르 결과 비교를 통해 북극권 수은 거동의 물질 수지를 평가하여 과거와 현재를 포함 미래 지구온난화로 인해 수은 거동의 변화 예측에 활용
- 스발바르 다매체 시료 내 유기독성물질 분석 결과는 북극환경 내 유기독성물질 분석을 위한 데이터베이스를 구축하여, 극지 유기독성물질 연구 기반 구축 및 양적 · 질적 독성 평가 기준마련
- 콩스피오르드 연안 해역 총 37개 정점의 표층퇴적물을 활용하여 융빙수 유출 위치에 따른 FVCOM 모델을 개선하여 융빙수 유출량에 따른 입자의 정체기 및 조수빙하 기원 물질 수송량 변화 입
- '21년 코로나 미진정 및 '24년 정부정책에 따른 연구비 대폭 삭감 등 어려운 여건에서도 목표를 상회하여 달성하였기 때문에 연구개발성과의 우수성에 있어 **아주 우수**로 평가함

2. 연구개발성과의 파급 효과

■ 등급: (**아주 우수**, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 국제공동탐사를 통해 획득된 해저지층 및 지형탐사자료, 코어 퇴적물 기록을 활용한 다중 프록시 분석 및 입도 end-member 모델링 기반 빙하 거동 추적 및 퇴적환경 정밀 복원을 통해 과거 기후변화에 반응하여 스발바르뿐만 아니라 극지역 빙하 거동 파악을 위한 자료로 활용될 것임
- 본 연구에서 확립된 유기분자생체지표 분석법은 장 · 단주기 퇴적물 기록에 적용함으로써 스발바르를 포한 극지역 피오르드를 대상으로 육상기원 유기물 거동, 시계열 변동 등 과거 고해상도 환경복원이 가능할 것임
- 극지 환경 다매체 시료 내 유기독성물질 분석 결과를 바탕으로 한 잠재적 오염원 평가는 극지 해역 오염 및 위해성 물질 저감 관리를 위한 기초 및 평가 자료로 활용될 것임
- 국내에서 수행된 대기 수은 침적 현상 및 스노우팩 수은 광환원 현상 연구는 국내 수은 안정동위원소 분석 기술력 및 전문성을 강화할 수 있으며, 스발바르 피오르드 지역의 연구 결과 비교를 통하여 현재까지 미비한 극지방 수은 유입원 및 생지화학적 순환 연구분야에서 수월성 높은 성과 도출 가능
- 정확도를 향상시킨 FVCOM 모델링 시스템을 통하여 지구온난화에 의해 빠르게 후퇴하고 있는 빙하의 융빙수 영향이 피오르드 및 연안 물질순환 및 퇴적환경 변화에 미치는 극지 환경 기술개발 및 고도화 연구의 기술을 제공할 것으로 기대됨

3. 연구개발성과에 대한 활용 가능성

■ 등급: (**아주 우수**, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 본 과제를 통해 획득한 자료는 국제 SCI 학술지 게재를 통해 검증 되었으며, 또한 데이터베이스로 구축되고 있어 향후 극지에서 수행되는 다학제간 연구에 활용 가능
- 현재 및 과거 환경 자료는, 미래 기후 변화 예측에 사용되는 기후 모델 검증에 주요 자료로 활용 가능
- 스발바르 극지 환경 다매체 시료 내 유기독성물질 분석 결과는 스발바르 원주민을 포함한 사회 구성원의 환경기준 마련을 위한 중요한 자료로 활용 가능함
- 스발바르 수은 농도 및 안정동위원소 데이터는 UN 국제수은협약의 Global Observation System for Mercury Isotopes(iGOS4M) 데이터베이스에 제공되어 극지 오염저감 정책에 대한 기초자료로 활용
- 스발바르 피오르드와 연안에서 정밀한 수치모델링 구축으로 조석, 해류, 수온, 염분 등의 예측 자료 제공을 통해 극지해역에 대한 국가 정책 설정 방향성 제시, 산학연 연구자들의 2차 활용 가능 및 국민 이해도 증진 가능

4. 연구개발 수행의 성실도

■ 등급: (**아주 우수**, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 노르웨이 트롬소 북극대학교(UiT) Matthias Forwick 교수, 노르웨이 지질조사소(NGU) Jochen Knies 박사와 한-노 스발바르 피오르드 국제공동 탐사를 성공적으로 추진하여 탐사자료 및 퇴적물 시료 확보를 통해 수월성 높은 연구 성과를 달성함
- 2024년도 노르웨이 트롬소 북극대학교(UiT) 방문을 통해 기확보 퇴적물 코어에 대한 암층서 분석을 성실히 달성함 (시추코어 26정점, CTD 34정점 등)
- UiT 소속 Matthias Forwick 교수, 중국 칭다오 중국해양대학(OUC) Xiatong Xiao 교수, 독일 AWI 극지해양연구소 고기후 모델링 최고 전문가 Gerrit Lohmann 교수 및 중국해양대학교 Ruijian Gou 연구원 초정 및 세미나 개최 통해 북극권 고환경복원 연구를 위한 국제협력 연구를 추진하고, 국내 전문가들이 참여한 공동워크숍을 개최하여 연구 진행 상황 및 계획 등을 논의함으로써 위탁기관을 포함한 국내·외 다학제간 연구 협력을 도모하고 계획된 연구 목표를 우수하게 달성
- 본 과제의 연구기간 동안 계획한 연구개발 내용을 성실히 수행한 바, 연구개발 수행의 성실도에 있어 **아주 우수**로 평가함

5. 공개 발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급: (**아주 우수**, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 스발바르 피오르드를 대상으로 기후환경 프록시를 개발하고 과거 환경변화를 복원한 연구 내용으로 상위 10% 이상 국제 SCI 학술지 11건을 포함한 총 26편 게재 및 총 59회의 국내·외 학회 발표 및 5차례의 대내·외 수상을 통해 우수한 연구 성과 달성. 그 밖에 SCIE급 논문 3편을 연장된 연구기간('25년 1-4월) 중 투고를 완료하였으며 8-9월 중 게재함
- '24년 부산 벡스코에서 개최한 국제지질학회(37th International Geological Congress, IGC 2024)에서 북극권 고기후·환경 연구 관련 세션을 유치하여 국제협력 연구를 도모하였으며, 구두발표 3건/포스터 발표 1건 수행
- 본 과제의 연구기간 동안 논문 성과, 학술 발표 및 발표회 개최 등 계획한 목표치를 초과 달성하였으므로 공개 발표된 연구개발성과에 있어 **아주 우수**로 평가함

Ⅱ. 연구 목표 달성도

세부 연구 목표 (연구계획서의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
(정성) 한국-노르웨이 스발바르 국제공동탐사 수행 및 탐사시료 획득	30	100	노르웨이 트롬소 북극대학교(UiT) 및 노르웨이 지질조사소(NGU)와 국제협력을 통해 스발바르 국제공동탐사를 성공적으로 추진하여 해저지형·지층탐사 및 퇴적물 코어 자료 확보를 계획한 연구목표를 성공적으로 초과달성
(정성/정량) 기후환경 복원 프록시 개발 및 적용	20	100	스발바르 피오르드 퇴적물 시료를 활용한 퇴적물 기원, 빙하 후퇴 속도, 빙하 풍화작용 양상, 유기물 기원 및 특성 파악, 퇴적환경 변화 해석에 필요한 다양한 기후환경 프록시를 개발하고 이를 적용하여 스발바르 북부, 서부 및 남부 등 주요 스피츠베르겐 피오르드 지역의 과거 환경변화 복원에 관한 논문 게재 및 학술 발표 성과 등 계획한 연구 목표를 초과달성
(정성/정량) 스발바르 환경변화에 대한 인간 활동 간섭 영향력 이해	20	100	유기분자생체지표 분석법을 구축하고 스발바르 피오르드 퇴적물 내 적용함으로써 인간 활동 간섭에 영향을 받은 여러 스발바르 피오르드를 대상으로 다양한 유기물 기원과 상대적 기여도를 평가하였으며, eDNA, 저서성 유공충 분포 분석 등 관련 논문 및 학술 발표 성과를 통해 인간간섭에 의한 스발바르 환경변화를 파악
(정성/정량) 유기·무기 오염물질 유입량 변화 추적 및 생태 영향력 평가	20	100	스발바르 환경의 오염원 및 매개체 파악을 통한 오염도 평가. 기후변화에 의한 수은 거동 관련성 파악 및 수은 이동 경로와 유입원 규명을 통해 수월성 높은 논문 및 학술 발표 성과 등 계획한 연구 목표 달성
(정성/정량) 유동모델(FVCOM) 구축을 통한 기후변화에 따른 조수빙하 유출 물질의 순환 기작 이해	15	100	스발바르 콩스피오르드와 인접한 연안해역을 대상으로 한 조수빙하 유출 물질의 순환 기작 수치모델 구축 및 파악을 위해 FVCOM 모델 기반을 구축하여, 해류변화 특성의 재현성 검증을 기반으로 물질 확산 모델링 기술을 개발하여 연구 목표 달성
합계	100점		

KOPRI 극지연구소

Ⅲ. 종합 의견

1. 연구개발성과에 대한 종합의견

(연구결과의 우수성 및 활용성)

- 본 연구는 스발바르 지역을 대상으로 노르웨이 트롬소 북극대학 소속의 탐사선 RV Helmer Hanssen을 임차하여 2022년과 2023년 2회에 걸쳐 한-노 스발바르 피오르드 국제공동탐사를 통해 기후환경 변화 이해를 위한 연구에 필수적인 천지지형 및 지층탐사 자료와 퇴적물 코어를 당초 계획한 목표 대비 100% 이상 확보하여 과거 기후변화 및 현재 진행되고 있는 지구온난화에 가장 민감한 스발바르 군도에서 국내 연구팀이 주축 되어 기후환경변화에 연구를 위한 기반을 구축하여 국내·외 다학제적 협력과 지속성을 강화하는데 기여함
- 특히, 본 연구에서 개발된 기후환경복원 다중 프록시는 다양한 시스템으로 구성된 스발바르 피오르드를 대상으로 적용하여 과거 및 현재의 빙하거동, 해빙분포변화, 대서양 해류유입과 표층 생산력 변화 등 기후환경 변화에 대한 정밀 복원을 달성함
- 또한 스발바르 육상, 연안 및 피오르드 환경에서 획득한 다매체 시료 내 유기독성물질의 분포 특성과 수은 농도 및 동위원소 분석 결과를 통해 주요 오염원과 수은 이동 경로 및 유입원을 규명하였으며, FVCOM 모델링을 통해 모의되는 해류특성변화로 인한 콩스피오르드에서의 조수빙하 유출 물질의 이송 및 확산 기작은 피오르드 내 퇴적물, 유기물, 오염원 등 물질 순환 양상을 이해하는데 기여할 것으로 판단됨
- 연구결과는 수월성 높은 국제학술지 논문게재와 학술대회 발표 등을 통해 학문적 위상을 강화하였으며, 한국극지데이터센터(KPDC)에 등록한 여러 환경 인자를 바탕으로 구축된 데이터베이스는 다양한 연구 및 정책 수립에 활용 가능성을 높일 것으로 기대됨

(연구 목표 설정의 타당성)

- 코로나와 예산삭감 등 대내외적인 어려운 여건 속에서 급격히 진행되고 있는 지구온난화에 의한 기후환경변화에 따른 북극 스발바르 과거와 현재 환경변화 및 영향 진단이라는 본 연구의 최종 목표를 달성하기 위하여, 2회에 걸쳐 추진한 한-노 국제공동탐사를 통한 탐사자료 및 퇴적물 코어 등 시료 확보, 연구 인프라 구축, 기후환경 프록시 개발 및 프록시 적용을 통해 과거와 현재 기후환경을 복원하고자 하였던 연구 목표 설정은 계획한 최종 목표를 우수하게 달성함으로써 본 연구를 통해 구축한 국내·외 다학제적 협력 연구는 극지에서의 국제공동 연구협력 강화라는 시대적 요구에 부합함

(연구수행 방법의 적절성)

- 노르웨이 탐사선 임차를 통한 2회에 걸친 한-노 국제공동탐사를 추진하여 해저지형 및 천부지층 탐사 자료 및 퇴적물 코어 등 시료를 확보하여 환경변화 복원 및 진단을 위한 다중 프록시 개발을 위한 선행연구 진행 및 다양한 시스템으로 구성된 스발바르 피오르드 및 연안환경을 대상으로 프록시를 적용하여 빙하거동, 퇴적작용 및 기작, 유기 독성물질 거동 및 매체 파악, FVCOM 모델링 활용 피오르드와 연안 물질순환 파악 등 피오르드와 주변 육상 및 연안에서 일어났던 과거 및 현재의 기후 환경변화를 정밀 복원하고 그 영향을 진단하기 위한 적용한 연구 수행 방법은 적절한 것으로 평가함

(연구목표의 달성도)

- 본 연구는 3개 위탁기관의 세부 목표를 포함하여, 계획된 모든 목표를 성공적으로 달성하였으며, 코로나 및 연구비 삭감 등의 어려운 여건에서도 일정 내에 계획한 목표 이상의 분석 및 연구를 성실히 수행하고 스발바르의 과거와 현재 환경 변화를 규명하고 그 영향을 진단하는 데 중요한 성과를 성공적으로 달성함

KOPRI 극지연구소

2. 평가 시 고려할 사항 또는 요구사항

4차년도(최종) 연구 기간이 '25년 3월로 연장됨에 따라서 금년 1-3월 기간 동안은 4차년도에 수행한 연구 결과를 바탕으로 연구 논문 초안 작성 및 투고를 진행하고자 함

4차년도 연구 내용 기반 '25년 1-3월 투고 계획 연구 논문 항목:

1) **Youngkyu Ahn**, Young Jin Joe, Kwangchul Jang, Jung-Hyun Kim, Jochen Knies, Berenice Ebner, Matthias Forwick, Sungmin Hong, Seung-Il Nam. Deposition and environmental changes off Kongsfjorden of Arctic Svalbard during the last 14,000 years. ***Journal of Geophysical Research-Oceans*** (mrnIF: **85.94**)

2) **Young Jin Joe**, Kwangchul Jang, Youngkyu Ahn, Jung-Hyun Kim, Matthias Forwick, Jan Sverre Laberg, Christoph Vogt, Youngjoo Son, Xiatong Xiao, Seung-Il Nam. Changes in depositional environment and provenance on Bellsund of the southern Spitsbergen, Svalbard since the Younger Dryas. ***Paleoceanography and Paleoclimatology*** (mrnIF:)

3) **Dahae Kim**, Jung-Hyun Kim, Youngkyu Ahn, Matthias Forwick, Seung-Il Nam. Variations in sedimentary organic carbon input the Kongsfjord over recent centuries: Application of CuO oxidation products. ***Biogeosciences*** (mrnIF: **82.61**)

4) **Eun Jin Son**, Ju Hyeon Lee, Kwangchul Jang, Youngkyu Ahn, Jochen Knies, Matthias Forwick, Jung-Hyun Kim, Seung-Il Nam, Sae Yun Kwon. Holocene climate driving spatially variable mercury input to an Arctic fjord environment. ***Chemical Geology*** (mrnIF: **85**)

5) **Yun Ji Song**, Jong Wook Kim, Seung-Buhm Woo, Hye Min Lee, Ki-Hwan Kim, Jung-Hyun Kim, Seung-Il Nam, Pedro Duarte. Impact of glacier meltwater runoff on current flow patterns and seawater exchange processes in Kongsfjorden of Arctic Svalbard. ***Journal of Geophysical Research-Oceans*** (mrnIF: **85.94**)

3. 연구개발성과의 활용방안 및 향후 조치에 대한 의견

Ⅳ. 보안성 검토 (※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성)

1. 연구책임자의 의견

2. 연구기관 자체의 검토 결과

첨부4	[해당 시] 연구개발성과 공개제한 요청사유서
첨부5	[해당 시] 청년 의무채용 관련 실적
첨부6	[해당 시] 참여기업 의견서
첨부7	평가의견에 대한 수정 . 보완 대비표

평가의견 (수정 및 보완사항)	수정 및 보완 내용	해당 페이지	비고
ㅇ 해당사항 없음	ㅇ 해당사항 없음		
ㅇ 해당사항 없음	ㅇ 해당사항 없음		

KOPRI 극지연구소

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 과학기술정보통신부에서 시행한 해양극지기초원천기술개발사업 “북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발” 총괄과제의 “북극 스발바르 기후·환경 취약성과 회복력 이해” 3세부과제의 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술정보통신부(한국연구재단)에서 시행한 해양극지기초원천기술개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

KOPRI
극지연구소