보안과제[ ] 일반과제[○] (제출용)

BSPN24011-004-12
NRF-2021M1A5A1065425
RS-2021-NR056051

(총괄) NRF-2021M1A5A1065407 / (세부) NRF-2021M1A5A1065425
(위탁) NRF-2021M1A5A1065667 / 2021M1A5A1065668 / 2021M1A5A1065672 / 2021M1A5A1065675 / 2021M1A5A1065679 / 2021M1A5A1065681
(1단계) (KOPRI) (BSPN21011 / PN22011) /(2단계) (PN23011 / PN24011)

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)

(1세부과제) 북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명
(Interrelationship Investigation and Comprehensive Monitoring based on Permafrost-Atmospheric Environment)

2025. 11. 06.

한국해양과학기술원부설
극지연구소

과학기술정보통신부

제 출 문

과학기술정보통신부 장관 귀하

이 보고서를 “북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발“ (과기부 해양극지기초원천기술개발사업 총괄과제)의 1세부과제 “북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명” 최종보고서(연구기간: 2021.04.27～2025.03.31)로 제출합니다.

2025년 10월 24일

주관연구기관명 : 한국해양과학기술원부설
극지연구소
주관(총괄)연구책임자 : 이방용(‘21.04~ ‘25.03)
1세부과제 연구기관명 : 극지연구소
1세부과제 연구책임자 : 이방용
연 구 원 : 강효진,권혁진,김성중,김연태,
“ : 김유진,김정한,박기태,박근보,
“ : 박상종,박지연,서민주,서원석,
“ : 서현교,안서희,예익주,윤영준,
“ : 이영미,이지연,이창섭,장은호,
“ : 장지이,정지웅,지건화,최진희,
“ : 최태진,황혜원
(이상 극지연구소; 퇴직 연구원 포함)
연 구 원 : 이홍금
(이상 국가생존기술연구회)

1위탁연구기관명 : 광주과학기술원
위탁연구책임자 : 박기홍(‘21.04～ ‘25.03)
연 구 원 : 이해범,조형진
(이상 광주과학기술원; 퇴직 연구원 포함)
2위탁연구기관명 : 광주과학기술원
위탁연구책임자 : 한경만(‘21.04～ ‘25.03)
(이상 광주과학기술원)
3위탁연구기관명 : 경인여자대학교
위탁연구책임자 : 정창훈(‘21.04～ ‘25.03)
연 구 원 : 박진희,이승수
(이상 경인여자대학교)
연 구 원 : 이지이
(이상 이화여자대학교)
4위탁연구기관명 : 고려대학교
위탁연구책임자 : 김태욱(‘21.04~ ‘24.12)
참여연구원 : 박선민,석민우
(이상 고려대학교)
5위탁연구기관명 : 고려대학교
위탁연구책임자 : 채남이(‘21.04～ ‘25.03)
(이상 고려대학교)
6위탁연구기관명 : 서울대학교
위탁연구책임자 : 류영렬(‘21.04～ ‘24.12)
연 구 원 : 김예지,이정희
(이상 서울대학교; 퇴직 연구원 포함)

KOPRI 극지연구소

국내학술용역기관명 : ㈜이커넥트
용역연구책임자 : 양희권(‘21.04～ ‘24.12)
(이상 ㈜이커넥트)
국외학술용역기관명 : 미국 알래스카주립대학교
용역연구책임자 : 김용원(‘21.04～ ‘25.03)
(이상 미국 알래스카주립대학교)
기타전문가참여 : 홍창희
(이상 한국건설기술연구원)

(이상 성명 가나다순)

본 보고서는 정부(과학기술정보통신부/한국연구재단)로부터 지원받은 해양・극지기초원천기술개발사업의 일환으로 수행한 과제에서의 연구활동에 대한 최종보고서로서, 수행 주기에서 연구개발기간은 1단계(2021.04.27.～2022.12.31)와 2단계(2023.01.01～2025.03.31)이며, 연구개발과제 수행에 참여한 1세부과제와 위탁과제의 연구내용을 담고 있다(근거 : “한국연구재단 지원사업 관련 법규집” 제12조 5항, vol.2021.01.01).

이에 당초 연차실적계획서에서 제시한 1단계와 2단계의 연구목표와 내용 및 범위 등의 모든 내용이 연속적으로 기술되어야 하므로, 보고서의 연구수행 내용 중 1단계 보고서 및 2단계 1차년도 연차보고서에서 기술한 내용과 부분적으로 불가피하게 중복될 수 있음을 밝혀 둔다.

KOPRI 극지연구소

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		2021M1A5A1065425 RS-2021-NR056051

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 (1세부과제명)	국문	북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명
	영문	Interrelationship Investigation and Comprehensive Monitoring based on Permafrost-Atmospheric Environment
1위탁과제명	국문	북극권 환경변화에 따른 나노사이즈 미세먼지 생성 및 특성 변화 연구
	영문	A study on the formation and characteristics of nano-sized particles according to environmental changes over the Arctic
2위탁과제명	국문	북극권 미세먼지 예측 개선을 위한 대기질 모델링 고도화
	영문	Advanced air quality modeling for improvement in the prediction of PMs over the Arctic
3위탁과제명	국문	북극지역 대기 에어로졸의 조성 및 흡습성에 따른 광학특성 파악
	영문	Characteristics of optical properties for Arctic aerosol according to chemical composition and hygroscopicity
4위탁과제명	국문	북극권 환경 변화와 기후변화감시물질 변동성 상호연계성 연구
	영문	A study on interactions among variables related with Arctic climate and environmental changes
5위탁과제명	국문	북극권 환경변화에 따른 식생별 탄소 flux의 거동 연구
	영문	A Study on the behavior of carbon flux by vegetation according to environmental changes of the Arctic
6위탁과제명	국문	위성 영상 기반 북극 동토지역 이산화탄소 플럭스 모니터링
	영문	Remote sensing of CO_2 flux across arctic region

주관연구개발기관	기관명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	사업자등록번호	134-82-06870
	주소	(우)21990, 인천시 연수구 송도미래로 26	법인등록번호	131471-0018173

연구책임자	성명		이방용	직위	책임급
	연락처	직장전화	032-760-5302	휴대전화	010-3331-4887
		전자우편	bylee@kopri.re.kr	국가연구자번호	10153866

연구개발기간	전체		2021. 04. 27 - 2025. 03. 31(4년 개월)
	단계	1단계	2021. 04. 27 - 2022. 12. 31(1년 9개월)
		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		10,659,000							10,659,000		10,659,000	
1단계	1년차	2,570,000							2,570,000		2,570,000	
	2년차	3,450,000							3,450,000		3,450,000	
2단계	1년차	3,100,000							3,100,000		3,100,000	
	2년차	1,539,000							1,539,000		1,539,000	

극지기초원천기술개발사업 최종보고서
(평가/제출용, 세부과제용)

① 부처사업명(대)	거대과학연구개발사업		④ 보안등급(보안, 일반)	일반
② 사업명(중)	해양극지기초원천기술개발사업		⑤ 과제성격(기초, 응용, 개발)	기초
③ 세부사업명(소)	해양극지기초원천기술개발사업			
⑥ 총괄과제명	북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발			
⑦ 세부과제명	국 문	북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명		
	영 문	Interrelationship Investigation and Comprehensive Monitoring based on Permafrost-Atmospheric Environment		
⑧ 주관연구기관명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소		⑨ 사업자 등록번호	134-82-06870
⑩ 위탁과제기관명	광주과학기술원,경인여자대학교,고려대학교,서울대학교			
⑪ 주관연구책임자	성 명	이방용	국가연구자번호	10153866
	전 공	대기과학	직급(직위)	연구원(책임급)
	소속부서	해양대기연구본부	전자우편	bylee@kopri.re.kr
	전 화	032-760-5302	휴대전화	010-3331-4887

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	2,570,000					2,570,000	
2차년도	3,450,000					3,450,000	
3차년도	3,100,000					3,100,000	
4차년도	1,539,000					1,539,000	
5차년도							
합계	10,659,000					10,659,000	

KOPRI 극지연구소

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	
	미국,캐나다,노르웨이,그린란드(덴마크),아이슬란드,러시아,이태리,스웨덴		8				8	
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 10월 24일

주관연구책임자 : 이방용 (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							
위탁연구개발기관	광주과학기술원	박기홍	교수	010-4801-2156	kpark@gist.ac.kr	북극권 환경 변화에 따른 나노 사이즈 미세 먼지 생성 및 특성 변화 연구	*대학*
	광주과학기술원	한경만	연구교수	010-9982-5566	kmhan@gist.ac.kr	북극권 미세 먼지 예측 개선을 위한 대기질 모델링 고도화	*대학*
	경인여자대학교	정창훈	부교수	010-2659-0629	jch@kiwu.ac.kr	북극지역 대기 에어로졸의 조성 및 흡습성에 따른 광학특성 파악	*대학*
	고려대학교	김태욱	교수	010-8683-6943	kimtwk@korea.ac.kr	북극권 환경 변화와 기후 변화 감시 물질 변동성 상호 연계성 연구	*대학*
	고려대학교	채남이	연구교수	010-6311-6709	cnamyi@korea.ac.kr	북극권 환경 변화에 따른 식생별 탄소 flux의 거동 연구	*대학*
	서울대학교	류영렬	교수	010-7174-6280	yryu@snu.ac.kr	위성영상 기반 북극 동토 지역 이산화탄소 플럭스 모니터링	*대학*
연구개발기관 외 기관							

KOPRI 극지연구소

〈 요 약 문 〉

연구개발 목표 (500자 내외)	– 환북극 동토층 관측거점 운영 최적화와 육상(동토)–대기 기후환경변화 종합 모니터링, 상호작용 연구 및 특성 분석 – 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 책무 수행을 위한 '책임있는 북극권 파트너' 로서 북극권 거점 기반 기후환경변화 환경인자 빅데이터 확보
연구개발 내용 (1000자 내외)	– 북극 동토지역의 4차원적(시공간적) 종합 환경변화 파악 및 영향평가를 통한 동토 환경변화가 온실기체 방출에 미치는 과정 이해 – 동토 관측거점 운영 정상화/고도화, 빅데이터 환경인자 확보 및 현상 분석 강화 : 국제공동연구협력, 빅데이터 환경변화 정보 확보 및 공유 강화, 응용 기술 개발 확대 – 북극 동토대기 에어로졸의 물리화학 특성 및 미량기체 현장관측을 통한 에어로졸 생성–성장 변화 및 구름응결핵 활성화 등의 기후피드백 기작 규명 – 에어로졸 및 미량기체 이동식 관측소 구축 및 선도연구장비 도입을 통한 북극 대기 에어로졸 선도연구 수행 기반 마련 – CPS/IoT 기반 동토 환경인자 관측 및 분석을 위한 Smart Polar Platform 개발 – 북극 동토 생태계 구조 파악 및 기후변화가 생태계 생지화학적 순환에 미치는 영향 이해 – 동토 융해에 따른 물질대사 변화–온실기체 발생과의 상관성 이해 및 북극 육상 생태계 연구자들과 네트워크 구축, 협력 – 북극권 온실 가스 및 대기 환경과 기후 피드백 규명을 통한 기후–탄소 상호작용 평가
활용계획 및 기대효과 (500자 내외) (응용분야 및 활용범위 포함)	– 이산화탄소 증가에 의한 동토층 변화의 정도를 파악하고 동토변화가 전지구 및 유라시아에 온실가스 변화, 표면 알베도 변화, 물수지 변화에 미치는 영향 정량화를 통해 미래 기후변화 예측 기술 향상에 적용 가능 – 접근성이 열악한 북극권 지역에서 안정적인 대기 미세먼지 연속 관측 업무를 수행하기 위한 관측 플랫폼 고도화로 국제 공동 연구를 강화 및 극지 연구 범위 확장 – 기후변화에 가장 취약한 북극권에서의 에어로졸의 기후적 역할 규명을 통한 지구온난화 대응 및 완화 정책 수립 기여 – 극지 생태계 탄소수지 보정 및 기후변화에 가장 취약한 유기물의 종류에 대한 이해도를 높여, 이를 통해 지역적, 또는 전 지구적 모형의 입력 자료 확보 및 검증

국문핵심어 (8개)	환북극 동토지역	관측거점	기후환경변화	환경인자
	온실기체	에어로졸	감시	기후 피드백
영문핵심어 (8개)	Circum–Arctic permafrost region	Observation node	Climate environmental change	Environmental factors
	GHGs	Aerosol	Monitoring	Climate feedback

ㅇ 단계별 연구개발 목표와 내용

연구개발 목표 및 내용	1단계	목표	환북극 동토 거점기반 육상–대기 환경 관측 고도화(I) 및 환경인자 확보, 특성 분석 등
		내용	○ 거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 고도화 계획 수립 ○ 북극 에어로졸 등 관측 시스템 및 DB 고도화, 생성과정의 정량화 ○ 환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 개발, 모니터링 시스템 원격 및 에너지 하베스팅 기술 고도화 ○ 북극 동토거점 육상–대기 환경 관측 고도화 등
	2단계	목표	환북극 동토 거점기반 육상–대기 환경 관측 고도화(II) 및 환경변화 특성 파악, 기후적 역할 규명 등
		내용	○ 북극 동토거점 환경관측 고도화 및 환경 DB 활용시스템 구축 ○ 북극 동토 에어로졸과 구름 등 형성과정의 상관성 규명 ○ 북극 동토 에어로졸 장거리 이동 등 평가와 중위도 영향 평가 ○ CPS/무선센서 네트워크 기반 환경인자 관측시스템 구축 ○ 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현 및 Smart Polar Platform 구축

〈 연구 분야 〉

양식A103

코드구분	중심분야		관련분야1		관련분야2		관련분야3		관련분야4	
	코드	비중	코드	비중	코드	비중	코드	비중	코드	비중
국가과학기술표준분류	ND1103	30 %	ND1106	30 %	ND1104	20 %	ND1102	10 %	ND1199	10 %
국가과학기술표준분류(적용분야)	X99	100 %		%		%		%		%
과학기술분야분류	G13401	40 %	G13405	20 %	G20102	20 %	G20107	10 %	G13599	10 %
6T 기술분류	050116	40 %	020314	20 %	020315	20 %	010214	15 %	070101	5 %
NTRM 분류	B030308	40 %	B030305	40 %	B060601	20 %		%		%
원천기술개발분야	0751	40 %	0811	20 %	0719	20 %	0499	10 %	0129	10 %

KOPRI 극지연구소

〈 보안 등급의 분류 및 결정사유 〉

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

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발 목표 및 평가항목별 성과 ····· 1

1. 연구개발 목표 ····· 5
2. 평가항목별 성과 ····· 9
3. 목표 미달 시 원인 분석 ····· 21
4. 연구개발 목표 및 주요내용 변경사항 ····· 23
5. 선정/단계/연차점검의견 ····· 26

제2장. 추진내용 · 연구결과 및 추진일정 실적 ····· 39

1. 추진내용 · 연구결과 ····· 40
2. 목표 달성 수준 및 추진일정 실적 ····· 284

제3장. 연구개발 결과의 활용 방안 ····· 317

1. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여정도 ····· 318
2. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ····· 337
3. 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항 ····· 341

제4장. 당초 연구계획 대비 주요 변경사항 ····· 343

[첨부목록] ····· 350

첨부1 연구개발 목표의 달성도 증빙 ····· 351
첨부2 연구개발결과 활용계획서 ····· 383
첨부3 자체평가의견서 ····· 426
첨부4. [해당 사항 없음] 연구개발성과 공개제한 요청사유서 ····· 433
첨부5. [해당 사항 없음] 청년 의무채용 관련 실적 ····· 433
첨부6. [해당 사항 없음] 참여기업 의견서 ····· 433
첨부7. [최종본 제출] 평가의견에 대한 수정 · 보완 대비표 ····· 433

KOPRI 극지연구소

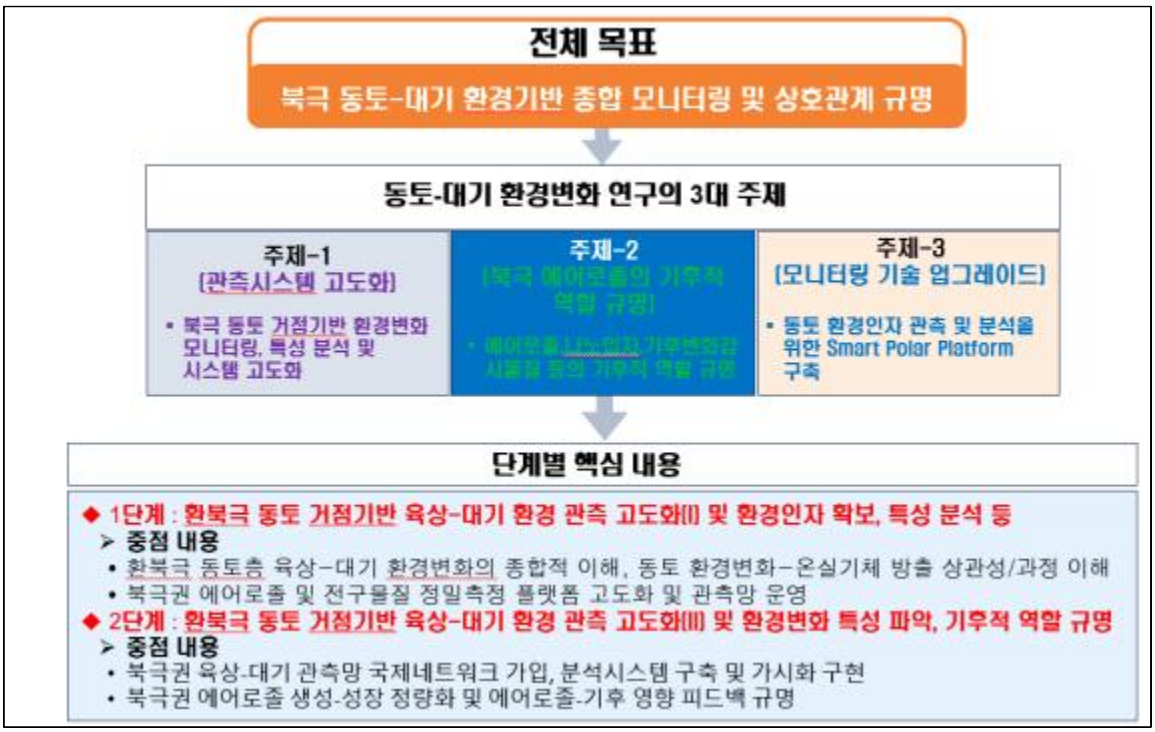
제 1 장

연구개발 목표 및 평가항목별 성과

KOPRI
극지연구소

○ 과제의 추진 체계 (총괄 5개 세부과제로 구성, 1세부과제는 주로 관측거점 운영/온실기체-에어로졸-육상(동토) 분야에 3개 주제로 수행)

○ 1세부과제(위탁과제 포함) 특성과 추진 체계(3개 주제)



KOPRI 극지연구소

○ 1세부과제 전체 기간 로드맵 (‘21.04~ ‘25.03)

주제	전체 (48개월)				최종 목표 달성
	2021년 (1단계 1차년)	2022년 (1단계 2차년)	2023년 (2단계 1차년)	2024년 (2단계 2차년)	
주제-1 관측거점 운영 최적화/환경인자 확보/특성 분석 및 관측시스템 고도화	환북극 동토 6개 관측거점의 운영 최적화/정상가동 (가동률 약 90% 이상), 환경인자 누적 확보				• 환북극 관측거점 운영 최적화 및 관주기록 고도화 (관측시스템 매고 및 플랫폼 구축 등)
	북극 현장 동토-대기 현상 실측 및 위성자료 기반 동토 관측거점 환경모니터링과 특성 분석 지속 (6개 위탁과제와의 체계적 연계와 자료 확보 및 공유 등)				• 동토 환경인자 DB 구축, 설정 및 활용 고도화 (정상를 매시 등)
	관측거점 기반 메탄 관측 1개소 추가, 식생지수 및 광합성 관측 1개소 추가(고도화)	메탄 관측 1개소 추가, 식생지수 및 광합성 관측 2개소 추가 (고도화)	식생지수 및 광합성 관측 2개소 추가, 온실기체 플럭스 머신러닝 모델 개발	최근 40년 환북극 동토 온실기체 플럭스 정량 매핑	• 북극권 북상-대기 상호 작용 규명 및 온실기체 플럭스 교환 알고리즘 제공
	알래스카 토양기원 온실기체의 생성 및 방출량 특성과 환경 제어인자 파악 등	알래스카 총탄관측등 (툰드라 및 혼대산림) 등한 토양/식물 기원 온실기체의 방출량 평가 등	툰드라 화재 및 비화재 지역에서의 토양기원 온실기체의 생성 및 방출량 상이성 평가 등	온실기체의 방출량 및 환경제어인자 이용 지표면 생태모형 개발	• 북극권 온실기체 미래 배출 전망 제시
					• 에어로졸 정확화 및 관련 기후 영향 피드백 규명
주제-2 에어로졸 역할 규명	에어로졸 정밀측정 플랫폼 고도화 및 운영 방안 수립	다양한 생성원 고려 에어로졸 생성 과정 모사	에어로졸 정밀측정 플랫폼 시험 운영 및 국제공동 캠페인, 네트워크 구축	에어로졸 정밀측정 플랫폼 정상 가동 및 현장 집중 캠페인 실시	• 스마트 플랫폼 구축으로 환경인자 확보 지속성 및 안정성 확보 (센서노드 256, 통신거리 ≥5 km)
주제-3 모니터링 기술 업그레이드	환경인자 멀티 센서 통합 관측 시스템 개발 (환경인자 4종)	모니터링 시스템 원격 및 에너지 하베스팅 기술 고도화 (64 노드)	CPS/무선센서 네트워크 기반 환경인자 관측 시스템 구축(128 노드)	Smart Polar Platform 구축 (통신거리 ≥5 km)	• 환경변화 초래 북상-증폭도 영향 평가를 위한 측정 자료 제공

본 과제에서는 총괄적으로 북극이사회 8개 국가 중 북극해 연안 6개 국가(미국, 캐나다, 그린란드(덴마크), 노르웨이(스발바르), 아이슬란드, 러시아 등)내 동토 지역에 관측거점을 확보하고 정상 가동 또는 운영 고도화, 동토층에서의 대기-육상(동토, 생태)-식생 등 환경물리학적 특성과 북극권 온실기체 변동 요인인 동토층 유기탄소 및 미생물의 특성을 이해하는 것을 목적으로 하고 있다. 또한 각 관측거점에서의 동토층에서의 온난화 기체 특성 관측 및 분석, 전자통신기술 접목 자료 전송시스템 구축과 적용 등 연구를 수행하였다. 본 보고서에서는 1세부과제에서 수행한 연구만 기술하였다.

한편, 본 과제의 특성상 접근하기 어렵고 북극권 국가들만의 주권행사 지역에서의 환경변화 연구 수행이라는 특수성을 최대한 감안하기 위하여, 과학적/정책적/국제적 접근 방향을 설정하고 충분한 사전종합분석-국제협력 추진-관측거점 확보 및 시스템 구축-확보된 거점에서의 지속적 모니터링-양질의 자료 확보와 모델링을 통한 예측 등의 연구 흐름성을 유지 발전시키면서 계획된 연구의 성공적 달성을 위해 주력하였다.

1세부과제에서는 전체 연구기간('21.04~ '25.03) 동안 대기분야, 생태분야, 환경분야, 지질/지구물리분야, ICT 공학분야 등 다학제적으로 분야로 구성되어 있으며, 북극권 동토층의 대기-동토-지질-공학적인 현상을 입체적으로 연구하는 전략의 3개 주제로 이루어져 있다. 본 과제에서의 참여연구원은 우리나라와 국외의 해당분야 전문가 그룹과의 연계로 상승효과를 도모하고자 구성하여, 과제를 수행하였다.

KOPRI
극지연구소

1. 연구개발 목표

최종목표	글로벌 기후환경변화에 가장 민감 지역인 북극권 육상(동토)-대기 통합 연구개발을 통한 글로벌 이슈 대응 및 활용기술 개발
세부목표	1. 환북극 동토층 관측거점 운영 고도화와 육상(동토)-대기 기후환경변화 종합 감시 및 피드백 프로세스 규명 - 동토거점 기상/온실기체/토양/식생 관측시스템 운영 지속 및 관측항목.기간 확대 및 표준화 - 북극권 나노입자 특성 상시 및 집중 관측자료 확보를 통해 나노입자의 생성 및 성장 원인 규명(1위탁과제) - 북극지역 대기오염 상황을 정교하게 모의하기 위한 극지 대기질 모델링 시스템 고도화(2위탁과제) - 북극 툰드라 생태계의 탄소순환에서 극지 식생의 역할 규명, 환경변화에 따른 탄소 순환 이해(5위탁과제) - 1982~2022년 기간동안 극지 툰드라 지역의 순생태계교환량 지도 제작 및 시공간 분석(6위탁과제) 2. 북극 동토 기반 현장 관측을 통한 에어로졸의 기후적 역할 규명 - 북극 미세먼지의 조성 및 흡습성장 특성에 따른 광학 특성 및 기후변화 영향 파악(3위탁과제) - 북극권 기후변화감시요소 중 에어로졸의 형성, 분포, 변동성 특성 분석과 이와 연관되는 기후/환경인자 탐색(4위탁과제) 3. 북극 동토거점 환경인자 모니터링을 통한 빅데이터 확보 및 환경변화 규명 ※ 극지연 주관 세부과제에서 6개 관측거점 운영 정상화 및 고도화 추진, 동토 지역 종합 감시 등의 주요 업무를 수행하며, 인적/기술적 gap을 보강하며 연구효율성 증대 등을 위해 대학 등과의 위탁연구 추진으로 목표 달성토록 함 ※ 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 의무 수행을 위한 '책임있는 북극권 파트너' 로서의 과학기술 적용과 성과 산출 및 국익 확보에 기여
연차별목표 (1단계)	**[1단계](2021.04.27~2022.12.31)** **o 1차년도 (1단계 1차년도) :** - 환북극 6개 관측거점 기존 관측시스템 정상 가동 및 환경인자 확보 지속 - 기존 연구 대비 알래스카 거점 관측기간 확대 및 메탄 관측 1개소 추가 - 북극 에어로졸 관측시스템 및 DB 고도화 - 거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 고도화 계획 수립 - 환경인자 멀티 센서 통합 관측시스템 개발 - 북극 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행(1위탁과제) - 입력자료 배출 인벤토리 및 기상자료 분석, 위성관측 기반 자료 분석(2위탁과제) - 북극지역 대기 미세먼지의 조성 특성 파악(3위탁과제) - 북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 관측, 재분석 자료 조사 및 수집(4위탁과제) - 북극 툰드라 생태계의 주요 식생별 탄소 플럭스 분석(5위탁과제) - 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발용 입력자료 다운로드 및 전처리를 통한 자료

KOPRI 극지연구소

	구축(6위탁과제) **o 2차년도 (1단계 2차년도) :** - 환북극 6개 관측거점 정상 가동 및 환경인자 확보(지속) - 북극 동토 에어로졸 생성과정의 정량화 - 기존 연구 대비 메탄 관측 1개소 추가 및 식생/광합성 관측 2개소 추가, 온실기체 플럭스 알고리즘 2건 - 동토거점 환경인자 DB 웹사이트 설계안 작성 - 모니터링 시스템 에너지 하베스팅 기술 고도화 및 자가발전 장시간 저전력 운용 - 북극권 에어로졸의 물리화학적 특성, 기상 및 가스자료 등을 국제공동연구진과 협력을 통해 추가 확보 및 분석, 인공지능 기법을 활용한 북극권 나노입자생성 예측 모델 개발(1위탁과제) - 동토 환경인자 관측 및 분석을 위한 Smart Polar Platform 구축(토양온도, 토양수분, 토양 CO_2, 토양 CH_4에 대한 저비용 저전력 네트워크 시스템, 개별 관측 목적의 다양한 센서들을 flexible하게 구성하여 실시간 생태계 모니터링 네트워크 시스템 구축) - 기상모델 구동 및 대기화학모델 민감도 테스트 수행, 위성관측 기반 자료 분석(2위탁과제) - 북극지역 대기 미세먼지의 유·무기 조성에 따른 흡습성장 및 광학 특성 모수화(3위탁과제) - 북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 전 지구 모델로부터 자료 조사, 수집 및 분석, 수집된 기후/환경인자 및 기후변화감시요소 중 대기조성물질 자료 검증 및 기초분석(변화/변동 양상)(4위탁과제) - 북극 툰드라 생태계의 주요 식생별 탄소 플럭스 분석과 다양한 환경조건에서 식생별 탄소 플럭스 거동 분석(5위탁과제) - 생물리기작모델 BESS-Polar 개발하며 생태계호흡 및 순생태계교환량 모듈개발(6위탁과제) **[2단계](2023.01.01.~2025.03.31)** **o 3차년도 (2단계 1차년도) :** - 환북극 5개 관측거점 정상 가동 및 환경인자 확보(지속) ※ 대외환경으로 인해 러시아 바라노바 거점 활동은 잠정적 중단 - 북극 동토 에어로졸과 구름 형성과정의 상관성 규명 - 기존 연구 대비 식생/광합성 측정 2개소 추가 및 환경인자 DB 활용시스템 신규 구축 - CPS/IoT 네트워크 기반 환경인자 관측시스템 구축 - 북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자 크기 분포 및 수농도 상시 장기 관측 수행,다양한 지역/계절/시간 변화에 따른 나노입자의 생성률, 성장률, 발생조건 비교, 아이슬란드 기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 집중관측 수행 (1위탁과제) - 최적 조건 대기화학모델 구동 및 위성관측 기반 자료 분석 등(2위탁과제) - 북극지역 대기 미세먼지의 수분 특성에 따른 에어로졸 생성과정 파악 및 광학 특성 분석(3위탁과제) - 북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 자료 시공간 변동성 분석. 추가자료의 계속 업데이트 및 연구활용(4위탁과제)

	– 북극 동토의 다양한 환경조건에서 식생별 탄소 플럭스 분석과 자료(DB) 구축 (5위탁과제) – 1982~2022년 기간동안의 BESS-Polar 탄소 플럭스 지도 제작 / BESS-Polar 탄소 플럭스 지도를 다른 머신러닝 모델의 플럭스 지도 및 FLUXNET 현장자료와 비교평가(6위탁과제) **o 4차년도 (2단계 2차년도) :** – 환북극 5개 관측거점 정상 가동 및 환경인자 확보(지속) ※ 대외환경으로 인해 러시아 바라노바 거점 활동은 잠정적 중단 – 북극 동토 에어로졸 생성 및 이동이 한반도를 포함하는 중위도에 미치는 광학적 특성 평가 및 예측 – 환북극 동토 환경변화 평가 – Smart Polar Platform 구축 – 북극권 환경변화 요인과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명/ **북극권 나노입자 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악**/다양한 지역에서 확보된 나노입자의 생성 특성자료와 북극 지역의 나노입자생성 특성의 차별성 및 유사성 도출 등 (1위탁과제) – 최적 조건 모의자료 활용 자료동화 수행 및 재분석 자료 생성 등(2위탁과제) – 북극 미세먼지의 크기분포에 따른 흡습성장 및 수분 특성에 따른 에어로졸 영향 파악(3위탁과제) – 북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 자료 시공간 변동성 분석 및 이해(4위탁과제) – 북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명(5위탁과제) – 극지방의 순생태교환량의 시공간 패턴 분석(1982~2022)(6위탁과제) [최종] – 환북극 5개 관측거점 정상 가동(평균 가동률 80% 유지) – 기존 연구 대비 연중관측기간 증가, 거점 관측소별 관측요소 표준화 및 증가를 통한 위성자료 및 모델결과 검증 자료 제시 – 온실기체 플럭스 알고리즘 2건 확보(위탁과제 포함) – 환경인자 확보(누적 23건), 각 주제별 특성 분석 관련 SCI 논문 총 15편 (상위 20% 이내(NSC 자매지포함) 6편 포함)(위탁과제 포함) – 북극 동토 에어로졸의 생성-성장 특성 및 기후적 피드백 평가 – 환북극 동토-대기 환경변화에 따른 온실기체 거동 규명 – 동토 환경인자 관측 및 분석을 위한 Smart Polar Platform 구축(토양온도, 토양수분, 토양 CO_2, 토양 CH_4에 대한 저비용 저전력 네트워크 시스템, 개별 관측목적의 다양한 센서들을 flexible하게 구성하여 실시간 생태계 모니터링 네트워크 시스템 구축) ※ KPDC 내 북극 동토거점 환경인자 DB 가시화 및 분석 기능 탑재로 활용성 제고 (북극 동토지역 연구기반 관련 선진국 수준의 약 70%까지 향상), 북극권 육상-대기 상호작용 모델링 연구에 제공 등 ※ 과기부/외교부 등 정부차원에서의 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 환북극 환경변화에 대한 과학기술적 역할 이행 근거자료 제시

(참고) 관측거점별 위치 및 측정시스템 (개요)

극지연구소

2. 평가항목별 성과 (기간 : 2021.04.27~2025.03.31)

□ 1세부과제 (북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정성) 북극 동토거점 관측 시스템 및 활용 시스템 고도화	25	1, 2	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 동토거점 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 관측시스템 고도화 계획 수립 ▪ 위성게이트웨이 이중화 개발 및 현장 설치	▪ 거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 관측 시스템 고도화 계획 작성(100%) ▪ 알래스카 카운실 관측거점 설치 (100%)	
			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 북극 동토거점 관측시스템 1차 고도화 ▪ 동토 환경 DB 시스템 설계 ▪ 위성게이트웨이 이중화 및 WPAN/LP-WAN 통합 시스템 현장설치	▪ 1차년도 고도화 계획에 따른 고도화 완료(100%) ▪ DB 시스템 설계 완료(100%) ▪ 알래스카 카운실 관측거점 설치 (100%)	정성-1. 동토환경 DB시스템 설계
			3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 북극 동토거점 관측시스템 2차 고도화 ▪ 북극 동토거점 환경인자 수집분석 시스템 구축 ▪ 중장거리 무인 데이터 수집 시스템 개발	▪ 고도화(100%) · 니알슨 NDVI/PAR 센서 설치 · 동토거점 (러시아 바라노바 제외) 온실기체 플럭스 자료 준실시간 송신시스템 설치: 카운실, 캠브리지베이, 니알슨 실시간 자료 전송 · 카운실 거점 관측기간 11월까지 확대 ▪ 수집분석 시스템(100%) · 북극 동토거점 동토-대기 환경인자 자료 준실시간 수집 및 중장거리 무인 데이터 관측 시스템 현장설치, DB 구축(100%) · 웹기반 가시화시스템 구축 (100%)	정성-2. 니알슨 센서 설치 정성-3. 가시화 시스템 구축
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 실측/위성/재분석 자료 활용 북극권 육상 탄소순환 분석	▪ 실측자료 기반 거점별 GPP (총일차생산량), RE(생태계 호흡량), NEE (순생태계 교환량) 경년 변동 평가 (100%) ▪ 실측과 모델간 GPP, RE, NEE 비교 평가(100%) ▪ 위성/재분석/모델 활용 탄소순환 분석(100%)	정성-4. 거점별 실측 이산화 탄소 교환량 경년 변동 자료 정성-5. 모델과 실측자료 비교 정성-6. 환북극 탄소 플럭스 지도
				▪ 동토 Smart Polar Platform 구축을 위한 센서 관측 기술 개발	▪ LoRaWAN 통합 시스템 현장(카운실 관측거점) 설치 (100%)	
(정성) 북극 동토기원 에어로졸	30	3	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 에어로졸 정밀측정 플랫폼 설계 및 관측프로그램 수립	▪ 신규 에어로졸 관측 플랫폼 설계 및 필수 관측 장비 구성 완료(100%)	정성-7. 신규 플랫폼 구성

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
등의 기후적 역할 규명을 위한 관측 플랫폼 확장 및 현장 집중 캠페인 실시			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 에어로졸 생성 과정 모사 연구 수행	▪ 에어로졸 생성 과정 모사 챔버 실험 수행 완료 (100%)	
			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 에어로졸 정밀측정 플랫폼 시험 운영 ○ 북극 관측거점 기반 국제공동 현장집중 캠페인 네트워크 구축	▪ 신규 에어로졸 관측 플랫폼 이동 및 관측 장비 설치 완료(100%) ▪ 북극 아이슬란드 거점 기반 공동연구 네트워크 구축 및 국제공동 논문 발간(100%)	정성-8. 에어로졸 관측 플랫폼 이동 및 관측 장비 설치 완료 정성-9. 북극 아이슬란드 거점 기반 기후냉각가스와 해양 생물간의 상관성 분석 논문 발간
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 에어로졸 정밀측정 플랫폼 시험 가동 ▪ 다양한 북극 동토 관측거점 기반 에어로졸 특성 자료 통합 분석	▪ 에어로졸 정밀측정 플랫폼 활용 에어로졸 및 미량기체 분석 완료(100%) ▪ 다양한 북극 동토 관측거점 기반 에어로졸 특성 자료 통합 분석(100%)	정성-10. 에어로졸 정밀측정 플랫폼 활용 현장관측 결과
(정량) 환경 DB 고도화 및 온실기체 거동 연구 결과 발표	25	1, 2	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 동토 대기 기상인자 DB 5건 ▪ 메탄 플럭스 측정 거점 1개소 추가 ▪ 광합성 측정 거점 1개소 추가 ▪ 환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 개발(환경인자 4건) ▪ 위성통신시스템 개발 특허 출원	▪ 거점별 2021년 기상인자 DB 5건(KPDC 등재) (100%) ▪ 알래스카 거점 메탄장비/PAR 센서 확보(80%) ▪ 태양광 자가발전 시스템 및 저전력 통신모듈 동토층 환경인자(토양온도, 토양함수비, CO_2, CH_4) 통합형 멀티 모니터링 센서 시스템 개발(100%) ▪ 환경인자 획득 센서 취득부, 위성통신 모듈, 게이트웨이 이중화(데이터 손실 최소화 가능)(특허출원 완료) (100%) ▪ 동토 멀티 센싱 관련 인자 DB 4건(KPDC 등재)(100%)	정량-1. 카운실 메탄 측정 등 정량-2. 특허 출원서
			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 동토 대기 온실기체 DB 5건(누적 10건) ▪ 메탄 플럭스 측정 거점 1개 추가 ▪ 광합성 측정 거점 2개소 추가 ▪ 온실기체 플럭스 알고리즘 2건 개발 ▪ 모니터링 시스템 원격 무선전송 및 에너지 하베스팅 기술 고도화 (64노드) ▪ 모니터링 시스템 자가발전 장시간 저전력 운용	▪ 동토 대기 온실기체 DB 17건 (누적 22건)(100%) ▪ 그린란드 노르드 메탄 플럭스 측정(100%) ▪ 캠브리지베이/그린란드 광합성 유효 복사(PAR) 측정 (100%) ▪ 온실기체 플럭스 알고리즘 2건 개발(100%) ▪ 환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 고도화(84노드 데이터 취득, 특허출원) (100%) ▪ 동토 멀티 센싱 관련 인자 DB 4건(KPDC 등재) (100%)	정량-3. 노르드 메탄 측정자료 정량-4. 캠브리지베이/그린란드 PAR 측정자료 정량-5. 알고리즘 수식과 그림

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
			3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 동토 대기 온실기체 DB 3건 (누적 13건) ▪ 광합성 측정 거점 1개소 추가 (※ 러시아 거점 1개소는 잠정 중단) ▪ 동토 환경변화 분석 및 관련 논문 1편 (SCI급) ▪ CPS/IoT 네트워크 기반 환경인자 관측시스템 구축 (128 노드) ▪ 극지환경인자 제어 방법 등 개발	▪ 동토 대기 온실기체 DB 18건 등록 (누적 40건) (100%) ▪ 캠브리지베이 거점 NDVI/PAR 측정 추가완료(100%) ▪ 동토 환경변화 분석 및 관련 논문 1편(SCI급) (100%) ▪ 극지환경인자 관측시스템용 배터리 장치 및 이의 온도 제어 방법(특허출원 1건) (100%)	정량-6. 온도제어 특허 출원서
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 동토 식생 DB 5건 (누적 18건) ▪ 동토 온실기체 거동변화 관련 논문 1편 (축소) (상위 20% 1편 포함) ▪ 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현 및 실증	▪ 동토 대기 온실기체 DB 16건 등록 (누적 56건) ▪ 동토 온실기체 거동변화 논문 1편(상위 10%) 출판 ▪ 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현(100%) ▪ Smart Polar Platform 실증(통신거리 ≥5 km) (100%) ▪ 동토층 환경인자 특성 자료 통합 분석(128 노드) (100%)	정량-7. 북극 동토 탄소순환 분석논문
(정량) 북극 동토기원 에어로졸 등의 기후적 역할 규명을 위한 DB 의 고도화 및 관련 연구 결과 발표	20	3	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 – 북극 에어로졸 분자 특성 시계열 자료 ▪ 북극 동토 기반 에어로졸 특성 분석	▪ 북극 에어로졸 분자 특성 시계열 자료 및 에어로졸 인자 DB 1건(KPDC 등재) (100%) ▪ 북극 에어로졸 생성 및 성장 관련 논문 1편 발간 완료 (100%)	정량-8. 북극 에어로졸 생성 관련 논문 등
			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 추가 (누적 2건) – 북극 대기 중 에어로졸의 화학 특성 관측 자료 분석관련(SCI급 논문 1편 (상위 20%))		
			3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 북극 거점 기반 에어로졸 DB 2건 추가 (누적 4건) – 북극 대기 중 구름 응결핵 시계열자료/북극 대기 중 에어로졸 물리-화학적 특성 ▪ 북극 동토 기반 에어로졸의 특성 분석 및 관련 SCI급 논문 1편	▪ 북극 에어로졸 구름응결핵 시계열 자료 및 북극 대기 중 에어로졸 화학 특성 KPDC 등록 2건 완료(100%) ▪ 북극 에어로졸 생성 특성 관련 논문 1편 발간 완료(100%)	정량-9. 중위도 -고위도 유기물 해양-대기 상호작용 논문 발간
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 추가 (누적 5건) – 고분해능 에어로졸 화학조성 ▪ 국제공동연구를 통한 북극 동토 기반	▪ 초고분해능 질량분석기를 활용한 에어로졸 유기특성 KPDC 등록 1건 완료(100%) ▪ 북극 유기 에어로졸 계절적 발생 특성 관련 논문 1편 발간 완료 (100%) ▪ 북극 관측거점 기반 에어로졸	정량-10. 북극 생체분자-에어로졸 물리특성 간의

KOPRI 극지연구소

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
				에어로졸의 기후적 역할 규명 논문 1편 (NSC/자매지 1편 또는 상위 10% 이내 1편) ▪ 북극 거점 기반 에어로졸 물리-화학 성질 DB 누적 총 5건 ▪ 북극 에어로졸의 기후적 특성 SCI급 논문 총 3편(상위 20% 이내 논문 3편 또는 NSC/자매지 1편 포함)	특성 관련 KPDC 등록 5건 완료(100%) ▪ 북극 에어로졸의 기후적 특성 관련 SCI급 논문 5편 발간 (100%)	상관성 규명 논문 발간
합계	100					

KOPRI 극지연구소

□ 1위탁과제(광주과기원 : 북극권 환경변화에 따른 나노사이즈 미세먼지 생성 및 특성 변화 연구)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정량) 북극권 나노입자 특성 장기 및 집중 관측자료 확보	50	1	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행	– COVID19 재확산으로 인해 현장 관측 일정이 늦어졌으나, 21년 11월부로 현장관측을 성공적으로 수행하였음 (100%)	위탁과제보고서 1. 국내 학술회의 발표 5건 2. 국제 학술회의 발표 5건 3. 국제 논문 게재 3건 4. 수상 실적 1건 5. 인력양성 실적 4건 (박사 2명, 석사 2명) 6. 해외파견 1건 (“북극항해를 통한 나노입자의 크기 분포 및 수농도 집중 관측”) 7. 나노입자 크기분포 및 수농도 장기 관측 데이터 확보 및 KPDC 데이터 등재
			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행 ▪ 북극권 에어로졸의 물리화학적 특성, 기상 및 가스 자료 등을 국제공동연구진과 협력을 통해 추가 확보	– 북극권 환경변화 요인을 파악하기 위해 에어로졸 이온성분, 가스 자료, 기상 자료 등을 국제공동연구진과 협력을 통해 확보 (+ 인공위성 활용 바다 chlorophyll 농도, 바다 표면 온도, 해빙 면적 등 자료, 공기괴 역궤적 모델 (기상장 기반) 자료 추가 확보) (100%) – 3~60 nm 크기 범위의 나노입자 수농도 분포 연속 관측 수행 및 자료 확보 및 등재 (100%)	
			3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기 분포 및 수농도 상시 장기 관측 수행 ▪ 북극 항해를 통한 나노입자의 크기분포 및 수농도 관측 수행	– 3~60 nm 크기 범위의 나노입자 수농도 분포 연속 관측 수행 및 자료 확보 (장기 및 집중 관측) (100%) – 아이슬란드 기지 인프라 구축이 늦어짐에 따라 북극해 선박 관측으로 대체 (100%)	
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기 분포 및 수농도 상시 장기 관측 수행	– 3~60 nm 크기 범위의 나노입자 수농도 분포 연속 관측 수행 및 자료 확보 (장기 및 집중 관측) (100%)	
(정성) 북극권 환경변화에 따른 나노입자의 생성 원인 변화 규명	50	2,3	3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 다양한 지역/계절/시간 변화에 따른 나노입자의 생성률, 성장률, 발생조건 비교	– 확보된 데이터를 이용하여 분석에 활용 (100%) – 인공지능 기법을 활용하여 나노입자의 특성 비교 수행 (100%)	
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 북극권 환경변화 요인(대기 온도, 습도, 바닷물 특성 (온도, 생물학적 특성 등))과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명 ▪ 북극권 나노입자 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악 ▪ 다양한 지역 (도심, 농촌 지역 등)에서 확보된 나노입자 특성의 차별성 및 유사성 도출	– 북극권 환경변화 요인을 파악하기 위해 대기온도, 습도, 바닷물 특성, 해빙의 면적, chlorophyll 농도 등과 나노입자의 생성 및 성장 관련성을 규명하기 위한 분석 수행 (100%) – 확보된 데이터와 hysplit model를 활용하여 나노입자 생성에 기여하는 요인 파악 (100%) – 다양한 지역에서 확보된 데이터를 이용하여 지역적 나노입자 생성 특성 분석 수행 (100%)	
합계	100					

□ 2위탁과제(광주과기원 : 북극권 미세먼지 예측 개선을 위한 대기질 모델링 고도화)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
북극권 대기질 모델링 시스템 고도화	60	1	1차년도 (1단계 1차년도)	– 대기화학모델 입력 자료 (배출량 및 기상자료)를 북극권 지역에 대해 분석	– 북극권 배출량 자료 확보 및 다양한 인벤토리의 물질별 시공간 분석(100%) – 기상자료 확보 및 월별 시간별 바람장 분석 (100%)	위탁과제보고서 (Tables 1–3 및 Fig. 2) 및 증빙 1
			2차년도 (1단계 2차년도)	– 기상 모델 구동 및 대기화학 모델 민감도 테스트 수행 – 민감도 테스트를 통한 최적 조건 확보 (2019년 2개월 대상)	– 모델 및 지상/위성관측 자료 비교를 통한 모델 성능 평가(100%) – 각종 입력자료를 기초로 모델링 10개 사례 선정 및 결과 분석(100%)	위탁과제보고서 (Tables 5–6 및 Fig. 3) 및 증빙2
			3차년도 (2단계 1차년도)	– 최적화 조건 대기화학 모델링 수행 (Optimized Run 모의 자료 생성) – 2019년 대상	– 최적화 조건 대기화학 모델링 구동 (2019년 대상)(100%) – 모델모의 성능 평가 (지상 관측 자료 활용) – 모델모의 성능평가 (위성관측 자료 활용) (100%)	위탁과제보고서 (Fig. 4–7 및 Table 7) 및 증빙3
			4차년도 (2단계 2차년도)	– Optimal Interpolation 기법 자료동화 수행 – Optimized Run 모의 자료 및 MODIS/AERONET 광학 관측 자료 통합 활용	– 자료동화 수행 완료(100%) – 위성 및 지상원결관측 자료와 비교하여 재분석 자료 성능 평가 완료 (100%)	위탁과제보고서 (Fig. 9–12) 및 증빙4
위성관측자료 장기 트랜드 분석	40	2	1차년도 (1단계 1차년도)	– 2016년 – 2018년 MODIS 관측 광학특성 자료 분석	– MODIS 센서 관측 에어로졸 광학적 두께 시공간 분포 분석 (100%)	위탁과제보고서 (Fig. 13) 및 증빙5
			2차년도 (1단계 2차년도)	– 2019 – 2021년 MODIS 관측 광학특성 자료 분석	– MODIS 센서 관측 에어로졸 광학적 두께 시공간 분포 분석 (100%)	위탁과제보고서 (Fig. 14–15) 및 증빙5
			3차년도 (2단계 1차년도)	– 2022년 MODIS 관측 광학특성 자료 분석 – Optimized Run 모의 성능 평가용 지상/위성 관측망 자료 분석	– MODIS 관측 에어로졸 광학적 깊이 시공간 분포 분석(100%) – 모의성능 평가용 자료 처리(100%)	위탁과제 보고서 본문 (Fig. 16) 및 증빙5
			4차년도 (2단계 2차년도)	– 2016년 – 2023년 MODIS 관측 종합 분석 – (RFP 충족) SCI급 논문 1편	– MODIS 관측 에어로졸의 광학특성 자료종합 분석 (에어로졸 장기 경향, 시공간적 특성 및 에어로졸 분류 등) (100%)	위탁과제보고서 (Fig. 18–20), 증빙 6 및 논문 (증빙7)
합계	100					

□ 3위탁과제(경인여자대학교 : 북극지역 대기 에어로졸의 조성 및 흡습성에 따른 광학특성 파악)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정성) 북극지역 대기 미세먼지 의 유·무기 조성에 따른 광학특성 파악	30	1,2,3	1차년도 (1단계 1차년도)	○ 북극지역 대기 미세먼지 물리화학적 특성 연구	북극지역 CCN농도와 에어로졸 물리화학적 조성관련 연구 (100%)	위탁과제보고서 1-1 게재논문
			2차년도 (1단계 2차년도)	○ 북극지역 대기 미세먼지 흡습 특성과 광학적 특성 관계 규명	북극지역 대기 미세먼지 흡습 특성과 광학적 특성 관계 파악 (100%)	위탁과제보고서 2-1 광학특성 모수화 process diagram 및 산출물
			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 북극지역 대기 미세먼지 조성 특성과 광학적 특성 관계 규명	흡습성과 광학특성을 연계할 수 있는 범용적 κ- κsca 관계식 도출 연구 (100%)	위탁과제보고서 3-1. 게재논문
			4차년도 (2단계 2차년도)	○ 북극 미세먼지의 크기분포 및 흡습성장 특성에 따른 파악	북극지역 에어로졸 크기분포 및 흡습성장 계수 관련 자료 (100%)	위탁과제보고서 4-1. 에어로졸 크기 및 흡습 성장변수 분석
(정량) 북극지역 에어로졸의 조성에 따른 광학계수 산출	25	1,2,3	1차년도 (1단계 1차년도)	○ 북극지역 에어로졸의 조성 농도 확보 (조성농도자료 산출 1건)	북극지역(제플린 측정소) 무기이온 에어로졸 조성 농도측정 결과 산출 (100%)	위탁과제보고서 1-2.에어로졸 조성 농도자료 산출
			2차년도 (1단계 2차년도)	○ 북극지역 유·무기 에어로졸의 조성에 따른 산란계수 모수화 (산란계수 모수화 자료 산출 1건, SCI논문 1편)	북극지역 에어로졸의 조성에 따른 산란계수자료 (100%)	위탁과제보고서 2-2.산란계수 자료
			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 북극지역 유·무기 에어로졸의 조성에 따른 산란 및 흡수계수 변화 특성 파악 (유, 무기 에어로졸 흡수계수 자료 산출 1건, SCI논문 1편)	- 북극지역 유무기 에어로졸 농도에 따른 에어로졸 흡습성 파악 (100%) - 유무기 에어로졸을 포함한 다양한 조성의 흡습성과 광학특성 모수화 (100%)	위탁과제보고서 3-2. 유무기 에어로졸 농도의 흡습성 비교 분석 결과
			4차년도 (2단계 2차년도)	○ 북극 미세먼지의 크기분포 및 흡습성장 특성에 따른 광학특성 모수화	다분산 크기분포를 가진 에어로졸의 크기에 따른 광학특성 모수화 (100%)	위탁과제보고서 4-2. 모수화 과정 알고리즘 개략도
(정량) 북극지역 에어로졸의 흡습성장 및 수분에 따른 에어로졸 화학 및 기후영향 모수화	25	1,2,3	1차년도 (1단계 1차년도)	○ 북극지역 미세먼지 생성 전구물질 측정자료 확보 (전구물질 측정자료 산출 1건)	북극지역(제플린 측정소) O3, SO2, NO2 등 가스상 전구물질 농도측정 결과 확보 (100%)	1-3.전구물질(가스상 물질) 측정자료 경향 분석
			2차년도 (1단계 2차년도)	○ 북극지역 유·무기 에어로졸의 조성에 따른 흡습성 모수화 (유무기 에어로졸의 흡습성 모수화 자료 산출 1건)	북극지역 에어로졸의 조성에 따른 흡습성 모수화 (100%)	위탁과제보고서 2-3. 흡습성 산출 자료 및 측정값 비교
			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성과정 모사 (수분에 의한 황산염 모수화 농도 자료 산출 1건, SCI논문 1	북극지역 미세먼지의 액상반응(생성 및 제거)이 미세먼지 생성에 미치는 영향 파악 (100%)	위탁과제보고서 3-3. 북극지역 액상반응 분석 결과

				편)		3-4. 액상 습식 제거 관련 게재 논문
			4차년도 (2단계 2차년도)	○ 북극지역 황산염 미세먼지 특성에 영향 요소 분석	Covid 전후의 황산염 미세먼지 농도 추이 분석	위탁과제보고서 4-3. 추이분석 결과
(정량) 북극지역 대기 미세먼지 조성관련 정보 획득	20	1,2,3	1차년도 (1단계 1차년도)	○ 최근 3년간 북극지역 대기 미세먼지의 조성관련 변화 Trend 파악 ○ 원격자료를 통한 최근 3년간 대기 미세먼지 조성 변화 Trend 파악(미세먼지 조성 자료 산출 1건)	- 확보된 측정자료 기반 미세먼지 조성 등의 시계열 분석 (100%) - 동일기간 위성 등 원격자료 추출 및 자료 확보 (100%)	위탁과제보고서 1-4. 에어로졸 조성별 시계열 1-5. 원격 자료를 이용한 극지 AOD변화
			2차년도 (1단계 2차년도)	○ 최근 3년간 북극지역 대기 미세먼지의 산란관련 측정 변화 Trend파악 ○ 최근 3년간 북극지역 대기 미세먼지의 흡수관련 측정 변화 Trend파악 (미세먼지 산란, 흡수자료 산출 1건)	Zeppelin지역 미세먼지 산란 및 흡수계수 Trend 분석 (100%)	위탁과제보고서 2-3 미세먼지 산란, 흡수계수 경향 분석
			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 환북극지역 2개 측정 지점 이상의 미세먼지 화학 조성 관련 정보 획득 ○ 환북극지역 2개 측정 지점 이상의 미세먼지 산란 및 흡수계수 관련 정보 획득 (측정지점의 미세먼지 조성자료 산출 1건)	- Zeppelin 미세먼지 조성 자료 및 북극 항차 환북극 지역 미세먼지 화학조성 측정(100%) - Zeppelin 및 환북극 지역 산란 및 흡수 계수 자료를 이용, 에어로졸 수분 특성 및 모수화 연구 적용(100%)	위탁과제보고서 3-5. 북극 항차 측정자료 현황 및 미세먼지 및 광학 특성 자료
			4차년도 (2단계 2차년도)	○ 북극지역 에어로졸의 광흡수 특성 분석 (BC/CO 분석 결과 1건) ○ 북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성 기여도 산출(북극지역 반응별 황산염 기여도 자료 분석결과 1건)	- 북극지역 에어로졸의 광흡수특성 분석 및 기여도 분석(100%) - 북극지역 황산염 등 흡습성 입자의 대기 수분에 의한 CCN/IN 등 에어로졸 생성모사 (100%) - Arctic Haze를 포함한 황산염 고농도 사례의 액상반응에 의한 황산염 생성 매커니즘 파악 및 액상반응에 의한 기여도 파악(100%)	위탁과제보고서 4-4.BC/CO 분석 결과 4-5. 황산염 기여도 산출 알고리즘 4-6. 게재논문
합계	100					

극지연구소

□ 4위탁과제(고려대학교 : 북극권 환경 변화와 기후변화감시물질 변동성 상호연계성 연구)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정량) 북극, 유라시아, 아시아 지역 기후/환경인자 및 기후변화감시요소 중 대기조성물질 자료 조사 및 수집	30	1	1차년도 (1단계 1차년도)	기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 자료 수집(관측과 재분석 위주)	2차 연도 자료산출: 재분석 및 위성 관측으로부터 기후 7건, 환경 2건, 해양 5건, 대기조성 5건 총 19건 수집 (100%)	위탁과제보고서 1차 연도 보고서: p4~p28
			2차년도 (1단계 2차년도)	다양한 모델로부터 기후/환경인자 및 대기조성물질 자료 수집		
			3차년도 (2단계 1차년도)	신규 데이터 지속적 업데이트		위탁과제보고서 2차 연도 보고서: p8~p18
			4차년도 (2단계 2차년도)	해당사항 없음		
(정량) 북극권 기후/환경인자 및 북극, 유라시아, 아시아 지역 기후변화감시요소 중 대기조성물질 자료 검증	30	2	1차년도 (1단계 1차년도)	2차년도부터 수행	수집된 자료 중 산불기원 에어로졸 영향 연구에 사용된 인자와 기후 바람 인자를 제외하고 시공간 시각화 (100%)	위탁과제보고서 2차 연도 보고서: p8~p18
			2차년도 (1단계 2차년도)	기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 변화/변동 경향 분석 정보 산출 (자료 산출물에 대한 시공간 분포 시각화 포함, 총 12건)		
			3차년도 (2단계 1차년도)	해당사항 없음		
			4차년도 (2단계 2차년도)	해당사항 없음		
(정량/정성) 기후/환경인자 및 기후변화감시요소 중 대기조성물질 자료 시공간 지역별 변동성 분석 및 이해	40	3	1차년도 (1단계 1차년도)	3차년도부터 수행		
			2차년도 (1단계 2차년도)	3차년도부터 수행		
			3차년도 (2단계 1차년도)	지역별 기후/환경인자 및 대기조성물질 자료 시공간 변동성 분석(국내 논문 1건)	북극 환경변화에 따라 오염물질이 어떤 영향을 받는지 이해하기 위해 대기 조성물질 배출이 높은 지역별 기후인자와 대기 조성물질의 연관성을 확인한 결과를 국문 논문으로 출판(3차연도) (100%)	위탁과제보고서 3차 연도 보고서 및 국문 논문 “기후인자와 관련된 동아시아 봄과 가을 PM 2.5 농도 이해” 기후연구지 18(3) 197-208 (증빙2)
			4차년도 (2단계 2차년도)	기후/환경인자 및 대기조성물질 자료 시공간 변동성 분석 및 이해(SCIE급 논문 1건, mrnIF 70이상))	Marine Pollution Bulletin 영문 논문 출판 (100%)	Marine Pollution Bulletin, 201, 116149. (증빙1)
합계	100					

KOPRI 극지연구소

□ 5위탁과제(고려대학교 : 북극권 환경변화에 따른 식생별 탄소 flux의 거동 연구)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정성) 북극 툰드라 생태계의 주요 식생별 탄소 플럭스 분석	30	1	1차년도 (1단계 1차년도)	북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	환북극 지역 툰드라 식생의 특징과 종류 및 환경을 파악하고 툰드라 생태계에서의 이산화탄소 플럭스의 발생과 흡수 관련 조건을 파악(100%)	위탁과제보고서 1. page 7~8
			2차년도 (1단계 2차년도)	북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정 (RFP 충족) (관련 SCI급 논문 1편)	관목, 초본, 이끼류, 지의류 등 다양한 식생에서 순이산화탄소 교환량과 호흡량을 이용하여 광합성량을 추정하였고, 일부 관련 자료를 이용한 논문 출판(100%)	위탁과제보고서 2. page 12, 16~17, 3. Virkkala et al.(2022)
			3차년도 (2단계 1차년도)	–	–	
			4차년도 (2단계 2차년도)	–	–	
(정성) 북극 동토의 다양한 환경조건에서 식생별 탄소 플럭스 거동 분석	30	1,2	1차년도 (1단계 1차년도)	북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	환북극 지역의 다양한 환경에서 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 및 광합성량의 분포와 정량적인 값을 파악(100%)	위탁과제보고서 4. page 10~11
			2차년도 (1단계 2차년도)	북극 동토의 다양한 환경조건에서 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석	식생 및 토양 조건에 따른 이산화탄소와 메탄 플럭스를 분석하였고, 습한 초지에서 활발한 이산화탄소 교환량을 확인할 수 있었고, 메탄 플럭스는 습한 나지에서 지속적으로 대기로 방출하였음(100%)	위탁과제보고서 5. page 11~13
			3차년도 (2단계 1차년도)	북극 동토의 다양한 환경조건에서 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석	극지의 주요 식생인 초본, 이끼류, 지의류에서 기온과 토양 수분에 따른 해빙시기 이산화탄소 및 메탄플럭스를 측정하여 광합성을 통한 식생의 흡수와 미생물에 의한 대기중 방출을 통해 탄소 플럭스 변화를 파악(100%)	위탁과제보고서 6. page 14 ~15
			4차년도 (2단계 2차년도)	–	–	
(정량) 툰드라 생태계 탄소플럭스 자료(DB) 구축	20	1,2	1차년도 (1단계 1차년도)	북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	7월부터 9월 초까지 알래스카 식생 성장기 전반에 대하여 알래스카 관목과 이끼류에 대하여 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 자료를 확보하고 이를 이용해 광합성량을 계산하여 탄소순환을 구성하는 각 성분별 탄소 플럭스 자료를 확보하였고 관련 자료를 이용한 논문 출판(100%)	위탁과제보고서 7. page 16~17 위탁과제보고서 8. Virkkala et al.(2021)
			2차년도 (1단계	북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량	다양한 식생과 환경 조건에 대한 온실기체 플럭스의 반	위탁과제보고서 9. page

			2차년도)	과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	응을 조사하고자 해빙시기의 자동 챔버 시스템을 구축하여 이산화탄소 플럭스 자료를 확보(100%)	18~19
			3차년도 (2단계 1차년도)	북극 동토의 다양한 환경조건에서 주요 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석 (RFP 충족) (관련 SCI급 논문 1편, 상위 20% 이내)	북극의 해빙기 동안 초본, 이끼, 지의류 등 다양한 식생에 대하여 토양 상태가 습한 정도, 식생의 유무, 인위적인 수분 조절(snow fence), 실내 토양수분 조절 실험(SCI급 논문 1편 출판) 등 다양한 환경조건에 따른 이산화탄소 및 메탄 플럭스 자료를 확보하여 세부1의 에디공분산 자료와의 비교하고, 나아가 모델링 검증 자료로 확보(100%)	위탁과제보고서 10. page 15, 19~20 11. Kim et al.(2022) 논문
			4차년도 (2단계 2차년도)	-	-	
(정성) 북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명	20	1,2	1차년도 (1단계 1차년도)	북극 해빙시기의 주요 식생별 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	북극 식생의 성장기 동안 관목과 이끼류에 대하여 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 자료를 이용해 광합성량을 추정하면서 관목과 이끼류 식생에서의 이산화탄소 플럭스 차이를 확인할 수 있었음(100%)	위탁과제보고서 7. page 16~17
			2차년도 (1단계 2차년도)	북극 해빙시기의 주요 식생별 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	이끼, 초본, 지의류가 혼합된 지점에서 이산화탄소 플럭스를 분석하였고, 순이산환탄소 플럭스와 호흡량을 이용하여 광합성량을 추정하였음(100%)	위탁과제보고서 12. page 11~12
			3차년도 (2단계 1차년도)	북극 동토의 다양한 환경조건에서 주요 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석	북극 툰드라 생태계에서 식생의 광합성을 조절하는 인자 중 해빙시기에 매우 중요한 토양수분 조건을 고려하여 탄소 플럭스 변화를 감시하면서 식생의 역할을 조사(100%)	위탁과제보고서 13. page 14
			4차년도 (2단계 2차년도)	북극 동토의 다양한 환경조건에서 주요 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석	토양 수분이 지속적으로 공급되는 초본 식생에서 이끼류와 지의류에서 보다 큰 차이(~3배)의 광합성과 호흡량의 차이를 보임. 해빙시기 탄소 플럭스의 정량적인 값을 이용하여 두 편의 논문 출판(100%)	위탁과제보고서 14. page 16 위탁과제보고서 15 Lee et al(2024) 논문 위탁과제보고서 16. See et al.(2024) 논문
합계	100					

KOPRI 극지연구소

□ 6위탁과제(서울대학교 : 위성 영상 기반 북극 동토지역 이산화탄소 플럭스 모니터링)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정성) BESS-Polar를 모델을 위한 입력자료 구축 및 데이터 전처리	20	1	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발을 위한 입력자료 다운로드 및 전처리 - 모델 입력자료 구축 (위성 자료 다운로드 및 그리드화된 자료들 구축) - 데이터 전처리 (공간해상도를 0.05도로 바꾸고, WGS-84 위경도로 재투영)	- BESS-Polar 모델 입력자료 정리(100%) - 입력자료 다운로드 (위성자료 포함)(100%) - 입력자료 간 다른 공간좌표 재투영 (WGS-84) 및 0.05° 공간해상도에 맞추어 리샘플링(100%)	위탁과제보고서 첨부1-관련증빙1 참고
			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발, 호흡 모듈 개발 - 시공간적으로 일관된 자료 구축 (AVHRR과 MODIS 자료가 겹치는 기간 동안 교차 보정	- 1단계 1차년도에 수행된 자료들을 바탕으로 AVHRR 기반 입력자료들을 MODIS에 맞추어 상호 교정 수행 완료(100%)	위탁과제보고서 첨부1-관련증빙2 참고
(정성) BESS-Polar를 개발하고, 생태계호흡량 및 순생태계교환량 모듈 개발	20	1	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발을 위한 입력자료 구축 및 데이터 전처리	- BESS-Polar 모델 입력자료 정리(100%) - 입력자료 다운로드 (위성자료 포함)(100%) - 입력자료 간 다른 공간좌표 재투영 (WGS-84) 및 0.05° 공간해상도에 맞추어 리샘플링 (100%)	위탁과제보고서 첨부1-관련증빙1 참고
			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 생물리기작 모델 BESS-Polar을 개발하여 호흡 모듈개발, 총일차생산량, 생태계호흡량, 순 생태계교환량 산출 - 프로그래밍으로 알고리즘 구현 및 스크립트 작성 제시	- 호흡 및 순 생태계교환량 모듈이 포함된 BESS-Polar 스크립트 작성(100%)	위탁과제보고서 첨부1-관련증빙3 참고
			3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 1982-2022년 기간동안의 BESS-Polar 탄소 플럭스 지도 제작	- 1단계를 통해 개발된 BESS-Polar의 정량화된 탄소 플럭스 지도 제작 (100%)	위탁과제보고서 첨부1-관련증빙4 참고
(정성) BESS-Polar 탄소 플럭스를 현장 단위 및 지역 단위 성능 평가	20	1,2,	2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 생물리기작 모델 BESS-Polar의 호흡 모듈을 개발하여 총일차생산량, 생태계호흡량, 순 생태계교환량 산출	- 생물리기작 모델 BESS-Polar의 정량화된 탄소 플럭스 지도(100%)	위탁과제보고서 첨부1-관련증빙4 참고
			3차년도 (2단계 1차년도)	▪ BESS-Polar 탄소 플럭스를 현장 단위에서 평가 (FLUXNET과 극지연 확보 자료를 활용하여 현장검증) ▪ BESS-Polar 탄소 플럭스를 지연 단위로 평가 (머신러닝 기반의 국외 모델의 탄소플럭스와 비교검증)	- FLUXNET과 KPDC의 현장 자료 활용 BESS- Polar과 비교, 분석 (100%) - FLUXCOM의 탄소 플럭스 모델과 BESS-Polar 비교 분석 (100%)	위탁과제보고서 첨부1-관련증빙5 참고
(정성) 극지방의 순 생태교환량을 시공간 패턴을 분석 (1982~2022)	20	2	4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 극지방 탄소 플럭스의 연간 변동성 분석	- 1982~2022년 기간 동안 북위 60도 이상 극지방의 탄소플럭스(총일차생산량, 호흡량 및 순 생태계교환량)의 추세파악을 위한 시간적 변화패턴 분석(100%) - 1982~2022년 기간 동안의 극지방 탄소플럭스의연간 변동성 분석 (100%)	위탁과제보고서 첨부1-관련증빙6 참고
(정량) 논문 또는 특허 창출 계획	20	1,2	4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 개발한 호흡 모듈 혹은 순 생태계교환량을 활용한 mrnIF 80 이상의 논문 1편 출판	- 개발한 호흡 모듈 혹은 순 생태계교환량을 활용한 mrnIF 80 이상의 논문 1편 출판(100%)	위탁과제보고서 첨부1-관련증빙7 참고
합계	100					

3. 목표 미달 시 원인 분석

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 본 과제 책임자 및 참여연구원 등으로 인한 목표 미달 사항 없음
- 단, 러시아 바라노바 거점에서의 현장조사 및 데이터 확보 미흡(사유 : 2021년 7월 러시아 AARI로부터 바라노바 거점 한-러시아 공동 연구 협약 갱신이 상급기관(러시아 정부)에 의한 중단 상태임을 통보 받음. 2021년 3월 이후 자료 확보 현재 불가(※ 러-우 전쟁으로 인한 러시아 북극 영역에서의 타국 과학활동 불가))

2) 자체 보완활동

러시아에서 수행하려던, 거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단 부분을,

- 그린란드 노르드 거점의 확장 측면에서 Sirius Passet 지역으로 확대('21.12월경 측정시스템 설치 완료함)하고,
- 러시아 동토거점 기반 에어로졸 관측 데이터 획득 및 특성 분석에 대해 쇄빙연구선의 북극항차시 동승하여 관측 자료를 북극 동토 거점 관측 자료와 비교하기 위해 에어로졸 포집 및 관측 수행함(북극 동토 지역으로 유입되는 에어로졸 장거리 이동 평가와 중위도의 영향을 평가에 활용)

3) 연구개발 과정의 성실성

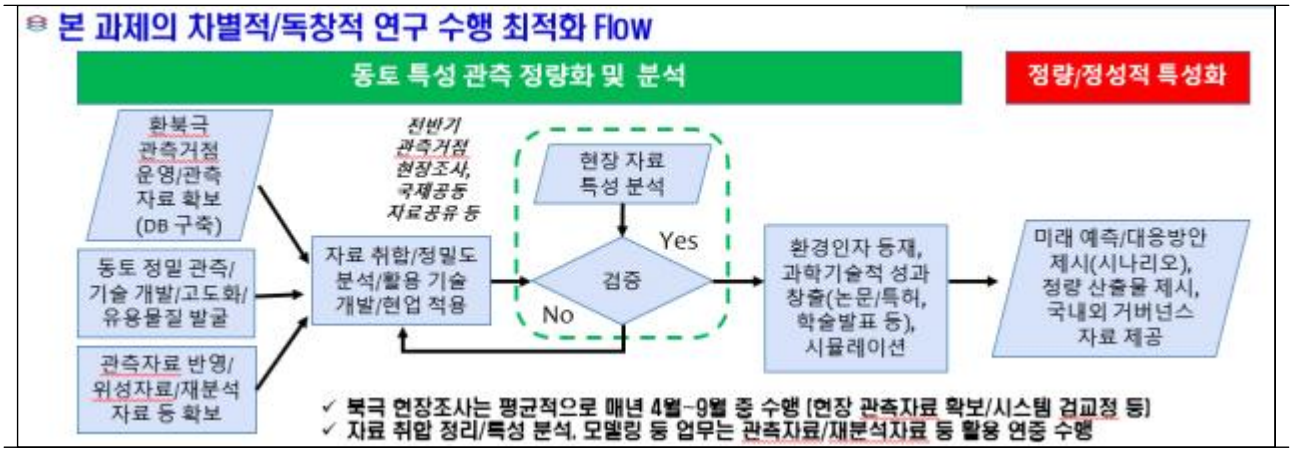
□ 북극권 동토층 환경변화 관측거점 확보 및 기초·원천기술 개발 연구 수행(종합)

- **국내 최초로 국제공동 북극권 대기-육상(동토, 생태)-피오르드·연안 기후환경변화 연구 진행(북극권 영역에서의 table setter이며 first mover 사업)**
  - ※ 북극이사회 6개 국가 동토 지역에 기후환경변화 정밀측정 및 현장조사용 관측거점* 확보(우리나라와 북극이사회 6개 국가 간 협약체결), 북극연구 영역 확보
  - * 6개 관측거점[미국(알래스카, '11년), 캐나다(캠브리지베이, '12년), 노르웨이(스발바르, '12년), 덴마크(그린란드(노르드), '15년), 아이슬란드(스토르호피이, '16년), 러시아(바라노바, '16년)] 설치/운영(단, 러시아는 국제 정세에 따라 현재는 잠정 중단 상태임)
- **관측거점 및 주변 지역에서의 정밀 측정시스템 및 입체형 무인측정시스템/전송기술 개발(cyber-network)과 적용, 현장 심층 조사 고도화 수행**
  - 북극 기후환경변화 관련 환경인자(environmental factors, CID) 독자 확보 및 DB 구축, 수혜자에 공개
  - 북극 대기-동토-생태계 등 물질 및 에너지 교환 정밀 모니터링 빅데이터 DB 구축 및 동토 생태계 기후변화 취약성 평가 결과 도출

- 북극권은 러시아 뿐만 아니라, 북극이사회 8개 국가의 주권이 행사되는 영역이므로, 위와 같은 상황은 언제라도 발생 가능성 있음을 시사함. 이에 본 과제에서는 '국가연구개발사업' 으로서의 임무와 취지에 맞도록 상대국가와의 긴밀한 협조 체제 유지에 노력하고 있으며, 이후 북극권 국가와의 북극권 환경변화 이슈 대응에 대한 공동연구를 지속함과 동시에 옵서버 국가로서의 책임을 다하려고 함.
- 아울러 광활한 북극권 동토 지역을 대상으로 보다 폭넓은 기후환경변화의 환경인자를 자체 확보하고 분석함으로써, 궁극적으로 우리나라에 미치는 영향성 분석과 미래 대응안 마련에 성실히 노력하고 있음

□ 북극이사회 참여 국가와 국제공동연구협력 강화(종합)

※ 북극이사회 정식옵서버 국가의 정부 R&D 사업 자격으로 북극이사회 6개 국가 및 독일, 이탈리아 등 EU 북극 연구 국가와의 지속적 국제공동연구 체제 마련 및 가동


본 과제의 차별적/독창적 연구 수행 최적화 Flow
동토 특성 관측 정량화 및 분석
정량/정성적 특성화
화북극 관측거점 운영/관측 자료 확보 (DB 구축)
동토 정밀 관측/기술 개발/고도화/유용물질 발굴
관측자료 반영/위성자료/재분석 자료 등 확보
진반기 관측거점 현장조사, 국제공동 자료공유 등
자료 취합/정밀도 분석/활용 기술 개발/현업 적용
현장 자료 특성 분석
검증
Yes
No
환경인자 등재, 과학기술적 성과 창출(논문/특허, 학술발표 등), 시뮬레이션
미래 예측/대응방안 제시(시나리오), 정량 산출물 제시, 국내외 거버넌스 자료 제공
✓ 북극 현장조사는 평균적으로 매년 4월-9월 중 수행 (현장 관측자료 확보/시스템 검교정 등)
✓ 자료 취합 정리/특성 분석, 모델링 등 업무는 관측자료/재분석자료 등 활용 연중 수행

KOPRI
극지연구소

4. 연구개발 목표 및 주요내용 변경사항 (4차년도만 해당)

구분	변경 전 (당초 연구목표/내용)	변경 후 (수정 연구목표/내용)	변경 사유 및 조치사항	협약변경 승인일
1세부 과제	• 북극권 육상-대기 관측망 국제네트워크 가입 • 실측/위성/재분석 자료 활용 북극권 육상 탄소 순환 분석 • 북극권 온실기체 미래 배출 전망 육상 탄소순환 평가 • 에어로졸 정밀측정 플랫폼 정상 가동 및 북극 현장 집중 캠페인 실시 • 동토 식생DB 5건(누적 18건) • 동토 온실기체 거동변화 관련 논문 2편(상위 20% 1편 포함) • 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현 • Smart Polar Platform 구축(통신거리 ≥5 km) • 동토층 환경인자 특성 자료 통합 분석 (128 노드) • 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 추가 (누적 5건) - 고분해능 에어로졸 화학조성 • 북극 동토 기반 에어로졸의 기후적 역할 규명 논문 2편 (NSC/자매지 1편 포함)	〈해당내용 변경없이 수행〉 • 실측/위성/재분석 자료 활용 북극권 육상 탄소 순환 분석 • 동토 식생DB 5건(누적 18건) • 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 추가 (누적 5건) - 고분해능 에어로졸 화학조성 〈해당내용 축소/변경/중단〉 • 회의, 워크숍 참석 등 국제 교류 제한으로 북극권 육상-대기 관측망 국제 네트워크 가입 불가(중단) • 북극권 온실기체 미래 배출 전망 육상 탄소 순환 평가는 극지방 탄소 플럭스의 장기 추세 분석 미수행(중단)(위탁과제 연구비 감액과 연계하여 협연 불가) • 에어로졸 플랫폼 국내로 변경(조정)하여 배경대기 관측 수행 • 동토 온실기체 거동변화 관련 논문 1편(상위 20% 1편 포함)(지표 축소) • 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 축소 구현 • Smart Polar Platform 구축(모니터링 현장 통신거리 ≥3 km로 목표 하향 조정; 동토 모니터링 현장 지역 토지소유자인 알래스카 원주민에 추가 토지사용료 납입/협의 어려움) • 북극 동토 기반 에어로졸의 기후적 역할 규명 논문 1편 (*NSC/자매지 또는 상위 10% 1편* 포함)(축소)	(전반적인 변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한 일부 목표 축소/변경/중단으로 조정 등임) • 온실기체 미래배출 전망에 대해서 위탁과제-5와의 긴밀한 연계로 수행되었지만, 예산 감액으로 미수행 결정, 달성 불가 • 연구비 감액으로 에어로졸 플랫폼 북극동토 연구 거점 집중 캠페인 미실시 --> 국내 적지에 설치하여 테스트와 병행으로 배경대기 관측으로 대체 • 연구비 감액으로 인한 목표 하향 조정 등 • 현장연구 축소에 따른 연속적인 자료 확보 제약이 예상되는 바, "*NSC/자매지 또는 상위 10% 1편* 포함"으로 지표 변경	협약용 연차보고서 승인일
국제학술 용역 (UAF)	▪ 온실효과기체의 방출량 및 환경제어인자를 이용한 지표면 생태모형 개발	〈해당내용 변경없이 수행〉 • 지표면 생태모형의 개발에 집중	(변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한 일부 목표 축소/변경/중단으로	협약용 연차보고서 승인일

	▪ 탄소순환 및 수지의 정량적 평가를 위한 관측자료-지표면 생태모형-인공위성의 유기적 연구 ▪ 알래스카 육상생태계에 적합한 지표면 생태모형 개발을 위한 온실효과기체 및 환경제어인자의 입력 자료로서의 가치 평가 ▪ 자연재해로 인한 육상생태계의 반응의 결과로 온실효과기체 및 환경인자의 특성을 활용한 인공위성 및 지표면 생태모형의 재현 기술 개발 ▪ 적설면적 및 적설량의 변화로 인한 토양 및 줄기기원온실효과기체의 정량적 방출량 산정 ▪ 지표면 생태모형 및 인공위성 자료와 상호검증 및 활용도평가	〈해당내용 축소/변경/중단〉 • 필수관측(종단관측과 카운실/쿠가룩)의 중단 • 카운실 및 알래스카 종단 관측을 위한 현장조사 중단으로 페어뱅크스 주변 육상생태계에서 집중 관측으로 영역 변경	조정 등임)	(2024.03.20)
1세부 1위탁과제 (GIST)	▪ 북극권 환경변화 요인(대기 온도, 습도, 바닷물 특성 (온도, 생물학적 특성 등), 해빙 면적 등)과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명 ▪ 북극권 나노입자 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악 ▪ 다양한 지역 (도심, 농촌지역 등)에서 확보된 나노입자의 생성 특성 자료와 비교분석을 통해 북극 지역의 나노입자 생성 특성의 차별성 및 유사성 도출(+인공지능 기법 활용)	〈해당내용 변경없이 수행〉 • 북극권 환경변화 요인(대기 온도, 습도, 바닷물 특성 (온도, 생물학적 특성 등), 해빙 면적 등)과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명 • 다양한 지역 나노입자의 생성 특성자료와 비교분석 〈해당내용 축소/변경/중단〉 • 북극권 에어로졸 나노입자 아이슬란드 측정 미실시(중단): 기존 측정 자료 분석으로 대체 • 인공지능기법 활용 나노입자 생성 예측 모델 개발 미수행(중단)	(변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한 일부 목표 축소/변경/중단으로 조정 등임)	협약용 연차보고서 승인일
1세부 2위탁과제 (GIST)	• 2016~2023년 MODIS 관측 종합 분석 • Optimal Interpolation 기법 자료동화 수행 • Optimized Run 모의자료 및 MODIS/AERONET 광학 관측자료 통합 활용 • (RFP 충족) SCI급 논문 1편(상위 20% 이내,	〈해당내용 변경없이 수행〉	해당사항 없음 (당초 목표 이행, 완료 예정)	당초 목표 이행, 완료 예정

	과제목표와 관련성 있는 논문 게재)			
1세부 3위탁과제 (경인여대)	• 북극 미세먼지의 크기분포 및 흡습성장 특성에 따른 기후변화 영향 파악 • 북극지역 에어로졸의 크기분포에 따른 산란 및 흡수계수 변화 산출 및 광학계수 모수화 (크기분포에 따른 광하계수 모수화 자료산출 1건, SCI논문 1편) • 북극지역 에어로졸의 크기분포 특성과 흡습성장 모수화 • 북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성 기여도 산출(북극지역 반응별 황산염 기여도 자료 산출 1건, SCI논문 1편) • 최근 3년간 북극지역 미세먼지 특성에 영향을 줄 수 있는 기상 정보 파악 • 최근 3년간 북극지역 미세먼지 특성에 영향 미치는 기상 정보 파악 (기상자료 산출 1건)	〈해당내용 변경없이 수행〉 • 북극 미세먼지의 크기분포 및 흡습성장 특성에 따른 광학특성 모수화 • 북극지역 황산염 미세먼지 특성에 영향 요소 분석 〈해당내용 축소/변경〉 • 북극지역 에어로졸의 광흡수특성 분석(변경) (BC/CO 분석 자료 1건) • 북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성 기여도 산출(북극지역 반응별 황산염 기여도 분석결과 1건)(변경)	- SCI 논문 기 발표로 인한 연차별 정량적 목표 조정 (변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한 일부 목표 축소/변경으로 조정 등임)	협약용 연차보고서 승인일 (2024.03.20)
1세부 4위탁과제 (고려대)	• 기후/환경인자 및 대기 조성물질 자료 시공간 변동성 분석 및 이해 (SCIE급 논문 1건, mrnIF 70 이상)	〈해당내용 변경없이 수행〉	해당사항 없음 (당초 목표 이행, 완료 예정)	당초 목표 이행, 완료 예정
1세부 5위탁과제 (고려대)	• 북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명 • 식생 및 토양에서의 툰드라 생태계 탄소순환 특징 분석 • 탄소순환에서 동토 환경인자와 상관관계 파악 및 식생의 종류에 따른 영향 분석 • 식생의 성장과 식생분포에 따른 탄소순환의 변화 파악, 기후변화에 따른 동토 시스템의 탄소순환 설명	〈해당내용 변경없이 수행〉 • 북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명 • 식생 및 토양에서의 툰드라 생태계 탄소순환 특징 분석 • 탄소순환에서 동토 환경인자와 상관관계 파악 및 식생의 종류에 따른 영향 분석 〈해당내용 중단〉 • 식생의 성장과 식생 분포에 따른 탄소순환 변화 파악, 기후변화에 따른 동토 시스템의 탄소순환 (중단)	(변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한 일부 목표 중단으로 조정 등임)	협약용 연차보고서 승인일 (2024.03.20)
1세부 6위탁과제	• 극지방의 순생태교환량을 시공간 패턴 분석	〈해당내용 변경없이 수행〉 • 극지방의 순생태교환량	(변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한	협약용 연차보고서

KOPRI 극지연구소

(서울대)	(1982~2022) • 극지방 탄소플럭스의 연간변동성 분석 • 극지방 탄소플럭스의 장기 추세 분석 • 개발한 호흡모듈 혹은 순생산량 활용하여 mrnIF 80 이상의 논문 1편 출판 • 탄소플럭스의 시공간 패턴 분석을 이용한 mrnIF 80 이상의 논문 1편 출판	시공간 패턴 분석 (1982~2022) • 극지방 탄소플럭스의 연간변동성 분석 • 개발한 호흡모듈 혹은 순생산량 활용하여 mrnIF 80 이상의 논문 1편 출판 〈해당내용 중단〉 • 극지방 탄소플럭스의 장기 추세 분석 미수행 (중단)	일부 목표 중단으로 조정 등임)	승인일 (2024.03.20)

5. 선정/단계/연차점검의견

선정평가	1. 종합의견 : 2. 수정 및 보완사항 : 3. (필요시)연구비 조정사항 :	해당 내용에 대해 아래 표로 별도 제시
단계평가	1. 종합의견 : 2. 수정 및 보완사항 : 3. (필요시)연구비 조정사항 :	특이사항 없음
2단계 1차년도 연차점검	1. 종합의견 : 2. 수정 및 보완사항 : 3. (필요시)연구비 조정사항 :	
2단계 2차년도 연차점검	1. 종합의견 : 2. 수정 및 보완사항 : 3. (필요시)연구비 조정사항 :	

KOPRI 극지연구소

※ 본 자료는, 선정평가 시 및 1단계 평가의견을 수렴하여, 당초 연구계획서에 기 반영하여 작성, 제출하였으며, 2단계 1차년도 연차점검 시 점검의견은 없음

선정평가 시 평가의견	수정 및 보완 내용	해당 페이지	비고
〈 우수한 점 〉 -극지환경변화 연구를 통해 기후환경 관련 원천기술 확보로 북극 동토 지역 환경변화에 대한 이해와 예측, 대응방안 제시를 위해서 국가 연구 지원이 필요함. -북극이사회에 우리나라가 옵서버로 참여하고 있기 때문에, 우리의 북극연구에서의 과학적 성과, 역량을 보여줄 수 있는 기회를 제공한다는 점에서 이 과제는 매우 필요해 보임. -연구책임자 및 참여연구원의 연구 경험과 역량은 우수한 것으로 사료됨. -연구 결과에 대한 실적 산출 가능성이 높음. 플랫폼 개발에	해당사항 없음		

따른 활용가능성이 매우 높다고 판단됨. 전체적인 연구 내용이 균형이 잡혀 있으며, 현재 필요성이 증대되는 극지의 자체 관측 자료를 획득한다는 측면에서 중요한 연구임. -부족한 극지 연구에 대한 관심과 지속적인 과제 연계성을 위해 필요한 연구로 보임. 또한, 이전 10년간의 연구 성과 및 자료 등의 지속성 및 연계 연구를 위해서도 부합하는 연구로 생각됨. -국제공동연구, 대기, 기후, 생지, 생태 등 다각도로 극지의 변화를 통해 분석할 예정으로 특히, 난분해 유기 물질 분해 효소 확보 및 생물리화학적 특성 분석이 우수함.			
〈 미흡한 점 〉			
-현재 수행하고자 하는 과제와 기존에 수행한 과제와의 차별성을 구체적으로, 뚜렷하게 제시할 필요가 있음.	○ (1세부과제) • 관측고도화 및 DB고도화, 에어로졸 등 연구분야에 기존연구와 신규연구의 차별성 명확하게 보완하였음 • 모니터링 네트워크 시스템 구축 내용 보완하였음	세부단계보고서 p.321~323	
-기존 북극 관측 자료 및 네트워크와 현 과제의 관측에 대한 차별성을 명확하게 할 필요가 있음.	○ (1세부과제) 에어로졸 분야 및 관측 거점 고도화 계획 등에 대해서 보완하였음	세부단계보고서 p.321~323	
-기후의 문제에서는 대기의 성층권 분석이 필요함. 그러나 본 계획서에서는 성층권과 관련된 연구 내용이 부족함.	○ (1세부과제) 성층권 연구관련한 내용에 대해 설명 삽입하였음	세부단계보고서 p.321~323	
-과제제안요구서의 연구목표(최종목표)가 단계별 목표와 연계성이 약해 보임.(각 세부과제가 최종목표 및 다른 과제들과 어떤 연계성이 있는지 제시가 필요함)	○ (1세부과제) 과제와 위탁과제간의 업무 및 연계성에 대해 보완하였음	세부단계보고서 p.4~5	
-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.	○ (1세부과제) 대기와 육상에서의 기상 및 에어로졸 등 연구분야의 5세부과제 미래 예측 관련 사항을 삽입하였음	세부단계보고서 p.321~323	
-구축된 DB의 활용방안이 필요할 것으로 판단됨. 선진국 대비 연구수준 이후에 본연구가 차별성의 구체화가 필요함.	○ (1세부과제) 현재 구축되어 있거나 향후 구축할 DB는 본 과제 관련 연구는 물론, 극지연구소의 KPDC에 등재하여 필요한 국내외 연구자에게 배포, 연구활동에 활용토록 하고 있음. 북극권 육상-대기 상호작용 모델링연구에 제공 등 제시하는 내용 삽입하였음	세부단계보고서 p.321~323	
-확보된 현장 연구자료 및 연	○ (1세부과제) 북극권 환경변화에 대	세부단계보고서	

KOPRI 극지연구소

구성과들이 향후 4년 동안 어떻게 활용될 것인지에 대한 구체적인 제시보다 나열식 설명만 있어 아쉬움.	한 기초 데이터 확보 및 관측시스템 고도화로 환경인자의 종류와 관측 기간 확대 시 온실기체 변동성 분석 및 기상/식생/토양 환경인자의 정량적 관계식 분석에 활용 가능에 대한 내용을 보완하였음	p.321~323	
-극지지역의 극궤도위성(MODIS)의 지표반사도에 의한 부족한 AOD자료 및 해당 지역의 부족한 AERONET의 관측 수와 데이터 부족에 대한 방안이 필요함. 또한 이러한 부족한 원격탐사의 자료를 가지고 북극의 배출량 산정에 대한 계획이 필요함.	○ (1세부과제) 본 과제와 해당 세부과제 및 위탁과제 내용과 연계하여 수행할 것임	세부단계보고서 p.321~323	
-국내외 기관들 간의 구체적인 협력 방안에 대한 제시가 미흡함.	○ (1세부과제) 해당 사항에 대해 설명 내용 보완하였음	세부단계보고서 p.4~5, p.321~323	
-해외 기관들과의 협업에 대한 구체적인 플랜 및 스케줄이 제시 또는 제안되면 더 좋을 것 같음.	○ (1세부과제) 해외 기관들간의 협업 내용에 대해 보완하였음	세부단계보고서 p.4~5, p.321~323	
<조정/권고사항>			
-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.	○ (1세부과제) 기상, 에어로졸, DMS, 동토 대상 각 측정요소별 특성을 분석하고, 이에 대한 자료는 5세부과제의 모델링 및 미래 예측에 기여하는 내용을 부가적으로 설명 보완하였음	세부단계보고서 p.4~5, p.321~323	
-세부과제간의 상관관계 및 세부과제 내의 위탁연구들과의 관련성에 대한 구체적인 제시가 필요함.	○ (1세부과제) 1세부과제에서의 대기환경인자 확보 및 수치모델링 검증 및 개선 자료로 활용되는 구체적 내용을 보완 삽입하였음	세부단계보고서 p.338~344	
-과제목표와 내용의 경우 정량적으로 제시할 수 있는 것은 추가적으로 구체적으로 제시하는 것이 필요함.	○ (1세부과제) • 과제목표 및 연구내용에서 최대한 정량적 제시 계획 • 동토 환경인자 관측 및 분석을 위한 Smart Polar Platform 구축의 정량 성과를 제시하였음	세부단계보고서 p.1,2,5	
-분야가 다양해서 이를 잘 융합하는 과정이 필요함. 다양한 자료 확보에 대한 방안은 제시하였으나 이에 대한 활용 방안이 정확하지 않음. 이에 대한 구체적인 내용 추가가 요구됨.	○ (1세부과제) 각 주제별 수행내용과 활용성 및 파급효과 내용을 추가하였음	세부단계보고서 p.338~344	
-각 세부과제에서 수행된 결과가 다른 과제(특히 과제5)에 어떻게 사용/활용 되는지 기술할 필요가 있음.(현 제안서에서는 과제간의 연계성이 잘 나타나지 않음.	○ (1세부과제) 1세부과제에서 획득되는 대기환경인자에 대한 장기간 연속 시계열 자료를 수치모델링 검증 및 개선 자료로 활용하는 내용을 삽입하였음	세부단계보고서 p.4~5	

-결과물로 산출되는 논문이 일반적인 내용보다는 과제목표와 직접적으로 관련이 있는 논문이면 좋을 것 같음.	○ (1세부과제) 본 과제에서 계획하고 제시한 논문은 모두 과제목표와 일관되게 직접적인 관련성 있는 논문만 제시하는 것으로 보완	세부단계보고서 p.302	
-국외 연구기관과의 연계를 위해 협력과 데이터 사용에 관한 참여의향서가 반드시 필요해 보임.	○ (1세부과제) 본 연구를 위한 미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드, 아이슬란드, 러시아 등 국가와의 연구 활동확인서를 삽입하였음-이를 근거로 북극권 6개 국가와의 공동연구 수행	세부단계보고서 p.490~505	
<연구비 조정의견(필요시) > ※ 연구비 의견 3개 항목(감액/유지/증액) 중 택일 후 검토의견 기재 -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.	○ (총괄/1세부과제) • 본 과제에서 계획한 연차별 소요예산(각 세부과제/위탁과제 포함)은, 각 거점 운영과 현장 조사, 학술활동 및 관련 업무를 수행하는 것을 고려하여 적정하게 편성하였음. 아울러 각 위탁과제도 현장조사와 실험실 분석, 모델 가동 등의 수행 내용을 고려하여 연구비를 차등하게 배분하였음	코멘트	수정불필요

KOPRI 극지연구소

1단계 평가의견 (수정 및 보완사항)	수정 및 보완 내용	해당 페이지	비고
우수한점			
- 1단계 연구성과 및 실적은 매우 우수함 - 최근 전 지구적으로 관심의 대상인 북극지역에 대해 현장 관측을 위한 관측기지 구축, 자료 분석 그리고 이를 기반으로 한 미래 육상-대기환경 변화를 예측 하려고 한 점 - 코로나19 유행, 러-우크라이나 전쟁 등 외부환경 변화에도 각 세부과제들이 소기의 성과를 도출한 점 - 짧은 연구기간에도 우수한 논문을 다수 출간한 점 - 북극권 연구의 과학기술/학술적 연구 성과 및 역량 제고를 위한 연구 필요성 및 중요성 - 북극권 연구자료의 지속적인 확보 및 활용 가능성 - 최근 극지/해양 연구의 중요성이 강조되고 있다는 점에서 과제의 시의성이 인정됨 - 북극 육상-대기 환경에서의 실측 자료 확보와 관측 자료 기반 극지 기후환경 변화 예측 및 대응 기술을 개발한다는 점에서 차별성이 있음 - 극한 환경에서 관측 자료를 획득하기 위한 관측시스템을 안정적으로 운영하기 위한 노력이 보임 - 어려운 환경에도 불구하고 극한지 현장관측에 대한 노력이 돋보이며 좋은 결과를 획득함 - KPDC(한국극지데이터센터)의 메타데이터 및 실시간 데이터 공유를 통해 축적된 데이터를 통해 극지 및 기후의 영향 연구가 활성화를 기대함 - 기후변화에 따른 동토생태계 생지화학적 변화 이해를 통해 국제공동연구결과와 연구실적은 우수함	*해당사항 없음*		

KOPRI 극지연구소

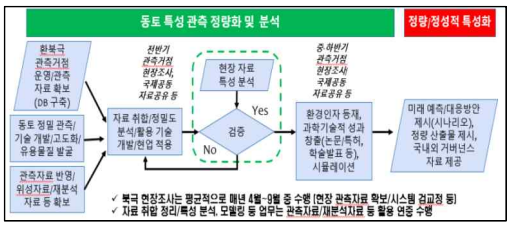
– 극미생물로부터 분해효소 개발에 따라 상용화로의 활용성 증대가 기대됨 – 극지–한반도 상호환경 변화 예측을 통해 미래의 기후변화 대응을 기대함			
수정/보완할 점			
– 세부과제별 결과와 성과는 훌륭하나 전체 과제가 유기처럼 구성되어 있지 않음 – 총괄과제와 세부과제의 연관성이 계획 당시에도 지적되었듯이 1단계 2년의 연구결과가 2단계에 어디에 적용되었는지 제시하는 것이 매우 중요함 – 각 세부과제들은 자체적으로 연구 필요성/우수성이 충분히 이해가 되나 각 세부과제들의 연구 내용들 간 유기적 연계성이 부족함(예: 세부 4, 5등) – 연구기간 및 연구비에 대해 연구내용이 너무 방대하고 세부과제 간 연계성이 부족하여 연구종료 후 북극의 육상–대기환경변화 예측 및 대응기술 관련 구체적인 성과도출이 어려울 것으로 판단됨 – 5개 세부과제의 실제 연구내용들이 전체 과제의 연구목표 달성에 어떠한 기여를 하며 어떻게 연계되어 있는지를 제시할 수 있는 구체적인 "평가 요소"가 필요함 – 본 내역사업의 궁극적인 목표인 '기후변화가 북극의 육상–대기환경변화 예측 및 대응기술 개발'을 달성하기 위해서는 세부과제의 연구내용의 조정이 필요함 – 연구과제 간 연계 및 융복합의 과학기술/학술적 연구 성과도출 및 활용방안이 요청됨 – 관측, 과정, 모델링 및 대응방안의 연계성에 대한 세밀한 검토가 요청됨	※ 본 과제의 RFP 상의 최종목표와 단계목표는 다음과 같음. [최종목표] 1) 북극권 육상지역의 급격한 기후환경 변화가 초래하는 중위도 지역 영향 평가 2) 북극권 육상–대기 상호작용 연구를 통한 미래 기후환경변화 예측 및 대응 제시 [단계목표] • 1단계(2021–2022): – 환북극 동토층 거점기반 육상–대기 환경 관측 고도화 – 북극권 육상–대기 생태계를 조절하는 동토 환경인자 제시 – 북극권 동토 내 미생물의 환경적응 대사기작 및 유용성 연구 – 북극권 과거 및 현재 기후환경변화가 중위도에 미치는 영향 평가 • 2단계(2023–2024): – 동토–대기 관측 데이터에 기반한 북극권 기후/환경 미래변화 제시 – 환경별 기후조절인자 변화에 따른 북극권 생태계 변화 규명 – 북극권 육상환경 변화에 따른 고위도 생지화학적 순환의 변화 전망 – 북극권 환경변화를 고려한 중위도 기후환경변화 미래 예측 및 대응 방안 제시 등으로 되어있음. 따라서, • 육상–대기 상호작용 연구를 위한 각 관측거점에서의 환경인자 확보 및 관측 고도화는 매우 필수적임. 이러한 현장관측 자료와 위성자료 및 재분석 자료의 종합적인 적용과 분석을 통해 모델 시뮬레이션의 과정으로 미래 예측과 대응기술 마련을 세부과제–5에서 중점 수행하므로, 연계성이 없다고 할 수는 없고, 2단계의 2차년도에 이에 대한 성과를 충분히 도출할 수 있을 것을 사료됨. • 또한 4세부과제에서 수행하고 있는 북극 유래 유용물질 활용에 관한 연구도, 기후변화 대응 및 생물다양성 감소에 대비한 생물자원 보존과 발굴을 위하여 접근성 확대 및 시료 확보의 유리함과 맞물려, 5세부과제와의 연계성이 아닌 1과 2, 3	코멘트 및 총괄과제 단계보고서 p. 19, 24~39, 121~123, 131~134, 149~152 1세부과제 단계보고서 p. 321~324, 338~344	1~5 세부과제에서 추구하는 동토 특성 관측 정량화 및 분석, 그리고 정량/정성적 특성화에 대한 연구수행의 흐름도 제시, 관측거점별 빅데이터 DB 구축 및 획득 자료의 활용방안 (세부과제 간 업무 특성과 연계)

– 연구과제 제안서에 대한 세밀한 검토 및 반영이 요청됨	세부과제로부터 채집한 동토와 퇴적물 시료로부터 성과 창출이 가능하므로, 굳이 5세부과제와의 연계성을 맞출 필요는 없다고 사료됨. • 각 세부과제는 RFP 상에 제시된 단계별 목표를 달성하기 위해, 세부과제별로 업무를 수행하고 있음. 즉, 유용물질 활용에 관한 4세부과제를 제외한 1/2/3과 5세부과제는 글로벌 기후환경변화에 가장 민감한 지역인 북극권 육상(동토, 생태)–대기–연안 영역에서의 환경변화 관측/분석/예측 및 대응기술 개발의 목표 달성을 위해, 아래와 같은 세부내용으로 각 특성 파악 및 미래 예측 등에 활용 가능한 DB 구축 등의 연구를 수행 중임. – (1세부과제) 환경 관측 고도화 및 동토–대기 관측 데이터에 기반한 북극권 기후/환경 미래변화 분석과 영향력 제시에서 관측거점 정상 가동 및 환경 DB 확보(Smart Polar Platform 구축; 관측시스템 128노드, 통신거리 ≥5km) 등 동토층 환경인자 특성 자료 통합 분석을 통해 세부과제–1에서 얻은 데이터를 세부과제–5에 제공하므로 모델링과 예측에 대해 연계됨. – (2세부과제) 환경별 기후조절인자 변화에 따른 북극권 생태계 변화 규명 및 북극권 육상환경변화에 따른 고위도 생지화학적순환의 변화 전망 등 – (3세부과제) 과거 및 현재 기후환경복원 등 – (5세부과제) 북극권 환경변화를 고려한 중위도 기후환경변화 미래 예측 및 대응 방안 제시 등 • 각 세부과제별 평가항목별 목표 및 요소는 총괄과제에서 적시하고 있으며, 본 과제 수행으로 확보되는 빅데이터 환경인자 DB의 정밀한 분석을 통한 결과 획득은 세계 최고 수준의 성과 창출로 발전할 수 있고, 국가적 차원의 미래 기후변화 대응안 마련에 기여할 수 있음. • 또한, 당초 수립한 본 과제의 수행 전략과 WBS(작업분할구조; Work Breakdown Structure)의 탄탄한 기반 조성으로 좀더 전문화된 연구 수행의 구조로 편성되어 있다고 사료됨.		
– 과제제안요구서(RFP)의 2단계에서 제시한 북극권 온실기체 미래배출전망, 기후환경변화 미래예측시나리오의 구체적 방법론 제시가 필수적임	• 온실기체 미래 배출 전망에 관한 방법론 제시(과거 30년 순생태계교환량(NEE)을 분석한 격자모델(BESS–Polar)의 NEE 및 기후환경인자와의 통계적 관계식을 고위도 격자별로 산출함. – CMIP6 같은 미래 기후 및 식생 예측자료에서 북극권 기후환경인자 추출하여 앞서 산출한 통계적 관계식을 적용해 미래 이산화탄소 배출전망자료를 생산함. • 미래예측 시나리오 제작을 위한 방법론을 단계보고서 내에 상세 기술하였음. – 기후예측의 방법론은 크게 전구기후모델과 지역기후모델로 구분됨. 즉 전구기후모델은 초기장을 이용하여 수행되는 장	1세부과제 단계보고서 p. 302, 312~317, 319, 327, 334 1세부과제 6위탁과제 단계보고서 p. 14~15 5세부과제	예측모델 방법론 제시

	점은 있으나 물리 및 역학과정의 간소화 및 해상도가 낮아 불확도가 높은 단점이 있음. 그러나 지역기후모델은 입력되는 전구기후모델의 초기장과 예측자료의 편향성을 승계한다는 단점은 있으나 고해상도 모의결과를 통하여 상세한 분석이 가능한 장점이 있음. – 지역기후모델 중 WRF모델은 다양한 기후변화를 고려하여 수행이 가능하고 이 연구에서는 복사과정 모수화 개선 및 극지역의 환경모의에 최적화된 Polar WRF를 적용하여 미래기후변화를 모의 및 분석함. 특히 북극의 기후환경변화에 따른 중위도 및 한반도의 기후변화와 특이기상 현상을 모의하며 이 연구에 포함된 다른 세부과제들의 관측기반으로 기상, 복사, 에어로졸 및 환경변화를 고려하여 기후변화시나리오를 제작 및 분석함. – 미래예측시나리오의 기상변수는 생태계 온실기체(CO_2) 증가 추정을 위한 생태계 모델(BESS모델)의 입력자료로 제공함.	단계보고서 p. 42~45	
– 북극권 육상–대기변화에 따른 "중위도" 기후환경변화 미래예측과 "시나리오제작 및 대응방안제시" 라는 RFP상의 2단계 연구내용달성을 위한 방법론과 계획이 전혀 제시되지 않음. 실제적으로 가능한 범위와 구체적인 계획 및 예상되는 성과를 현실성 있게 제시할 필요가 있음 – 북극권 과거 및 현재 기후환경변화가 미래의 중위도에 미치는 영향평가는 다소 미흡함 – 기후변화가 북극의 육상 및 대기환경변화, 나아가 중위도 기상 및 기후변화에 미치는 영향에 대한 국내외 연구가 많이 수행되었으므로 그런 연구들과 차별화를 위한 연구내용 조정이 필요함 – 북극의 육상–대기환경변화가 중위도 기상 및 기후에 미치는 영향 평가모델 수행은 근본적으로 설계부터 변경을 하여야 할 것으로 판단됨. 육상변화의 경우 눈 덮임, 동토특성, 빙하면적, 식생 상태변화가 미치는 영향에 대해 연구하여야 하며 대기의 경우 온실기체 (CO2,	• 에어로졸의 조성에 따른 기후적 역할을 규명하기 위해 흡습성에 따른 대기입자의 광학특성 연구는 1세부과제의 위탁연구로 수행 중이며, 다산과학기지가 위치한 니알슨의 관측자료와 인공위성 자료를 활용하여 북극에어로졸의 조상에 따른 산란계수 도출 및 분석을 수치적으로 수행 중임. • 5세부과제에서는 북극권 동토 변화에 따른 중위도의 기후변화 예측 및 대응방안을 제시하는 것이 2단계 목표임. 또한 미래예측 시나리오 제작을 위한 방법론을 단계보고서 내에 상세 기술하였음. 즉, 위에서 서술한 바와 같이 이 연구에서는 Polar WRF를 이용하여 미래기후변화를 분석할 것이고 특히 북극의 기후환경변화에 따른 중위도 및 한반도의 기후변화와 특이기상 현상을 모의하며 이 연구의 다른 세부과제들과 관련된 자료들을 극대화하여 기후변화 시나리오를 제작 및 분석함. – 이 목표를 추진하기 위해 PWRF를 이용해 북극권 육상–중위도 공간 상세화를 통한 근미래(2025~2034) 예측을 수행할 것임. – 즉, 이 사업에서 사용될 모델은 전지구 기후모델이 아닌 지역기후모델(PWRF)이며 입력자료는 RCP 시나리오 중 예측성능이 높은 자료(CESM, HadGEM, GFDL) 중 단일 시나리오를 활용할 것임. – 미래 예측시나리오 결과는 생태계 온실기체(CO2) 증가 추정을 위한 생태계모델(BESS모델)의 입력자료로 제공함. – 해양과 관련된 기후연구는 타 기관과의 연구 중복성 문제로 이 연구에서는 제외되며 대기모델 예측결과(기온, 강수량, 습도, 복사량 등)를 기준으로 예측 및 대응방안을 제시할 것임.	1세부과제 단계보고서 p. 10, 192~194 5세부과제 단계보고서 p. 42~45	

CH4…) 및 에어로졸 변화에 대해서도 다양한 모의실험 및 분석을 하여야 함 – 현재 운용 중인 모든 모델은 불확실성이 크기 때문에 적어도 3~5개 수준의 지역기후 또는 전구모델의 다양한 북극의 육상 및 대기환경에 대해 수십년 이상의 적분결과를 앙상블하여야 할 것임 – 세부과제5의 내용이 전체 사업목표를 달성하기에 부족함. 최종 사업 목표 달성에서 모델이 차지하는 비중이 지나치게 높은데, 이 부분을 보완하려는 계획이 없음 – 2단계에서 요구하는 "미래 전망, 예측 시나리오 제작 및 대응 방안 제시" 내용을 2년 내에 달성할 수 있는지 확신할 수 없음. 성과 달성을 위해서 세부과 제5에 더 집중이 필요함	– 이 연구의 초기제안은 극지관측자료의 확보 및 기후변화 감시를 주요 목표로 하며 이들 자료의 활용을 위해 기후변화시나리오 제작 및 대응방안을 제시하고자 함. – 앙상블기반의 기후예측은 많은 전산자원과 예산을 필요로 하기 때문에 본 과제에서는 앙상블 예측 보다는 2건의 시나리오 제작을 목표로 하였으며 이에 대한 연구 방법론 및 예상 결과들은 단계보고서 내에 상세히 작성하였음.		
– 관측시스템 운영과 별개로 관측 자료의 신빙성과 객관성을 확보하기 위한 노력이 더 필요함 – 일부 과제의 경우 현장측정 결과제시가 미흡한 것으로 판단됨 – 극지역에서의 새로운 육지 및 대기의 특성 변화 특이점(이벤트) 관측결과 제시가 필요함	• 자료의 신뢰성 및 객관성을 확보하기 위해 획득 과정에서의 정확성 및 정밀성 등 검교정 및 dual system 가동, 국제표준 검증의 일환으로 다국간 공동 관측캠페인 등을 수행하여 자료의 질적 수준 확보함. • 관측거점별 동일 환경인자 확보(예; 에디공분산) 및 품질 평가 과정 수행함. • 본 연구를 통해, 북극해 미세조류에 의해 생성되는 DMS 성분이 나노크기 입자의 형성에 기여할 뿐만 아니라, 북극 대기 입자의 효과적인 성장과 함께 구름응결핵 작용에 기여할 수 있음을 다양한 현장 관측 자료로 증명함 (2010~2019년 북극 스발바르 지역에서 장기간 관측된 대기 DMS, PM10 입자 내 MSA 농도, 그리고 에어로졸 입자의 크기별 분배 자료를 바탕으로 북극 대기 중 황 에어로졸 입자 형성의 계절 변화 양상 분석함).	코멘트 및 1세부과제 단계보고서 p. 69~72, 73, 76, 81, 83, 85, 86, 88, 95, 97~101	
– 기후환경인자 별 정확성 및 국제표준검증 필요 – 확보된/예정인 환경인자들을 전체 과제목표에 기반하여 단계별로 분류하고, 목적성에 맞게 제공하는 DB구조가 필요함. 또한, 해당 관측 데이터가 국제 수준의 QA/QC 과정을 거친다는 것을 보여	• 관측자료의 신빙성과 객관성 제고를 위해 관측장비에 대한 주기적 검교정 결과 체계적 관리 및 타 관측자료와 비교 연구를 수행하고 있음. • 온실기체 플럭스를 측정하기 위해 사용된 에디 공분산 관측과 챔버 관측은 연구 커뮤니티 내에서 공인된 장비와 플럭스 측정 이론에 근거하여 자료를 취득하고 있으며, 이들 자료들이 국제공동연구 포함 출간된 SCI 논문에 사용됨. 또한	1세부과제 단계보고서 p. 314 연구개발 내용 및 방법 등에 표현, 321~324 증빙7 논문	획득자료의 정확성/정밀성을 확보하기 위해 국제공동 협업을 통해 자료 확보,

줄 수 있는 근거가 필요함 – 현 단계 연구에서 관측 및 분석이 매우 중요 분야이므로 이들에 대한 QA/QC가 이루어지는(국가 간 공통 관측 항목에 대한 비교 등) 과정에 대해서도 한 두개 정도 ppt 발표에도 제시하여 비교 평가할 수 있도록 제시가 요구됨	2단계에서는 환경인자 관측망 국제 네트워크에 가입할 예정임. • 일부 현장 측정 결과 제시가 미흡한 것은 COVID-19로 인해 2차년도부터 본격적인 현장 연구활동이 이루어지고, 관측시스템이 설치된 결과임. 특히 그린란드 거점의 경우 원격감시 시스템이 구축되지 않아 현장 활동 시 확보한 일부 자료만 제시되었음. • 기후환경인자 측정 센서는 국제표준 대비 검정된 센서들을 사용하고 있음 • 확보된 환경인자들은 기상, 복사, 토양 물리 등으로 구분되어 KPDC에 등록되어 있으며, 2단계에 동토환경인자 DB시스템을 구축하는 과정에서 사용자 중심의 구조가 되도록 DB 시스템을 구성할 계획임. • WMO GAW 프로그램의 경우 엄격한 품질 관리 절차가 적용되지만 온실기체 플럭스 관측의 경우 그와 같은 절차는 없으며, 플럭스 관측 커뮤니티에서 인정된 방법으로 획득된 자료의 QC와 함께 이론에 근거한 관측 시스템 운영 및 정기적인 가스분석기 및 복사계 교정, 그리고 동일 변수에 대한 복수의 측정을 통해 자료 QA가 이루어지고 있음. • 2단계에서 다년간의 자료 분석을 통해 특이현상 사례를 포함한 관측 결과가 제시될 예정임. 예로, 위탁과제 5에서는 1982-2022년의 40년간 북극 툰드라 생태계의 이산화탄소 흡수/발원에 대한 지도가 제작될 예정이며, 지역별 차이에 대한 원인 규명이 이루어질 예정임. • (1세부과제) 토양온도, 토양습도, 토양 CO2, 토양 CH4, 등에 대한 국제표준은 International Organization for Standardization(ISO)에서 일부 논의중에 있으나 확정되지 않았고 향후 표준으로 확정되면 적용 가능함. 무선센서네트워크 관련 표준기술은 무선 근거리 통신망(WPAN) 전송 규격을 위한 IEEE802.15 표준 규격과 이를 기반으로 상위 계층 규격을 정하여 관련 산업에 적용하려는 ZigBee 규격이 있으며, IP기술을 센서네트워크에 접목하기 위해 IETF의 6LoWPAN WG, ROLL WG, CORE BoF 등에서 표준화가 진행 중에 있음. HART와 ISA는 WirelessHART와 ISA-100.11a 등의 표준 작업을 마치고 공정 모니터링 및 산업 자동화에 적용하고 있으며 ISO와 IEC도 IEC62591 과 ISO/IEC18000-7 등 무선센서네트워크 관련 표준규격을 승인하거나 현재 표준화가 진행 중임. 본 연구에서 Smart polar platform 구축 기술에 상기 무선센서네트워크 표준을 적용하고 있음.	1세부과제의 위탁과제보고서 p. 12~14	자료의 신빙성을 확보하기 위해 십수년간 지속적인 모니터링 및 장비의 dual system 가동을 통해 정량적 특성 비교, 매년 관측거점 현장활동 전후를 통해 장비의 사전 최적화 검교정 수행
– 관측분야에 해당하는 세부과제1-3의 내용이 세부과제5와 연계되는 부분이 없음. 2	• 1, 2, 3세부과제에서 5세부과제와의 연계성 내용, 환경인자의 활용성 부각 제시함-총괄에서 각 제시 내용의 종합적인	5세부과제 단계보고서 p. 43~45	타 세부과제와의 연계성

<table>
<tr>
<td>단계 진행에서 세부과제1-3의 관측내용과 세부과제5의 모델내용이 연관을 보여야 함
- 극기후 예측 모델 개발을 위한 세부과제별 기후 환경인자 관측 및 발굴, 개발에만 그치고 있어 전체 기후변화 모델의 input 자료로 활용성을 높일 필요가 있음
- 기후환경인자의 기후변화 및 환경예측/대응기술에 활용성 및 적용 데이터 흐름의 제시가 필요</td>
<td>흐름 제시함
 

<table>
<tr><th>세부과제</th><th>활용 자료</th></tr>
<tr><td>1세부</td><td>• 관측자료(기상 및 복사 요소) 기후변화 특성 자료 추출 -> 입력특성보완(과거/현재 관측자료 비교 분석 결과) 적용
• 에너지플럭스 과거 및 현재 기후변화 특성 도출
• 대기질 관측 및 위성자료를 활용한 중위도 영향 평가</td></tr>
<tr><td>2세부</td><td>• 위성영상 기반의 동토분포(식생분포)
• 강설 모의결과를 PWRF 입력자료 및 검증자료로 활용</td></tr>
<tr><td>3세부</td><td>• 스발바르 기후환경의 과거 및 현재 변화 -> 공동탐사 결과를 PWRF 모델 검증자료로 활용</td></tr>
<tr><td>5세부</td><td>• 이 연구의 다른 세부과제들의 연구분석 결과 초기입력자료 활용(식생,CO_2, CH_4,NO_2,에어로졸 광학특성)
• 세부1(복사관측):BSRN자료와 합쳐 복사모수화모델 개선 및 평가자료 활용
• 세부2(식생분포):현재 및 미래 식생분포 입력자료 활용
• 세부3(스발바르 과거/미래 기후변화 특성 분석결과): 미래 기후변화 시나리오 분석 활용
• 기후변화에 따른 생태적(BESS모델기반) 온실기체(CO2) 변화 추정을 위한 기상입력자료 제공</td></tr>
</table></td>
<td></td>
<td>제시</td>
</tr>
<tr>
<td>- 에어로졸-기후변화 영향을 파악하기 위해서는 대표 관측지 측정을 통해 모델 결과에 반영되고 활용되어야 함</td>
<td>• 1세부과제의 에어로졸 분야가 5세부과제에서 어떻게 모델에 반영되고 활용되는지 부각 제시함
• (1세부과제) 본과제에서 구축한 연구거점 중에서, 다산과학기지가 니알슨의 제플린 관측소는 세계기상기구가 지정한 지구급 지구대기관측소 중 하나이며, 온실기체 및 에어로졸의 장기관측이 국제공동프로그램으로 운영되고 있음.
- 북극 동토대기 에어로졸의 생성-성장-구름 형성 과정의 연속관측을 위해 구름응결핵, 나노미터크기 입자의 수농도 분포, 황을 포함하는 에어로졸의 전구가스상물질, 입자의 화학 성분 등이 제플린 관측소에서 본 과제의 일환으로 연속관측 되고 있으며, 스웨덴, 노르웨이, 일본 등 공동연구 참여기관 등이 생산하는 모든 에어로졸의 물리-화학-기후 등 자료들은 1세부, 1세부의 위탁, 그리고 5세부과제의 수치적 방법을 이용한 연구에 제공될 것임.</td>
<td>1세부과제
단계보고서
p. 10, 76~78</td>
<td></td>
</tr>
</table>

	– 예를 들면, 제플린 관측소에서 생산된 제플린의 구름응결핵, O3, SO2, NO3 등 미량기체 자료들을 활용하여 1세부의 위탁과제에서 북극지역 미세먼지의 산란 및 흡수계수의 수치적 재현 연구를 수행하고 있음. • (5세부과제) 북극권–중위도 지역의 환경변화로 인한 지역규모 에어로졸 기여도 평가는 관측자료에 기반한 라그랑지안 모델링 수행을 통하여 에어로졸 주요 발생원과 중장거리 이동 특성 및 영향 영역 파악을 하고 위성관측 자료와 지상관측 에어로졸 및 영향요인(Fire, Dust 등)자료를 이용하여 요인별 중장기 변화 경향 및 분포 특성을 분석함. – 그리고 관측 및 라그랑지안 모델 분석을 통한 북극권과 중위도 에어로졸 변동성 정량화 분석을 수행함. 이를 위해 기후인자 자료 기반으로 북극권–중위도 지역의 에어로졸과 시공간적인 연관성 분석과 공간분석(spatial analysis)기법을 이용하여 공간자기상관 분석 및 공분산도를 해석함. – 또한 에어로졸 변동과 관련된 지역 대기 환경 변화 특성 분석을 위해 기후인자 자료 기반의 북극권–중위도 에어로졸 변동에 따른 대기환경 요인(구름, 안개 등) 변화 특성을 분석하여 상관분석 및 영향 요인을 해석함.	5세부과제 단계보고서 p. 43~45	
연구비 검토의견			
– 연구비는 대체로 관측환경에 맞게 관측과 활동비 등의 조정을 잘하고 있다고 판단됨	해당사항 없음		
– 과제 최종 목적에 맞춘 육상–대기환경변화 예측 및 대응 기술개발에 맞춰 연구개발계획서 변경은 필수적이고 그에 따른 각 세부별 연구비 조정이 필요할 수 있음	• 본 과제의 당초 목표와 연구내용 및 범위는, 과기부와 연구재단의 RFP 검토위원회로부터 작성되고 사업 공고가 된 것이며, 각 단계별 세부 연구내용과 범위도 추진배경 및 거점기반 환경인자 DB 확보와 이를 활용한 육상–대기–연안 영역에서의 과학활동, 나아가 관측/위성/재분석 자료 등을 활용하여 미래 예측 및 대응 방안 제시에 초점을 맞춰 계획된 것임. • 아울러, 당초의 단계별 계획에 따라 연구가 수행되었고, 1단계에 설정된 목표는 100% 달성되었으며, 2단계에서는 1	코멘트 세부과제–1의 단계보고서 p. 355 총괄표에서 4차년도 예산 축소 (세부과제–5에 해당액만큼 배정함)	

	단계에 확보된 데이터와 결과를 활용하여 최종 목표를 달성하려고 함. 따라서, 현 시점에서의 계획은 절대 무리하거나 잘못된 방향을 갖고 있지 않으며, 3차년도(2023년)의 각 세부과제별 연구비도 충분한 논의를 거쳐 배정되었으므로 조정이 필요하지 않을 것으로 사료됨. 그러나 기본적인 광대한 기후자료 처리를 위한 전산비용은 논의될 수 있으며, 4차년도에 1세부과제에서 일부 삭감하여, 5세부과제에 증액 조정하였음.		
– 2단계 이후 5과제의 비중이 크게 나타나는데, 이에 대한 연구비 책정 등의 고려가 필요함 – 세부5과제가 소기의 목적을 달성하기 위해서는 연구비 및 연구내용 조정이 필요할 것으로 판단됨 – 2단계 모델링 연구의 비중이 너무 높아 5세부 기후 모델링 분야의 연구비 증액은 필수적임. – 탐사선 임차비 이월 반영 및 예측 및 대응방안에 대한 연구비 증액이 요청됨	• 이 과제는 전체적으로 북극권에서의 기후·환경변화에 대한 관측/분석/예측의 주제로 수행되고 있음. • 특히, 1~3세부과제는 북극권의 관측거점을 운영하면서 기후·환경변화에 대한 현상들의 특이 관측과 환경인자 확보 및 자료분석에 비중과 예산 소요가 높고, 기후변화에 대한 예측 주제는 이들 북극권의 자료 활용 차원에서 수행되기 때문에 일반적인 기후연구와는 차별됨. • 코로나 재확산 또는 탐차선 임차 문제에 따른 현장 탐사 취소 등 예상치 못한 대외적 문제가 발생하여 2023년 스발바르 탐사가 불가피하게 축소 또는 연기가 필요할 경우, 2023년 탐사를 위한 탐사선 임차비를 차년도(2024)로 이월하여 탐사가 진행될 수 있도록 사전 승인요청을 통해 해결할 예정임. • 이에 기후 예측과 대응방안 수립 등 연구부분의 연구비 비중을 높이는 것이 쉽지 않음. 그러나 기본적인 광대한 기후자료 처리를 위한 전산비용은 논의될 수 있으며, 2단계 2차년도(2024년)에 50,000,000원 증액을 적용하려함. • 예측 및 대응방안 연구를 위한 (5세부과제)에 2024년(4차년도) 연구비 일부 증액함.	코멘트 1세부과제의 단계보고서 p. 355 총괄표에서 4차년도 예산 축소 (5세부과제에 해당액만큼 배정함) 코멘트 및 3세부과제 단계보고서 p. 281 5세부과제 단계보고서 p. 49~50	

제 2 장

추진내용 · 연구결과 및 추진일정 실적

(1세부과제－위탁과제 포함)

KOPRI
극지연구소

1. 추진내용 · 연구결과 (위탁과제 내용 포함)

가. 1세부과제 핵심 내용 및 결과

년도	연구개발 목표	연구개발 내용 및 방법
1차년도 (1단계 1차년도)	거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 고도화 계획 수립	● 기구축 환북극 동토거점 관측시스템 현황 진단 – COVID-19 팬데믹으로 1차년도 거점 방문 여부가 불확실하여 거점별 관측시스템 점검을 현지 상황에 맞게 수립함. 직접 방문이 필요한 알래스카 카운실 및 캠브리지 베이 거점은 현장 방문 추진. 노르웨이 스발바르 거점은 공동연구자의 방문으로 대체, 그린란드 노르드 등의 경우 현지 인력을 활용하여 관측시스템 진단 추진 – 미국 알래스카 카운실 거점 · 2021년 9월 2일부터 14일까지 거점 현장 방문하여 에디공분산 장비, 데이터로거, 식생카메라, 전력시스템 점검 및 조치 – 캐나다 캠브리지베이 거점 · 2021년 9월 17일부터 24일까지 거점 현장 방문 · 전원 미공급 등으로 인한 플럭스 관측 시스템 운영 중단 · 전원 복구 및 데이터 로거 에러 해결을 통한 플럭스 관측 시스템 운영 재개 · 현지 인력 활용 주기적인 시스템 점검 및 자료 백업 진행 – 노르웨이 스발바르 거점 · 2021년 9월 이태리 CNR-ISP Dr. Angelo Viola의 현장 방문 · 가스 분석기 교정, 원격 통신 재게 및 자료 백업 완료 · 플럭스 관측 시스템은 중단 없이 가동됨을 확인함 – 그린란드 노르드 거점 · 현장 방문 없음 · 현지 체류 인원을 통한 시스템 진단 결과, 전원 공급 문제 발생, 데이터로거 미작동 등 시스템 가동 전면 중단된 상태 · 플럭스 시스템 관측 위치 이탈 – 러시아 바라노바 거점 · 현장 방문 없음 · 2021년 1, 2월 자료 확보 · 2021년 7월 러시아 AARI로부터 바라노바 거점 한-러시아 공동 연구 협약 갱신이 상급기관(러시아 정부)에 의한 중단 상태임을 통보 받음. 2021년 3월 이후 자료 확보 현재 불가 · 2021년 1, 2월 자료를 이용하여 관측 시스템 진단. 낮은 자료 수득률 및 플럭스 시스템 비정상 반응 – 거점별 공통 진단 사항 · 온실기체 관측시스템 과거 운영결과 분석을 통해 가동률, 자료 수득률, 문제 발생원인 등 분석 수행 ● 북극 동토거점 관측시스템 고도화 계획 수립 – 각 동토거점 관측시스템 진단 결과에 따라 장비 교체 및 수리 계획 수립 · 알래스카: 기존 플럭스 관측시스템 장비 수리/신규 장비로 대체 · 캠브리지베이: 기존 플럭스관측 시스템 유지 · 스발바르: 기존 플럭스 관측시스템 유지 · 노르드: 기존 플럭스 관측시스템 교체(2022년 예정) · 바라노바: 기존 플럭스 관측시스템 교체(2022년 계획이나 공동연구 협약 갱신 과정 중단으로 2022년 이후 예상) – 기존 연구 대비 관측고도화 계획 · 알래스카: 관측기간 여름에서 봄/가을확대, 메탄플럭스/fPAR/NDVI 관측

		추가, 위성통신 활용 실시간 자료 수집 · 캠브리지베이: 폐회로 가스 분석기 추가, fPAR/NDVI 관측 추가, 플럭스 시스템 원격 모니터링 시스템 구축 · 스발바르: fPAR/NDVI 관측 추가 · 노르드: 플럭스 시스템 원격 모니터링 시스템 구축, fPAR/NDVI 관측 추가 · 바라노바: 메탄플럭스/fPAR/NDVI 추가 (단, 과제 기간 내 러시아 정부로부터 연구활동 재개 승인 시 달성 가능. 미승인시 메탄 관측은 타 거점에 추가) ● 북극 동토거점 관측시스템 고도화 준비 · 알래스카 거점 온실기체 플럭스 관측 기간 봄, 가을철 확대를 위한 전력시스템 보강계획 수립 및 풍력발전시스템 확보 · 알래스카 거점 관측 확대 계획에 따라 알래스카 거점에서 하계 메탄 관측 계획 수립 및 추가 1개 거점 메탄 관측 계획 수립 · 알래스카 거점 식생지수(NDVI) 및 광합성 센서 확보 완료 및 2차년도 캠브리지 베이 및 스발바르 fPAR/NDVI 센서 구매 준비 · 캠브리지베이 거점 강수 발생 시기 및 동계 기간 플럭스 자료 수득률 제고를 위한 2차년 폐회로 가스 분석기 추가 설치 준비 · 노르드 거점 플럭스 시스템 교체를 위한 알래스카 거점 플럭스 시스템 제조사 점검 진행 중 ※ 1차년도 미달성 내역 및 사유 – 내역 : 당초 1차년도에 알래스카 거점에서 하계기간 중 메탄 및 fPAR 요소에 대한 시험 관측을 실시할 계획이었으나, 장비확보 및 알래스카 현지 운송까지 진행하고 하계 시험관측은 수행하지 못했음 – 사유: COVID-19 관련 알래스카주의 외부인 출입금지 조치 및 국내 백신접종 완료 후 출국으로 인해 하계가 종료된 9월에 알래스카 방문이 이뤄짐에 따라 하계 시험관측은 수행하지 못하였음. 그러나 해당 메탄 관측시스템의 국내테스트 및 알래스카 현지 발송까지는 완료하여 2차년도에 하계 관측 준비는 완료되었음(알래스카 거점용 광합성 관측시스템 역시 현지 방문이 9월에 이뤄짐에 따라 하계 시험 관측은 수행하지 못하였음) → 상기 연구개발 결과로 동토거점의 환경인자 DB 종류 및 기간 확대를 통해 동토지역의 지면-대기간 프로세스 규명 및 기후환경변화 경향 평가가 가능하고 정확도가 향상되므로 “북극권 육상-대기 상호작용 연구” 를 통해 북극권 기후변화 이슈 대응에 기여함
	북극 에어로졸 등 관측 시스템 및 DB 고도화	● ‘에어로졸 및 생성원인 가스 관측’ 플랫폼의 북극 현장 설치 및 확충을 위한 사전 연구 수행 – 북극해 해빙에 따른 유기성분의 북극 대기 및 북극해 유입 과정과 에어로졸 형성에 관한 문헌 조사 및 기초 자료 논문화 – 다산과학기지 (또는 아이슬란드) 현장 집중 캠페인을 위한 물리 기초자료 분석 (에어로졸 수농도의 계절적 특성, 미세 먼지 크기 분포 특성 분석 등 사전 연구 수행) ● 이동식/고정형 ‘에어로졸 및 생성원인 가스 관측’ 플랫폼 타당성 검토 및 설계 – 3차년도 현장 설치, 4차년도 현장 집중 관측을 위한 에어로졸 관측 플랫폼 (이동 또는 고정식) 설계 및 공동 캠페인 네트워크 구축 – 북극 에어로졸 이동식 관측 후보지 검토 및 운영 장비 (에어로졸 수농도, 크기분포, 구름 응결핵, 해양 기원 황성분 기체 관측 장비 등) 실험실 평가 수행

		– 다산과학기지 / 아이슬란드 하계 집중 관측 캠페인을 위한 국제 네트워크 구성 (이태리 피렌체 대학, 스페인 해양연구소, 아일랜드 국립대학, 중국 샤먼 대학 등) 및 연구주제 논의 ● 스발바르 거점 제플린/그루바뎃 관측소 기반 실시간 화학-물리적 에어로졸 특성 관측(I) – 제플린 관측소 구름 응결핵 연속관측 수행 (장비 점검 및 구름 잔여물 연속관측 프로그램 확충, 2021.11월 재개) – 그루바뎃 관측소 기반 에어로졸의 화학 성분 분석을 위한 샘플링 실시 (이태리 피렌체 대학과 공동연구) * 코로나19 상황에 따라 북극 거점 현장 조사가 제한적이므로, 북극 스발바르 거점 니알슨 과학기지에 상주하고 있는 이태리 연구 인력을 활용한 북극 대기 입자 시료 확보 ● 입자기화장치를 활용한 에어로졸의 연속 샘플링(5분 시간 분해능) 및 이온/미량원소/유기물 실시간 정량 시스템 구축 – 에어로졸 화학성분 실시간 분석 질량분석기(Aerosol Mass Spectrometer)를 도입하여 크기별 입자 화학성분 실시간 모니터링 시스템 구축 및 실험실 운영 ● 북극 대기 입자 생성과 원인가스(precursor)의 상관성 규명 – 스발바르 제플린 관측소에서 운영 중인 에어로졸 물리 특성 (수농도, 크기분포 등), 구름 응결핵 연속관측 자료를 활용한 북극 대기 에어로졸 형성 과정 집중 분석 – 해양 생물활동에 의해 대기 중으로 방출된 황성분의 에어로졸 형성 과정과 구름 응결핵 수농도에 미치는 기여도 평가 ● 극지 에어로졸 발생 모사 챔버 제작을 통한 실험실 규모의 입자 형성 메커니즘 연구 – 국내 강물 샘플을 활용한 강물기원 에어로졸 생성 메커니즘 파악 및 북극 강물 기원 에어로졸 생성 메커니즘과 비교 분석 (수농도 분포 곡선 측정) – 강물과 바닷물 속 유기물의 분자구조 특성 비교 분석 – 강물과 바닷물 속 유기물의 화학적 특성이 일차 에어로졸 생성에 미치는 영향 파악 – 실험실 제조 입자 (예: NaCl 입자)를 활용한 바닷물 속 해양염이 일차 에어로졸 생성에 미치는 영향 파악 ● 해양유래 에어로졸 발생 기작 확인을 위한 실제 바닷물 샘플 실험실 테스트 – 중위도 또는 북극권 바닷물 속 유기물의 화학적 특성 분석 ● 북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행(광주과학기술원 위탁 연구로 nano-SMPS 점검 후 11월 제플린 관측소 재설치)
	환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 개발	● 동토층 환경인자(토양온도, 토양함수비, CO_2, CH_4) 통합형 멀티 모니터링 센서 시스템 개발 (특허출원) – 동토층 환경인자의 주요 인자 중 큰 요인인 토양온도, 토양습도, CO_2, CH_4에 대해 효과적으로 측정할 수 있는 통합형 멀티센서 시스템 설계 – 토양온도의 경우 Layer 구조로 개발 – 토양온도에 대한 통신장비 인터페이스 개발 – 토양함수비의 frequency 특성을 이용한 토양함수비 통신 인터페이스 개발 – 토양 CO_2 인터페이스 개발 – 토양 CH_4 인터페이스 개발

		– 64노드 이상의 센서 네트워크 설계 및 모의실험 ● 환경인자 데이터 신뢰성 향상 및 멀티센서 시스템 성능시험 – 동토 환경인자 토양온도, 토양함수비, CO_2 및 CH_4에 대한 동일한 전력 소모에서 측정인터벌 감소로 층별 온도 변화에 대한 많은 데이터 확보 – 센서 통신 프로토콜 설계 – 통합형 멀티 모니터링 센서 및 이동식 관측장치 성능시험 – 소자별 특성을 고려한 센싱 성능 분석 및 개발 ● 센싱 데이터 원격 전송기술 및 복합전원제어 모듈 기술 성능 평가 – 개발된 인터페이스 기술 성능시험 – 장시간 관측용 복합전원제어 모듈의 성능평가 – 데이터 전송장치 및 복합전원장치의 센서 적용 및 성능 분석
2차년도 (1단계 2차년도)	북극 동토 에어로졸 등 생성과정의 정량화	● 스발바르 거점 제플린/그루바덴 관측소 기반 실시간 화학–물리적 입자 특성 관측 (II) – 제플린 관측소와 그루바덴 관측소 에어로졸 모니터링 프로그램 연속 운영 및 현장연구 ● 고정식 및 이동식 에어로졸 입자 관측 플랫폼 제작 및 시험운영 (I) – 에어로졸 관측 플랫폼 고도화를 위한 관측 패키지 구성과 실험실 운영 – 다산과학기지, 아이슬란드 관측거점 등 하계 집중 관측 캠페인 관측 후보지 조율 ● 북극권 현장에서 비실시간 에어로졸 포집 및 정밀 화학성분 분석 수행 – 북극권 현장 설치를 위한 AMS 의 성능 평가 및 운영 매뉴얼 작성, 실험실 운영 시작 – 초고분해능 질량분석기를 활용한 북극 대기 에어로졸 유기물 화학특성 정밀 분석 – 실시간 탄소 입자 분석기 구입 및 시험 운영 ● 극지 미세입자 생성 모사 실험 수행 – 실험실 제조 극지기원 유기물 생성 및 화학적 특성 분석 – 실험실 제조 극지기원 유기물을 활용한 극지 에어로졸 발생 모사 챔버 실험을 통해 바닷물 속 유기물 특성이 일차 에어로졸 생성에 미치는 영향 파악 ● 북극권 에어로졸의 물리화학적 특성, 기상 및 가스자료 등을 국제공동연구진과 협력을 통해 추가 확보
	북극 동토거점 육상–대기 환경 관측 고도화	● 북극 동토거점 관측시스템 1차 고도화 수행 – 알래스카 거점 메탄 플럭스 관측시스템 및 광합성 관측시스템 정식 운영 – 알래스카 거점 비생장기 관측기간 확대 운영 – 바라노바 거점 메탄 플럭스 관측시스템 설치 – 바라노바 및 캠브리지베이 거점 광합성 관측시스템 설치 ● 북극 동토거점 환경인자DB시스템 설계 – 환북극 동토거점 동토–대기 환경인자 분석 및 가시화 시스템 구축을 위한 DB 구조, 기능 설계 ● 동토 온실기체 플럭스 알고리즘 개발 – 북극 동토거점 환경인자 관측자료 기반 이산화탄소 및 메탄 플럭스 조절 메커니즘 분석 – 이산화탄소 플럭스 및 메탄 플럭스 알고리즘 개발
	모니터링 시스템 원격 및 에너지 하베스팅 기술 고도화	● 모니터링 시스템 원격 무선전송 고도화 – 현장 운용의 문제점을 파악하여 전원회로, 측정회로 등의 개선이 필요한 부분과 통신 장치의 개선 문제점 파악 – 동토층 환경인자 탐지를 위한 멀티자료 분석 시스템 개발

		– 통합형 멀티 센서 관측장치 성능 고도화 – 통합형 멀티 센서 모듈의 펌웨어를 수정 설계 – 통합형 멀티 센서 인터페이스 회로를 수정, 동토 환경인자의 원격 무선 전송 기술에 대한 성능 개선 – 환경인자 측정시 발생되는 소모전류 억제 및 발열감쇄 효과, 신호전송 손실 억제를 위한 차동 신호 전달, 이동식 관측장치의 케이스 설계 등 변경 – 관측장치 전원 및 통신성능 개선 – 개발된 통합형 멀티 센서 성능시험 – 원격 무선전송 시스템 장거리 무선전송 플랫폼 개발 – 현장 운용의 문제점을 파악하여 전원회로, 측정회로 등의 개선이 필요한 부분과 통신 장치의 개선 문제점 파악 – 장단거리 혼합형 64노드 이상의 네트워크 구성, 시작품 설계 및 제작 ● 개발된 시스템 자가발전 장시간 저전력 운용 – 장시간 운용을 위한 에너지 하베스팅 기술 개발 – 원격 데이터관리 등의 솔류션을 활용한 데이터 이중화 – 데이터 취득 핵심 기능인 전원공급장치 등의 이중화 – 개발기술 현장 적용 및 운용 시험 – 배터리 절약형 지능형 센싱 기술을 접목한 저전력 동작 기술을 활용하여 수년간 무보수 가능 시스템 구축 – Wake-up 전원관리(Active, Sleep, Deep sleep, Wake-up 방식 등)과 지능형 에너지 하베스팅 기술 접목(태양광, 풍력, 열, 진동 등) ● 개발된 인터페이스 코팅 – Silicone Based, Solvent Based, Water Based 및 UV Curing 코팅을 실시하여 최적의 코팅 방법을 선정 – 외부 함수비에 대한 PCB의 센서 코어 및 기타 연결부의 내구성을 강화 – 최저온도(-40℃)를 만족하여 정상적인 운전이 가능한 환경인자 측정 시스템 개발
3차년도 (2단계 1차년도)	북극 동토거점 관측 시스템 및 활용 시스템 고도화	● 환북극 5개 관측거점 정상 가동 및 환경인자 확보(지속) – 미국 알래스카 카운실 관측거점(2023년 6월 현장활동 중 데이터로거에 이리듐위성 송신장치 부착, 일부 데이터 국내로 위성전송하는 체계 구축) – 캐나다 캠브리지베이 관측거점(캠브리지베이 거점 관측소는 두 세트의 에디 공분산 (Eddy covariance, EC) 시스템이 메인 타워와 세컨드 타워에 설치, 별도의 데이터 로거와 전원을 이용하여 운영) – 스발바르 니알슨 관측거점(스발바르 니알슨 거점 관측소는 33 m 높이의 고층타워의 20.5 m 높이에 에디 공분산 시스템이 운영되고 있음. 전용 데이터 로거가 자료를 처리 및 저장하고 있으며, 노트북 PC가 랜케이블로 연결되어 있어 관측 자료는 실시간 데이터 로거와 노트북 PC에 저장) – 그린란드 노르드 관측거점(노르드 거점에 자료의 일부를 이리듐 위성을 이용하는 송신기를 설치하여 극지연구소로 전송) ● 북극 동토거점 관측시스템 2차 고도화 수행 – 니알슨 및 노르드 거점 광합성 관측시스템 설치 – 동토거점 (러시아 바라노바 제외) 온실기체 플럭스 자료 준실시간 송신 시스템 설치 ● 북극 동토거점 환경인자 수집분석시스템 구축 – 북극 동토거점 동토-대기 환경인자 자료 준실시간 수집 및 분석시스템 구축 – 웹기반 가시화시스템 구축

		● 기존 연구 대비 식생/광합성 측정 2개소 추가 및 환경인자 DB 활용시스템 신규 구축 – 식생/광합성 측정 추가(2023년 4월 북극 니알슨 거점에 식생지수(NDVI) 센서 및 광합성유효복사량(PAR) 센서를 추가하여 관측 시작) – 환경인자 DB 활용시스템 신규 구축(동토거점에서 확보되는 환경인자에 대한 데이터베이스를 구축하여 활용도를 높이기 위한 목적으로 용역사업을 통해 환경인자DB 활용시스템 1차 구축 수행) ● 위성자료 기반 육상 탄소플럭스 장기 변동성 분석 – 위성자료 기반 탄소순환 모델 결과 활용 북극 육상 탄소플럭스 20년 이상 변동성 분석 – 환경인자 가시화시스템에 위성자료 기반 거점별 육상 탄소플럭스 자료 가시화 기능 추가 ● 고층대기 관측시스템 구축 사전 연구 수행 – 북극 고층대기 전리권 전자밀도 불균일성 관측을 위해 스웨덴 키루나에 GPS 씬틸레이션 모니터 신규 설치
	북극 동토 에어로졸과 구름 등 형성과정의 상관성 규명	● 스발바르 거점(제플린/그루바뎃 관측소) 기반 실시간 화학–물리적 입자 특성 관측 (III) – 제플린 관측소와 그루바뎃 관측소 에어로졸 모니터링 프로그램 연속 운영 및 현장연구 수행 – 구름 응결핵 연속 관측 및 에어로졸 샘플러 운영 – 북극해 식물플랑크톤 번성 기간 동안 대기 DMS 농도 변화 연속 관측 – 하계 기간 중 대기 중 DMS 연속관측 수행 ● 에어로졸 성장 및 구름 응결핵 크기로의 성장 과정 정량화 – 제플린 관측 자료를 분석하여 나노사이즈 에어로졸의 생성과 구름응결핵으로의 성장과정 분석(구름응결핵 생성에 미치는 북극해빙의 역할 규명) – 구름 잔여물(residual) 연속관측 자료 분석으로 북극 구름 형성에 미치는 에어로졸의 물리화학적 특성 분석 – 북극 지역의 생물학적, 비생물학적 환경 요인에 의한 에어로졸 생성 및 성장 과정 규명 ● 고정식 및 이동식 에어로졸 입자 관측 플랫폼 제작 및 시험운영 (II) – 에어로졸 관측 플랫폼 구성 및 테스트 완료 후 현장 운영을 위한 매뉴얼 작성 – 4차년도 집중 관측 후보지 설치를 위한 현장 제반 특성 분석 (기상, 해빙의 영향, 해양 생물군 활동의 특성 등) – SMPS, CPC, Aethelometer, 샘플러 등 관측 패키지 정상운영 – 북극 대기 중 VOC 연속 관측을 위한 질량분석기 구매 완료 및 시험 운영 (에어로졸 관측 플랫폼 보완 리스트로서의 타당성 검토) ● 바닷물로부터 생성되는 해양입자 화학적 성분 측정 및 분석 – 일차 해양 에어로졸 챔버 관측 시스템 구축 – 실험실 제조 입자 및 바닷물을 활용한 시스템 테스트 – 바닷물으로 생성되는 일차 해양 에어로졸 생성–물리/화학적특성 분석 ● 북극권 해양입자에 포함된 이온성분 및 유기성분관측 및 분석 – 북극권 해양입자 이온성분 및 유기성분 관측 (에어로졸 관측 현장 캠페인 진행) ● 다양한 지역/계절/시간 변화에 따른 나노입자의 생성률, 성장률, 발생조건 비교
	CPS/무선센서 네트워크 기반	● 장/단거리 통신 프로토콜 결정 – 네트워크의 구성에 대한 토폴로지 (topology) 결정

	환경인자 관측시스템 구축	– 네트워크 안에 있는 노드간의 연결 방식 결정 – 실시간 무선 전송 네트워크 확인 – 모니터링 서버에서는 계측의 시기, 기간 및 시스템의 운용상태 등을 원격 제어 평가 – 복합센서 모듈 적용 2차 시제품 제작 (128노드 이상) – 극지 무인관측 ≥5km 관측 거리 확보 ● CPS/무선센서 네트워크 기반 환경인자 관측시스템 구축 – 토양 조건에 따른 동토 환경인자 발생특성 분석 – 이론적 기법을 토대로 한 동토 환경인자 탐지기준 설정 – Test-bed지역 (알래스카 카운실) 적용 및 정확성 검증 – 알래스카 카운실 환경인자 평가 및 모니터링 시스템 구축 – 모니터링 시스템 설치위치 선정 – CPS 기반 네트워크 안에 있는 노드간의 연결 방식 결정 – 장거리 양방향 통신이 가능한 중계기 설계를 위한 통신 모의 실험 ● 무선 네트워크 관리용 게이트웨이 개선 – 이리듐(Iridium) 모뎀을 통해서 미리 정의된 메일 계정으로 데이터를 송신 – 소비전류를 최소한 갖는 게이트웨이로 개발 – 장시간 저전력 운용에 가능한 게이트웨이로 개발 – 게이트웨이 동작 온도 범위는 −30 ~ 80℃ 이상이 되도록 하여 극한 환경 온도에서도 사용 가능하도록 설계/제작 – 장치간 패킷 호환 확인 – 개방형 표준 IoT 기반 통합 관측시스템용 서버 구축 ※ 환경인자 DB 추가 확보
4차년도 (2단계 2차년도)	환북극 동토 환경변화 평가	● 북극권 육상 탄소순환 분석 – 동토거점 온실기체 플럭스 실측자료 기반 각 거점별 광합성, 호흡, 순생태계교환 특성 및 변화경향 분석 – 동토거점 온실기체 플럭스 대비 위성자료 및 모델자료 평가 – 실측/위성/모델 자료 활용 북극권 육상 탄소순환 성분별 특성 및 변화 분석
	북극 동토 에어로졸 장거리 이동 등 평가와 중위도 영향 평가	● 에어로졸 입자 관측 플랫폼 북극 연구거점 설치 현장 집중 관측 캠페인 실시 – 북극 에어로졸 생성과 성장 과정에 미치는 북극환경 변화 영향 파악을 위한 하계 집중 관측 실시 – 이태리, 노르웨이, 스웨덴, 스페인, 아일랜드 등 북극 에어로졸 연구 네트워크 활용 역할 분담 – 북극 동토 거점 관측 자료와 쇄빙연구선 아라온 이동항차를 활용한 관측 자료를 비교함으로서 북극권-중위도 간 에어로졸의 이동 거동 연구 수행 – 이온/미량원소 자료와 통계 및 역궤적 분석을 통해 인위적 에어로졸의 주요 공급원 지역을 파악 – 장거리 에어로졸 이동 특성 및 기여도 파악 수행 – 캐나다 캠브리지베이 블랙카본 연속관측 자료 분석 : 북극권 블랙카본의 시공간적 특성 분석 ※ 쇄빙연구선 아라온 선상관측 자료 확보와 학술활동 수행 관련하여, 후속과제('25.04~'29.12) 연구에서도 대기 미세먼지 관측 집중 캠페인을 집중적으로 수행 예정임 ● 스발바르 거점 제플린/그루바뎃 관측소 기반 실시간 화학-물리적 입자

		특성 관측 (IV) – 제플린/그루바뎃 관측소 기반 구릉 응결핵 및 에어로졸 물리–화학 특성 연속관측 및 현장 방문연구 수행 – 북극대기 구름 형성에 미치는 ice nuclei 의 역할 공동연구 수행 (일본 극지연구소, 스톡홀름 대학) ● 스발바르 거점 그루바뎃 관측소 및 아이슬란드 거점 측정소 조성별 탄소 에어로졸 측정 및 북극지역 조성별 에어로졸의 기후적 영향 규명 – 아이슬란드 대기중 DMS 연속관측 및 에어로졸 샘플링 수행 – 스발바르–아이슬란드–러시아 바라노바 기지의 에어로졸 화학 성분 비교로 북극과 중위도 지역 에어로졸의 상호 작용 (생성–수송 등) 파악 ● 북극권 환경변화 요인 (대기 온도, 습도, 바닷물 특성 (온도, 생물학적 특성 등))과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명
	현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현 및 Smart Polar Platform 구축	● 효율적인 통합관리 기능 구현 – 동토 환경인자의 데이터 확보를 위한 통합 운영/관리 시스템 개발을 위한 개발 시스템의 기본 설계 – 토양온도 증가/감소 위치, 토양함수비 증가/감소 위치, CO2 및 CH4 발생위치, 지질, 토양물성자료 및 모니터링 관측자료의 연계를 통한 멀티자료 분석 및 구현 – 동토의 환경인자 모니터링 시스템의 DB 자료 및 시스템 구현 검토 사항 확인 – 실시간 모니터링 기반 동토 환경인자 모니터링 시스템은 전지구적 기후변화 대응을 위한 동토 환경변화 통합 운영/관리 시스템 개발을 위해 현장 측정 모니터링 자료 분석 및 관리 기능 구현 – 자립적인 운영체계로 전환하여 독립적인 운영 – 자가 발전형 복합센서 모듈 적용 – 극지역 사이버–물리(Cyber–Physical) 통합 관측 시스템 운영 ● Smart Polar Platform 구축 – Smart Polar Platform 실증 – 동토층 환경인자 특성 자료 통합 분석 – 관리자가 모니터링을 통해 수집된 자료를 효율적이고 체계적으로 분석 관리할 수 있도록 시스템 설계 – 시스템의 독립성을 확보 – 개방형 IoT 표준 플랫폼 기술을 적용한 4개 데이터 시각화
(국외학술 용역, UAF)	알래스카 화재 및 동토융해에 따른 온실효과기체의 정량적 평가	● 알래스카 육상생태계에 있어서 급변하는 온난화 및 그에 따른 자연발화 화재의 영향(알래스카 종단관측) – 온난화와 화재로 인한 동토 융해속도의 가속화 및 적설패턴의 변화로 토양기원 온실효과기체의 생성 및 방출량 특성과 환경제어인자 파악 ● 중앙알래스카 흑가문비나무의 줄기호흡 분석(Fairbanks) – UAF사이트 흑가문비(black spurce stands)의 줄기호흡량 및 온도(기온 및 줄기 온도)를 2020년 10월부터 2021년 9월까지 관측 ● 온난화 및 화재발발로 인한 생태환경의 변화에 반응하는 온실효과기체 및 환경제어 인자의 정량적 평가(서부 알래스카 툰드라 화재; Kougarok) – 온난화와 화재로 인한 지하부의 변화 (동토 융해의 가속화), 지상부의 변화 (지면함몰, 알베도 및 식생)로 토양기원 온실효과기체의 발생기작 및 방출특성과 환경제어인자의 정량적 대응효과 파악
	서부 알래스카와	● 2022년 8월 종단관측 겨울철 토양기원 CO_2 방출량과 환경인자의 연속관측에 집중

	종단관측을 통한 툰드라 및 한대산림에서 토양/줄기 기원 온실효과기체 및 환경제어인자의 시공간 분포 특성 파악	– 알래스카 북쪽 툰드라 사이트(Imnavait Creek)에서 2019년 7월부터 2022년 8월까지, Tussock tundra에서 지온 (5와 10 센티)의 연평균값(범위) 측정 – 알래스카 북쪽 툰드라 사이트 (Imnavait Creek)에서 2021년 9월부터 2022년 8월까지, Tussock tundra에서 수분함량 (10 및 20센티)의 연평균값(범위) 측정 – 알래스카 북쪽 툰드라 사이트(Imnavait Creek)에서 2021년 7월부터 2022년 8월까지 지표식생-Tussock tundra and sphagnum moss (inter-tussock)에서 FD (forced diffusion) chamber에 의한 토양 이산화탄소의 연평균 방출량 측정 ● UAF사이트 흑가문비(black spurce stands)의 줄기호흡량 및 온도(기온 및 줄기 온도)를 2021년10월부터 2022년 10월까지 관측 ● Kougarok 툰드라화재지역 및 비화재지역에서의 환경인자 및 토양 이산화탄소의 방출량 측정 – 2021년 6월부터 2022년 9월까지의 화재지역과 비화재지역의 연평균 기온 측정 – 2021년 9월부터 2022년 9월까지 툰드라 화재지역과 비화재지역에서의 연평균 토양수분함량 측정 – 2022년 7월부터 9월까지의 Council 적설펜스 실험지 tussock tundra에서 적설과대지역 (East)과 적설과소지역 (West)의 이산화탄소 방출량 측정
(국내학술용역, 이커넥트)	이중화 구조의 위성 게이트웨이, 복합센서 모듈개발	● 동토층 환경인자 수집용 통합형 복합센서의 통신 모듈 개발 – 토양온도, 토양함수비, CO2, CH4 센서 연결이 가능한 자가 발전형 무선 통신 모듈 하드웨어 설계 및 제작(자가 발전형 무선 복합 센서 모듈) – 자체 저장 매체를 내장하는 방식으로 설계하여 2년 이상의 연속 관측 데이터 저장기능 확보(측정 주기 1분 이내)(모듈 50set, 통신 검증 완료) – 배터리와 자가 발전을 이용하여 극지환경(알래스카 카운실 기준)에서 2년 이상 연속 동작이 가능하도록 설계 및 제작(방수 방진은 IP67 이상) ● 위성통신용 게이트웨이 개발 – (주요기능) 자가 발전형 무선 복합 센서 모듈로부터 전송된 관측데이터를 자체 내장된 저장 매체에 저장하고, 설정된 주기로 평균값을 계산하여 위성 통신 모뎀을 통해 극지연구소 서버에 전송하는 기능 확보 – 위성통신을 통한 전송주기, 평균값 계산 주기, 센서의 측정 주기는 위성 통신을 통해 설정가능 – 365일 안정적으로 데이터가 수집될 수 있는 위성 통신 기술 적용개발 – 시스템은 신뢰성 확보를 위해 이중화 설계(2set를 센서 통신 및 환경인자 데이터 저장, 가능하도록 제작후 성능 검증) – 배터리와 자가 발전을 이용하여 극지환경(알래스카 카운실 기준)에서 2년 이상 연속 동작이 가능하도록 설계, 제작(방수 방진은 IP67 이상) ● 복합 센서 모듈 및 위성게이트웨이 RF 성능 및 소비전력 – 통합센서 모듈 50set, 위성게이트웨이 2set에 대한 RF 성능 및 소비전력 분석 데이터 확보
	WPAN/LP-WAN 통합 무선 센서 네트워크 기술 개발	● 펌웨어 프로그램 개발 및 원격 제어가 가능한 위성 통신용 게이트웨이 개발 – 관측거점의 센서 네트워크 구축을 위한 저전력 장거리 통신을 포함하는 구조로 극지 환경에서 최소 5km 이상의 통신 범위를 갖도록 설계 – 복합센서 노드 128노드 이상 네트워크 구성과 데이터 수집이 가능한 하드웨어 설계 및 시제품 제작

		– 원격으로 측정 제어 및 보고(Reporting) 알고리즘 변경이 가능한 구조 : 게이트웨이에 내장된 프로그램 알고리즘과 센서 노드 제어 알고리즘을 원격으로 업데이트하고 복구할 수 있는 구조로 설계 개발. 펌웨어 프로그램 개발시 데이터 손실 방지를 위한 2중구조 이상의 작동 원리 탑재 – 1차년도에 적용한 근거리 통신 기능을 지원하는 구조 (ZigBee 3.0) – Campbell Scientific 社의 CR1000 또는 CR3000 데이터로거와 ModBus 연동이 가능한 구조로 설계 – 최저 동작 온도(–40℃)를 만족하여 정상적인 운전이 가능한 환경인자 측정시스템 개발 – 프로그램을 통한 관측장치 전원 및 통신 성능 개선 – 장단거리 혼합형 128노드 센서 이상 사용 가능한 펌웨어 프로그램 개발 ● 복합센서 인터페이스 및 무선통신 모듈 개발 – 중장거리용 네트워크 모듈이 탑재된 복합센서 인터페이스 개발 : 중장거리 네트워크 기술은 극지 환경에서 최소 5km이상의 범위를 갖도록 설계하며 태양광 등 에너지 수확 시스템을 사용하여 최소 1년 이상 끊김없이 데이터를 확보할 수 있도록 개발 – 단거리용(수백 m) 네트워크 모듈 탑재 복합센서 인터페이스 고도화 : 1차년도에 개발되어 설치된 복합센서 모듈의 전원 및 통신 성능 개선, 성능시험과 신뢰성 시험, 센서 품질 및 신뢰성 평가를 수행하여 센서 인터페이스 회로 개선 및 계측 알고리즘 개선 – 극저온 환경에서 인내할 수 있는 보호 기술 적용 : 제작된 시제품의 방수·방진 보호용 코팅 및 내구성 강화 방법을 적용, 센서 코어와 기타 연결부의 내구성 강화 기술 적용 – 정밀도가 높은 센서를 접목한 기준 복합센서 모듈 개발 : CO2, CH4 등 고정밀 센서를 사용하여 관측 사이트의 수집데이터의 품질 검증과 보정을 위한 기준이 되는 고급형 복합센서 모듈 개발 – 최저 동작 온도(–40℃)를 만족하여 정상적인 운전이 가능한 환경인자 측정시스템 개발 – 외부 함수비에 대한 PCB의 센서 코어 및 기타 연결부의 내구성 강화 및 코팅 ● RF 성능 및 소비전력 분석 – 근거리 및 중거리 RF 성능 및 소비전력 분석 데이터 확보
	중장거리 무인 데이터 관측 시스템 현장설치, DB구축, 시각화	▪ 알래스카 카운실 관측사이트에 설치 및 운영 ▪ 극지환경인자 관측시스템용 배터리 장치 및 이의 온도 제어 방법 (Battery Apparatus for Polar Environmental Observation System and Temperature Control Method) : 특허출원 1건
	연구개발 결과(요약) ■ IoT 기반 북극환경인자 통합관측 플랫폼 구축 [1] 북극 환경인자 관측 시스템의 개념도로 관측거점에 설치 운영되는 물리적 장치와 인터넷 환경에서 동작하는 소프트웨어로 구성되며 수집된 환경인자 데이터를 수집·저장·분석하여 연구자에게 제공하는 무인 관측 시스템 개발 [2] 관측 사이트에서 위성통신을 통해 전송되는 데이터는 자료수집서버에서 인덱싱되어 시계열 데이터베이스에 저장됨. 저장된 데이터는 MQTT 프로토콜 또는 SQL을 통해 다른	

	(기존) 데이터베이스와 연계가 가능한 구조로 개발 [3] 통합 관측 플랫폼은 1)자료수집 서버, 2)시계열 데이터베이스, 3)시각화 서버로 구성됨 ■ 통합형 복합센서 인터페이스 및 무선통신 모듈 개발 [1] 센서노드와 게이트웨이에 사용할 무선통신 기술을 선정하기 위하여 최소 수 km 이상의 통신 도달거리 달성을 위해 저전력 중장거리 무선통신 기술인 LoRaWAN와 Sigfox 기술 비교 분석 [2] 통신 속도, 패킷 길이, 소비 전력, 통신 도달 거리를 중요한 성능으로 판단하여 통신 거리는 비교적 불리하나 다른 성능이 우수하여 LoRaWAN을 적용하여 관측 시스템 개발 ■ 북극환경인자 DB 설계 및 수집 시스템 구축 [1] 환북극 동토거점에 기설치된 센서 및 관련 시스템에 대해 동토-대기 환경인자 분석 및 가시화 시스템 구축을 위한 DB 구조, 기능 설계 [2] 북극 동토거점 동토-대기 환경인자 자료 준 실시간 수집 및 분석 시스템과 웹기반 가시화 시스템 구축 ■ 개발 시스템 특허출원 [1] 특허명: 극지환경인자 관측시스템용 배터리 장치 및 이의 온도 제어 방법 [2] 극지환경인자 관측시스템용 배터리 장치는 극저온 환경 인자를 관측하는 복합센서 장치인 환경인자 관측장치, 환경인자 관측장치의 구동전원을 생산하는 자가발전장치, 자가발전장치에서 생산된 구동전원의 일부를 저장하고 저장된 구동전원을 환경인자 관측장치로 공급하는 항온 배터리 장치를 포함하며, 항온 배터리 장치는 그 내부 온도에 대응하여 선택적으로 발열되는 발열부재 및 외부로의 열전도를 방지하는 단열부재를 포함하여 그 내부의 온도가 항상 상온을 유지하는 항온 배터리장치를 주 내용으로 함	
(1단계) (전문가 활용 동향 분석)	북극관련 레질리언스 등 동향 분석	● 북극권 환경변화에 대한 레질리언스 등 국제 동향 분석 - 레질리언스 정의/태동/사례 연구 등 분석, 정리 - 북극 레질리언스 행동 프레임워크(Arctic Resilience Action Framework, ARAF) 분석 - AMAP(The Arctic Monitoring and Assessment Programme; 북극모니터링평가 프로그램) 분석 - CAFF(The Conservation of Arctic Flora and Fauna Working Group; 북극동식물 보전) 분석 - EPPR(The Emergency Prevention, Preparedness and Response Working Group; 비상사태 예방 준비 대응) 분석 등 ● 북극기후변화업데이트 2021: 주요 동향 및 영향 분석 - 북극 기후변화 업데이트 2021: 주요 동향 및 영향
최종	환북극 동토-대기 환경변화에 따른 온실기체 거동 규명	● 동토거점 관측시스템 종류 및 기간 확대를 통한 고도화 ● 동토거점 환경인자DB 분석 및 가시화 시스템 구축 ● 북극권 육상-대기 관측망 국제 네트워크 가입을 통한 환경인자 DB 활용도 제고 ● 실측/위성/모델 자료를 이용한 북극권 육상 탄소순환 변화 평가
	북극 동토 에어로졸의 생성-성장 특성 및 기후적 피드백 평가	● 스발바르 거점 제플린/그루바뎃 관측소 기반 실시간 화학-물리적 입자 특성 관측 ● 다양한 북극 관측 거점 기반 입자 특성 자료의 통합적 분석 ● 북극 대기 입자의 생성-성장-소멸과 북극 기후시스템의 피드백 과정 증거 확보 및 기후적 영향 가설 제공 ● 사례별 에어로졸 및 전구물질의 거동 특성 분석
	동토 환경인자 관측 및 분석을 위한 Smart Polar Platform	● 환경인자 멀티 센서 통합 관측 시스템 개발(환경인자 4종) ● 모니터링 시스템 원격 및 에너지 하베스팅 기술 고도화(64 노드) ● CPS/무선센서 네트워크 기반 환경인자 관측시스템 구축(128 노드) ● 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현 및 Smart

	구축	Polar Platform 구축(통신거리 ≥5 km) – 북극권 육상–대기 환경변화 예측 및 대응 기술 개발은 북극권 환경변화에 대한 현장에서의 정밀측정시스템을 이용하여 기초 데이터 확보 수행 – 이러한 환경변화를 예측하기 위해 여러 에너지원을 통합하여 효율적으로 환경변화량을 확보할 수 있어 향후 극한지역에서의 인간 활동에 필요한 데이터를 확보. 이러한 데이터를 확보할 수 있도록 하는 정밀측정시스템의 안정적인 전력 시스템 구축은 무엇보다 중요한 과제임 – 따라서 환경변화 대응 기술로 효율적인 에너지 관리시스템을 고도화하여(예: 작은 전력에너지를 이용한 센싱 및 통신 기술) 개발 – 특히 구동회로의 소모전류 억제 및 발열감쇄 효과 회로 개선으로 기존 환경 데이터 확보를 위해 사용되는 배터리 등을 최소화하고 태양열 발전 등을 이용하고 저전력 시스템을 개발하여 재생에너지를 이용한 안정적인 전력 시스템을 구축함 – 저전력 장거리 무선통신 장치의 성능 고도화를 위하여 장거리 전송에 더 좋은 성능을 가지는 LPWA기반의 인터페이스 모듈 개발 – 북극 동토–대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명에서는 복합전원제어에 대한 정량적 평가를 위한 인터페이스 개발, 자가발전 장시간 저전력 시스템 개발, 이에 대한 핵심기술 개발성과를 바탕으로 실제 북극권 현장 pilot test를 수행하여 개발성과의 현장적용에 크게 기여함

KOPRI
극지연구소

나. 위탁과제(세부내용은 각 위탁과제보고서 별도 제출함)

□ 1위탁과제(광주과기원 : 북극권 환경변화에 따른 나노사이즈 미세먼지 생성 및 특성 변화 연구)

년도	연구개발 목표	연구개발 내용 및 방법
1차년도 (1단계 1차년도)	북극권 나노입자 특성 장기 및 집중 관측자료 확보	▪ 북극다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행
2차년도 (1단계 2차년도)	북극권 나노입자 특성 장기 및 집중 관측자료 확보	▪ 북극다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행
	북극 환경변화에 따른 나노입자의 생성 원인 변화 규명	▪ 북극권 에어로졸의 물리화학적 특성, 기상 및 가스자료 등을 국제공동연구진과 협력을 통해 추가 확보 ▪ 인공지능 기법을 활용한 북극권 나노입자생성 예측 모델 개발에 활용
3차년도 (2단계 1차년도)	북극권 나노입자 특성 장기 및 집중 관측자료 학보	▪ 북극다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행 ▪ 북극해 선박 (아라온) 관측을 통한 나노입자의 크기분포 및 수농도 집중관측 수행
	북극권 환경변화에 따른 나노입자의 생성 원인 변화 규명	▪ 인공지능 기법을 활용한 북극권 나노입자생성 예측 모델 개발에 활용 ▪ 다양한 지역/계절/시간 변화에 따른 나노입자의 생성 특성 자료와 비교분석을 통해 북극 지역의 나노입자생성 특성의 차별성 및 유사성 도출 (+인공지능 기법 활용)
4차년도 (2단계 2차년도)	북극권 나노입자 특성 장기 및 집중 관측자료 학보	▪ 북극다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기관측 수행
	북극권 환경변화에 따른 나노입자의 생성 원인 변화 규명	▪ 북극권 환경변화 요인(대기 온도, 습도, 바닷물 특성 (온도, 생물학적 특성 등))과 나노입자의 생성 및 성관 관련성 규명 ▪ 북극권 나노입자의 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악 ▪ 다양한 지역 (도심, 농촌 지역 등)에서 확보된 나노입자의 생성 특성자료와 비교분석을 통해 북극 지역의 나노입자생성 특성의 차별성 및유사성 도출

□ 2위탁과제(광주과기원 : 북극권 미세먼지 예측 개선을 위한 대기질 모델링 고도화)

년도	연구개발 목표	연구개발 내용 및 방법
1차년도 (1단계 1차년도)	– 대기화학 모델링: 입력자료 분석 – 위성 (MODIS) 관측 에어로졸 광학특성 자료 분석 (2016년 – 2018년)	• 북극권 배출량 자료 확보 및 분석 • 북극권 기상 특성 분석 • MODIS 센서 관측 에어로졸 광학적 두께 시공간 분포 특성
2차년도 (1단계 2차년도)	– 대기화학 모델링: 민감도 테스트를 통한 배출량 최적조건 – 위성 (MODIS) 관측 에어로졸	• 기상모델 구동을 통한 대기화학모델 기상 입력자료 생성 • 북극권 배출량 인벤토리에 대한 민감도 테스트 수행 • MODIS 센서 관측 에어로졸 광학적 두께 시공간 분포 특성

KOPRI 극지연구소

	광학특성 자료 분석 (2019년 - 2021년)	
3차년도 (2단계 1차년도)	- 대기화학 모델링: 최적조건 구동 - 위성 (MODIS) 관측 에어로졸 광학특성 자료 분석 (2022년)	• 최적화 조건 3차원 대기화학모델 (CMAQ 모델) 구동 (2019년 대상) • 모델모의 성능 평가 (지상관측 및 위성관측 자료와 비교) • MODIS 센서 관측 에어로졸 광학적 두께 시공간 분포 특성
4차년도 (2단계 2차년도)	- 대기화학모델-위성자료 통합한 재분석 에어로졸 자료 생산 (2019년 대상) - 위성기반 에어로졸 광학특성 종합 분석 (2016년-2023년 대상)	• Optimal Interpolation 기반 자료동화 수행 • 재분석 에어로졸 광학적 두께 자료 산출 • 위성관측기반 에어로졸의 장기 경향, 시공간적 특성 및 에어로졸 유형 구분

□ 3위탁과제(경인여자대학교 : 북극지역 대기 에어로졸의 조성 및 흡습성에 따른 광학특성 파악)

년도	연구개발 목표	연구개발 내용 및 방법
1차년도 (1단계 1차년도)	북극지역 대기 미세먼지의 조성 특성 파악	• 북극지역 미세먼지 조성자료 확보: 북극지역 미세먼지 조성과 광학적 특성 파악에 필요한 최신 자료 확보 • 북극지역 미세먼지 생성 전구물질 측정자료 확보 • 북극지역 대기 미세먼지의 조성관련 변화 Trend 파악 - 확보된 자료를 바탕으로 북극지역의 대기 에어로졸 조성의 변화 동향 파악
2차년도 (1단계 2차년도)	북극지역 대기 미세먼지의 유·무기 조성에 따른 흡습성장 및 광학 특성 모수화	• 북극 지역 미세먼지 조성에 따른 흡습특성 파악 - 북극지역 에어로졸의 조성에 따른 CCN 생성 관계 파악 • 북극 미세먼지의 유기 성분 조성의 흡습성장이 미세먼지 광학특성에 미치는 영향 파악 • 북극지역 미세먼지 흡습성장에 영향 요소 파악 - 북극지역 에어로졸의 크기분포 특성과 흡습성장 모수화: 북극지역 에어로졸의 크기분포 특성이 흡습성장에 미치는 영향 모수화
3차년도 (2단계 1차년도)	북극지역 대기 미세먼지의 수분 특성에 따른 에어로졸 생성과정 파악 및 광학특성 분석	• 북극지역 미세먼지의 액상반응이 미세먼지 생성에 미치는 영향 파악 - 황산염 생성기여도 파악을 위한 북극지역 미세먼지 조성 특성 경향 파악 • 수분에 의한 에어로졸 생성 메커니즘 이해 - CCN/IN등 흡습 성장에 의한 에어로졸 생성 모사 • 조성에 따른 광학적 흡수 특성 규명
4차년도 (2단계 2차년도)	북극 미세먼지의 크기분포에 따른 흡습성장 및 수분 특성에 따른 기후변화 영향 및 기여도 산출	• 북극지역 미세먼지의 흡습성이 크기분포에 미치는 영향 파악 - 북극지역 에어로졸의 흡습 특성 모사 - 에어로졸의 흡습성장이 크기분포에 미치는 영향 모수화 • 북극지역 광흡수 에어로졸의 특성 분석 - Zeppelin에서 측정한 BC와 CO분석을 통하여, 북극 광흡수 에어로졸의 특성 분석 • 북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성 연구 및 영향요소 파악 - 북극지역 황산염 생성 특성 및 액상 반응에 의한 황산염 생성 기여도 분석 • 1, 2단계의 연구내용을 취합 최종적으로 북극 미세먼지의 조성 및 흡습성장 특성 파악 및 크기분포와 조성특성을 고려한 광학특성 영향 파악 알고리즘 제시

□ 4위탁과제(고려대학교 : 북극권 환경 변화와 기후변화감시물질 변동성 상호연계성 연구)

년도	연구개발 목표	연구개발 내용 및 방법
1차년도 (1단계 1차년도)	북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기 조성물질 관측, 재분석자료조사 및 수집	• 북극권 및 유라시아 지역 기후, 환경, 해양, 그리고 대기 조성물질 관측 및 재분석 자료 조사 • 자료 제공 기간, 해상도, 변수 종류 등을 고려해 각 인자 수집
2차년도 (1단계 2차년도)	북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 전 지구 모델로부터 자료조사 및 수집	• 북극권 및 유라시아 지역 기후, 환경, 해양, 그리고 대기 조성물질 모델 자료 조사 • 모델 자료 검증 사전연구 조사
	수집된 기후/환경인자 및 기후변화감시요소 중 대기조성물질 자료 검증 및 기초분석(변화/변동 양상)	• 수집된 관측 및 재분석 자료 중심으로 북극권 및 유라시아 지역 기후, 환경, 해양, 그리고 대기 조성물질 연, 계절 평균 공간 분포 분석 • 수집된 관측 및 재분석 자료 중심으로 북극권 및 유라시아 지역 기후, 환경, 해양, 그리고 대기 조성물질 장기 변동성 및 추세 분석 • 산불기원 에어로졸의 거동에 따른 해상수송 및 침적 확인, 에어로졸이 해양생산력에 미칠 수 있는 영향력을 확인하여 산불 과정에서 대기로 배출된 탄소의 해양 재흡수 효과 파악
3차년도 (2단계 1차년도)	지역별 기후/환경인자 및 대기 조성물질 자료 시공간 변동성 분석	▪ 북극 환경변화와 한반도를 포함한 유라시아 대기 조성물질 상관성을 연구하기 위해 유라시아 지역 대기 조성물질(PM2.5) 연/계절 배출량 확인, Empirical Orthogonal Function(EOF) 분석 진행 ▪ 동아시아와 유럽 등 도시화 산업화가 많이 이루어진 곳 중심으로 기후인자와 대기 조성물질(PM2.5) 고/저농도 경우 상관성 평가 ▪ 산불기원 에어로졸의 북극해 수송 및 해양생산력 변화확인 ▪ 산불기원 블랙카본 에어로졸의 해빙 융해속도 영향 확인
4차년도 (2단계 2차년도)	북극권 및 지역규모에서 기후/환경/해양인지와 대기조성물질 간의 시공간적 변화 추세 비교분석	▪ 에어로졸과 같은 기후변화감시물질 및 다른 대기조성물질을 기분석된 기후/환경/해양인자의 시공간적 변동과 상호 비교하여 관련성이 있는지 파악 ▪ 북극 해빙감소와 에어로졸 농도의 연관성처럼 대기 에어로졸을 포함한 기후변화감시물질과 기후/환경/해양학적 요소간의 연계성 파악

□ 5위탁과제(고려대학교 : 북극권 환경변화에 따른 식생별 탄소 flux의 거동 연구)

년도	연구개발 목표	연구개발 내용 및 방법
1차년도 (1단계 1차년도)	북극 툰드라 생태계의 주요 식생별 탄소 플럭스 분석	• 환북극 툰드라 지역의 다양한 식생 분포에서 미기상학적 방법을 이용한 온실기체 자료들을 수집 및 분석 정리, 식생종류 및 기후환경 변화에 따른 온실기체 플럭스 범위 파악 • 북극 툰드라 지역(예, 알래스카, 캐나다)에서 챔버시스템을 이용하여 측정된 각 식생별 온실기체 자료 분석. 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량을 정량화하고, 이를 이용하여 광합성량(총일차생산량)을 추정하여 탄소순환을 구성하는 생태계의 각 성분에 대한 값을 정량화 함(Gross primary productivity = Ecosystem respiration – Net ecosystem exchange)
2차년도 (1단계	북극 툰드라 생태계의 주요 식생별 탄소 플럭스	• 북극 툰드라 생태계의 식생 및 다양한 조건에 대한 메탄 플럭스 결과들을 조사 및 분석하여 툰드라 시스템의 탄소순환에

2차년도)	분석과 다양한 환경조건에서 식생별 탄소 플럭스 거동 분석	서 메탄 플럭스의 역할과 관련한 환경 인자들에 대하여 분석 • 북극 해빙기 동안 툰드라의 다양한 식생에 대한 이산화탄소 및 메탄 플럭스를 정량화하고, 각 온실기체의 발원(흡원)을 분석 후, 세부 1과제와의 긴밀한 협조 하에 에디공분산 방법과의 상호 비교를 통해 생태계 규모로 공간을 확장하여 탄소순환 과정을 이해 • 극지 동토 탄소순환에 관여하는 주요한 환경인자(기상 자료 및 토양 온도 및 수분 자료)들을 모니터링하여 다양한 환경조건에서 각 식생의 탄소순환에 관여하는 인자들을 파악하고 상관관계 분석
3차년도 (2단계 1차년도)	북극 동토의 다양한 환경 조건에서 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석	▪ 극지의 주요 식생인 초본, 이끼류, 지의류에서 기온과 토양 수분에 따른 해빙시기 이산화탄소 및 메탄플럭스를 측정하여 광합성을 통한 식생의 흡수와 미생물에 의한 대기중 방출을 통해 탄소 플럭스 변화 파악 ▪ 북극의 해빙기 동안 초본, 이끼, 지의류 등 다양한 식생에 대하여 토양 상태가 습한 정도, 식생의 유무, 인위적인 수분 조절(snow fence), 실내 토양수분 조절 실험(SCI급 논문 1편 출판) 등 다양한 환경조건에 따른 이산화탄소 및 메탄 플럭스 자료를 확보하여 1세부과제의 에디공분산 자료와 비교, 모델링 검증 자료로 확보 – 북극 툰드라 생태계에서 식생의 광합성을 조절하는 인자 중 해빙시기에 매우 중요한 토양수분 조건을 고려하여 탄소 플럭스 변화를 감시하면서 식생의 역할 조사
4차년도 (2단계 2차년도)	북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명	• 북극 툰드라 생태계를 구성하는 식생 및 토양에서의 이산화탄소 교환량과 호흡량 및 광합성량을 이용하여 툰드라 생태계 탄소순환의 특징을 분석 • 툰드라 생태계 탄소순환에서 이를 조절하는 동토 환경인자를 조사하여 상관관계를 파악하고 식생의 종류 및 분포에 따른 영향을 분석

□ 6위탁과제(서울대학교 : 위성 영상 기반 북극 동토지역 이산화탄소 플럭스 모니터링)

년도	연구개발 목표	연구개발 내용 및 방법
1차년도 (1단계 1차년도)	생물리기작 모델 BESS-Polar 개발용 입력자료 다운로드 및 전처리를 통한 자료 구축	• 극지 툰드라 지역을 대상으로 1982~2022년 순 생태계교환량 지도 제작을 위해서 BESS-Polar 입력자료 확보 • 해당 자료들은 지도 제작 기간에 맞추어 다운로드 및 전처리 진행
2차년도 (1단계 2차년도)	생물리기작 모델 BESS-Polar 개발을 위한 생태계 호흡 및 순생태계교환량 모듈 개발	▪ 시공간적으로 일관된 자료구축 – 지도 제작 기간(1982~2022년)을 고려하여 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)와 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 자료 이용 – 매개변수별로 AVHRR과 MODIS에서 산출된 자료 간의 상호교정(inter-calibration) 수행—상호교정은 MODIS 자료를 기준으로 AVHRR 자료 교정하였으며, 2002~2017년 자료를 이용하여 상호교정 계수 산출 ▪ BESS-Polar 호흡 및 순 생태계교환량 모듈 개발 – 호흡(Terrestrial Ecosystem Respiration; TER) 모듈 개발 – GPP와 TER의 차를 기반으로 순 생태계교환량 산출하는 BESS-Polar 개발(본 연구에서는 관련 수식을 기반으로 호흡

		모듈 개발) – 최종적으로 순 생태계교환량 (NEE)은 TER과 GPP의 차로 산출되며, 본 연구에서 개발된 모듈은 MATLAB 언어 기반으로 알고리즘 구현 및 스크립트 작성 완료
3차년도 (2단계 1차년도)	1982~2022년 기간의 BESS-Polar 탄소 플럭스 지도 제작 / BESS-Polar 탄소 플럭스 지도를 다른 머신러닝 모델의 플럭스 지도 및 FLUXNET 현장 자료와 비교평가	▪ BESS-Polar 탄소 플럭스를 현장 단위에서 평가 (FLUXNET과 한국극지데이터센터(KPDC) 등재 환경인자 DB(플럭스타워)를 활용하여 현장검증) – 북위 60° 북쪽 지방에 위치하는 18개의 FLUXNET 지점 중 12개년 이상의 자료를 제공하는 5개의 지점을 평가를 위한 지점으로 선정 – 한국극지데이터센터(KPDC)로부터 환경인자 DB를 제공받아 BESS-Polar 탄소 플럭스 비교, 평가 시도하였음 ▪ BESS-Polar 탄소 플럭스를 지연 단위로 평가 (머신러닝기반의 국외 모델의 탄소 플럭스와 비교검증) – 지연 단위에서 비교 · 평가하기 위하여 머신러닝 기반의 국외 탄소 플럭스 모델인 FLUXCOM를 선정하여 평가 ▪ 온실기체 미래 배출 전망 제시를 위한 BESS-Polar 기반의 과거 자료 1세부과제에 제공 – 1982~2019년 BESS-Polar GPP, TER, NEE monthly 자료를 클라우드를 통해 세부 1에 프로토콜과 함께 제공
4차년도 (2단계 2차년도)	1982~2022년 기간 동안 극지방 순 생태계교환량 시 · 공간 경향성 분석	▪ 극지방 탄소플럭스의 시 · 공간 경향성 분석 – 1982~2022년 기간 동안의 북위 60도 이상 극지방의 탄소플럭스 (총일차생산량, 호흡량 및 순 생태계교환량)의 추세파악을 위한 시간적 변화패턴 분석 – 1982~2022년 기간 동안의 극지방 탄소플럭스의 연간 변동성 분석

KOPRI 극지연구소

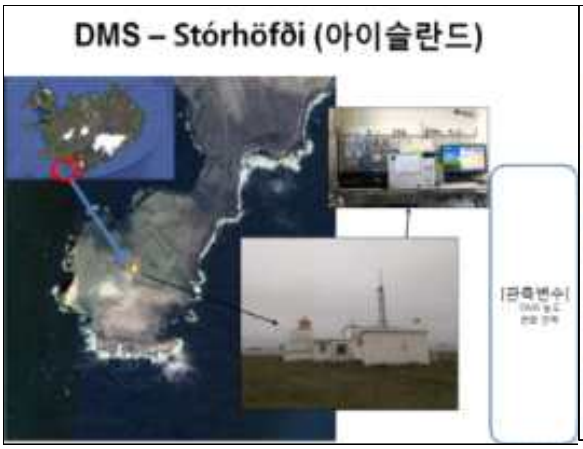
▣ 북극이사회 6개 국가 내 관측거점 개관

[미국 알래스카 거점 상황 및 관측변수]

[캐나다 캠브리지베이 거점 상황 및 관측변수]

[노르웨이 스발바르 거점 상황 및 관측변수]

[그린란드 노르드 거점 상황 및 관측변수]



[아이슬란드 스토르호퍼이 거점 상황 및 관측변수]

[러시아 바라노바 거점 상황 및 관측변수]

Fig.5. Characteristics of each observation node in permafrost area of six nations of Arctic Council.

관측거점은 위도 64° N에서 81° N에 이르며, 북극을 대표하는 지역에 위치하고, 2016~2019년 거점 관측 자료에 따르면 월평균 기온은 제2거점인 캠브리지베이와 제4거점인 그린란드 노르드의 기온이 가장 낮은 영하 33℃에서부터 여름철에는 미국 알래스카 카운실 거점에서 11℃ 이상을 기록함. 지역에 따른 강수량의 차이와 함께 관측지의 활동층의 깊이, 토양 수분 및 식생의 종류가 상이함. 북극 지역의 온난화에 따른 주요 생태 지역의 반응은 향후 북극 지역 온난화에 대한 이해에 매우 중요하며, 한편, 북극 동토층 관측지로의 접근의 어려움, 전원 및 통신 인프라의 부족으로 인한 양질의 자료 생산 및 안정적인 자료의 확보의 어려움을 극복하고, 동토층 지하로부터 대기에 이르는 통합 환경 감시 시스템을 유비쿼터스센서네트워크(USN; Ubiquitous Sensor Network) 기술에 기반하여 개발하고 각 거점에 적용하였고, 각 관측 거점은 미국, 캐나다, 그린란드, 이태리, 노르웨이, 독일, 프랑스 등 국제 협력연구를 수행하는 국외 연구팀과 공조하여 연구 및 관측시스템을 유지하고 있음.

(참고) 환북극 6개 관측거점 확보 내역(과학기술정보통신부-극지연구소, 2021)[1)]

- 미국 알래스카 카운실(Council) 거점 확보(2011년)
- 노르웨이 스발바르(Svalbard) 거점 확보(2012년)
- 캐나다 캠브리지베이(Cambridge Bay) 거점 확보(2012년)
- 그린란드 노르드(Nord) 거점 확보(2015년)
- 아이슬란드 스토르호퍼이(Stórhöfði) 거점 확보(2016년)
- 러시아 바라노바(Baranova)거점 확보 (2017년) * 현재 러-우 전쟁으로 잠정 중단

KOPRI 극지연구소

1) 미국 알래스카 카운실(Council) 거점

□ 지리적 특성 및 과학적 의의

본 연구과제의 환북극권 관측 제1거점인 알래스카 카운실 거점은 64° 50.6′ N, 163° 42.32′ W에 위치하고 있으며, 여름철에는 표층이 녹아 활성층(active layer)이 약 60~70cm 두께로 존재하는 불연속 동토층 지대임. 이 지역은 수목(tree)의 북방한계선에 해당하여 장기적인 모니터링을 수행 시 향후 북반구 고위도 지역에서 식생분포 변화를 보여줄 수 있는 매우 좋은 입지조건을 갖추었음. 또한 알래스카대학 국제북극연구센터(IARC; International Arctic Research Center)에서 물수지 연구를 진행해오던 사이트여서 1998년부터 일부 기상관측자료가 획득되어 기후변화 모니터링 관점에서 유리함. 또한 지표에 미분해 유기물층이 풍부하게 존재하여 메탄 발생과 관련한 연구에도 적합함.

카운실 사이트에는 이전 단계 과제 수행을 통해 이산화탄소 교환량 측정을 위한 자동챔버시스템(자체제작)과 대기복사계, 에디공분산시스템 및 태양광발전시스템이 설치되어 목표로 했던 관측시스템 구축이 완료되었음. 관측지 주변 식생분포 조사에 의하여 대표 식생을 분류하고 각 식생 종류별 이산화탄소 교환량 측정을 위하여 자동 챔버시스템을 설치하여 하계 기간 동안 연속적인 관측 및 이리듐 위성 등을 이용한 자료전송이 이루어지고 있음.

1) '환북극 동토층 환경변화 분석을 통한 미래 예측 및 유용물질 응용 기술 개발' 최종보고서(2021.10)

2) 캐나다 누나붓 준주 캠브리지베이(Cambridge Bay) 거점

□ 지리적 특성 및 과학적 의의

제2거점은 캐나다 누나붓 준주의 캠브리지베이(69° 7′ N, 105° 3′ W)에 위치함. 캠브리지베이에는 인구 약 1,500명이 거주하고, 북극대학이 위치한 마을이 있고, 관측지는 마을에서부터 북쪽으로 자동차로 10분 거리에 있음. 관측지 주변에는 Environment Canada (EC) 소유의 지상 기상 관측 시스템과 상층 기상 관측 시스템이 있는데 운영과 관리는 현지의 Halmet of Cambridge Bay에서 담당함. 마을 인근 여러 개의 담수호가 있는데 관측지에 위치한 플럭스 타워를 기준으로 북서쪽으로 약 200m, 남서쪽으로 약 500m에 호수가 있으며, 북쪽과 동쪽으로 약 1km 떨어진 곳에 상대적으로 큰 호수가 있음. 관측지로부터 남동쪽으로 400m 이상 떨어진 곳에는 소각장이 있어, 남동풍일 때에는 자료의 선택에 주의가 필요함. 환북극 동토층 관측지 중에서 평균적으로 가장 추운 곳으로 1월 중 일 평균 기온은 -33℃까지 내려가며, 일 평균 기온에 근거하면 6월~8월 영상의 기온이 나타남. 강수량이 적어 토양은 상대적으로 건조하며, 선태류, 지의류, 그리고 10cm 이하의 초본류와 관목류가 주 식생을 구성함.

캐나다 정부는 2007년 “Strengthening Canada's Sovereignty and Place in the World"를 발표하여 2017년 이 지역에 월동 가능한 첨단과학기지 Canadian High Arctic Research Station(CHARS)를 건설하여 북극연구의 거점으로 활용하고 있음. 캐나다 북극 연구활동을 지원하는 천연자원부 Polar Continental Shelf Program(PCSP)과 CHARS를 주도하는 INAC는 우리나라와 극지연구 협력에 많은 관심을 표명하며, 국제공동연구의 일환으로 지지를 받고 있음.

KOPRI 극지연구소

3) 노르웨이 스발바르(Svalbard) 거점

□ 지리적 특성 및 과학적 의의

스발바르 거점은 본 과제에서 수행하는 제3거점으로서, 노르웨이 스발바르 군도 내의 니알슨(Ny-Ålesund) 주변에 위치(78° 55' N, 11° 56' E)해 있음. 니알슨은 Kongsfjord 해안에 위치하며, 34m 높이의 Amundsen-Nobile Climate Change Tower (CCT) 관측 타워는 니알슨으로부터 남서쪽 약 1.3km 떨어져 있다. CCT로부터 수 km 이내에 높고 가파른 산과 빙하, 깊은 계속, 평지 그리고 침강된 지역이 혼재되어 있음. CCT로부터 북쪽 방향에 Schetelig 산이, 남쪽으로는 Zeppelin 산과 그 정상부에는 GAW 지구급 관측소가, 동쪽으로는 니알슨의 오른편에 위치한 Mobile Mast가 있음.

4) 그린란드(덴마크) 노르드(Nord) 거점

□ 지리적 특성 및 과학적 의의

제4거점 그린란드 노르드(Nord)(81° 36′ N, 16° 40′ W)는 그린란드의 북동쪽 연안에 위치하고 있고, 캐나다의 Alert 군사기지를 제외하면 가장 고위도 북극에 위치한 유인 기지로 북극점에서 933km 떨어져 있음. 기후학적으로 북극해로부터 한류가 주변을 흐르기 때문에 하계기간 2개월 전후의 기간만 해빙이 녹으며, 육상 동토의 활동층의 깊이는 약 0.2m임. 연평균

기온은 영하 21℃이고, 6월부터 8월까지 여름철 최고(최저) 기온의 평균은 2~4 (-1)℃의 영상 기온이 나타남. 반면, 11월부터 3월까지 겨울철 기온은 평균적으로 영하 33℃까지 내려가며, 기록된 최저 기온은 영하 51℃이다. 강수량은 188mm로 적음.

노르드 거점에서의 기후는 북반구 중위도로부터 들어오는 난류로 인해 연중 많은 기간 해빙이 없는 스발바르 지역과는 대조를 이루는데 스발바르 지역 활동층은 약 1m임. 노르드의 풍향은 하계(6월~8월)에는 동풍이, 나머지 기간은 남서풍이 주풍으로 나타남. 풍속의 경우 11~12월에 상대적으로 강한데 주변의 빙상으로부터의 활강풍이 주원인으로 파악됨.

5) 아이슬란드 스토르호피이(Stórhöfði) 거점

□ 지리적 특성 및 과학적 의의

스토르호피이 거점(63.4° N, 20.3° W)은 아이슬란드 베스트만 제도에 위치하고 있으며, 기후변화에 따른 환경변화가 가장 빠르게 나타나는 북극에서 대기 중 기후냉각물질 변화 관측 및 이를 통한 자연발생적 기후변화 피드백 연구를 위한 한-아이슬란드 공동연구 차원에서 구축하였음. 본 거점의 과학적 의의는 아이슬란드 인근 지역이 차가운 북극해와 따뜻한 북대서양 해류가 만나는 지역에 위치하며, 또한 그린란드 기원 융빙수의 영향을 크게 받고 있기때문에, 기후변화에 따른 해양환경 변화가 급격히 일어나고 있고, 기후냉각물질(DMS; DiMethyl Sulfide)의 발생이 가장 높은 지역으로써, 온실가스에 의한 기후변화가 가장 급격히 진행되는 북극권의 DMS 모니터링 시스템 구축이 필요하였기 때문임. 아이슬란드에서는 주로 기상, 중금속, 주요 대기 화학 성분, 온실 기체 등을 측정하고 있음. 북극 고위도 지역에서의 연속적인 대기 DMS 자료 확보를 통해 'DMS-에어로졸-구름 형성' 기작에 대한 관측적 증거를 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 실시간 대기 관측 자료의 축적을 통해 해양 생물의 특성 변화에 대한 간접적 단서도 제공할 수 있음.

6) 러시아 바라노바(Baranova) 거점

□ 지리적 특성 및 과학적 의의

바라노바 거점(79° 16' N, 101° 45'E)는 북극해의 카라해(Kara Sea)와 랍티브해(Laptive Sea) 사이에 있는 Severnaya Zemlya archipelago의 볼쉐비키 섬의 북쪽 끝단에 위치하여, 러시아 바라노바 기지를 함께 사용함. 볼쉐비키 섬과 대륙의 시베리아 사이의 해협은 북극항로로 이용되기도 함. 바라노바 기지 주변은 북극에서 가장 연구가 안 된 지역 중의 하나임. 러시아 북극남극연구소(AARI; Arctic and Antarctic Research Institute)는 바라노바 기지를 Tiksi 관측소에 이은 제2의 북극해 국제기지로 개발하였음.

러시아는 2013년부터 기상, 해양학, 해빙, 지구물리, 수문학, 빙하학 등 다양한 분야의 연구를 수행해 오고 있으며, 여러 국제 관측 네트워크도 준비 중임. 대기환경 측면에서 지상 및 상층 기상관측, 대기복사, 난류 에너지 플럭스, 오존 전량, 대기 경계층 온도 구조를 관측하고 있음. 핀란드 기상 연구소와 함께 온실 가스 농도 및 에어로졸 연구도 수행 중임.

지표면 근처 토양층에서의 온도 및 수분 변화를 관찰하고, 모델을 이용하여 1930년대부터 활동층의 두께의 장기 변동을 추정해 오고 있음. 토양 타입은 Cryozems이며, 지표면 근처 토

양에는 돌이 많으며, 이 지역의 식생은 환북극 식생도에서 G1(Walker et al., 2005)에 속하며, 초본, 잎이 넓은 초본, 민꽃식물, 이끼, 지의류 그리고 우산이끼 등이 있음

▣ 1세부과제의 핵심 주제별 추진내용 및 연구개발결과

1) (주제-1) 북극 동토거점 관측 시스템 및 활용시스템 고도화

(1차 년도) 동토거점 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 관측시스템 고도화 계획 수립

가) 각 관측거점 점검

○ 알래스카 카운실 거점

· 현장 점검 기간: 2021.09.02.~09.14 (COVID-19 영향으로 추계 기간 방문)

· 활동 내용

- 에디공분산 플럭스 시스템 중 가스분석기 장애 및 데이터 로거 에러 발생으로 관측 중단되었고 동토 지반 융기로 인해 배터리 시스템 전도 및 일부 배터리 파손된 상태 확인함.
- 데이터 로거 장애는 현장에서 장비 재부팅 및 프로그램 수정으로 해결하고 가스분석기는 현장에서 회수(Fig. 1) 후 알래스카대학 실험실에서 점검한 결과(Fig. 2) 제조사 수리를 요하는 것으로 판단되어 반출 조치하였음. 신규 에디공분산 플럭스 시스템을 알래스카 현지에 발송해 두어 2차년도에 조기 관측 재개가 가능함.
- 카운실 관측거점 대기-토양 관측자료 획득 및 장비 운영을 재개하였음.

Fig. 1. Taking down of the eddy covariance system of the Council, Alaska (Sep. 2021)

Fig. 2. Check up of the eddy covariance system taken from the Council, Alaska (Sep. 2021).

- 지면식생 변화를 모니터링하는 식생카메라(페노캠)은 2019년 10월부터 2년간의 사진 자료를 온전히 보전하고 있어 안전하게 회수하였고 이로부터 2020년 융설(5월 11일) 및 적설(10월 15일) 시기를 확인하였음(Fig. 3).

Fig. 3. Phenocam images showing snow melt(May 11) and snow cover(Oct 15) of the Council site, Alaska in 2020.

- 순복사계와 기상 센서는 정상적으로 작동하고 있어 데이터로거 장애 복구 후 프로그램 수정. 9월 이후 동계 기간 기상 및 순복사 관측을 지속하도록 조치함.
- 신규 식생지수센서, PAR센서 설치, 태양광충전시스템 점검 및 배터리 전체 교체. 신규 식생지수(NDVI)센서 (모델 SD-500, ㈜쏠단) 도입하고 국내 테스트 완료 후 알래스카 현지에 발송하여 2차년도에 최대한 조기 관측이 가능하도록 준비하였음. 광합성량 추정을 위한 PAR 센서 (모델 LI-190, LICOR) 세트를 도입하고 알래스카 현지에 발송하여 2차년도에 조기 관측이 가능하도록 준비하였음. 동토 지반 융기로 인해 전도되어있던 배터리시스템을 복구하였으며 파손된 배터리는 폐기조치하였음. 하계 종료 시점에 방문한 관계로 배터리 전체 교체의 실효성이 낮아 2차년도에 방문시 신규 대용량 배터리로 교체할 예정임.
- 기타 동토 환경인자 수집장치 통신체계 점검, 교정 및 센서 설치 등 수행하였음.

KOPRI 금지연구소

▪ 미이행 내용 및 사유

- 메탄 플럭스 측정 거점, 광합성 측정 거점 각 1개소 추가 미완료 (COVID-19 관련 알래스카 주 외부인 방문금지 상황으로 인해 애초 계획한 2021년 여름철에 알래스카 거점을 방문하지 못하고 9월에 현장 방문이 가능해져 하계기간 메탄 관측 등 수행 불가).
- 그러나 메탄 측정장비와 광합성 관련 PAR센서 도입과 국내 테스트 완료 후 알래스카로 운송까지는 완료하였음. 이후 2차년도 하계에 메탄 측정 및 PAR센서 설치 완료하였음.

○ 캠브리지 베이 거점

· 기간: 2021.09.17.~09.14(COVID-19 영향으로 추계 기간 방문)

· 활동 내용

- 주전원 차단(2021.06.11~09.20)으로 모든 관측 및 자료 집록 중단된 상태였고 데이터로거 에러 발생, 동물에 의한 센서 케이블 일부 파손, 자료 저장 노트북 고장 상태 확인함.
- 주전원 복구 및 전원 공급 재개하고 (Fig.4), 데이터로거 운영 프로그램 수정 및 메모리 카드 교체로 정상 작동 확인하였음. 손상된 케이블 커버는 현장에서 수리 조치하였음.
- 에디공분산장비 플럭스 시스템 데이터로거 메모리카드 및 로거 데이터 자료 회수(3개 : 메인타워 로거, 세컨드타워 로거)
- 3대의 토양호흡 측정용 FD 챔버 자료회수, 블랙카본 측정 자료회수, 챔버시스템 토양온도 및 수분 자료 회수 완료하였음.
- 현지 백업용 KOPRI 노트북 자료 회수, 외장하드 자료 회수/기존에 저장되어 있는 데이터로거 프로그램 회수, 타임랩스 카메라 3대의 자료 회수 실시함.

– 거점 관리 및 자료 백업을 위한 현지 활용 인력 교육 실시하였음.

▪ 미수행 사항

– 에디공분산장비 플럭스 시스템 가스 분석기 교정 미수행

▪ 현재 상황

– 현지 인력 활용 작업 항목 작성 및 전달

– 주기(주, 월, 계절 단위) 현지 인력에 의한 관측지 점검 및 자료 백업 수행(Fig.5)

Fig. 4. Observation systems in Cambridge Bay, Canada in 2021 September.

Fig. 5. Uploaded data and job list done by the local person.

○ 스발바르 거점

· 기간: 2021.09 (이태리 극지연구소 위탁관리)

· 활동 내용

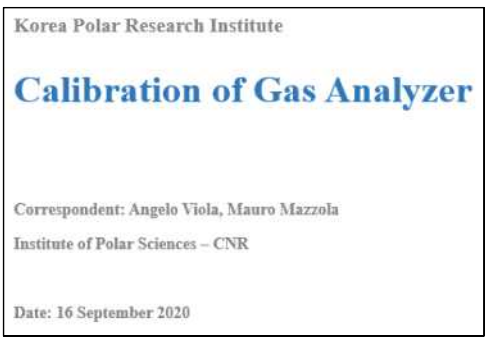
– 에디공분산 플럭스 시스템 가스 분석기 교정 미수행

– 에디공분산 플럭스 시스템 컴퓨터 원격 접속 및 자료 백업 불가

– 두 종류의 가스 분석기(LI7500 및 EC150) 교정 완료(Fig. 6)

– 극지연구소–스발바르 거점 플럭스 시스템 간 원격 접속 재개(Fig. 7)

– 2021년 플럭스 자료 백업 완료


Korea Polar Research Institute

Calibration of Gas Analyzer

Correspondent: Angelo Viola, Mauro Mazzola

Institute of Polar Sciences – CNR

Date: 16 September 2020

Fig. 6. Report for the calibration for gas analyzers from Dr. Angelo Viola.

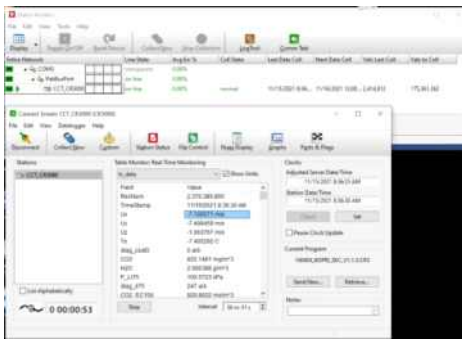


Fig. 7. Remote connection between KOPRI and the observation node.

○ 노르드 거점:

· 기간: COVID–19로 인한 미방문. 현지 인력으로부터 관측시스템 정보 입수(2021.09)

· 활동 내용
  – 전원 공급 중단. 관측 장비 훼손
  – 주 에디공분산 플럭스 시스템 관측 위치 이탈, 통신 중단에 따라 자료 백업 불가
  – 비전문가인 현지 인력에 의한 문제 해결이 불가하여 2차년도에 시스템 정상화 준비함.

나) 거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 고도화 계획 수립

○ 거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단(거점별 자료 수득률 중심)

· 과기부 선행과제에서의 분석 기간 이후 백업된 자료의 품질 평가 수행

– COVID-19 팬데믹 발생에 따른 거점별 방문에 따른 자료 백업 및 분석은 2019년 9~10월까지 이루어져 그 이후 자료에 대한 분석을 수행하였음.

· Table 1은 거점별 에디공분산 플럭스 시스템용 측기 구성, 전원(상시 전원 또는 배터리), 주기적인 관리 여부, 자료 백업 방식이 요약됨.

– 카운실 거점을 제외하면, 상시전원이 공급되며, 현지 인력을 통해 자료 백업이 가능함. 스발바르 거점의 경우 원격 접속이 가능하여 플럭스 시스템의 정상 작동 여부를 감시할 수 있으며, 백업도 주기적으로 가능함 .

· Table 2는 2021년 거점별 방문 또는 원격 접속을 통해 확보된 에디공분산 원시 자료를 최근 가장 많이 활용되는 EddyPro® (LI-COR, USA) 소프트웨어를 통해 분석한 결과를 요약함.

– 카운실 및 캠브리지베이 거점 자료는 2021년 현장 방문을 통해 확보.

– 스발바르 거점의 경우 원격 접속 및 이태리 연구자에 의해 상대적으로 관리가 잘 되어 다른 거점에 비해 자료가 많음.

– 노르드 거점의 경우 과기부 선행과제에서 분석된 기간 이후 확보된 자료가 없음. 전원 공급 실패에 따른 관측시스템 미작동으로 자료가 없는 것으로 추정됨.

– 품질 평가를 위한 주요 기준으로 1) 삼차원초음파 풍속계의 diagnostics, 2) LI-7500 가스분석기의 diagnostics를, EC150의 경우 diagnostics과 신호 강도(0.7 이하일 경우 제거), 3) 측정 변수 절대값의 크기를 고려하였으며, 플럭스가 산출되는 30분 시간에 대해 4) 분석에 이용 가능한 자료가 80% 이상일 경우에 대해 Level1 자료로 삼았음(EddyPro® 설명서(licor.com/env/supporrt/EddyPro/home.html).

– 카운실 거점의 경우 이용가능한 30분 단위의 원시자료는 분석 기간 중 30%이었으며, 이 중 Level1 자료는 13%이었음. Level1 자료는 모두 2019년 9월~12월에 분포하였으며, 2020년의 경우 사용 가능한 자료가 없었음. 이는 2019년의 경우 여전히 에디공분산 시스템을 가동할 만한 배터리로부터 전원 공급이 있었지만 2020년은 전원 부족에 따른 데이터 로거 오류 또는 가스분석기 오작동의 문제로 보임. 가스분석기를 제외한 삼차원 초음파 풍속계 자료만 처리했을 경우 Level1 현열 플럭스는 27%였으며, 특히 2020년 가을철에도 이용가능한 자료가 존재함. 이는 현재의 전력 시스템을 보완하면 봄철 및 가을철에도 이용 가능한 자료 획득이 가능한 것을 의미함.

– 캠브리지베이 거점의 경우 분석 기간 동안 자료 수득률은 99%이나 Level1 자료의 비율은 63%로, 스발바르 거점에 비해 23% 낮음. 특히 동계 기간 자료 비율이 전체 Level1자료 중 16%만을 차지하여 동계 기간 고품질 자료 생산에 주의를 기울여야 함.

– 스발바르 거점의 경우 상시 전원 이용과 원격 접속이 가능하여 거점 중 가장 좋은 인프라 및 상대적으로 높은 기온의 동계 기간으로 인해 원시자료 수득률 뿐만 아니라 Level1 자료 비율도 가장 높은 86%이었음.

– 바라노바 거점의 경우 원시 자료 수득률이 77%로 현지 관리 인력이 상주하는 것을 고려하면 캠브리

지베이 및 스발바르에 비해 낮으며, 특히 Level1 자료가 없음. 이는 삼차원 초음파 풍속계 및 가스 분석기의 작동 상태를 진단하는 diagnostics가 정상 범위를 벗어났기 때문임. 자료의 수득율이 낮은 이유는 데이터 로거 문제 또는 데이터 로거와 컴퓨터 간의 통신문제이며, 결론적으로 바라노바 거점의 경우 에디공분산 플럭스 시스템 전체를 교체해야함.

○ 1차년도 관측거점 시스템 진단에 근거한 고도화 계획 수립

각 거점별 관측 현황을 토대로 거점별 관측고도화 계획은 아래 Table 3과 같음. 고도화 계획의 주안점은

- 주요 온실기체인 메탄 플럭스 관측 거점 확대,
- 위성관측과 연계하기 위해 이산화탄소 플럭스의 구성요소인 광합성량 및 관련 식생계절성 관측 추가,
- 자료 수득률 향상을 위한 원격 감시 시스템 구축 및 보완관측 수행에 있음.

– 우선 2차년도인 2022년에는 알래스카 카운실 거점에서 여름철 메탄 플럭스 관측을 수행할 계획임. 또한 러시아 바라노바 거점에서 메탄 관측을 추가할 계획임. 그러나 러시아 상대기관의 연구협력 재개가 조기에 이뤄지지 않는 경우에는 타 거점에서 메탄 관측을 수행하여 1단계 목표인 총 2곳의 메탄 플럭스 관측 추가를 달성할 계획임.

– 광합성량 및 식생활성도 정량화를 위한 fPAR 및 NDVI 관측은 온실기체를 측정하는 5개 거점 모두에 추가할 계획이며 2차년도에 3개 거점, 3차년도에 2개 거점에 설치할 예정임. 단, 러시아 바라노바 거점 활동이 불가할 경우 총 4개 거점에 설치할 계획임.

– 카운실 거점의 경우 온실기체 플럭스 측정 기간을 기존 하계(6~8월)에서 5~11월로 2배 이상 확장하여 봄철 및 가을철의 이산화탄소 플럭스 자료를 생산할 계획임.

– 또한 카운실 및 캠브리지베이 거점 관측시스템을 위성통신 또는 인터넷망과 연결하고, 스발바르 거점 관측시스템에 자동 자료전송 체계를 구축해 3개 거점에서 준실시간 자료 수집이 가능하도록 고도화하여 3차년도 개발 예정인 온실기체자료 준실시간 수집.표출 시스템에 연계할 계획임.

– 캠브리지베이 거점에서의 동계 기간 자료 수득률 향상을 위해 폐회로 가스분석기를 2차년도에 도입하여 자료 수득율을 제고할 계획임.

Table 1. Information for eddy covariance system instruments, power type, maintenance and data backup at each site.

Sites	Instruments	Power	Manned or Unmanned	Data backup
Council	CSAT3/EC150	DC (Batteries/ Solar Panels	U	On site
Cambridge Bay	CSAT3/EC150	AC	M	Regular manual backup
Svalbard	CSAT3/LI7500	AC	M	Regular manual backup
Nord	CSAT3/EC150	AC	M	Intermittent manual backup
Baranova	CSAT3/LI7500	AC	M	Regular manual backup

Table 2. Eddy covariance CO_2 flux data (sampled at a rate of 10Hz) retrieval rate and its quality data rate for further analysis since COVID-19 pandemic break at each site. Level1 indicates the raw data, having passed the criteria of quality control based on EddyPro® .

Sites	Period	File Number (of 30 min. Interval)	Data retrieval rate (%) based on starting and ending time	Rate of available Fco_2 data of Level1(%)
Council	2019.09.23-2020.12.06	6,330	30	13
Cambridge Bay	2019.09.11-2020.02.07	7,163	99	63
Svalbard	2019.11.01-2021.10.18	33,822	98	86
Nord	N/A			
Baranova	2020.07.01-2021.02.28	8,959	77	0

Table 3. Upgrade plan of the permafrost node observation system.

관측 거점	온실기체		식물/광합성		기타	
	기존 관측	고도화	기존 관측	고도화	기존 관측	고도화
미국 (카운실)	CO_2, H_2O	2차년도: CH_4 관측 추가	녹색지수(GI)	2차년도: NDVI, fPAR 관측 추가	관측시기: 6-9월 플럭스자료전송: 현장 백업	관측시기: 2차년도부터 확대 플럭스자료전송: 2차년도 준실시간 전송
캐나다 (캠브리지베이)	CO_2, H_2O, CH_4, N_2O	2차년도: 폐회로 가스분석기 추가 운영	없음	2차년도: NDVI, fPAR 관측 추가	플럭스자료전송: 현장 백업	플럭스자료전송: 2차년도 준실시간 전송
노르웨이 (스발바르)	CO_2, H_2O	관측 유지	없음	2차년도: NDVI, fPAR 관측 추가	플럭스자료전송: 부정기적 원격 백업	플럭스자료전송: 3차년도 준실시간 전송
그린란드 (노르드)	CO_2, H_2O	2차년도 - 관측시스템 교체	없음	3차년도: NDVI, fPAR 관측 추가	플럭스자료전송: 현지인 부정기적 전송	동일
러시아 (바라노바)	CO_2, H_2O	2차년도[주1]: -관측시스템 교체 - CH4 관측 추가	없음	3차년도: NDVI, fPAR 관측 추가	플럭스자료전송: 현지인 부정기적 전송	동일
거점 종합		CH_4 관측 2개소 추가		NDVI, fPAR 관측 5개소 추가[주2]		1개 거점 관측계절 확대 3개 거점 플럭스자료 준실시간 전송체계 구축

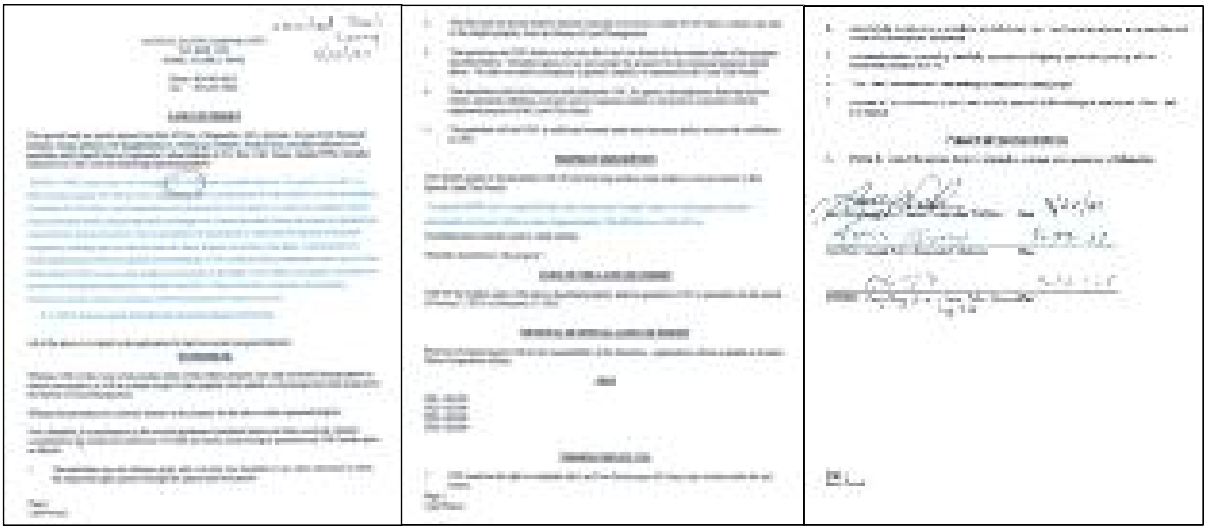
주1) 단, 러시아 거점 운영과 연구협력은 러-우 국제정세에 따라 잠정 중단함

주2) 러시아 연구협력 잠정 중단 상황에 의해 연구기간 내 러시아 거점 활동이 불가능, 바라노바 거점을 제외한 타 동토거점 4곳에 NDVI, fPAR 관측 추가

KOPRI 극지연구소

※ 알래스카 카운실 원주민과의 협력 약정 내용(2021.09.30.)

– 극지연구소의 동토환경변화 연구를 위해 카운실 사이트 지정구역에서의 환경 모니터링 장비 설치 및 시료채취 등을 허가한다는 원주민단체의 허가 약정서



(2차 년도) 북극 동토거점 관측시스템 1차 고도화

가) 각 관측거점 점검

○ 카운실 거점

· 기간: 2022.06.29.~07.10 (1차, COVID-19 영향 완화로 하계 기간 방문)
2022.09.14.~09.29 (2차)

· 활동 내용(1차)

– 기상관측자료, 식생모니터링사진, 순복사계자료 등 관측자료 회수하였음.

– 신규 에디공분산 장비를 설치하여 CO2 플럭스 관측 재개하였음.

– 1차년도에 발송해 둔 이동식메탄분석기(LI-7810) 장비를 활용하여 카운실 거점을 포함한 사방 1km 범위에서 메탄농도의 공간분포를 측정하여 발원지(hot spot) 탐지(Fig. 8) 및 이동식챔버와 결합하여 3개 지점에서 메탄플럭스 현장 측정 실시함 (Fig. 9).

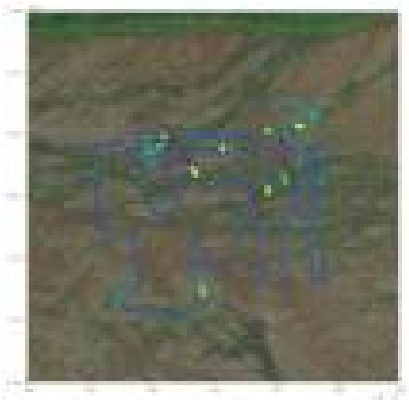


Fig. 8. CH4 (ppb) of the Council site (2022.07).

Fig. 9. CH4 flux measurement at the Council site, Alaska in July 2022.

– 광합성 및 식생지수 센서 추가: 카운실거점 에디공분산타워에 상향 및 하향 PAR 센서와 NDVI 센서

KOPRI 극지연구소

를 설치하여 30분 간격 fPAR 및 NDVI 모니터링 개시.

- thaw depth 측정: 현장 방문시 정기적으로 수행하던 thaw depth 측정을 자동챔버시스템 주변 14개 포인트에서 측정: 각 포인트별로 최소 28cm에서 최대 40cm 이었고, 평균은 32cm 였음.

· 활동 내용(2차)

※ 알래스카 태풍(제13호 므르복, 50년만에 발생) 영향으로 놈-카운실 도로가 유실되어 차량으로 접근 불가한 상황이 발생함. 이에 따라 헬기를 임차하여 9/23 및 9/26 연구거점 방문해 현장 활동 수행.

- 기상관측자료, 식생모니터링, 순복사계자료, 에디공분산자료 회수하였음 (Fig .10 and 11).

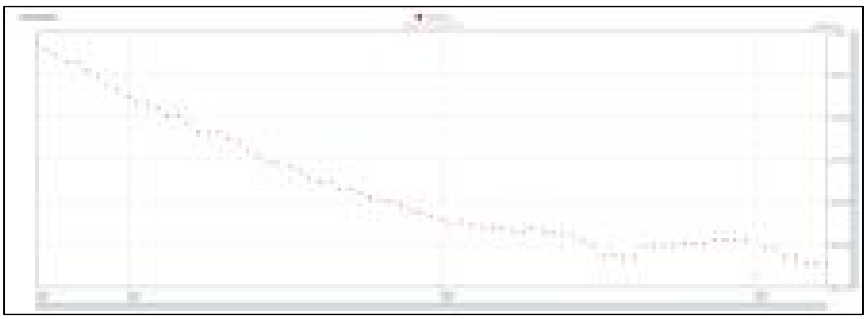


Fig. 10. Accumulated NEE during July 7 and September 22, 2022 at the Council site. About 410 gCO2/㎡ was absorbed by the late September.

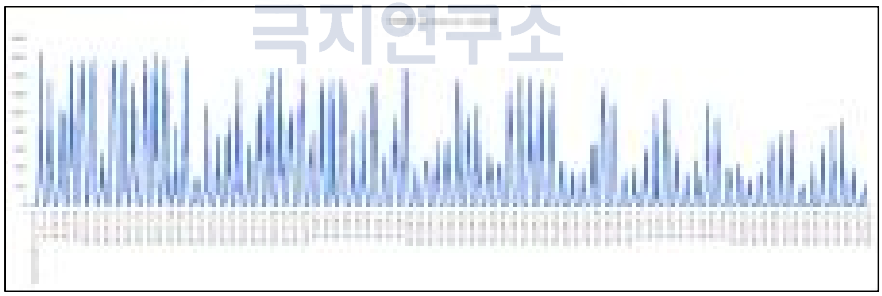


Fig. 11. Downward PAR observed at the Council site during July-September 2022.

- 관측기간 확대: 비생장기 관측을 위해 풍력발전기 설치하여 일사가 부족한 가을철 전력을 보강하였고 11월까지 측정 지속되도록 설정.
- 메탄 농도 측정: 지상 0.5m 및 3.5m 높이에서 메탄농도 측정 실시. 고도별 농도 분포의 일반적 양상을 바탕으로 2단계 기간에 경도법을 활용한 메탄플럭스 산출 (Fig. 12).
- 이리듐 위성통신 모듈 설치: 에디공분산장비 데이터로거에 이리듐 위성통신 모듈 설치하여 일 4회 환경인자 자료 자동전송시스템 구축(Fig. 13).
- thaw depth 측정: 현장 방문시 정기적으로 수행하던 thaw depth 측정을 자동챔버시스템 주변 14개 포인트에서 측정: 각 포인트별로 최소 62cm에서 최대 100cm 기록하였고, 평균 83cm 기록하여 80일간 51cm 증가한 것으로 분석되었음.

Fig. 12. Installation of communication module for datalogger–Iridium serial data transmission at the Council site.

Fig. 13. Data transmission from the Council eddy–covariance datalogger via Iridium satellite.

○ 캠브리지베이 거점

· 기간: 2022.06.09.~06.18 (1차) 및 08.31.~09.08 (2차)

· 활동 내용(1차)

– 관측시스템에 전원 공급이 되지 않아 관측이 중단된 상태였으며 원인 파악 결과 메인타워에서 세컨 타워로 연결된 전선에서 누전이 발견되어 이에 대해 조치 후 전원 공급 재개.

– 메인타워용 이산화탄소 가스분석기, 세컨 타워용 이산화탄소 가스분석기 및 메탄분석기 교정함.

– 메인 타워에 관측지 규모에 대한 NDVI 측정을 위해 카메라를 설치하였으며, 순복사계를 교체함.

– 세컨 타워에 메탄분석기를 포함한 이산화탄소 플럭스 시스템을 설치하고, fPAR 및 NDVI 측정 센서를 설치함(Table 4 and 5).

– 관측 시각을 현지 시각으로 확정하고, 두 타워에서 관측되는 기상, 복사 및 토양 물리 등 환경인자를 플럭스 자료 후처리를 위한 자료로 취합해서 분석에 활용함.

– 메인 타워는 도로변에, 세컨 타워는 메인타워로부터 약 200 미터 떨어진 pond 주변에 위치하며, flux footprint climatology에 따라 지면에서의 플럭스와 pond에서의 플럭스 산출이 가능함.

– 메탄 플럭스는 pond 방출 메탄량 정량화를 위해 세컨 타워에 설치됨(Figs. 14~17).

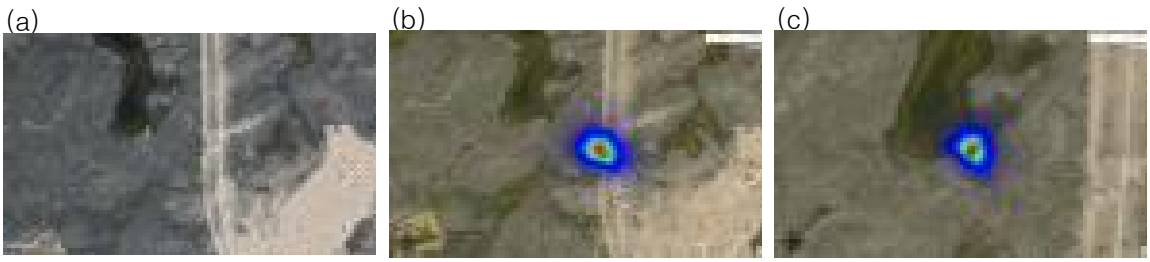


Fig. 14. (a) Locations of the main tower (right yellow point) just near a road and the second tower (left yellow point) at Cambridge Bay, Canada. Flux footprints of the main tower and second tower are shown in (b) and (c).

Table 4. Summary of measurements of Eddy Covariance Flux System of the Main Tower at Cambridge Bay.

Instruments	Variables	Height (m)	Number of Measurement Points for Soil Physical Property
CSAT3	U,V,W	5 m	
EC150	CO2	5 m	
CCFC	NDVI Image	2 m	
CNR4	Downward/Upward Short/Long-wave radiation	4 m	
CS616	Soil Water Content	0~ -0.1 m	1 point
107 soil temperature	Soil temperature	0~-0.1 m	2 point
HFP01SC	Soil Heat Flux	-0.05 m	1 point

Table 5. Summary of measurements of Eddy Covariance Flux System of the Second Tower at Cambridge Bay.

Instruments	Variables	Height (m)	Number of Measurement Points for Soil Physical Property
CSAT3	U,V,W	2.02 m	
EC150	CO2	1.94 m	
LI- 7700	CH4	1.70 m	
LI - 190	PAR	2.02 m	
SD - 500	NDVI	2.20 m	
HMP - 155	Temperature/ Relative Humidity	1.70 m	
CS616	Soil Water Content	0~ -0.1 m	2 point (10cm)
TCAV	Soil temperature	0~ -0.1 m	2 point (10cm)
HFP01SC	Soil Heat Flux	-0.05 m	2 point (10cm)

KOPRI 극지연구소

Fig. 15. Eddy-covariance flux system of the main tower(left) and the second tower(right) of the Cambridge Bay, Canada in 2022. Methane analyzer is on the second tower.

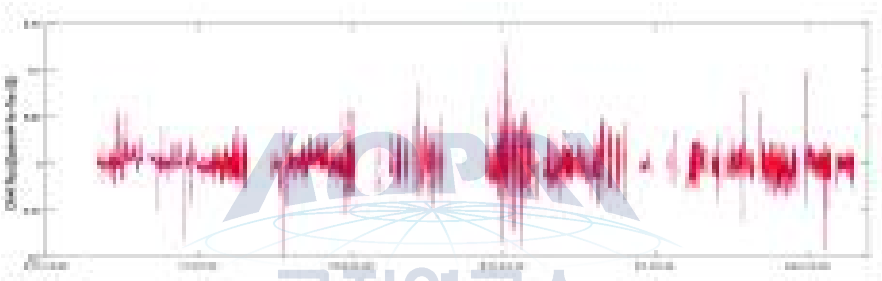


Fig. 16. Variation in the methane flux at the second tower in the Cambridge Bay from mid June to late September in 2022.

Fig. 17. Variations of the CO2 fluxes at the main and second tower in the Cambridge Bay from June to September in 2022.

· 활동 내용(2차)

- 기울어져 있는 세컨 타워의 가스분석기 위치를 정위치에 설치.
- 메인타워 플럭스 시스템 정상 작동 확인, 자료 백업 등을 위한 통신 시스템 구축.
- 메탄 분석기 케미컬 교체 및 교정 수행.
- LGR 챔버 회수 및 정리 등 동계 관측으로 전환 및 2022년 하계 자료 백업 완료.

○ 스발바르 거점

· 기간: 2022.09 (이태리 위탁관리)

· 활동 내용

- 현장 방문을 통해 에디공분산 플럭스 시스템 가스 분석기 교정 수행.
- 에디공분산 플럭스 시스템(Table 6) 컴퓨터 원격 접속으로 자료 백업 수행.
- 2022년 하계 기간을 중심으로 이산화탄소 플럭스 분석 중 (Fig. 18).

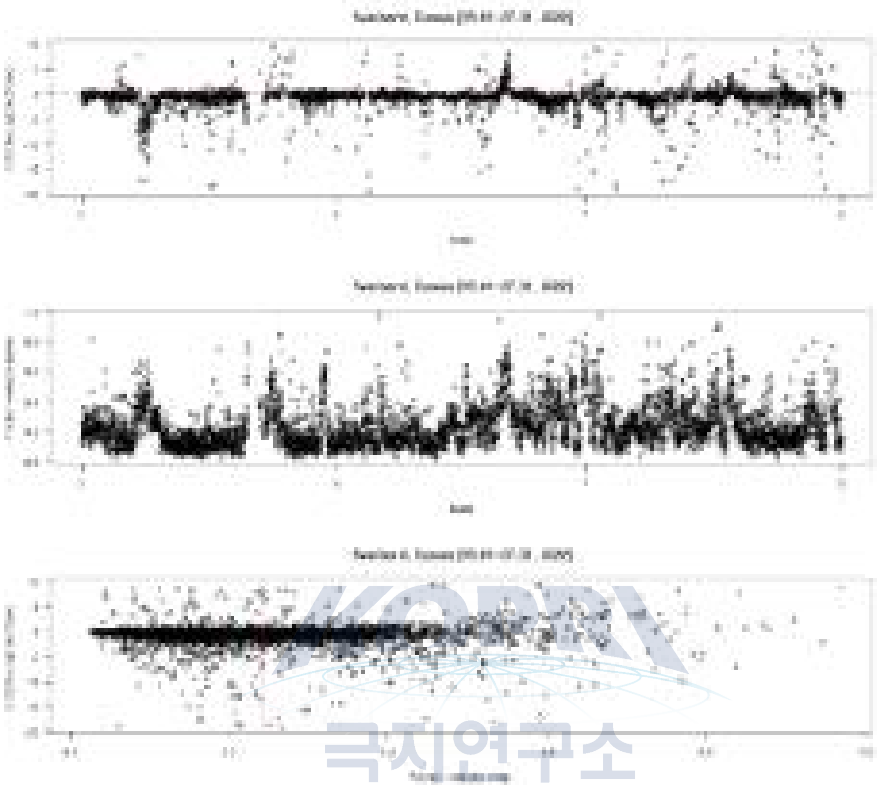


Fig. 18. Variations of the CO2 flux (top) and friction velocity (middle) and relation between friction velocity and CO2 flux (bottom) from May to September in 2022 at DASAN Station.

Table 6. Summary of measurements of eddy-covariance Flux System of the Svalbard site.

Instruments (Model)	Variables	Height (m)
3-D sonic anemometer (CSAT3)	Three orthogonal wind components (U, V, W)	20.2 m
CO_2/H_2O Open-Path Gas Analyzer (EC150)	CO_2 and H_2O Concentration	20.2 m
CO_2 /H_2O Open-Path Gas Analyzer (LI-7500)	CO_2 and H_2O Concentration	20.2 m

○ 노르드 거점

· 기간: 2022.07.09.~07.30

· 활동 내용:기존 관측 거점인 노르드와 새 연구지역인 시리우스 파셋에서 활동함 (Fig. 19)
(노르드 현장 활동. 2022.07.20~07.30, 81° 34.842'N, 16° 38.394'W)

- 1차년도 관측 이탈을 보였던 5.75 m의 에디공분산 시스템은 덴마크 오루스 대학 공동연구자에 의해 원상 복구되어 관측 중에 있었음.

- 다만, 가스 분석기 윈도우는 손상되어 정상적인 이산화탄소 플럭스 관측은 이루어지지 않았음.
- 또한 북극곰에 의한 지중 온도 센서들의 신호선이 끊어져 있었음.
- 7월 21일~30일 노르드 체류 기간 동안 에디공분산 플럭스 시스템 교체 및 메탄 플럭스 장비를 설치하여 당초 계획한 목표를 달성함. 향후 북극곰에 의해 장비 손상이 염려되고, 장비 유지 관리의 편의를 위해 5.75 m 높이의 에디공분산 시스템을 3.45 m 높이에 설치하고, 기존의 2.75 m 높이에 설치된 삼차원초음파 풍속계를 5.75 m 높이에 이동 설치하였음(Fig. 19, Table 7).

Fig. 19. The location of Sirius Passet and Station Nord (left). New eddy-covariance system including methane analyzer at Station Nord (2022).

Table 7. Summary of measurements of Eddy-covariance Flux System at Station Nord.

Instruments	Variables	Height (m)	No. of Measurement Points for Soil Physical Property
CNR4	Downward/Upward Short/Long-wave radiation	6.18 m	
CSAT3	U,V,W	5.78 m	
CSAT3A	U,V,W	3.45 m	
EC150	CO2	3.45 m	
EC Temp	Temperature	3.45 m	
HMP45	Temperature	2.90 m	
LI7700	CH4	2.90 m	
CS616	Soil Water Content	0~ -0.1 m	3 point
TCAV	Soil temperature	0~ -0.1 m	2 point
HFP01SC	Soil Heat Flux	-0.05 m	1 point

- 2022년 7월 25일부터 30일까지 측정된 순복사, 현열 및 잠열 플럭스, 그리고 이산화탄소와 메탄 플럭스에 대해 분석 수행.
- 이 기간 동안 타워 주변은 70% 이상이 눈으로 덮여 그에 따라 에너지 플럭스의 값은 매우 작은 변동을 보임. 또한 이산화탄소 및 메탄 플럭스 역시 0을 중심으로 거의 중립값 보임 (Fig. 20).

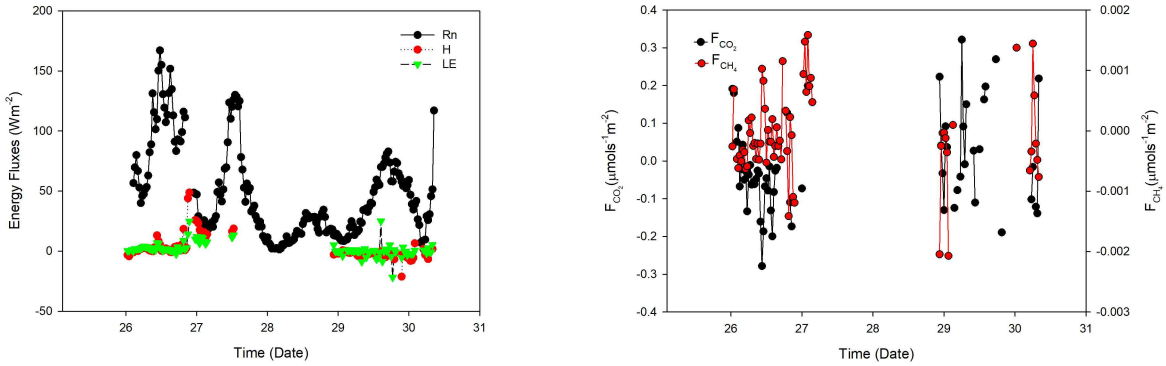


Fig. 20. Variations of net radiation, sensible heat flux(H) and latent heat flux(LE) (left) and the fluxes of CO2 (F_{CO2}) and CH4 (F_{CH4}) (right) in July 2022 at Station Nord.

· 시리우스 파셋 현장 활동(2022.07.09~07.19)

– 그린란드 연구지역 확대를 위해 시리우스 파셋(N 82° 47′ 27.8″ , W 42° 24′ 31.1″) 방문.

– 시리우스 파셋은 노르드에서 북서쪽으로 약 300 km 떨어진 고위도에 있으나 노르드에 비해 식생이 상당히 풍부한 지역임.

– 기상 현상 이해를 위해 자동기상측정시스템(AWS)을 3m 높이 타워에 설치하였으며, 25W 태양전열판 2조와 100 Ahr 배터리 3개를 전원으로 활용함 (Fig. 21, Table 8).

– 풍향, 풍속, 기압, 기온, 습도, 광합성 유효 복사(상향/하향), NDVI(상향/하향), 토양 수분 및 토양 온도(두 지점)를 1분에 1회 관측하고 10분 평균이 자료 집록기에 집록되도록 하였음.

– 사향소, 늑대, 토끼, 들쥐 등 다수의 동물도 서식하는 곳인데 특히 늑대의 경우 이전에 설치된 적 있는 AWS을 손상시킨 바가 있어 이번에 그에 대비할 수 있도록 상대적으로 높은 타워를 이용하여 측정 높이를 높이고, 전원 및 신호선이 외부 노출이 최소화되도록 조치하였음.

Fig. 21. Automatic Weather Station (left) and surface vegetation status (right) of the Sirius Passet, Greenland in July 2022.

– 노르드와 시리우스 파셋의 지역 차이에 따른 기상 차이를 분석하기 위해 7월 16일부터 19일까지 기온 및 풍향 비교(Fig. 22).

– 분석 기간 두 지역에서 고기압 통과로 기압 증가가 뚜렷하였으나 시리우스 파셋에서의 기온은 하

루 사이 10℃ 이상의 큰 변동을 보일 수 있는 반면 노르드 기온은 상대적으로 변화가 적었음.

- 상대적으로 지형에 의해 막힘이 없는 노르드의 경우 풍향 변동이 큰 반면, 산기슭에 위치한 시리우스 파셋의 경우 풍향은 남동에서 남서풍으로의 약간의 변화만 보여 두 지역에서 지형에 의한 차이를 잘 보여줌.

Table 8. Summary of measurements of Automatic Weather Station at Sirius Passet.

Instruments	Variables	Height (m)	Number of Measurement Points for Soil Physical Property
LI-190	PAR	3.60 m	
LI-190	PAR	3.50 m	
SD-500	downward NDVI	3.11 m	
SD-500	upward NDVI	2.99 m	
05106 (RM young)	Wind (direction, speed)	3.05 m	
HMP155	Temperature/ Relative Humidity	2.55 m	
CS616	Soil Water Content	0~ -0.1 m	1 point

KOPRI 극지연구소

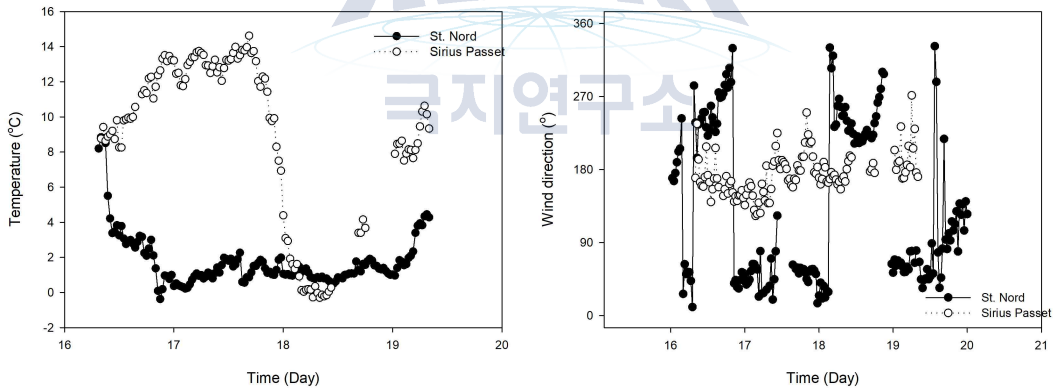


Fig. 22. Variation of air temperature (left) and wind direction(right) from July 16 to 19, 2022 at Station Nord and Sirius Passet, Greenland.

나) 1차 고도화 완료

○ 알래스카 카운실 거점

- 메탄관측 실시
- fPAR 및 NDVI 관측 추가
- 온실기체 측정기간 확대
- 환경인자자료 위성전송시스템 구축

○ 스발바르 거점

- 원격 모니터링 시스템 구축

○ 1단계 고도화에 따른 거점별 NDVI 비교

– 관측거점 고도화로 진행된 세 거점 관측지(알래스카 카운실, 캠브리지 베이 그리고 시리우스 파셋)에서 동일 기간 식생활성도를 평가하는 NDVI(Normalized difference in Vegetation Index)를 서로 비교하였음. 획득된 자료가 짧은 시리우스 파셋을 제외하면 나머지 두 지역의 NDVI는 시간이 지남에 따라 점차 감소하는 모습을 보임(Fig. 23).

– 상대적으로 저위도에 위치하고 식생이 가장 풍부한 카운실의 NDVI가 가장 높고, 캠브리지 베이가 그 중간을 차지함.

– 한 지점 측정 값인 NDVI는 관측지에서 촬영된 사진으로부터 도출된 NDVI와 비교 후 관측지 평균 NDVI를 평가하는 데 이용될 수 있음.

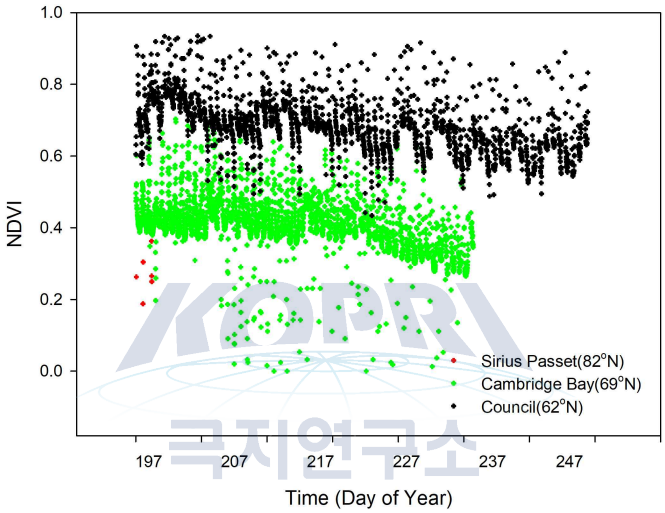


Fig. 23. Variations in NDVI at three sites from mid July to late September.

다) 환경 DB 설계

○ 1차년도

· 과기부 선행과제에서의 분석 기간 이후 백업된 자료의 품질 평가 수행

– 러시아 바라노바 기지를 제외하면, COVID-19 팬데믹 발생에 따른 거점별 방문에 따른 자료 백업 및 분석은 2019년 9~10월까지 이루어져 그 이후 자료에 대한 분석을 수행하였음.

· Table 9는 거점별 에디공분산 플럭스 시스템용 측기 구성, 전원(상시 전원 또는 배터리), 주기적인 관리 여부, 자료 백업 방식이 요약됨.

– 카운실 거점을 제외하면, 상시전원이 공급되며, 현지 인력을 통해 자료 백업이 가능함. 스발바르 거점의 경우 원격 접속이 가능하여 플럭스 시스템의 정상 작동 여부를 감시할 수 있으며, 백업도 주기적으로 가능함.

· Table 10은 2021년 거점별 방문 또는 원격 접속을 통해 확보된 에디공분산 원시 자료를 최근 가장 많이 활용되는 EddyPro® (LI-COR, USA) 소프트웨어를 통해 분석한 결과를 요약함.

– 카운실 및 캠브리지베이 거점 자료는 2021년 현장 방문을 통해 확보.

– 스발바르 거점의 경우 원격 접속 및 이태리 연구자에 의해 상대적으로 관리가 잘 되어 다른 거점에 비해 자료가 많음.

- 노르드 거점의 경우 과기부 선행과제에서 분석된 기간 이후 확보된 자료가 없음. 전원 공급 실패에 따른 관측시스템 미작동으로 자료가 없는 것으로 추정됨.
- 바라노바 거점의 경우, COVID-19 팬데믹임에도 자국 기지에서의 연구가 정상적으로 이루어져 정기적으로 자료 확보가 가능하였음. 단, 공동 연구협약이 러시아측 통보에 따라 중단됨에 따라 2021년 2월까지만 자료가 확보되었음.
- 품질 평가를 위한 주요 기준으로 1) 삼차원초음파 풍속계의 diagnostics, 2) LI-7500 가스분석기의 diagnostics를, EC150의 경우 diagnostics과 신호 강도(0.7 이하일 경우 제거), 3) 측정변수 절대값의 크기를 고려하였으며, 플럭스가 산출되는 30분 시간에 대해 4) 분석에 이용 가능한 자료가 80% 이상일 경우에 대해 Level1 자료로 삼았음(EddyPro® 설명서 (licor.com/env/supporrt/ EddyPro/home.html).
- 카운실 거점의 경우 이용가능한 30분 단위의 원시자료는 분석 기간 중 30%이었으며, 이 중 Level1 자료는 13%이었음. Level1 자료는 모두 2019년 9월~12월에 분포하였으며, 2020년의 경우 사용 가능한 자료가 없었음. 이는 2019년의 경우 여전히 에디공분산 시스템을 가동할 만한 배터리로부터 전원 공급이 있었지만 2020년은 전원 부족에 따른 데이터 로거 오류 또는 가스분석기 오작동의 문제로 보임. 가스분석기를 제외한 삼차원 초음파 풍속계 자료만 처리했을 경우 Level1 현열 플럭스는 27%였으며, 특히 2020년 가을철에도 이용가능한 자료가 존재함. 이는 현재의 전력 시스템을 보완하면 봄철 및 가을철에도 이용 가능한 자료 획득이 가능함을 의미.
- 캠브리지베이 거점의 경우 분석 기간 동안 자료 수득률은 99%이나 Level1 자료의 비율은 63%로, 스발바르 거점에 비해 23% 낮음. 특히 동계 기간 자료 비율이 전체 Level1자료 중 16%만을 차지하여 동계 기간 고품질 자료 생산에 주의 필요.
- 스발바르 거점의 경우 상시 전원 이용과 원격 접속이 가능하여 거점 중 가장 좋은 인프라 및 상대적으로 높은 기온의 동계 기간으로 인해 원시자료 수득률 뿐만 아니라 Level1 자료 비율도 가장 높은 86%이었음.
- 바라노바 거점의 경우 원시 자료 수득률이 77%로 현지 관리 인력이 상주하는 것을 고려하면 캠브리지베이 및 스발바르에 비해 낮으며, 특히 Level1 자료가 없음. 이는 삼차원 초음파 풍속계 및 가스 분석기의 작동 상태를 진단하는 diagnostics가 정상 범위를 벗어났기 때문임. 자료의 수득율이 낮은 이유는 데이터 로거 문제 또는 데이터 로거와 컴퓨터 간의 통신문제이며, 결론적으로 바라노바 거점의 경우 에디공분산 플럭스 시스템 전체를 교체 필요함.

Table 9. Information for eddy covariance system instruments, power type, maintenance and data backup at each site.

Sites	Instruments	Power	Manned or Unmanned	Data backup
Council	CSAT3/EC150	DC (Batteries/ Solar Panels	U	On site
Cambridge Bay	CSAT3/EC150	AC	M	Regular manual backup
Svalbard	CSAT3/LI7500	AC	M	Regular manual backup
Nord	CSAT3/EC150	AC	M	Intermittent manual backup
Baranova	CSAT3/LI7500	AC	M	Regular manual backup

○ 2차년도

- 네 거점(미국, 캐나다, 스발바르, 그린랜드, 러시아)에 대한 에디공분산 원시 자료 확보 및 1차 자료 처리 수행 결과를 Table 11에 요약함. EddyPro®에서 처리된 결과물 중 이산화탄소 플럭스에 대한 품질평가 중 0과 1에 대한 결과임.
- 품질 평가를 위한 주요 기준으로 1) 삼차원초음파 풍속계의 diagnostics, 2) LI-7500 가스분석기의 diagnostics를, EC150의 경우 진단값과 신호 강도(0.7 이하일 경우 제거), 3) 측정 변수 절대값의 크기를 고려하였으며, 플럭스가 산출되는 30분 시간에 대해 4) 분석에 이용 가능한 자료가 80% 이상일 경우에 대해 Level1 자료로 삼았음.
- Table 11은 각 거점 관측지별 KDPC 등록 환경인자에 대한 요약임. 환경인자들은 기상, 복사 및 토양물리 변수로 구분됨.

Table 10. Eddy covariance CO_2 flux data (sampled at a rate of 10Hz) retrieval rate and its quality data rate for further analysis from 2021 to 2022 except for Baranova. Level1 indicates the raw data, having passed the criteria of quality control based on EddyPro®.

Sites	Measurement Period	Data retrieval rate (%)	Rate of available Fco_2 data of Level1(%)
Council	20220707 ~ 20220922	96	91
Cambridge Bay	20211121 ~ 20220930	65	45
Svalbard	20210101 ~ 20220930	99	72
Nord	20210101 ~ 20220725	81	43

※ 30분 자료와 NEE flag 0, 1로 환산

KOPRI 극지연구소

Table 11. Meteorological, soil physical and radiation data at each site in 2021 and 2022.

Sites	Period	Attribute	Variables
Council Alaska USA	2021.01.01-12.31	Meteorology	Wind, Temperature, Relative humidity, Pressure
	2022.01.01-09.30	Meteorology	Wind, Temperature, Relative humidity, Pressure
	2021.01.01-12.31	Radiation	Downward/Upward shortwave radiation, Downward/Upward longwave radiation
	2022.01.01-09.10	Soil temperature	Soil temperature at UAF chamber of Council, AK
	2022.01.01-09.10	Soil temperature	Soil temperature at UAF chamber of Kougarok, AK
Cambridge Bay Canada	2021.01.01-12.31	Meteorology	Wind, Temperature, Relative humidity, Pressure
	2022.01.01-09.30	Meteorology	Wind, Temperature, Relative humidity, Pressure
	2021.01.01-12.31	Radiation	Downward/Upward shortwave radiation, Downward/Upward longwave radiation Downward/Upward Photosynthetically Active Radiation(PAR)
	2022.01.01-09.30	Radiation	Downward/Upward shortwave radiation, Downward/Upward longwave radiation Downward/Upward Photosynthetically Active Radiation(PAR)
	2021.01.01-12.31	Soil physical	Soil temperature, Soil water content, Soil heat flux
	2022.01.01-09.30	Soil physical	Soil temperature, Soil water content, Soil heat flux
Svalbard Norwary	2021.05.18-12.31	Meteorology	Wind, Temperature, Relative humidity, Pressure
	2022.01.01-09.30	Meteorology	Wind, Temperature, Pressure
Nord Greeland	2021.01.01-12.31	Meteorology	Wind, Temperature, Relative humidity, Pressure
	2022.01.01-07.25	Meteorology	Wind, Temperature, Relative humidity, Pressure
	2021.01.01-12.31	Radiation	Downward/Upward shortwave radiation, Downward/Upward longwave radiation
	2022.01.01-07.25	Radiation	Downward/Upward shortwave radiation, Downward/Upward longwave radiation
	2021.01.01-12.31	soil physical	soil physical, Soil heat flux, Soil water content
	2022.01.01-07.25	soil physical	soil physical, Soil heat flux, Soil water content

KOPRI 극지연구소

– DB시스템 전체 기능 (수집, 백업, 1차 처리, 표출 등) 확정 (Fig. 24)

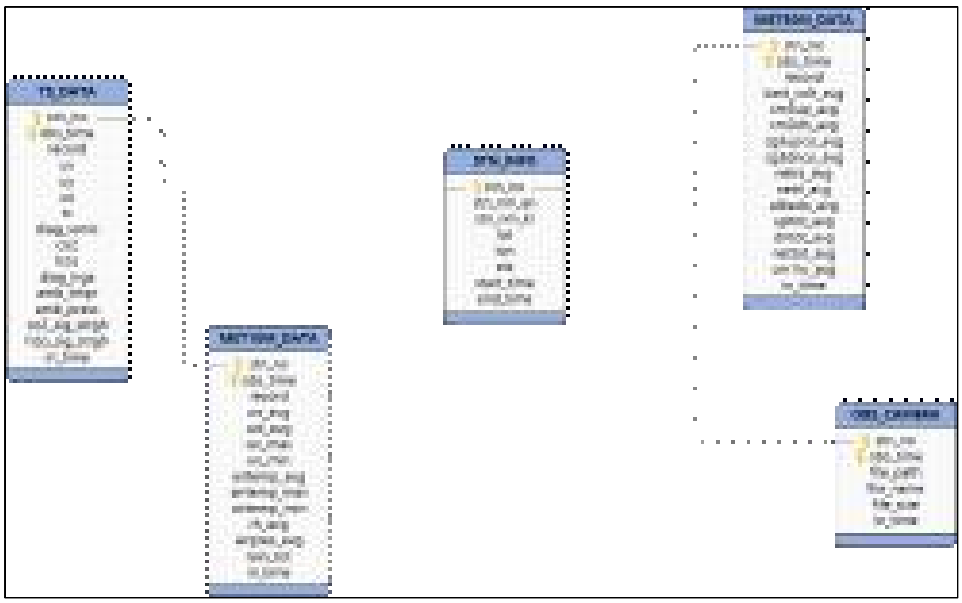


Fig. 24. Schematic of environmental DB of each permafrost sites.

다) 온실기체 방출 알고리즘 개발

○ 실측 자료 활용 생태계 호흡 알고리즘

– 2022년 하계(6~9월) 캠브리지 베이에서 관측된 이산화탄소 플럭스 자료를 활용하여 기온에 대한 생태계 호흡 반응을 분석하여 알고리즘 계수를 결정하였음.

– 카운실 거점 호흡량 측정자료(야간 NEE)와 기온 자료를 이용해 생태계 호흡량 산출 알고리즘 계수를 분석하였음. 시기별로 변동성을 가지며, Fig. 25는 2019년 6월 자료에 대한 계수 산출 결과임.

$$R_{ECO} = 1.03 \exp(0.084 \times T),\ r^2 = 0.82$$

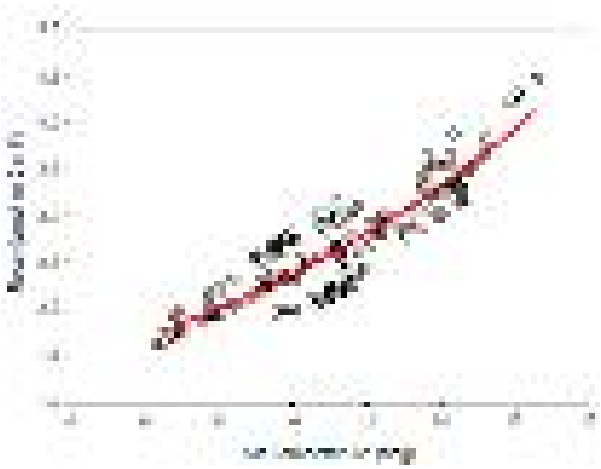


Fig. 25. Variation of Reco with air temperature at the Council site (June 2019).

– 캠브리지베이 위도는 북위 69° 로 하계 기간은 백야이기 때문에 야간에도 태양복사가 양의 값을 갖는 기간이 존재함. 야간 자료 사용을 위해 플럭스 커뮤니티에서 일반적으로 야간을 정의하는 데 사용하는 태양복사가 5 Wm^{-2} 보다 작은 경우의 이산화탄소 플럭스 자료를 사용하였음. 야간의 경우 난류의 활동이 약해 에디공분산 관측에 의해 측정된 이산화탄소 플럭스가 생태계 순교환(Net ecosystem exchange)를 대표할 수 없기 때문에 난류가 발달한 상태에서의 이산화탄소 플럭스 자료를 걸러내기 위한 문턱값(threshold)를 결정하기 위해 마찰 속도 변화에 따른 이산화탄소 플럭스 변동을 살펴본 결과 문턱값은 0.17 m/s이었음 (Figs. 26~27).
– 기온(T)에 대한 NEE(생태계 호흡, Reco)의 반응을 Fitting하여 다음과 같은 식을 도출함.

$$R_{ECO} = 0.32 \exp (0.13 \times T),\ r^2 = 0.86$$

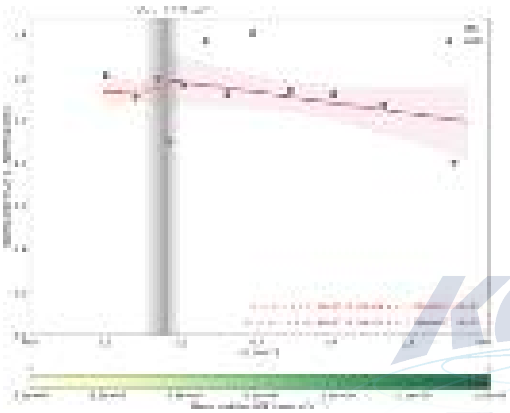


Fig. 26. Relationship between friction velocity and carbon dioxide flux at Cambridge Bay in summer, 2022.

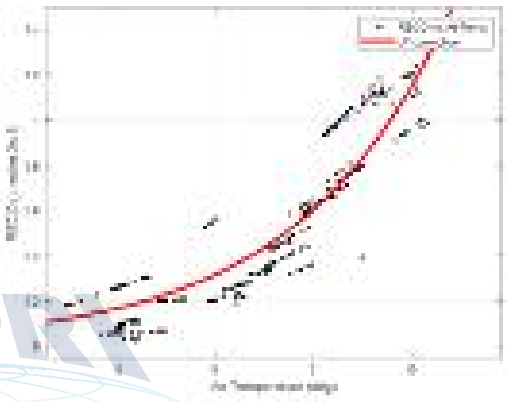


Fig. 27. Variation in the ecosystem respiration with air temperature when shortwave radiation is less than 5 Wm−2 at Cambridge Bay in summer, 2022.

KOPRI 극지연구소

(3차 년도) 북극 동토거점 관측시스템 2차 고도화

가) 각 관측거점 점검

○ 알래스카 카운실 거점

· 현장 점검 기간: 2023.05.31.~06.06 (1차) 및 07.18.~07.21 (2차)

· 활동 내용(1차)

<원격 감시 및 자료 확보>

– 기존에 알래스카 카운실 동토 관측거점의 온실기체 플럭스 자료는 하계 현장방문을 통해 회수하는 방법이 유일하였으나 2023년 6월 현장활동 중 데이터로거에 이리듐위성 송신장치를 부착하여 일부 데이터를 국내로 위성전송하는 체계를 구축하였음(Fig. 28).
– 이에 따라 기온, 기압, 풍속, PAR 복사량, 마찰속도, CO2 플럭스 등 일부 관측자료를 1시간 간격으로 수신할 수 있게 되었음.
– 이리듐위성을 통해 전송되는 자료는 전용 이메일계정(koprinode3@kopri.re.kr)으로 수신되고 이메일에 첨부된 아스키파일 형태의 관측자료는 자동처리되어 데이터베이스에 기록됨.
– 데이터베이스에 저장된 자료는 용역과제를 통해 구축된 자료수집 서버에서 수집율 확인 및 시계열 그래프 형태로 확인이 가능함.

Fig. 28. Iridium satellite antenna installed at the Council site in 2023.

〈현장 방문 자료 확보 및 관측 장비 관리〉

- 알래스카 카운실 동토거점 방문은 2회 수행되었음.
- 1차 방문은 알래스카 놈 현지 기준으로 2023년 5월 31일부터 6월 6일까지 총 7일간 이루어졌으며 참여자는 극지연구소 박상종 책임연구원 및 박근보 선임연구원 2인이었음.
- 알래스카 현지에서 2023년 봄철에 유례없이 많은 적설이 발생하여 놈에서 카운실 동토거점으로 접근하는 중간의 산악지대의 도로가 6월 중순까지 열리지 않는 예외적 상황이 발생하여 헬리콥터를 1일 임차하여 카운실 거점을 방문함 (Figs. 29~30).
- 카운실 거점 체류 약 6시간 동안 관측자료(기상, 복사에너지, 에디공분산) 회수, 관측장비 펌웨어 업그레이드, 전력공급시스템 충전배터리 10개 전체 교체(100Ah×10=1,000Ah) 등 우선순위 업무를 수행하고 복귀하였음(Figs. 31~32). 그 외 놈 체류기간 중 놈 근접지역 중 카운실 거점과 유사한 동토 및 식생 환경을 가진 지역을 답사하고 해당 토지 소유 원주민단체(Sitnasuak Native Corporation)와 과학연구 목적의 토지 임대 가능성을 협의하여 향후 장기적 동토 환경 모니터링 연구를 위한 자료조사를 실시하였음.
- 1차 방문 중 점검 결과 가스분석기 고장이 확인되어 가스분석기 교체 및 메탄측정시스템 설치를 위해 놈 기준 2023년 7월 18일부터 7월 21일까지 2차 현장활동을 수행하였음.
- 2차 활동에서는 차량을 이용해 카운실 사이트에 접근하였으며, 1차 방문에서 고장이 확인된 가스분석기를 회수하고 예비 가스분석기를 설치하여 CO2 플럭스 측정을 시작하였음. 또한 메탄 플럭스 산출을 위한 2개 고도별 메탄농도 측정시스템을 설치하고 이리듐 위성을 통해 1시간 간격으로 자료를 전송하도록 설정하였음.
- 이후 9월말에는 극지연구소의 동토 관측팀이 카운실 거점을 방문하여 메탄농도 측정시스템을 회수하고 하계 기간의 기상, 이산화탄소, 메탄 관측자료를 회수하여 전달하였음.

Fig. 29. Roadwork at 44 mile of Nome-Council road on May 31, 2023.

Fig. 30. Access to the Council site using charter Helicopter from Nome on June 4, 2023.

Fig. 31. Replacement of batteries of the Council site.

Fig. 32. Inspection of the gas analyzer of the Council site.

극지연구소

· 자료 분석 결과

– 온실기체 플럭스 측정기간 기상인자의 변화를 보면 기온은 7월 17일 약 7℃에서부터 8월 3일 낮 24.5℃까지 기록 후 감소하여 9월 2일부터 영하를 기록하였음(Fig. 33).

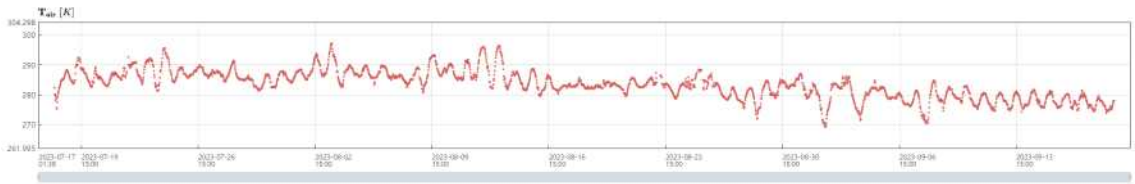


Fig. 33. Air temperature (° K) at the Council site during July 17~September 18, 2023.

– 카운실 사이트는 대체로 바람이 약한 곳으로 해당 기간에도 30분 평균풍속 기준 평균 풍속은 2.7㎧, 최대풍속은 10.1㎧ 바람이 기록되었음(Fig. 34).

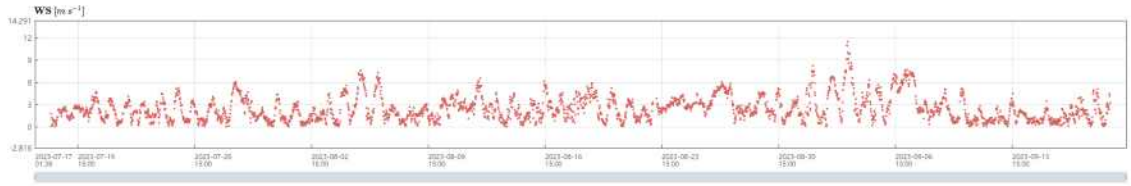


Fig. 34. Wind speed at the Council site during July 17~September 18, 2023.

– 카운실 사이트의 하향단파복사량(W/m2)을 아래 그림에 나타내었음. 6월 하지 이후 기간이기 때문에 시간에 따라 감소하는 추세가 보이며 일사량이 낮은 날은 강수일로 추정됨(Fig. 35).

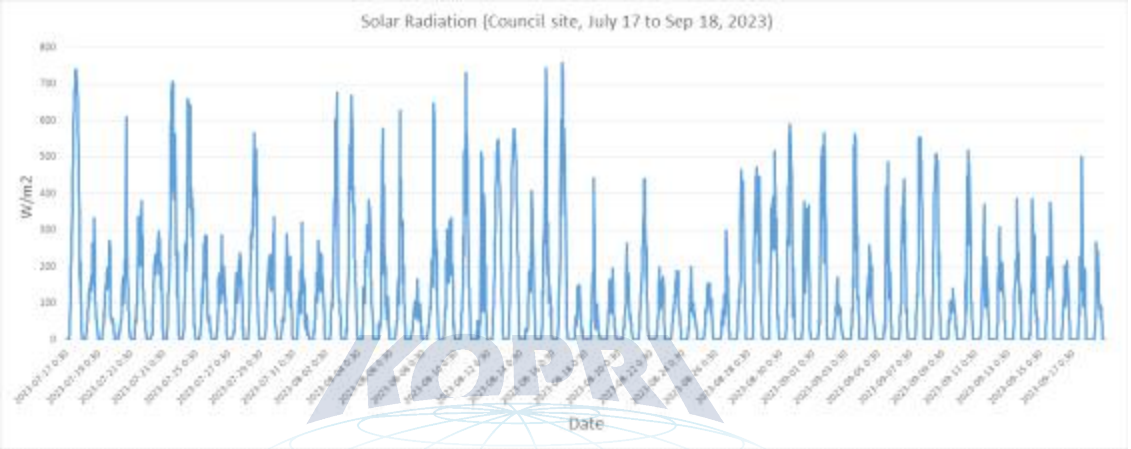


Fig. 35. Incoming solar radiation (W/m2) at the Council site during July 17~September 18, 2023.

– 토양온도 자료는 알래스카대학팀이 지중 5cm 깊이에 설치한 지중온도계로부터 획득한 값을 아래 그림에 나타내었음(Fig. 36). 일 단위로 처리된 값이며 2023년 1월 1일부터 자료수집일인 9월 6일까지 해당됨. 1월말에 약 −6℃ 정도를 최저온도로 기록하였으며 이후 변동하며 점차 상승하다가 5월초부터 약 한 달 가까이 0℃를 유지하여 이른바 zero curtain 현상을 나타내고 있음. 이는 봄철에 일사에너지가 증가하여 얼어있던 지면을 녹이는 과정에서 눈과 얼음을 녹이는 잠열로 사용되어 표면온도가 유지되는 현상인데 매우 장기간 유지된 점이 주목됨. 이후 6월초부터 지중온도가 영상으로 상승하기 시작했으며 8월 상순에 약 13℃를 최고온도로 기록한 후 빠르게 감소하는 양상을 보여주었음.

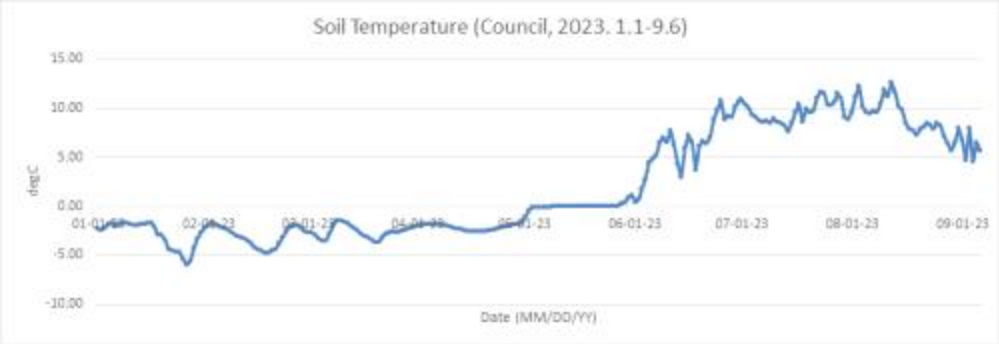


Fig. 36. Soil temperature variation of the Council site in 2023 between January 1st and September 6 (Sphagnum moss site, 5-cm depth).

- 카운실 관측거점에서 측정된 현열플럭스, 잠열플럭스, 이산화탄소 플럭스를 아래 그림에 나타내었음. 에디공분산시스템의 가스분석기에 고장이 발생하여 7월 현장 방문시 새 장비로 교체하여 관측을 재개하였고 9월 방문팀에 의해 회수된 9월 18일까지의 원자료 처리 플럭스 결과를 제시하였음 (Fig. 37).
- 현열플럭스는 7~9월 일중 대체로 100 W/㎡ 미만의 값을 보이며 일부 날짜에서 150 W/㎡까지 상승하기도 함. 이에 비해 잠열플럭스는 7~8월 기간 여러 날에 걸쳐 낮시간에 100 W/㎡ 이상의 값을 보이고 때로 200 W/㎡까지 증가하기도 하여 현열보다 큰 것을 알 수 있음. 이는 카운실 거점에서 여름철에 동토가 융빙되면서 발생하는 수분에 의해 대체로 습한 상태를 유지하기 때문으로 파악됨.
- 이산화탄소 플럭스(순생태계교환량, Net Ecosystem Exchange, NEE)는 7~8월 기간 낮시간에 최대 약 -10 ㎛ol/㎡/s 수준의 지면 흡수를 나타내고 야간에는 약 5 ㎛ol/㎡/s 이하 수준의 지면 방출을 나타내다가 9월로 접어들면서는 주간 흡수량 및 야간 방출량의 크기가 모두 감소하되 흡수량이 더 뚜렷하게 감소하여 일간 기준 순방출의 양상으로 변화함.

Fig. 37. Sensible heat flux (up, W/m^2), latent heat flux (middle, W/m^2), and CO2 flux (down, ㎛ol/㎡/s) at the Council site for July 17~September 18, 2023.

- 카운실 관측거점의 메탄플럭스 산출을 위해 이동형 메탄분석기를 7월부터 9월까지 운영하였으며 지상 0.5미터 및 3.5미터 높이에 각각 대기 흡입구를 설치하여 각 고도에서 번갈아가며 5분씩 측정하는 방식으로 2개 고도의 메탄농도를 측정하였음(Fig. 38). 8월에 잦은 강우 조건에서 전력이 방전되면서 작동이 중지될 때까지 약 18일간 정상적으로 작동하였음. 아래 그림은 카운실 사이트 에디공분산장비 옆 지상 0.5미터 및 3.5미터 높이에 설치된 2개의 공기흡입구 사진과 7~8월에 걸쳐 측정된 2개 고도의 메탄 농도를 나타내고 있음.
- 7월 19일부터 8월 5일까지 측정된 메탄농도는 대체로 2000~2500 ppb 값을 나타내었으며 2500~3500 ppb 사이의 농도도 몇 차례 기록되었음(Fig. 39). 이들 고농도 사례에 대해서는 당시 기상과 토양 조건을 확인하여 자료의 신뢰도를 평가하여 품질관리를 수행한 다음 두 고도의 농도차이와 대기난류확산도를 결합한 경도법(gradient method)를 적용해 플럭스 산출 가능함.
- 두 고도의 메탄 농도 중 지상 0.5미터 높이의 농도가 높은 경우는 지면에서 대기 중으로 메탄이 방출되는 경우라고 볼 수 있으며 반대로 지상 3.5미터 높이의 농도가 높은 경우에는 지면이 대기중의 메탄을 흡수하는 경우라고 해석할 수 있는데 실제 측정된 두 고도의 메탄 농도는 시기에 따라 농도의 높고 낮음이 변하여 카운실 사이트 지면이 경우에 따라 메탄의 방출원 또는 흡수원으로 작용하고 있음을 나타냄.
- 메탄플럭스 산출의 신뢰도를 높이기 위해 근접 위치에서 측정된 챔버 측정값과도 비교하여 적절한 난류확산도를 결정할 계획임.

KOPRI 극지연구소

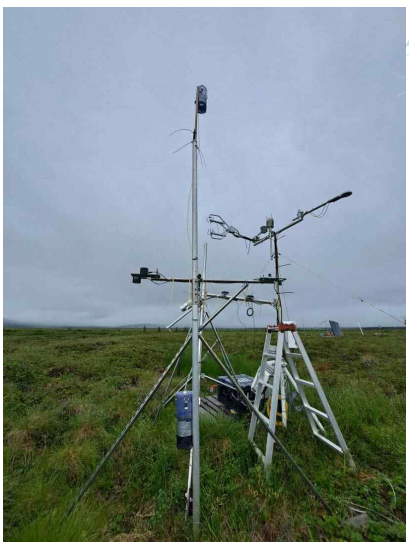


Fig. 38. Two air-inlets at 3.5m and 0.5m a.g.l. at the Council site.

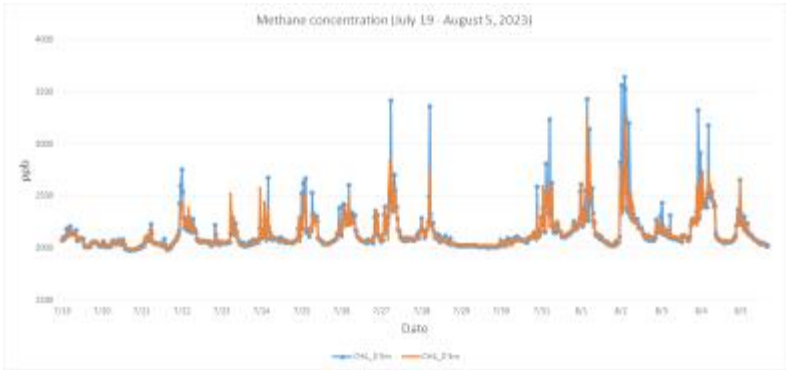


Fig. 39. CH4 (ppb) measured at 0.5m and 3.5m above ground level at the Council site between July 19 and August 5, 2023.

○ 캠브리지 베이 거점

· 현장 점검 기간: 2023.06.12.~07.03 (1차) 및 08.30.~ 09.011 (2차)

· 원격 자료 감시 및 확보

- 캠브리지베이 거점 관측소는 두 세트의 에디공분산 시스템이 메인 타워와 세컨드 타워에 설치되어 각각의 데이터로거와 전원을 이용해 운영되고 있음. 주 에디공분산 시스템의 데이터로거는 노트북 PC와

랜 케이블로 연결되어 관측 자료는 실시간 데이터 로거와 노트북 PC에 저장되는 반면 보조 에디공분산 시스템은 데이터 로거에만 저장됨.

- 상업용 인터넷이 앞선 노트북 PC에 연결되어 있어 주기적으로 주 에디공분산 시스템 관측 자료를 확인함과 동시에 연구소로 자료를 가져와 분석하고 있음. 반면에 보조 에디공분산 시스템의 경우 2주마다 현지 인력을 활용하여 자료를 저장하고, 연구소에서 받아 관측시스템 상태 점검 및 자료 분석을 수행하고 있음.

· 현장 방문 자료 확보 및 관측 장비 관리

- 2023년 캠브리지베이 현장 활동은 2회(1차: 06.12~07.03, 2차: 8.30~9.11)에 걸쳐 수행되었음. 1차의 주요 활동 내용은 관측지 전원 복구 및 개선이며, 2차의 주요 활동 내용은 폐회로 가스분석기를 주 에디공분산 시스템에 설치하는 것이었음.
- 1차 현장 점검은 극지연구소 황혜원 연구원과 김형권 기술원에 의해 이루어졌으며, 방문 당시 현장 상황은 전력 계통의 누전 발생으로 1월 22일 ~ 4월, 5월 일부 관측자료 집록이 중단된 상태였고, 세컨드타워 에디공분산장비 가스분석기(EC150)에도 문제가 발생한 상태였음. 한편 동계기간 야생동물에 의해 타워의 일부 센서(토양 및 NDVI 센서등) 케이블이 끊어져 있었음.
- 조치 사항으로 전력 복구(각 타워(메인, 세컨드타워) 후 전원 재분배 및 케이블과 전원함체를 교체하여 전력 공급방식을 개선하고, 데이터로거와 연결된 관측장비 각각의 전원 케이블 점검 및 유지보수를 하였음.
- 메인타워의 온실기체 측정장비, 기상 센서 및 순복사계(환경인자) 전력차단 기간 이후 정상적으로 작동하고 있었으며, 전력복구를 위한 유지보수 후 동계 기간 기상 및 순복사 관측을 지속하도록 조치하였음.
- 에디공분산장비(EC150 2대, LI-7700 1대) 검교정 시행 (Fig. 40): 메인타워의 이산화탄소 플럭스 관측장비(EC150), 세컨드타워 메탄플럭스 관측장비(LI-7700)의 케미컬 교체 및 검교정은 문제없이 진행되었으나, 세컨드타워의 EC150의 경우 Gas Head sensor 문제로 제조사 수리를 위해 장비 반출하였음. 따라서 장비의 손상으로 세컨드타워 하계기간 자료 수집이 어려워져, 기존에 메인타워에 있던 EC150 장비를 세컨드타워로 옮겨서 관측을 수행하였음.

Fig. 40. Calibration of EC150(CO_2, H_2O) and LI-7700(CH_4).

- 자료 수득률을 높이고자 고속 폐회로 가스분석기(EC155)를 설치하였으며(Fig. 41), 메인타워 데이터로거를 CR6로 교체하여 더욱 빠른 데이터 집록이 가능하게 되었고 실시간으로 장비 상태를 모니터링 할 수 있게 되었음. 세컨드타워의 경우 노트북과의 직접 연결이 불가하여 주 1회 현지 인력을 통해 자료를 확보하고 있음 (Fig. 42).
- 세컨드타워의 PAR센서(모델 LI-190, LICOR), 기상센서 자료 점검 시행하였으며, NDVI 센서(모델 SD-500, ㈜쏠단) 의 경우 동계기간 케이블이 끊어져 새로 결선하였으며, 세컨드타워 주변 장비

및 센서의 케이블을 모두 케이블관으로 보수하였음.

- 지면식생 변화 및 거점 현황을 모니터링하는 카메라(CCFC, Campbell Sci.)를 2022년 6월에 설치하여 이미지 자료를 수집하고 있으며 수치화된 NDVI 자료를 포함한 지면 상태 자료를 획득하고 있음 (Fig. 43).
- 에디공분산 시스템 EC100(CSAT3A, EC150과 연결됨) 펌웨어 업데이트 및 데이터로거 OS 업데이트를 진행하였음, 그러나 세컨드타워 데이터로거 CR3000의 경우 OS 업데이트가 진행되지않아 추후 CR1000X 데이터로거로 교체 할 예정임.
- 새로운 장비 설치 및 동계기간 장비 운영을 위해 각 타워별로 운영 프로그램 교체를 진행하였으며, 3대의 토양호흡 측정용 FD챔버, 블랙카본 측정용 Aethalometer 자료 확인후 회수하였으며, 토양 이산화탄소 및 메탄 측정을 위한 챔버시스템 설치를 6월에 진행하였음.

Fig. 41. Installation of main tower closed-path gas analyzer (EC155) and replacement of data logger (CR6).

Fig. 42. Second tower of the Cambridge Bay site.

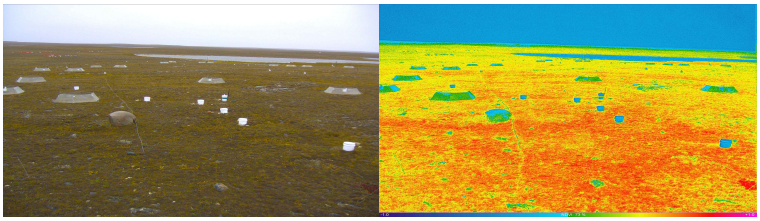


Fig. 43. CCFC camera image showing the Cambridge Bay site in 2023 (Sep. 02, 2023).

- 2차 현장 점검은 8.30~9.11 극지연구소 박상종 책임연구원과 황혜원 연구원이 수행하였음.
- 대기- 토양 관측장비 관리 및 현장 자료 확보하였음. 하계기간동안 메인타워에 있던 EC150 장비를 세컨드타워로 옮겨서 관측을 수행하였으나, 9월부터 폐회로 가스분석기와 개회로 가스분석기를 함께 설치하기위해 EC150을 검교정 후 메인타워에 재설치하였음.
- 에디공분산장비(EC150, 1대) 검교정 시행 후 하계 관측자료를 회수하였으며, 토양센서의 경우 야생동물로 인해 일부 끊어져 2023년 9월에 새로운 토양온도, 토양수분 센서로 교체하였고, 토양 이산화탄소 및 메탄 측정 챔버시스템을 회수하여 동계 대비 보관 조치하였음 (Fig. 44).
- 그 외 장비 변경 및 동계기간 대비 운영 프로그램 수정을 진행하였음.

Fig. 44. Installation of the soil temperature sensors and storage of soil chamber system of the Cambridge Bay site.

· 자료 분석 결과

- 2023년도 06.29. ~ 08.31에 관측된 기온은 최대 23℃, 최저 -0.5℃, 평균 14.8℃로 나타났으며, PAR 값의 범위는 0~1200㎛ol/㎡/s, 평균 280㎛ol/㎡/s으로 나타났음. 메인타워 및 세컨드타워는 7월의 경우 북동풍, 8월은 서풍계열의 바람이 주로 나타남(Figs. 45~47).

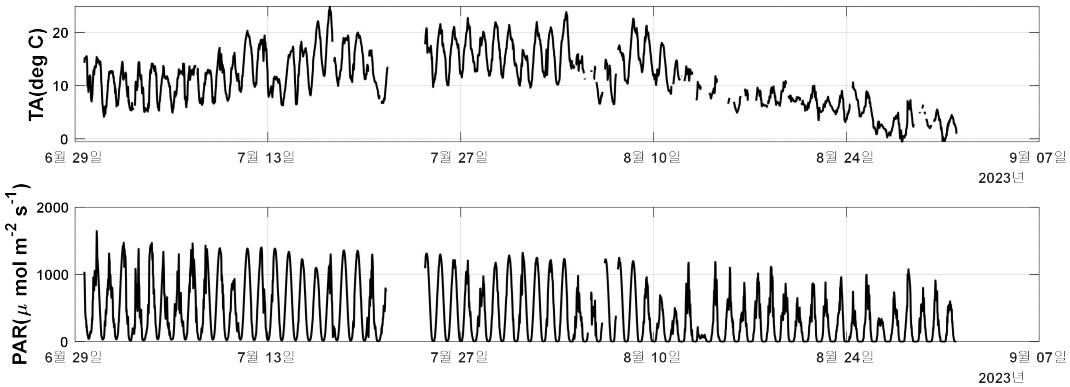


Fig. 45. Time series of air temperature, photosynthetically active radiation(PAR) measured at the Cambridge Bay, Nunavut, Canada in 2023.

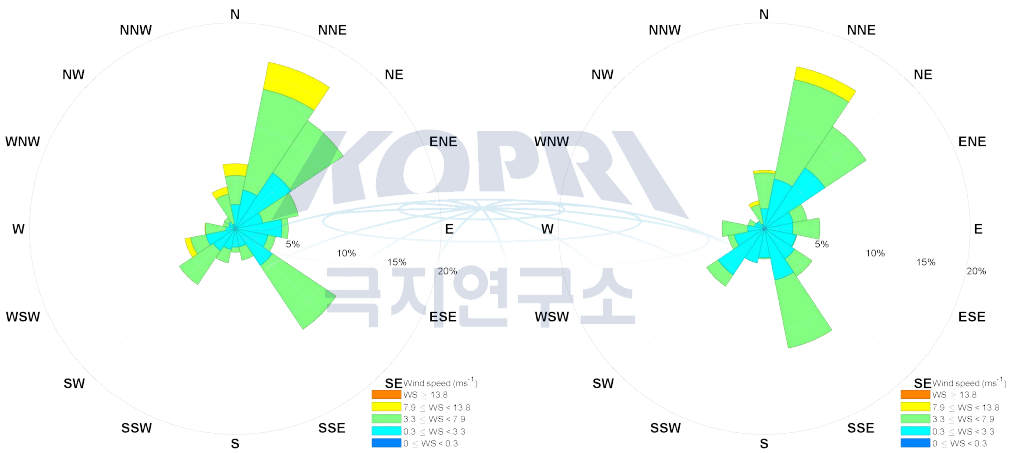


Fig. 46. Wind rose in Cambridge Bay, Nunavut, Canada in July 2023.

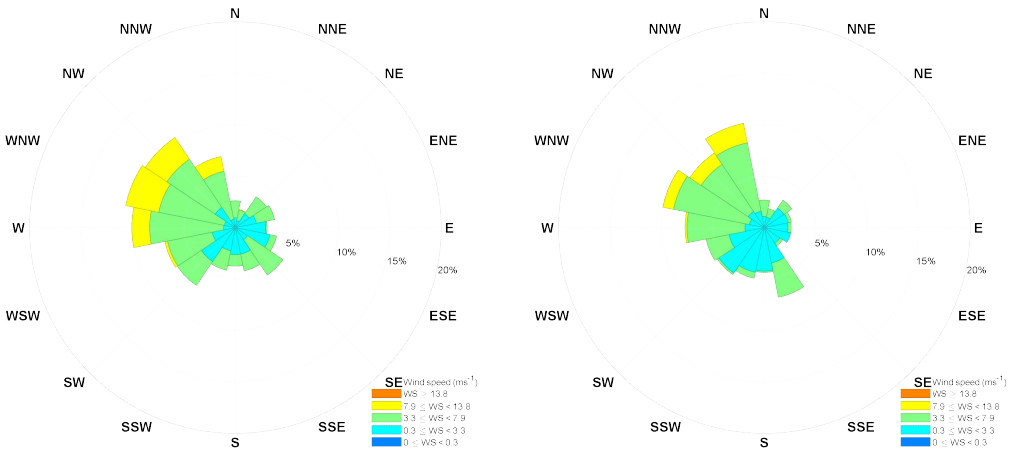


Fig. 47. Wind rose in Cambridge Bay, Nunavut, Canada in August 2023.

– 메인타워(폐회로 가스분석기 EC155) 및 세컨드타워(개회로 가스분석기 EC150)의 2023년 CO2 플럭스 시계열을 분석함. 캠브리지베이에서 지면이 드러나는 시기인 6월 말~8월 말 세컨드타워의 순생태계 교환량(NEE) 값의 범위(−8~3 ㎛ol/㎡/s)가 메인타워(−4~3 ㎛ol/㎡/s) 와 비교하여 크게 나타났으며, 이는 메인타워와 세컨드타워의 위치에 따른 식생별 차이에 의해 다음과 같이 나타난 것으로 보여짐. 또한, 이 시기중 7월 중순에서 8월 초까지 식생 성장이 활발하여 NEE 값이 상대적으로 큼(Fig. 48).

KOPRI 극지연구소

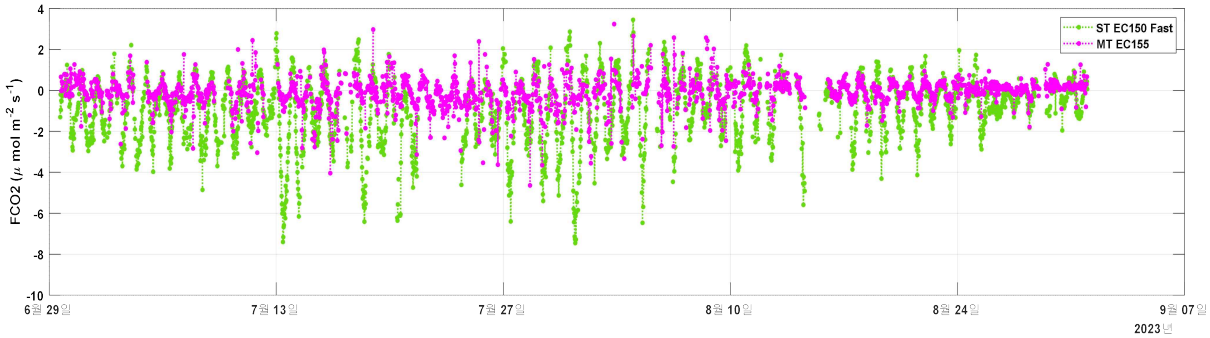


Fig. 48. Time series of CO2 fluxes of the main tower and second tower in Cambridge Bay, Canada from June to August 2023.

- Fig. 49에 2023.06.29.~08.31 기간의 메인타워와 세컨드타워의 Flux Footprint를 나타내었음. 여기에서 Footprint는 TOVI(LI-Cor) 소프트웨어를 통해 처리하였음. 메인타워와 세컨드타워의 에디공분산 장비는 각각 지상 5m, 2m 높이에 있으며 장비의 높이가 높은 메인타워의 Footprint 영역이 더 넓음.
- 메인타워는 대부분 지의류와 이끼류로 대체로 식생이 균질하며, 세컨드타워 주변으로는 Pond가 자리잡고 있으며 지의류, 이끼, 초본, 관목류의 여러 식생들이 있음.

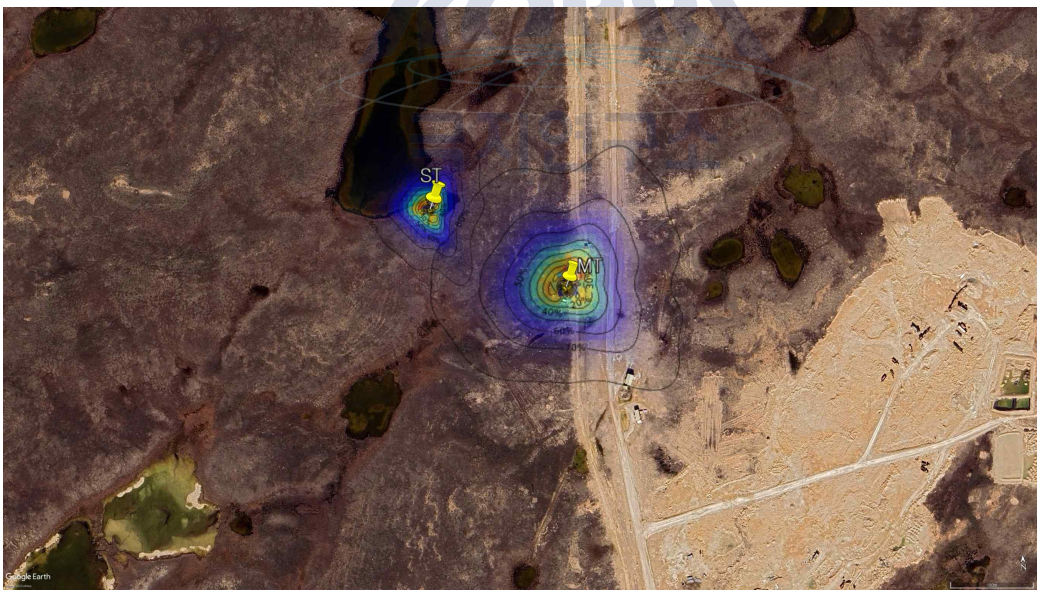


Fig. 49. Flux footprint of the main tower and second tower in Cambridge Bay, Nunavut, Canada from June to August 2023.

- 2023년 세컨드타워 식생별 CO2 Flux Footprint Allocation, Light Response Curve를 분석하기 위해 세컨드타워 주위 식생을 구분(Dry, Wet, Pond)하여 NEE 값의 차이를 확인하였음(Fig. 50). Dry area는 주로 지의류, 이끼류 등이 분포, Wet area는 지대가 낮으며 대체로 관목이 분포, Pond는 가장자리에 초본과 관목등이 분포하고 있음.

– 캠브리지베이의 식생 최대 성장기를 정하여(7월 13일~8월 10일, 평균 기온 14.87℃) 세컨드타워 주변 식생 별 NEE 값을 Light response curve(H.N. Mbufong et al, 2014) 아래 식에 적용하여 확인함(Fig. 51, Table 12).

$$NEE = (F_{csat} + R_d)(1 - e^{\frac{-\alpha(PPFD)}{F_{csat} + R_d}}) + R_d \quad \text{(Mbufong } et\ al\text{, 2014)}$$

– 빛의 강도에 따른 식물의 광합성 반응을 보여주며 초기단계에서는 빛의 강도가 증가함에 따라 광합성 속도가 증가하지만 빛의 강도가 증가함에 따라 광포화단계를 보여주었음.
– Wet area(−8 ~ +4 ㎛ol/㎡/s)에서 PAR 값 대비 NEE 값이 큰 것을 확인하였음.

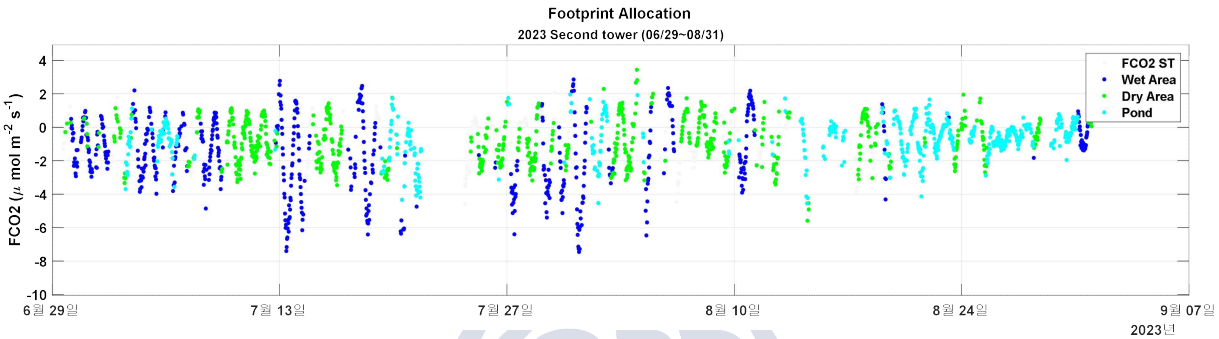


Fig. 50. Time series of CO2 flux of second tower. The blue color represents fluxes originating from the wet area, the green color represents fluxes originating from dry area, and cyan color represents fluxes originating from pond.

KOPRI 극지연구소

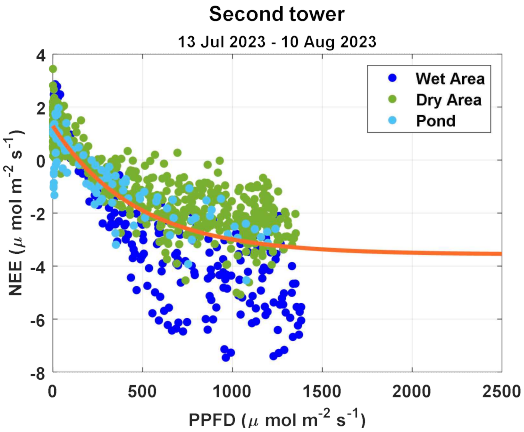


Fig. 51. Relationship between NEE and PPFD during growing season of 2023.

Table 12. Light response curve (LRC) parameters for growing season (2023) in the second tower.(Flux at light saturation(Fcsat), dark respiration(Rd) initial light use efficiency (α)).

Date	Fcsat	Rd	α	Temperature
13 Jul - 10 Aug	-3.56	1.29	0.01	14.87

- 캠브리지베이 관측거점에서 Sonic temperature(Fast-response Temperature)를 활용한 개회로 가스분석기의 CO2 플럭스 정확도 개선을 진행하였음. 개회로 가스분석기(EC150)의 경우 지표층 난류 열교환에 의해 Fast-response 온도변동에 영향을 받게 되므로 난류 온도변동을 개회로 가스분석기에 적용해야 함. 실제 폐회로 가스분석기와 비교했을 때 양의 현열 플럭스가 높은 낮 시간 동안 CO2 흡수량이 상대적으로 높음을 확인함(Fig. 52). 따라서 기존 Slow-response 온도를 이용하던 CO2 플럭스 산출법 대신 Fast-response 온도를 사용하는 보정을 실시하였음.
- Fig. 58은 9월 5일부터 설치된 메인타워 EC150 CO2 플럭스 값의 시계열이며 Slow-response 온도로 측정된 플럭스 값과 Fast-response 온도 값으로 측정된 플럭스값을 비교하고자 나타내었음. 시계열을 확인하였을 때 두 플럭스 간의 차이가 보였으며 회귀분석 결과 R^2 값은 0.9519로 나타났음.
- Campbell Scientific(2017)을 참고해 두 CO2 플럭스 간의 차이와 현열 플럭스의 선형회귀 분석(Fig. 53)을 시행해 얻은 보정식을 적용한 결과 CO2 플럭스 값의 시계열을 Fig. 54에 나타내었으며, 두 플럭스 값을 회귀분석한 결과 R-square 값은 0.999로 나타나 보정 후 두 플럭스간의 차이가 줄어들었음 (Fig. 55).

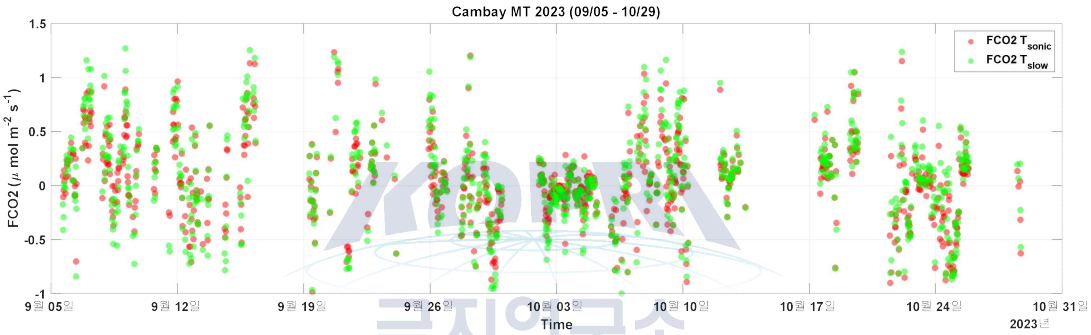


Fig. 52. CO2 fluxes of the main tower using slow response temperature (green) and fast response temperature (red).

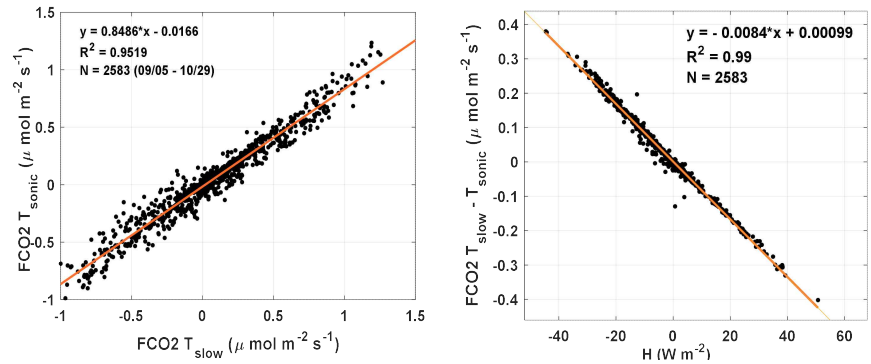


Fig. 53. Comparison between slow and fast response CO2 fluxes of the main tower (left) and the relationship between the CO2 flux difference and the corresponding sensible heat flux (H) (right).

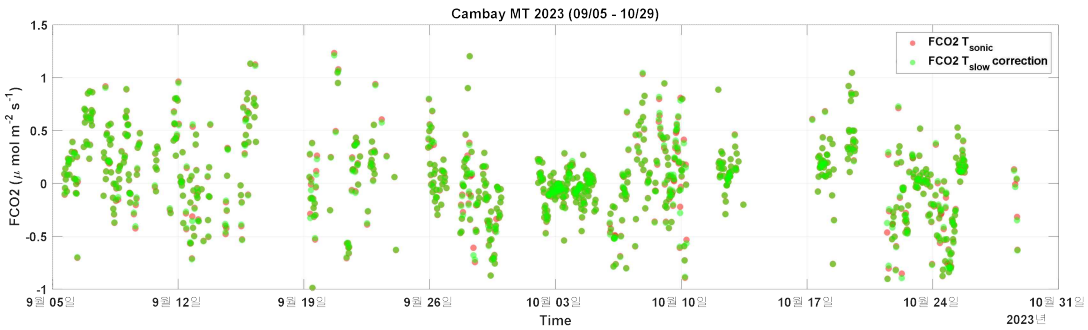


Fig. 54. The same as Fig. 58 but with FCO2_corrected. The light green color represents the flux corrected by fast-response temperatures and the red color represents the flux observed at a fast response temperature.

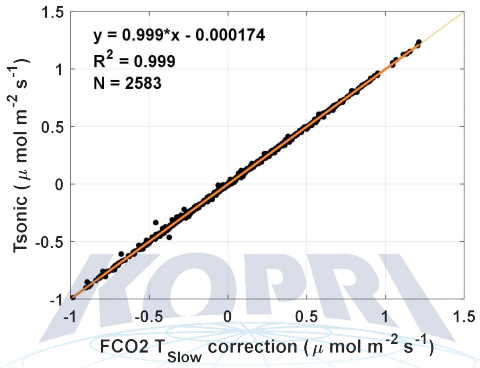


Fig. 55. Regression between slow-response CO2 flux corrected by fast-response temperatures(Tslow correction) and fast-response CO2 flux(Tsonic).

- 세컨드타워의 EC150에서 보정하지 않은 Slow-response CO2 플럭스값과 Fast-response CO2 플럭스 값의 시계열은 음의 CO2 플럭스 값일 때, 더 큰 차이를 보였음 (Fig. 56). 회귀분석을 진행한 결과는 R^2 값이 0.9859로 나타났으며(Fig. 57), 메인타워와 동일한 방법으로 보정식을 적용한 결과, R^2 값은 0.999로 Slow-response 온도가 적용된 CO2 플럭스 값이 보정식을 통해 Fast-response 온도가 적용된 플럭스 값과 비슷하게 적용되고 있음을 확인하였음 (Figs. 58~59).

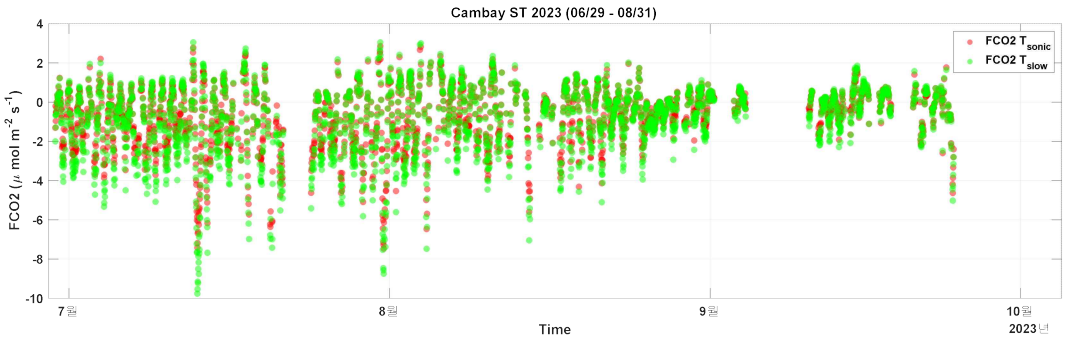


Fig. 56. CO2 fluxes of the second tower using slow response temperature (green) and fast response temperature (red).

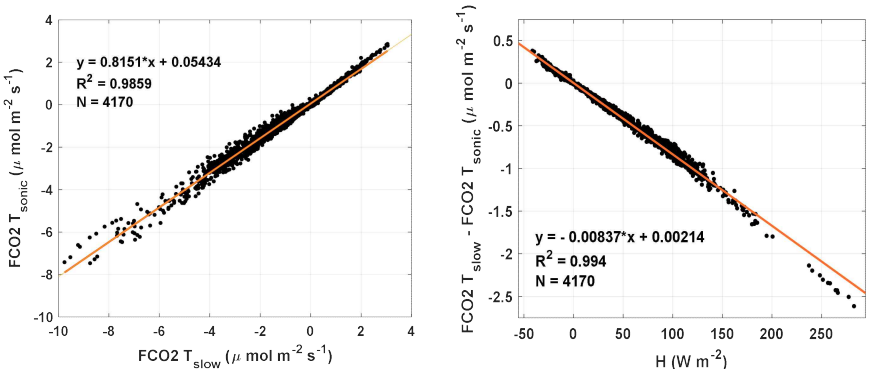


Fig. 57. Comparison between the slow and fast response CO2 fluxes of the second tower (left) and the relationship between the CO2 flux difference and the corresponding sensible heat flux (H) (right).

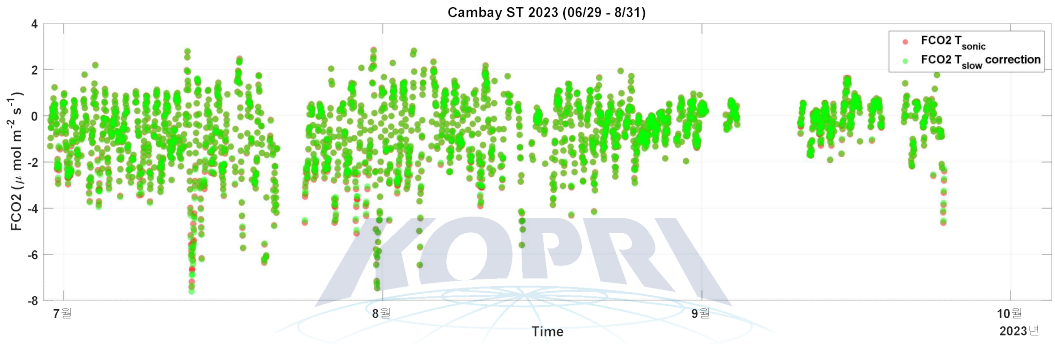


Fig. 58. The same as Fig. 62 but with FCO2_corrected. The light green color represents the flux corrected by fast-response temperatures and the red color represents the flux observed at a fast response temperature.

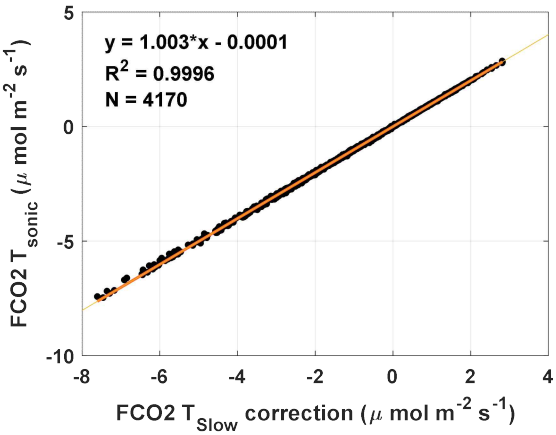


Fig. 59. Regression analysis between slow-response CO2 flux corrected by fast-response temperatures (Tslow correction) and fast-response CO2 flux (Tsonic).

○ 스발바르 거점 (이태리 극지연구소 위탁 관리)

· 현장 활동 기간: 2023.03.31.~04.03 (1차) 및 09.21.~09.26 (2차)

· 원격 자료 감시 및 확보

– 스발바르 니알슨 관측거점에서는 33 m 높이 타워의 20.5 m 높이에 에디공분산 시스템이 운영되고 있음. 전용 데이터로거가 자료를 처리 및 저장하는 동시에 네트워크로 연결된 노트북 컴퓨터에서 관측자료를 실시간 저장하고 있음. 주기적으로 주(main) 에디공분산 시스템 관측 자료를 확인함과 동시에 매월 연구소로 자료를 가져와 분석하고 있음.

– 스발바르 니알슨 관측거점의 노트북 컴퓨터에 저장된 자료는 매월 극지연구소로 추가 백업 후 분석하여 확인하고 있음. Fig. 60에서 2023년 7월에 해당하는 주요 기상자료(온도, 기압, 습도)와 CO_2 flux 데이터를 보여주고 있음.

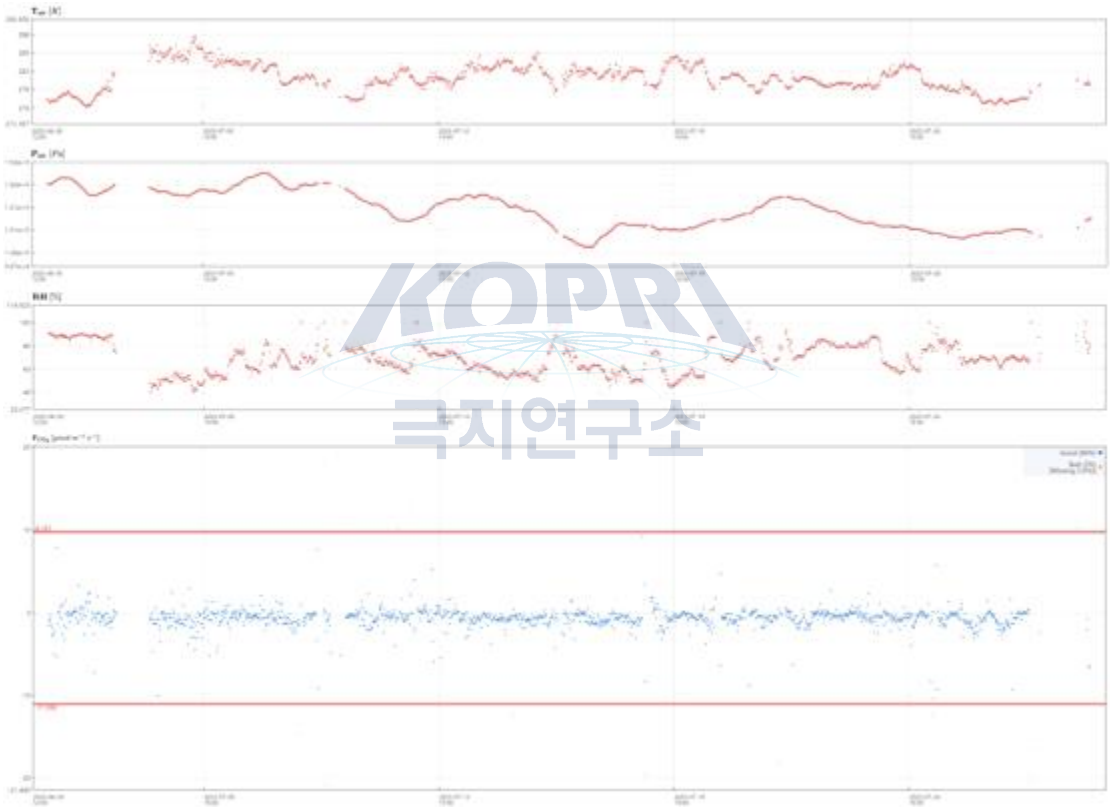


Fig. 60. Time series of flux data and meteorology measured with CR1000x at DASAN station in July 2023.

· 현장 방문 자료 확보 및 관측 장비 관리

– 스발바르 거점 에디공분산 관측시스템의 교정 및 장비 탈부착은 공동 연구 기관인 이태리 CNR-ISP 에 의해 수행되며, 극지연구소에서는 관측 자료의 백업 및 분석을 수행함.

– 2023년 이태리 CNR-ISP 연구진의 현장 점검 기간은 2023년 3월 31일~4월 3일/9월 21일~9월 26일 (CNR-ISP Dr. Mazzola)의 2회였으며, 이 기간 두 번의 가스 분석기에 대한 교정이 수행되었음. 스발바르 거점에서 이산화탄소 플럭스 관측을 위해 운영되는 가스 분석기는 모두 개회로 가스 분석기 EC150 (Campbell Scientific Inc.)와 LI-7500(LI-COR, Inc.) 장비임.

- 2023년 두 장비에 대한 교정 결과 첫 번째 교정(3월)의 경우 EC150의 경우 이산화탄소 교정 시 안정화가 이루어지지 않아 EC150으로 관측된 이산화탄소 플럭스에 문제 가능성이 확인되었고 두 번째 교정(9월)의 경우도 마찬가지로 EC150 이산화탄소에 대한 교정이 3월과 같은 문제를 보였음. 한편, EC150을 제어하는 EC100의 Firmware가 최신 버전으로 업데이트되었으며, 이에 따라 EC150으로 측정되는 이산화탄소 농도 산출에 기존의 저속 반응 기온뿐만 아니라 삼차원 초음파 풍속계로부터 측정되는 고속반응 기온의 사용이 가능해져 보다 정확한 이산화탄소 플럭스 산출이 가능해졌음.
- 2023년 4월 극지연구소 연구원이 스발바르 거점을 방문하였으며, 에디공분산 시스템과 연결되어 자료를 집록하는 데이터 로거를 기존의 CR3000에서 CR1000X로 교체하고 데이터로거에서 실시간으로 30분 단위 플럭스를 산출하게 되었음.

· 자료 분석 결과

- 스발바르 관측거점에서의 이산화탄소 관측은 낮은 이산화탄소 교환량과 잦은 강수 현상으로 인해 분석을 위한 자료 품질 평가가 쉽지 않음. 강수가 없는 날은 2021년(1월 1일~12월 31일)이 223일로 61%, 2022년(1월 1일~10월 13일)은 159일로 56%로 적으며, 상대적으로 가을에 강수가 가장 많음.
- 이산화탄소 및 에너지 플럭스 예비 분석 기간은 2023년 4월 18일부터 9월 14일까지 이며, CR1000X에서 실시간 처리된 30분 단위 난류 통계량과 원시 자료를 EddyPro®를 이용하여 자료 처리된 1차 결과를 상호 활용하였음. 난류 플럭스에 대한 데이터 로거에서의 실시간 교정의 특성상 EC150으로 관측된 이산화탄소(Fc_150) 및 잠열 플럭스(LE_150)는 품질 등급(0~9)을 확인할 수 있는 반면, LI-7500으로 관측된 이산화탄소 (Fc_7500) 및 잠열 플럭스(LE_7500)는 품질 등급을 확인할 수 없으며, 이는 EddyPro®를 이용하여 별도로 확인하였음.
- QC level은 낮은 값이 좋은 자료임을 나타내는데 데이터 로거에서 직접 계산된 자료의 경우 좋은 품질(1)에서 중간 정도의 품질(6)까지의 비율이 이산화탄소 플럭스와 잠열 플럭스 모두 약 22%이었음(Table 13).
- 원시 자료로부터 계산된 경우, 0과 1이 좋은 품질임을 가리키는데, LI-7500으로부터 계산된 플럭스는 이산화탄소의 경우 약 67%, 잠열 플럭스의 경우 약 64% 이었으며(Table 14), EC150으로부터 산출된 플럭스의 경우, 61~62%로, LI7500으로부터 계산된 플럭스의 품질이 다소 좋았음(Table 15). 이는 LI7500 센서의 측정 거리가 상대적으로 더 길어서 약한 강수에 대해서는 잘 작동하는 것으로 판단됨.

Table 13. Fraction with QC level for Fc_150 and LE_150 (April 18 ~ September 14) from the data logger, CR1000X.

QC level	1	2	3	4	5	6	7	8	9	N/A
Fc(%)	4.0	1.8	6.8	4.9	4.2	2.6	20.9	20.3	23.4	11
LE(%)	3.6	1.5	7.4	4.7	4.3	2.0	20.9	20.1	23.1	12.3

Table 14. Fraction with QC level for Fc_7500 and LE_7500 (April 18 ~ November 20) processed from raw data by EddyPro®.

QC level	0	1	2	N/A
Fc(%)	29.4	37.9	18.2	14.4
LE(%)	26.8	36.9	17.2	19.1

Table 15. Fraction with QC level for Fc_150 and LE_150 (April 18 ~ November 20) processed from raw data by EddyPro®.

QC level	0	1	2	N/A
Fc(%)	24.0	37.1	18.1	21
LE(%)	26.0	35.6	17.1	21.3

- 분석 결과로, 스발바르 니알슨 관측거점에서 데이터 로거로부터 직접 계산된 플럭스 자료를 기반으로 4월부터 9월까지 이산화탄소 플럭스 변동을 살펴보았으며 그 결과는 다음과 같음.
- 4월 중순부터 9월 중순까지 30분 단위의 이산화탄소 플럭스의 시간에 따른 변동은 뚜렷한 변화를 보이지 않지만 식물 성장기인 6월과 7월 다소 음의 값의 플럭스가 많음(Fig. 61). 플럭스 값이 이상적으로 큰 값들이 제거되었지만 여전히 전 기간에 걸쳐 다소 이상해 보이는 값들이 많이 나타남. 이는 단순히 데이터 로거 또는 에디 프로로 처리된 자료의 품질 등급만으로는 충분한 품질 평가가 이루어지지 않음을 가리킴. 이에 대한 원인은 앞서 언급된 것처럼 이산화탄소 플럭스의 크기가 매우 작고, 강수 빈도가 잦아 품질 평가에 세세한 주의가 요구됨.
- 월 평균 이산화탄소 플럭스의 변동으로부터 시간에 따른 플럭스 변화를 보다 뚜렷하게 확인할 수 있는데 대체로 5월까지는 교환되는 순탄소량이 0이나 6 ~ 9월은 스발바르 니알슨 관측거점이 대기 중 이산화탄소에 대해 흡수원으로 작용함(Fig. 62).
- 보다 의미 있는 결과 도출을 위해서는 강수 현상과 관련된 추가적인 품질평가와 함께 저류항을 고려한 순 탄소 교환량을 산출하고, 마찰 속도를 고려한 난류 상태의 확인을 통해 품질 평가를 추가한 후 미관측 또는 품질 평가과정에서 제외된 자료를 환경 인자를 이용하여 메운 후 탄소 교환에 대한 정량화가 필요함.
- 두 개회로 분석기 간의 이산화탄소 플럭스는 다소 차이를 보이기는 하나 전반적으로 유사한 패턴을 보여 두 장비 간의 비교 과정 또한 품질 평가의 한 방법으로 사용할 수 있을 것으로 보임.

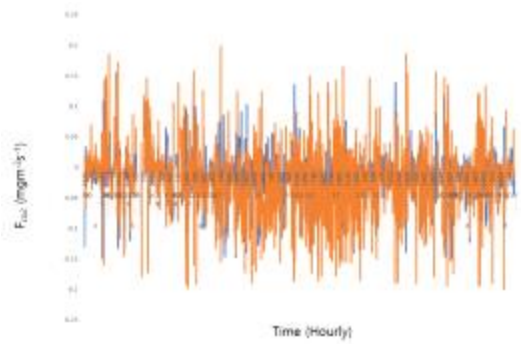


Fig. 61. The variations in Fco2 from EC150(orange) and LI7500 (blue) at Svalbard Node from mid April to mid September of 2023.

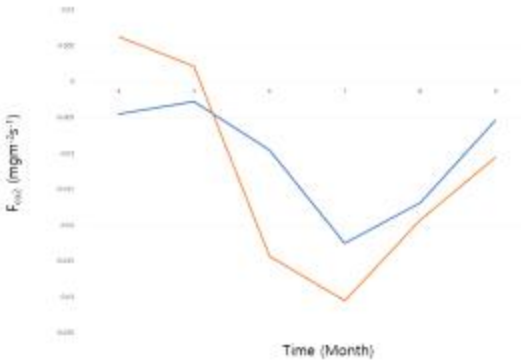


Fig. 62. The variations in monthly averaged Fco2 from EC150(orange) and LI7500 (blue) at Svalbard Node from mid April to mid September of 2023.

– 난류 플럭스의 경우에 보다 뚜렷한 시간에 따른 변동을 확인할 수 있음. 전반적으로 하계 기간을 제외하면 현열 플럭스는 음의 큰 값이 보이는 반면 잠열 플럭스의 경우 그 크기가 작지만 양의 플럭스 값을 보여 줌 (Fig. 63). 월평균 플럭스를 보면 7월의 에너지 교환은 잠열 플럭스 보다 현열 플럭스에 의해 주도되며, 겨울로 갈수록 잠열 플럭스와 현열 플럭스는 반대 부호를 보여, 대기에서 지면으로의 에너지가 증발에 활용됨을 보여줌(Fig. 64).

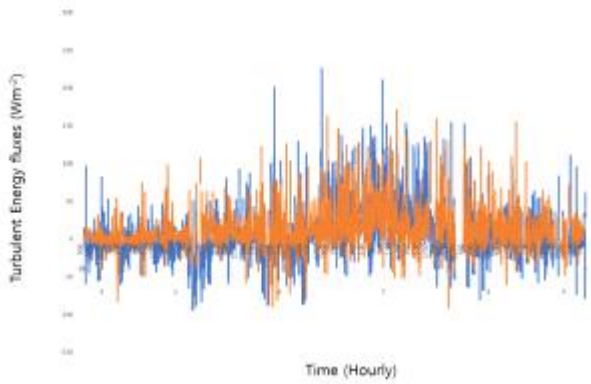


Fig. 63. Variations in fluxes of sensible (blue) and latent heat (orange) at Svalbard from April to September 2023.

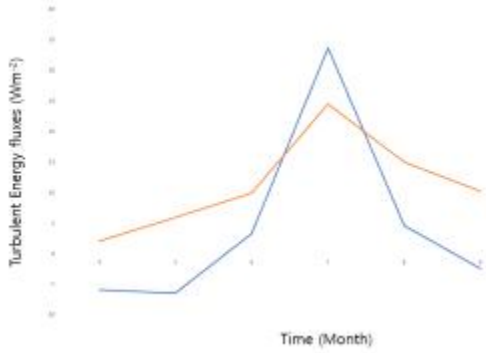


Fig. 64. Variations in monthly averaged fluxes of sensible and latent heat (EC150, orange) at Svalbard from April to September 2023.

KOPRI
극지연구소

○ 노르드 거점

· 현장 활동 기간: 2023.08.22.~08.25

· 원격 자료 감시 및 확보

– 가장 고위도에 있는 노르드 관측거점의 관측 자료 확보는 현장 방문을 통해서만 이루어져 왔음. 1단계 관측시스템 고도화 계획에 따라 2023년 하계 방문시 이리듐 위성 송신기를 설치하고자 하였으나 2023년 8월 장기간 악기상으로 인해 노르드 출입 항공기가 수 차례 취소되어 위성송신용 장비 등 화물 운송이 제대로 이루어지지 못했음. 다만 2024년 8월 방문시 이리듐 위성 송신장비를 설치하여 그 이후 정기적으로 일부 자료가 송신되고 있음.

· 현장 방문 자료 확보 및 관측 장비 관리

– 2023년 노르드 관측거점에서의 현장 활동을 위해 8월 12일~24일(총 10일)에 연구원 2명이 방문할 계획이었으나, 노르드 현지 날씨 사정으로 비행이 수 차례 취소되어, 연구원 1명이 8월 22~25일의 4일 동안 제한된 연구 활동만 수행하고 철수하였음.

– 주요 현장 활동으로 2022년 7월부터 수집된 자료를 확보하고, 데어터 로거를 CR5000에서 CR1000X로 교체하였음. 이와 함께 데이터 로거 프로그램은 실시간으로 Level1 수준의 이산화탄소 플럭스를 산출할 수 있는 프로그램으로 전환되었음.

– 당초 계획했던 이산화탄소 및 메탄 분석기 교정은 제한된 시간과 인력으로 수행되지 못하였지만, 휴대한 토양 열 플럭스 판을 세 곳에 8 cm 깊이에 설치하였으며 8월 25일부터 관측 재개됨(Figs. 65~66).

Fig. 65. Installation of the soil heat flux plate in August 2023.

Fig. 66. Eddy-covariance System of the Nord site in August 2023.

· 자료 분석 결과

- EddyPro®를 이용하여 원시 자료 처리결과 품질에 따른 이산화탄소 및 잠열 플럭스의 비율을 보면 QC Level 0과 1의 비율이 2에 비해 상대적으로 높으나 전반적으로 QC 과정을 통과하지 못한 자료가 50~60%로 매우 높음 (Table 16).
- 이산화탄소 플럭스의 경우 6월까지 0보다 큰 값을 보이다가 7월 들어 다소 약한 음의 값으로 전환되어 약한 흡수원이 됨을 알 수 있음(Fig. 67).
- 현열 플럭스의 경우 7월에 양의 값으로 전환되었고, 잠열 플럭스의 경우 부호 변화는 없으나 값이 상당히 증가하여 7월 지면이 모두 녹아 복사에너지가 대기를 가열하는 데 많이 사용되었음을 알 수 있음 (Fig. 68).

Table 16. Fraction with QC level for Fc_150 and LE_150 at Nord Node (January 1 - August 22, 2023) processed from raw data by EddyPro®.

QC level	0	1	2	N/A
Fc(%)	17.0	20	8.4	54.6
LE(%)	17.5	13.9	5.1	63.5

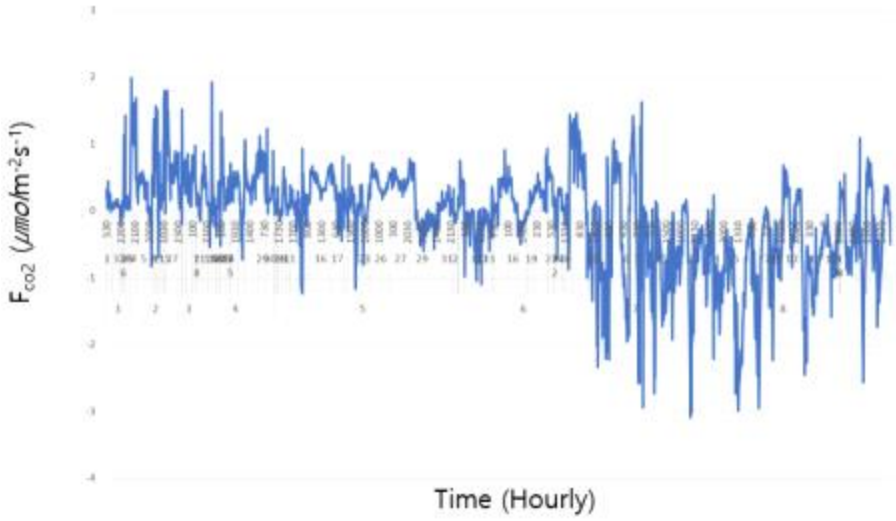


Fig. 67. The variation in Fco2 from EC150 with qc flag of 0 at Nord from early January to mid August of 2023.

KOPRI 극지연구소

Fig. 68. The variation in sensible heat flux (blue) and latent heat flux (orange) with qc flag of 0 at Nord from early January to mid August of 2023.

나) 기존 연구 대비 식생/광합성 측정 2개소 추가 및 환경인자 DB 활용시스템 신규 구축

○ 식생/광합성 측정 추가

– 동토거점 관측시스템 고도화 계획에 따라 2023년 4월 북극 니알슨 관측거점에 식생지수(NDVI) 센서 및 광합성유효복사량(PAR) 센서를 추가하여 관측을 시작하였음(Fig. 69). 그러나 하계 기간에 니알슨 관측거점에서의 잦은 정전이 발생하면서 센서에 문제가 발생하여 장기간 결측이 발생했으며 이는 2024년에 방문 시 조치가 필요하기로 함.

Fig. 69. Normalized vegetation index (NDVI) sensors and Photosynthesis Active Radiation(PAR) sensors installed in the backyard of the DASAN Station, Ny-Alesund.

- 캐나다 캠브리지베이 관측거점에서 2023년 측정된 식생지수(NDVI)의 일별 대푯값(30분 간격 자료의 median값)을 아래 그림에 나타내었음(Fig. 70). 7월에 점차 증가하다가 7월 20일부터 한 달간 최고치를 유지한 후 8월 하순부터 점차 감소하는 양상을 보여주고 있음. 9월 이후 값이 다소 불안정하게 변동하는데 이는 일사량이 감소하는 시기이므로 적절한 필터링을 통해 유효한 값으로 선정할 필요가 있음.

KOPRI 극지연구소

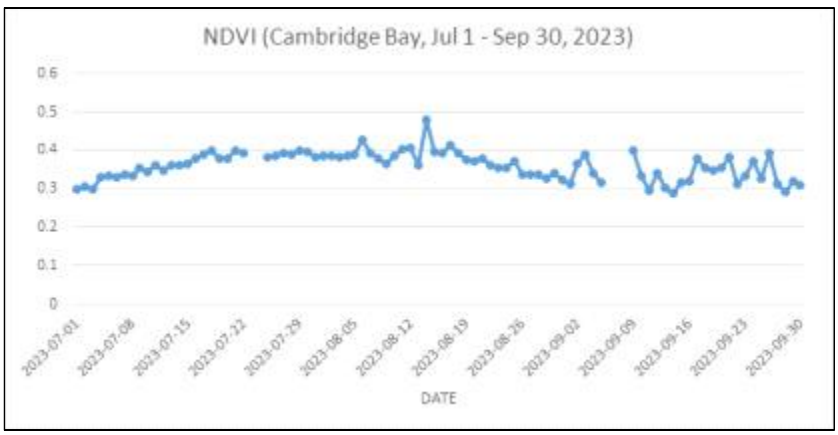


Fig. 70. Vegetation index (NDVI) measured at the Cambridge Bay, Canada between July and September, 2023.

○ 환경인자 DB 활용시스템 신규 구축

- 동토거점에서 확보되는 환경인자에 대한 데이터베이스를 구축하여 활용도를 높이기 위한 목적으로 용역사업을 통해 환경인자 DB 활용시스템 1차 구축을 수행하였음(Figs. 71~74).

- 1차년도 구축 단계에서는 거점별 자료 전송 및 수집 과정과 서버에서의 기본적인 시계열 가시화 체계 구축 실증을 위해 우선 알래스카 카운실 동토거점으로부터 이리듐 위성을 통해 1시간 간격으로 수집된 환경인자 자료를 대상으로 기능을 구현하였음.
- 카운실 거점의 기상 및 이산화탄소 자료가 매 1시간마다 이리듐위성을 통해 메일서버로 전송되고 여기에 첨부된 아스키파일에서 정보를 분리하여 데이터베이스로 저장하게 됨.
- 각 거점은 하나의 Bucket으로 정의되고, 거점의 각 측정 자료는 Table을 이루어 메타데이터 및 실제 데이터로 구성됨.
- 거점 및 환경인자 종류를 선택하고 원하는 기간을 선택하면 해당 환경인자의 시계열을 확인할 수 있고 데이터 파일로 다운로드가 가능하여 사용자의 활용도를 제고하였음.

Fig. 71. Structure of environmental data acquisition and visualization system.

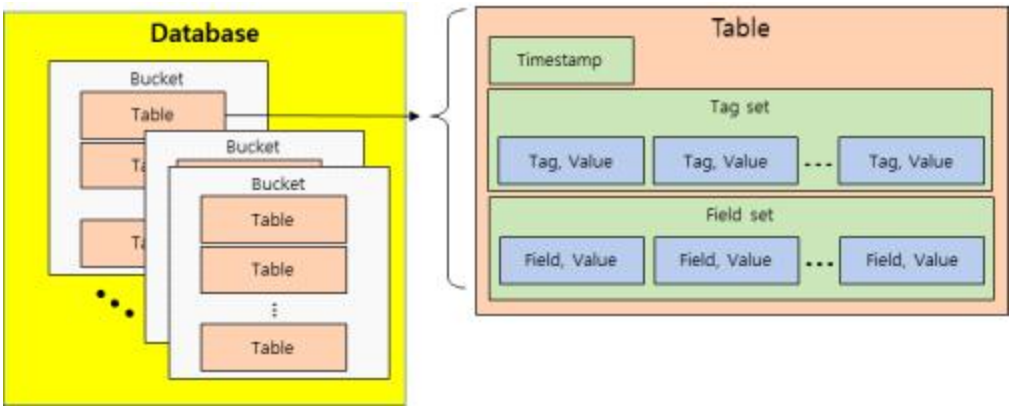


Fig. 72. Database structure of environmental data.

Fig. 73. List of 1-hour interval e-mail transmitted by Iridium satellite from the Council site.

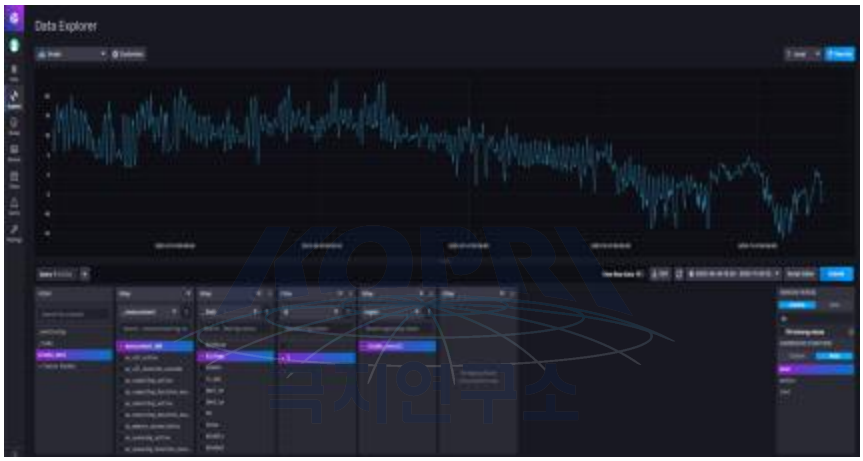


Fig. 74. An example of time series of air temperature measured at the Council site.

(4차 년도) 실측/위성/재분석 자료 활용 북극권 육상 탄소순환 분석

가) 거점 관측소 점검

○ 알래스카 카운실 거점

· 현장 활동 기간: 2024.06.13.~06.20

· 현장 방문 자료 확보 및 관측 장비 관리

- 2024년 하계 온실기체 플럭스팀의 카운실 거점 활동은 극지연구소 박상종 책임연구원이 알래스카 현지 기준으로 2024년 6월 13일부터 20일까지 총 8일간 수행하였음.
- 현장활동 중 관측시스템 점검 및 자료회수(기상, 복사에너지, 에디공분산, 식생카메라 등)를 실시하였고, 에디공분산 장비 회수 후 UAF 캠퍼스에서 보정 실시하여 사이트에서 이산화탄소 플럭스 관측을 재개하였음. 메탄 측정장비(LI-7810)을 설치하고 2개 고도(지상 0.5미터, 3.5미터)에서 번갈아 유입되는 공기시료의 메탄농도를 측정하는 경도관측시스템을 설치하였음 (Fig. 75).
- 그 외 자동챔버시스템 주변부 14개 지점 thaw depth 측정과 지정위치 토양수분 및 토양온도 수동 측정을 실시하였고, 일부 태양광패널 일부의 방향을 각각 동·서 방향으로 돌려 태양광충전

시간을 확장시켰으며 태양광패널의 지상고를 높여 봄철 충전시기를 앞당기도록 조치하였음.

– 이후 9월말에는 극지연구소의 동토 관측팀이 카운실 거점을 방문하여 메탄농도 측정시스템을 회수하고 하계 기간의 기상, 이산화탄소, 메탄 관측자료를 회수하여 전달하였음.

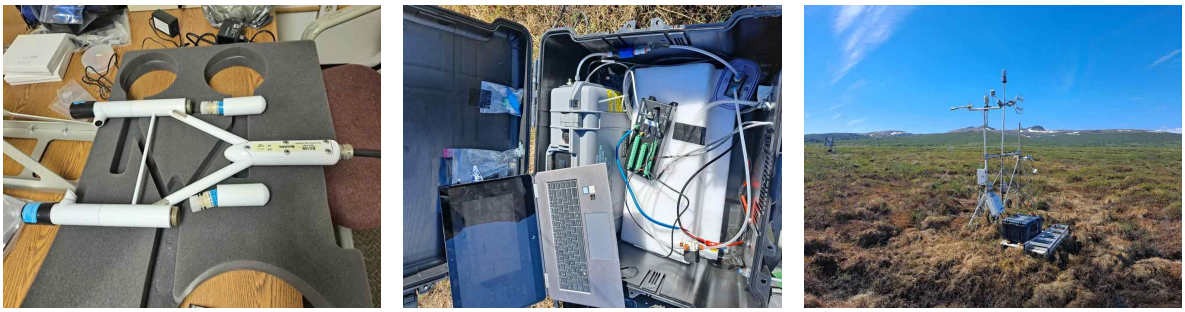


Fig. 75. Calibration of the gas analyzer (left), installation of the CH4–gradient system (middle), and eddy–covariance flux tower of the Council site in June 2024.

· 자료 분석 결과

– 온실기체 플럭스가 측정된 여름철의 기상인자 (기온, 상대습도, 풍속, 풍향)의 변화를 Fig. 76에 나타내었음. 기온은 7월 17일 아침 약 7℃에서부터 8월 3일 낮 24.5℃를 최고기온 이후 감소하여 9월 2일부터 영하의 기온이 기록되었음. 카운실 사이트는 바람이 약한 곳으로 해당 기간 30분 평균풍속의 평균값은 2.7㎧, 최대값은 10.1㎧을 기록하였음. 하향단파복사량(일사량, W/m2)의 경우 관측 초기인 6월 하순에는 맑은 날씨가 이어져 일사량이 높았던 것으로 보이며 7월 상순, 8월 상순 및 중순에 흐린 상태가 여러 날에 걸쳐 지속된 것으로 판단됨.

KOPRI 극지연구소

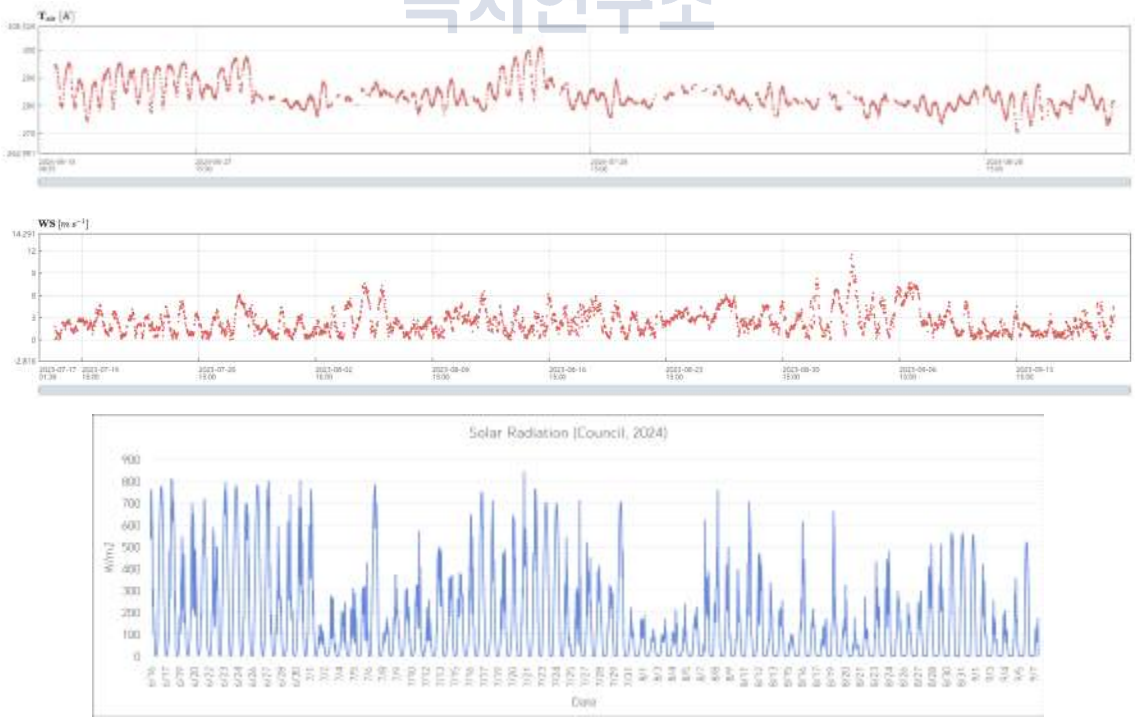


Fig. 76. Air temperature (up), wind speed (middle), and solar radiation (down) of the Council site, Alaska during from June to September 2024.

– 토양온도 자료는 지중 10 cm 깊이에 설치한 지중온도계로부터 획득한 값을 인공위성 통신을 통해 전송받은 값을 아래 그림에 나타내었음 (Fig. 77). 일 단위로 처리된 값이며 2024년 6월 1일부터 자료수집일인 8월 25일까지 해당됨. 10cm 깊이의 지중온도이기 때문에 6월 내내 영상 0.5℃ 정도를 유지하다가 7월 10일경부터 상승하여 7월 27일경과 8월 8일경에 각각 3℃ 정도로 최고온도를 기록한 이후 다시 하강하는 양상을 보여주었음.

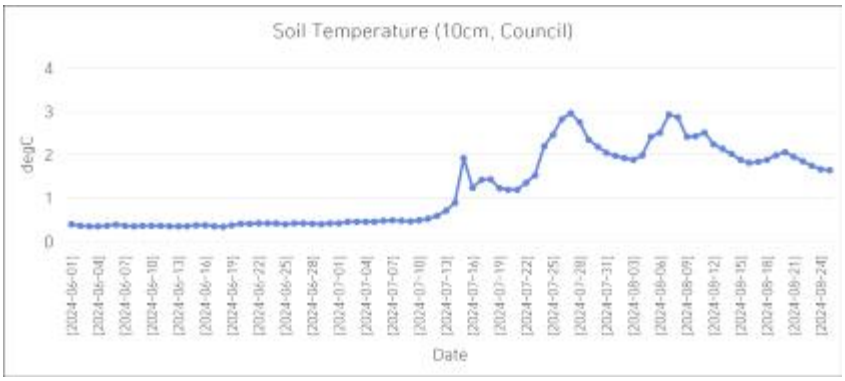


Fig. 77. Soil temperature at 10-cm depth of the Council site in 2024 from June 1 to August 25.

– 카운실 관측거점의 에디공분산시스템에서 측정된 난류 플럭스 결과 중 현열플럭스, 잠열플럭스, 그리고 이산화탄소 플럭스 변화를 아래 Fig. 78에 나타내었음. 6월에 가스분석기 보정한 이후부터 9월에 자료를 회수할 때까지 기간의 플럭스 자료로 6월 16일부터 9월 7일에 해당함.
– 현열플럭스는 6월 중하순에는 낮시간에 약 250 W/㎡ 수준의 높은 값을 보이다가 7월에는 낮 최고 약 200 W/㎡ 이하로 감소하고 8월에는 대체로 150 W/㎡ 미만의 값을 보이며 감소하는 양상을 보였음. 이 기간 평균적인 일변화양상을 보면 낮 12시부터 14시까지 약 100 W/㎡ 수준의 최고값을 보이고, 밤 20시 이후부터 아침 7시경까지는 -20W/㎡ 수준의 현열을 나타내었음.
– 잠열플럭스는 현열플럭스와 달리 6월부터 7월까지 낮 최고 150W/㎡ 수준의 크기를 유지하다가 8월 들어서 점차 감소하여 8월말에는 낮 최고 100W/㎡ 미만으로 감소하였음. 전체 기간 평균적인 일변화양상에서는 낮 동안 약 90W/㎡ 수준의 최고값을 보이고 밤 10시부터 아침 7시까지는 0에 가까운 수준을 나타냄.
– 이산화탄소 플럭스(순생태계교환량, Net Ecosystem Exchange, NEE)는 6월 중순 낮시간 약 -3 ㎛ol/㎡/s의 약한 흡수 양상을 보이다가 점차 증가해 7월 하순에는 낮시간 최대 약 -10 ㎛ol/㎡/s 수준의 지면 흡수를 나타내고 8월부터 점차 감소하여 9월에는 낮시간에도 흡수량이 미미함. 야간의 이산화탄소 배출량은 낮시간 흡수량의 변화에 비해 상대적으로 큰 계절 변화를 보이지 않으며 7~8월 야간에 약 5 ㎛ol/㎡/s 수준의 지면 방출을 나타내다가 9월로 들어서는 약간 감소함. 일간 NEE의 누적값 기준으로 보면 6월부터 8월말까지 대부분 지면에서 이산화탄소를 흡수하며 9월 3일부터 지면이 방출원으로 전환되었음. 단 8월 후반에 많은 강수 영향으로 광합성이 감소한 시기 며칠간 일간 방출원으로 기록되는 사례가 있었음.

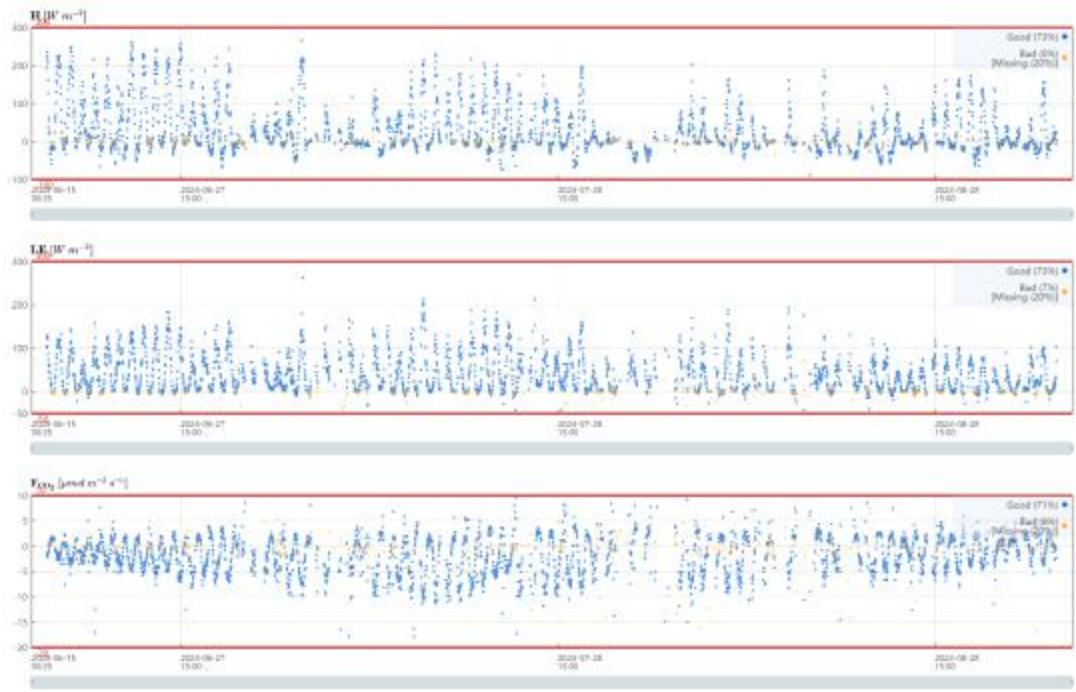


Fig. 78. Turbulent fluxes of sensible heat (upper), latent heat (middle), and CO2 (lower) at the Council site during June 16~September 7, 2024.

- 카운실 관측거점의 메탄플럭스 산출을 위해 이동형 메탄분석기를 6월부터 8월까지 운영하였으며 지상 0.5미터 및 3.5미터 높이의 흡입구에서 번갈아가며 5분씩 측정하는 방식으로 2개 고도의 메탄농도를 측정하였음. 2023년은 7-8월 동안의 잦은 강수로 인해 전력이 충분하지 않아 약 18일간 작동하고 정지되었으나 2024년에는 배터리 및 태양광패널을 보완하여 6월 18일부터 8월 10일까지 약 50일간 메탄 농도 측정에 성공하였음.
- 6월 18일부터 8월 10일까지 측정된 메탄농도는 대체로 2000~2500 ppb 범위의 값을 나타내었으며 지면온도가 높아진 7월말 이후 몇 차례 2600 ppb 이상의 고농도를 기록하였음 (Fig. 79). 이들 고농도 사례에 대해서는 당시 기상과 토양 조건을 확인하여 자료의 신뢰도를 평가하여 품질관리를 수행한 다음 두 고도의 농도차이와 대기난류확산도를 결합한 경도법(gradient method)를 적용해 메탄 플럭스를 산출중임.
- 2024년 여름철에 측정된 두 고도의 메탄 농도 중 지상 0.5미터 높이의 농도가 높은 지면방출형 농도분포 사례는 약 53% 빈도를 차지했고, 지상 3.5미터 높이의 농도가 높은 지면흡수형 농도분포 사례는 47% 빈도를 나타내었음. 향후 토양수분 및 토양온도 등 환경인자와 연계한 분석에 활용 예정임.

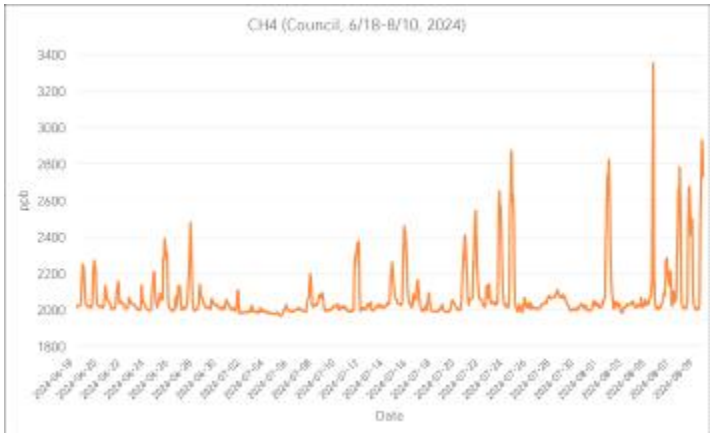


Fig. 79. CH4 (ppb) measured at the Council site between June 18 and August 10, 2024.

○ 캠브리지베이 거점

· 현장 활동 기간: 2024.06.12.~07.04

· 현장 방문 자료 확보 및 관측 장비 관리

– 2024년 하계 온실기체 플럭스팀의 캐나다 캠브리지베이 거점 활동은 극지연구소 황혜원 연수생이 알래스카 현지 기준으로 2024년 6월 12일부터 7월 4일까지 총 26일간 수행하였음.

– 현장 활동 기간 초기에 2023년 9월~ 2024년 5월 (동계기간)의 전체 관측시스템 자료(기상, 복사에너지, 에디공분산, 식생카메라 등)를 회수하였고, 에디공분산시스템 4대(CO2/H2O, CH4 플럭스 장비)를 회수 후 장비보정(Fig. 80) 실시한 뒤 카운실 사이트에 재설치하여 이산화탄소 플럭스 관측을 6월 말부터 재개하였음.

– CNR4 순복사계 장비 교정을 위해 교체후 민감도 수정하여 관측 재개하였으며 교체된 복사계는 한국으로 반입하였음.

– 세컨드타워의 노후화된 데이터로거를 교체하였으며 현장 컴퓨터와 데이터로거 간 블루투스 통신 장치를 설치하여 환경인자 데이터를 5분 간격으로 전송받아 장비 상태 파악이 가능해졌음.

– 주위 식생 분포 조사 및 좌표기록하여 추후 식생별 플럭스 변화를 파악하고자 하였음.

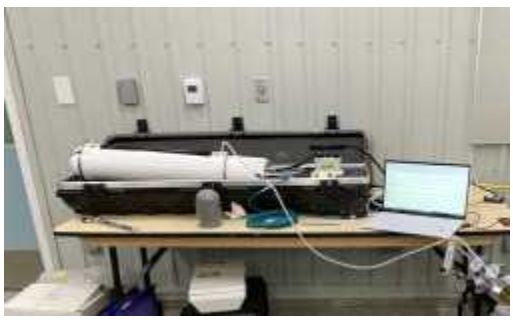


Fig. 80. Calibration of the CH4 gas analyzer at the Cambridge Bay site in 2024.

KOPRI 극지연구소

○ 스발바르 거점

· 현장 활동 기간: 2024.09. (이태리 극지연구소 위탁관리)

· 원격 자료 감시 및 확보

– 2023년과 마찬가지로 스발바르 니알슨 관측거점의 노트북 PC에 저장되는 자료는 매월 극지연구소로 추가 백업 후 데이터를 분석하여 확인하고 있음.

· 현장 방문 자료 확보 및 관측 장비 관리

– 스발바르 거점 에디공분산 관측시스템의 교정 및 장비 탈부착은 공동 연구 기관인 이태리 CNR-ISP에 의해 수행되며, 극지연구소에서는 관측 자료의 백업 및 분석을 수행함.

– 2024년 이태리 CNR-ISP 연구진의 현장 점검이 9월(CNR-ISP Dr. Mazzola)에 이루어졌으며, 이 기간 두 번의 가스 분석기에 대한 교정이 수행되었음. 스발바르 거점에서 이산화탄소 플럭스 관측을 위해 운영되는 가스 분석기는 모두 개회로 가스 분석기 EC150 (Campbell Scientific Inc.)와 LI-7500(LI-COR, Inc.) 장비임.

– 2024년 두 장비에 대한 두 번의 교정 결과는 다음과 같음. LI7500의 경우 정상 작동하는 것으로 평가됨. 다만, 수증기 범위 보정 시 예상보다 큰 값의 차이(1.05 ° C)를 보였음.

– EC150의 경우 이산화탄소 영점 및 범위 교정 시 모두 안정화가 이루어지지 않았지만, 교정을 수행하였음. 교정 상수는 기대되는 값과 크게 다르지 않았으나, 자료 사용에 주의가 필요함. 수증의 교정의 경우, LI-7500과 비슷한 결과를 보이며, 특히 범위 교정 시 설정된 값(10° C)과 큰 차이를 보였음(6.51° C).

– 2024년 교정 결과도 2023년 교정 결과와 비슷한 결과를 보였으며 향후 장비에 대한 정밀 진단이 필요함.

KOPRI 극지연구소

○ 노르드 거점

· 현장 활동 기간: 2024.08.04 ~ 08.27

· 원격 자료 감시 및 확보

– 1단계 관측시스템 고도화 계획에 따라 노르드 거점에 자료의 일부를 이리듐 위성을 이용하는 송신기를 설치하여 극지연구소로 전송하고자 하였음. 하지만, 현지에서 인터넷사용이 불가능하여 이리듐통신으로 문제점 파악에 어려움이 있었음. 2024년 최종적으로 정상작동을 확인하여 30분 간격으로 자료 전송이 가능해짐으로써 간단한 장비 체크가 가능해졌음.

· 현장 방문 자료 확보 및 관측 장비 관리

– 노르드 관측거점의 데이터로거 microSD카드의 순복사계, 기상, 에디공분산 관측 원자료 (2023.8-2024.8) 회수함.

– 장비 검교정 및 정비를 위해 타워에서 기존 순복사계, 초음파풍속계, 에디공분산시스템 가스분석기를 회수하였으며, 순복사계는 교정된 장비로 교체하였음.

– 가스분석기(EC150, LI7700)들은 내부 케미컬 교체 후 교정을 실시하였고 (Fig. 81) LI-7700 장비로 전원을 공급하는 DC 공급기 고장을 확인하고 교체하여 LI7700 작동을 재개하였음.

– 2023년도에 설치된 토양수분센서 3개 중 한 개의 측정값에 오류를 발견하여 신규 토양센서로 교체 매설하였음.

– 2023년도에 실시하지 못한 이리듐 위성 자료송신 시스템을 설치하여 30분 간격으로 일부 데이터 (NetTot, H, LE, FC, Fm_wpl, Temp, WS, WD, CM3Dn 의 9개 변수)를 극지연구소 메일서버로 전송하도록 설정하였음 (Fig. 82).

Fig. 81. CH4 analyzer (LI-7700) calibration at the Nord site in August 2024.

Fig. 82. Data transmission from the NORD datalogger via Iridium satellite.

KOPRI
극지연구소

나) 2021-2024년 거점별 획득된 자료 요약

○ 자료 처리 과정

- 각 거점별로 10Hz로 측정된 원시 자료(raw data)를 이용하여 이산화탄소 플럭스를 산출하기 위해 EddyPro® (LI-COR Biosciences, 2021, Frtini, G. & Mauder, M., 2014)를 사용하였으며 이후 품질관리 및 파티셔닝을 수행하였음 (Fig. 83).
- Level1 자료 산출 과정을 요약 설명하자면 EddyPro 7.0.6(LI-COR, 2019)을 사용하여 원시 데이터를 처리하고, open-path와 closed-path 시스템에서 30분 단위 CO2와 H2O 플럭스를 계산했음. 플럭스가 양수일 경우 지면에서 대기로 이동을, 음수일 경우 대기에서 지면으로 이동을 나타냄.
- 강수 등의 영향으로 인해 발생한 의심스러운 값들이 통계적 방법에 근거하여 제거(Mahrt, L., 1998)된 후 계산된 30분 통계량(평균, 공분산)에 좌표 변환 및 밀도 변동 보정이 적용되었음 (LI-COR Biosciences, 2021, Frtini, G. & Mauder, M., 2014).
- Eddypro를 사용한 원시데이터 처리 후에 추가적으로 데이터 품질을 관리하기 위해 세계기상기구(WMO)의 기준을 따랐으며, 품질 기준에 미치지 못한 데이터는 제외함. 플럭스 데이터에서 이상값은 median absolute deviation 방법을 사용하여 월별로 제거했음. 야간에 측정한 CO2 플럭스 데이터를 품질 관리하기 위해 Papale et al.(2006)의 방법을 적용하여 마찰 속도(friction velocity)와 CO2 플럭스 값의 관계를 분석하였음.
- 결측 데이터는 Reichstein et al.(2005)의 방법으로 보간하였음. 결측 플럭스 값은 유사한 기상

조건(하향 단파 복사, 기온, 포차)에서 얻은 평균값으로 채웠으며, 7일 이내에 유사 조건이 없을 경우 참조 기간을 14일로 연장하는 방식을 사용하였음.

- 순 생태계 교환(NEE)을 총 1차 생산량(GPP)과 생태계 호흡(Reco)으로 구분하기 위해 Lloyd와 Taylor(1994)의 식을 활용함. 식에서 Rref는 기준 호흡량, E0는 온도 민감도, Tref는 기준 온도, T0는 기준 기온을 의미하며 Lloyd와 Taylor의 설정에 따라 E0는 308.56 K, Tref는 283.15 K, T0는 227.13 K로 설정하였음. 야간 CO2 플럭스 데이터를 기반으로 Rref의 계절적 변화를 7일 간격으로 계산했고, 4일 단위로 데이터를 추출함. Rref 값을 계산할 수 없는 경우, 선형 보간법을 사용해 값을 채우는 방식을 사용함.

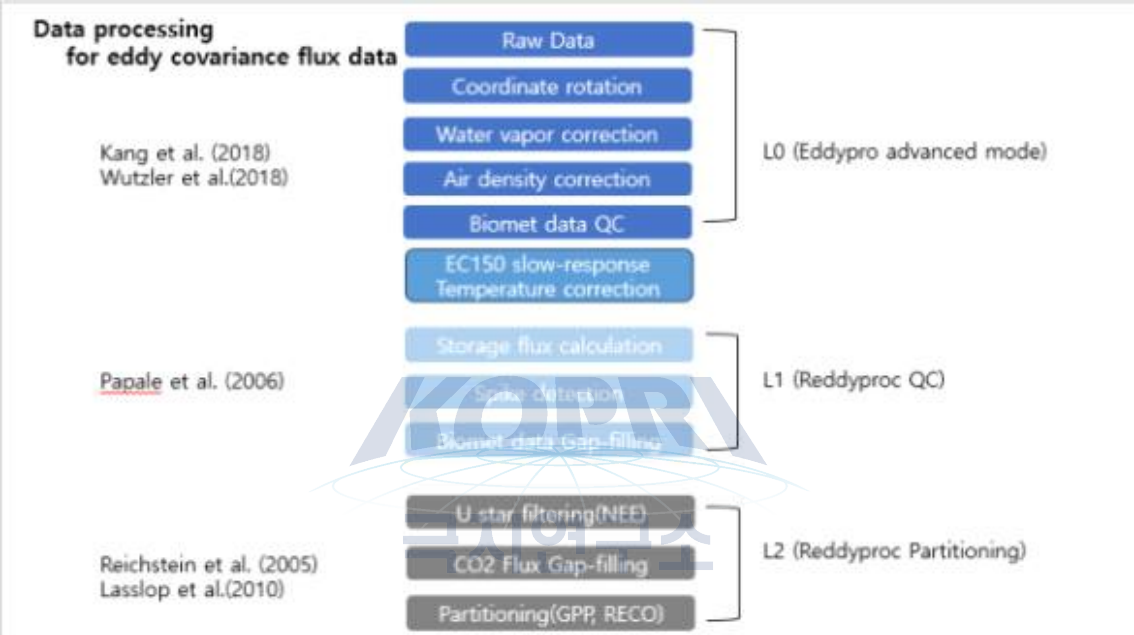


Fig. 83. Flow chart of eddy covariance data processing.

○ 에디공분산 자료 자료 수득율과 가용률

- 처리된 자료의 품질 등급은 Level1로 지정되어 KPDC에 등록되었음.
- 각 거점별 2021-2024년 10월까지 수집된 자료의 기간 및 수득률 그리고 Level1 자료의 비율은 표로 정리 (Table 17).

○ 환경인자 수득율

- 이산화탄소 플럭스(즉, 대기와 동토 간 교환되는 이산화탄소의 양)를 조절하는 환경을 이해하기 위해 거점별 보조 관측으로 지표복사에너지, 기상, 토양 물리량이 측정되고 있으며 각 관측거점에서 수집되는 환경인자의 종류와 연도별 수득율을 Table 18과 19에 제시하였음.

Table 17. Eddy covariance CO_2 flux data retrieval rate and its rate from EC150 gas analyzer for further analysis at each site and year. Level1 indicates the flux data processed by EddyPro®. (The rate is calculated based on summertime at the Council site).

Sites (Measurement Period)	Year	File Number (of 30 min. Interval)	Data retrieval rate (%) based on measurement period	Rate of available Fco_2 data of Level1(%)	Remarks
Council, USA (Summer)	1st year	N/A	N/A	N/A	No visit due to COVID19
	2nd year	3,578	96.1	91.3	2022.07.07.~09.22.
	3rd year	5,088	100.0	72.8	2023.07.18.~10.15.
	4th year	3,989	98.9	79.7	2024.06.16.~09.07.
Cambridge Bay, Canada (Year round)	1st year	N/A	N/A	N/A	COVID-19
	2nd year	14,276	81.5	47.2	
	3rd year	11,269	64.3	43.2	
	4th year	15,130	94.1	57.1	
Svalbard, Norway (Year round)	1st year	17,389	99.3	92.1	
	2nd year	15,542	88.7	66.4	
	3rd year	11,727	66.9	52.8	
	4th year	11,461	78.3	34.1	~2024.10.31
Nord, Greenland (Year round)	1st year	12,501	71.4	34.2	
	2nd year	13,305	75.9	46.0	
	3rd year	14,012	80.0	36.9	
	4th year	10,543	94.7	37.4	~2024.08.19

KOPRI 극지연구소

Table 18. Environmental factors obtained from each site: Downward Shortwave radiation, RSUP: Reflected Shortwave radiation, RLDN: Downward Longwave radiation, RLUP: Upward Longwave radiation, WS: Wind speed, WD: Wind direction, T: Air temperature, RH: Relative humidity, P: Atmospheric pressure, Ts: Soil temperature, SWC: Soil water content, SHF: Soil heat flux.

Sites	Category	Data
Council, USA (Summer)	Radiation	RSDN, RLDN, RSUP, RLUP
	Meteorology	WD, WS, T, RH, P
	Soil Physical Properties (1-day)	Ts
Cambridge Bay, Canada (Year round)	Radiation	RSDN, RLDN, RSUP, RLUP
	Meteorology	WS, WD, T, RH, P
	Soil Physical Properties	SHF, Ts, SWC
Svalbard, Nowway (Year round)	Radiation	RSDN, RLDN, RSUP, RLUP (by PANGEA)
	Meteorology	WD, WS, P, T
	Soil Physical Properties	N/A
Nord, Greenland (Year round)	Radiation	RSDN, RLDN, RSUP, RLUP
	Meteorology	WS, WD, T, RH, P
	Soil Physical Properties	SHF, Ts, SWC

KOPRI 극지연구소

Table 19. Environmental data at each site with year.

Sites (Ref. Period)	Year	Radiation	Meteorology	Soil Physical Properties	Remarks
Council, USA (Summer)	1st year	N/A	N/A	N/A	No visit due to COVID19
	2nd year	71.6	95.0	100	2022.05.01.~10.31.
	3rd year	86.2	88.7	100	2023.06.01.~10.31.
	4th year	96.7	96.7	76.8	2024.06.01.~09.07.
Cambridge Bay, Canada (Year round)	1st year	N/A	N/A	N/A	COVID-19??
	2nd year	82.1/82.1 82.1/82.1	51.8/51.8 96.5/96.5/96.5	62.4/82.1 82.1	2022.1.1. ~ 9.30
	3rd year	70.8/70.0 70.8/70.0	26.0/26.0 71.1/71.1/71.1	NA/70.8 61.0	2023.1.1. ~ 10.31
	4th year	94.9/94.9 92.3/94.9	95.8/95.8 97.7/45.3/97.2	2.1/94.2/ 95.2	~ 2024.10.08
Svalbard, Nowway (Year round)	1st year	N/A (98.6/98.6/ 95.6/98.6)	100.0	N/A	
	2nd year	N/A (99.9/99.9/ 99.9/99.9)	82.8	N/A	
	3rd year	N/A (99.9/99.9/ 99.9/98.0)	64.6	N/A	
	4th year	N/A (99.6/99.7/ 99.9/99.6)	61.1	N/A	~ 2024.10.31
Nord, Greenland (Year round)	1st year	72.5/72.5/ 70.0/70.0	34.5/34.5 72.5/72.1/72.5/	0.0/72.3/ 72.5	
	2nd year	99.2/99.2/ 44.2/44.2	46.2/46.2 99.2/99.2/98.9	0.2/98.5/ 99.2	
	3rd year	99.7/99.7/ 99.7/99.7	43.9/43.9 78.9/64.4/78.9	0.2/99.7/ 64.3	
	4th year	97.3	55	2.1/97.3/ 1.9	~ 2024.08.19

KOPRI 극지연구소

다) 실측/위성/재분석 자료 활용 북극권 육상 탄소순환 분석

관측거점은 위도 64° N에서 81° N에 이르며, 북극을 대표하는 지역에 위치하고, 2016~2019년 거점 관측 자료에 따르면 월평균 기온은 제2거점인 캠브리지베이와 제4거점인 그린란드 노르드의 기온이 가장 낮은 영하 33℃에서부터 여름철에는 미국 알래스카 카운실 거점에서 11℃ 이상을 기록함. 지역에 따른 강수량의 차이와 함께 관측지의 활동층의 깊이, 토양 수분 및 식생의 종류가 상이함. 북극 지역의 온난화에 따른 주요 생태 지역의 반응은 향후 북극 지역 온난화에 대한 이해에 매우 중요하며, 한편, 북극 동토층 관측지로의 접근의 어려움, 전원 및 통신 인프라의 부족으로 인한 양질의 자료 생산 및 안정적인 자료의 확보의 어려움을 극복하고, 동토층 지하로부터 대기에 이르는 통합 환경 감시 시스템을 유비쿼터스센서네트워크(USN; Ubiquitous Sensor Network) 기술에 기반하여 개발하고 각 거점에 적용하였고, 각 관측 거점은 미국, 캐나다, 그린란드, 이태리, 노르웨이, 독일, 프랑스 등 국제 협력연구를 수행하는 국외 연구팀과 공조하여 연구 및 관측시스템을 유지하고 있음.

○ 거점별 환경

· 알래스카 카운실(Council) 거점 환경

- 환북극권 관측 제1거점인 알래스카 카운실 사이트는 64° 50.6′ N, 163° 42.32′ W에 위치하고 있으며, 근접한 Nome 지역의 최근 10년 (2014~2023년) 관측기록에 따르면 1월 평균 영하 약 13도에서부터 7월 평균 영상 약 12도의 기온범위를 보이고 연중 강수량은 약 500 mm 정도를 나타냄. 카운실 사이트 카메라 자료에 의하면 보통 10월 중하순부터 5월 중순까지 약 7개월간 지표면이 눈으로 덮혀있음. 카운실 사이트 2022~2024년 여름철(6~8월) 평균 기온은 영상 11~12도를 기록하였음(Fig. 84). 여름철에는 표층이 녹아 활성층(active layer)이 약 60~70cm 두께로 존재하는 불연속 동토층 지대임. 이 지역은 수목(tree)의 북방한계선에 해당하여 장기적인 모니터링을 수행 시 향후 북반구 고위도 지역에서 식생분포 변화를 보여줄 수 있는 매우 좋은 입지조건을 갖추었음. 또한 알래스카대학 국제북극연구센터(IARC; International Arctic Research Center)에서 물수지 연구를 진행해오던 사이트여서 1998년부터 일부 기상관측자료가 획득되어 기후변화 모니터링 관점에서 유리함. 또한 지표에 미분해 유기물층이 풍부하게 존재하여 메탄 발생과 관련한 연구에도 적합함.
- 카운실 사이트에는 이전 단계 과제 수행을 통해 이산화탄소 교환량 측정을 위한 자동챔버시스템(자체제작)과 대기복사계, 에디공분산시스템 및 태양광발전시스템이 설치되어 목표로 했던 관측시스템 구축이 완료되었음. 관측지 주변 식생분포 조사에 의하여 대표 식생을 분류하고 각 식생 종류별 이산화탄소 교환량 측정을 위하여 자동 챔버시스템을 설치하여 하계 기간동안 연속적인 관측 및 이리듐 위성 등을 이용한 자료전송이 이루어지고 있음.

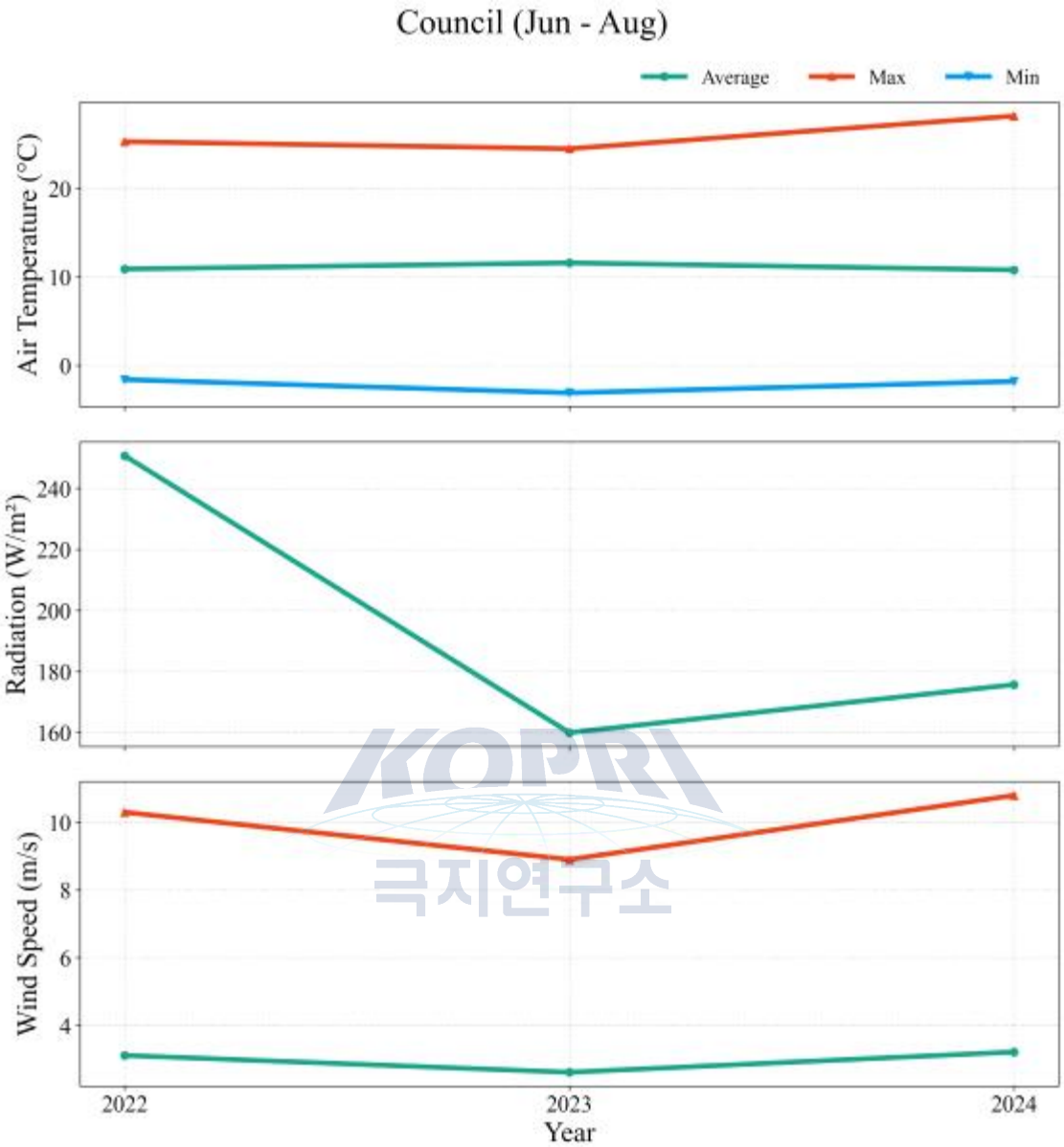


Fig. 84. Variations of environmental factors (air temperature, solar radiation, wind speed) of the Council site during summertime from 2022 to 2024.

KOPRI
극지연구소

· 캠브리지베이 거점 환경

– 제2거점은 캐나다 누나붓 준주의 캠브리지베이(69° 7′ N, 105° 3′ W)에 위치함. 캠브리지베이에는 인구 약 1,500명이 거주하고, 북극대학이 위치한 마을이 있고, 관측지는 마을에서부터 북쪽으로 자동차로 10분 거리에 있음. 관측지 주변에는 Environment Canada (EC) 소유의 지상 기상 관측시스템과 상층 기상 관측시스템이 있는데 운영과 관리는 현지의 Halmet of Cambridge Bay에서 담당함. 마을 인근 여러 개의 담수호가 있는데 관측지에 위치한 플럭스 타워를 기준으로 북서쪽으로 약 200m, 남서쪽으로 약 500m에 호수가 있으며, 북쪽과 동쪽으로 약 1km 떨어진 곳에 상대적으로 큰 호수가 있음. 관측지로부터 남동쪽으로 400m 이상 떨어진 곳에는 소각장이 있어, 남동풍일 때에는 자료의 선택에 주의가 필요함. 환북극 동토 거점 중에서 평균적으로 가장 추운 곳으로 1월 중 일 평균 기온은 -33℃까지 내려가며, 일 평균 기온에 근거하면 6월~8월 영상의 기온이 나타남 (Fig. 85). 강수량이 적어 토양은 상대적으로 건조하며, 선태류, 지의류, 그리고 10cm 이하의 초본류와 관목류가 주 식생을 구성함.

– 캐나다 정부는 2007년 “Strengthening Canada's Sovereignty and Place in the World"를 발표하여 2017년 이 지역에 월동 가능한 첨단과학기지 Canadian High Arctic Research Station(CHARS)를 건설하여 북극연구의 거점으로 활용하고 있음. 캐나다 북극 연구활동을 지원하는 천연자원부 Polar Continental Shelf Program(PCSP)과 CHARS를 주도하는 INAC는 우리나라와 극지연구 협력에 많은 관심을 표명하며, 국제공동연구의 일환으로 지지를 받고 있음.

· 스발바르 거점 환경

– 스발바르 거점은 본 과제에서 수행하는 제3거점으로서, 노르웨이 스발바르 군도 내의 니알슨(Ny-Ålesund) 주변에 위치(78° 55' N, 11° 56' E)해 있음. 니알슨은 Kongsfjord 해안에 위치하며, 34m 높이의 Amundsen-Nobile Climate Change Tower (CCT) 관측 타워는 니알슨으로부터 남서쪽 약 1.3km 떨어져 있다. CCT로부터 수 km 이내에 높고 가파른 산과 빙하, 깊은 계곡, 평지 그리고 침강된 지역이 혼재되어 있음. CCT로부터 북쪽 방향에 Schetelig 산이, 남쪽으로는 Zeppelin 산과 그 정상부에는 GAW 지구급 관측소가, 동쪽으로는 니알슨의 오른편에 위치한 Mobile Mast가 있음. 태양복사 자료는 https://doi.pangaea.de/ 에서 제공되는 BSRN Station-to-archive file for station Ny-Alesund 데이터를 사용하였음. 연평균 온도는 -6.3 ~ -0.4℃ 나타나며, 연 최저 기온과 최고 기온은 각각 -26.5 / 15.6 ℃을 기록하였음 (Fig. 86).

· 노르드 거점 환경

– 제4거점 그린란드 노르드(Nord)(81° 36′ N, 16° 40′ W)는 그린란드의 북동쪽 연안에 위치하고 있고, 캐나다의 Alert 군사기지를 제외하면 가장 고위도 북극에 위치한 유인 기지로 북극점에서 933km 떨어져 있음. 기후학적으로 북극해로부터 한류가 주변을 흐르기 때문에 하계 기간 2개월 전후의 기간만 해빙이 녹으며, 육상 동토의 활동층의 깊이는 약 0.2m임. 2021 ~ 2024 평균 기온은 -10.8℃이고, 2021~2023년 6월부터 8월까지 여름철 최고(최저) 기온의 평균은 13.5 (-18.4)℃의 영상 기온이 나타남. 반면, 11월부터 3월까지 겨울철 기온은 평균적으로 영하 33℃까지 내려가며, 기록된 최저 기온은 영하 51℃이다. 강수량은 188mm로 적음. 노르드 거점에서의 기후는 북반구 중위도로부터 들어오는 난류로 인해 연중 많은 기간 해빙이 없는 스발바르 지역과는 대조를 이루는데 스발바르 지역 활동층은 약 1m임. 노르드의 풍향은 하계(6월~8월)에는 동풍이, 나머지 기간은 남서풍이 주풍으로 나타남. 풍속의 경우 11~12월에 상대적으로 강한데 주변의 빙상으로부터의 활강풍이 주원인으로 파악됨 (Fig. 87).

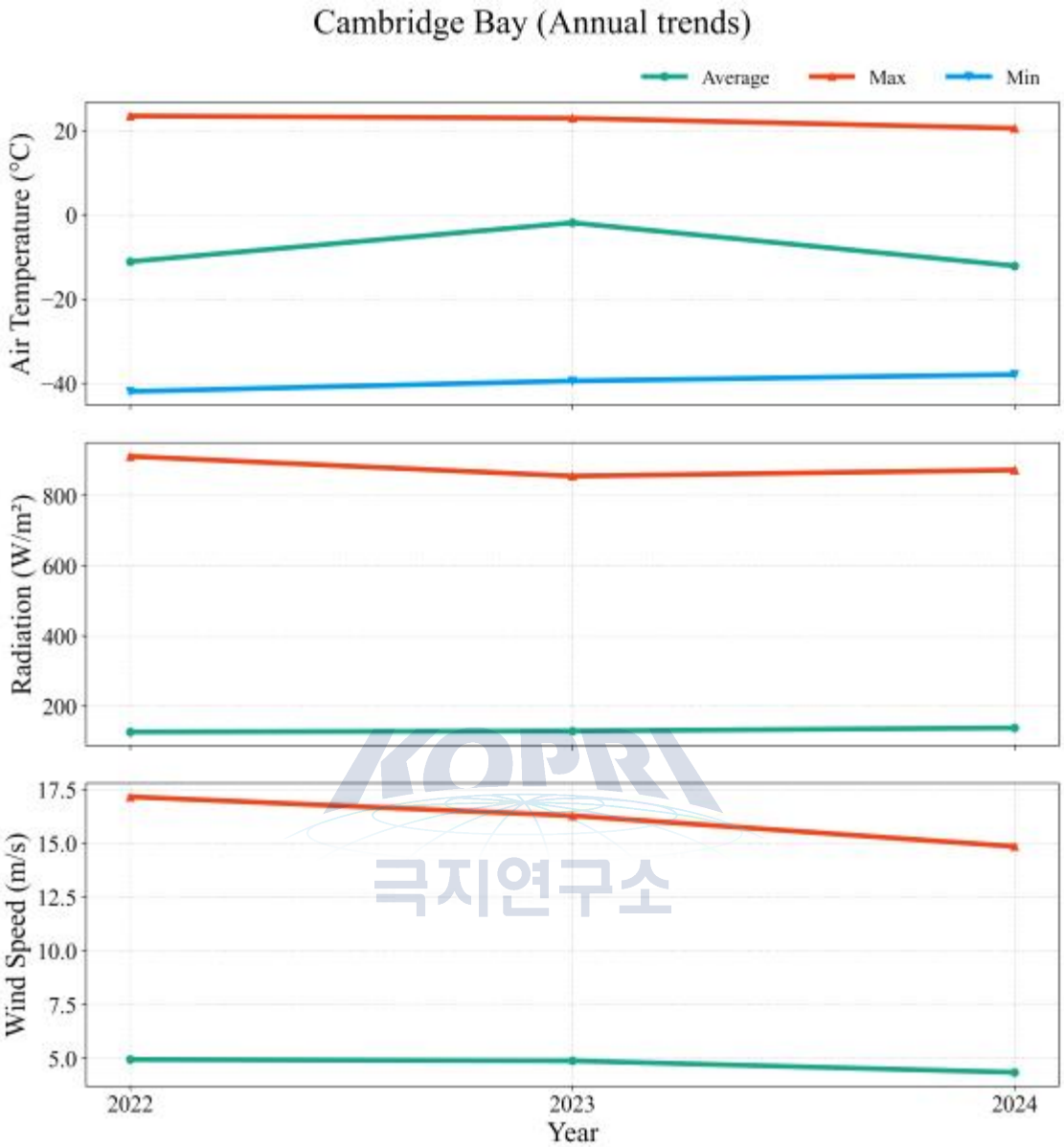


Fig. 85. Variations of environmental factors (air temperature, solar radiation, wind speed) of the Cambridge Bay site during summertime from 2022 to 2024.

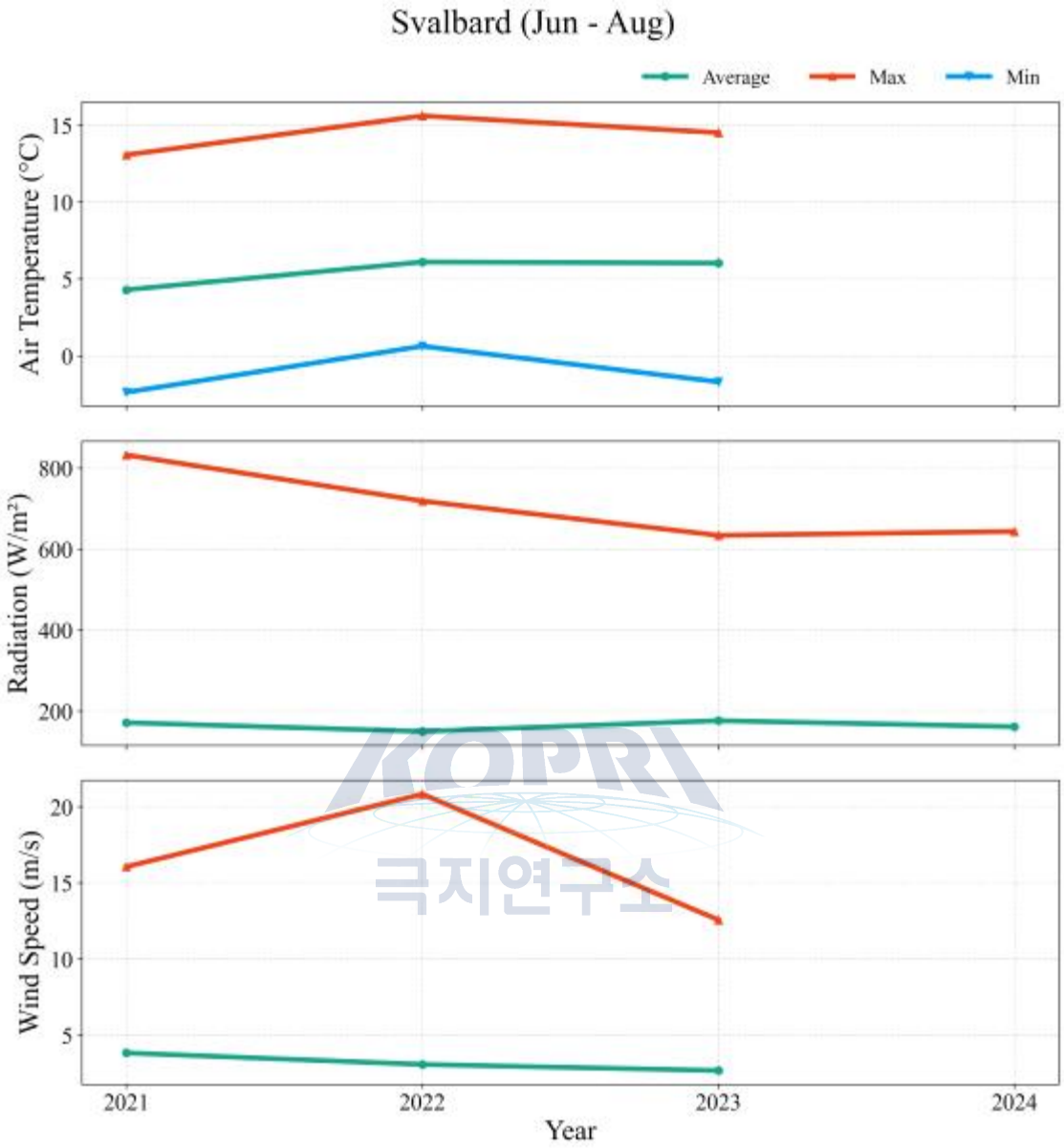


Fig. 86. Variations of environmental factors (air temperature, solar radiation, wind speed) of the Ny-Alesund, Svalbard site during summertime from 2021 to 2024.

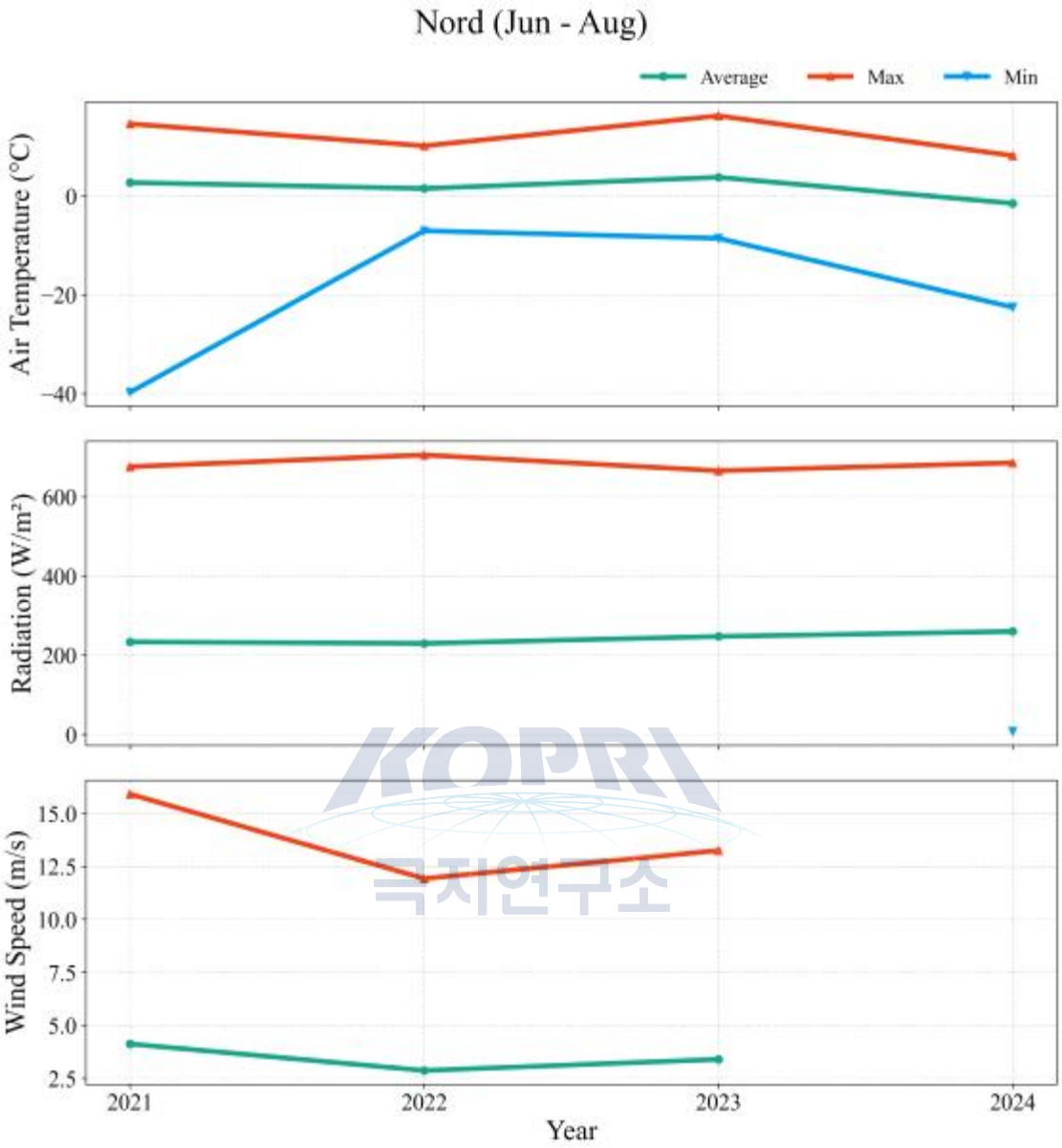


Fig. 87. Variations of environmental factors (air temperature, solar radiation, wind speed) of the Nord site during summertime from 2021 to 2024.

○ 거점별 생태계의 GPP, RE, NEE 특성 및 변화 경향

- Fig. 88은 북극 툰드라의 식생 최대 생장 기간(여름철) 동안 이산화탄소(CO_2) 교환이 광량에 따라 어떻게 반응하는지를 평가하고자 한 연구 결과를 보여줌. 이를 위해 캐나다 캠브리지베이, 미국 알래스카 카운실, 그린란드 노르드, 스발바르 니알슨에서 여름철(6월, 7월, 8월)의 순생태계 교환량(NEE), 광합성유효복사(PAR/PPFD), 하향단파복사, 기온을 활용하였음.
- 연구 대상 지역의 식생 최대 생장 기간을 분석하기 위해 전체 기간을 14일 단위로 구분하였음 (Mbufong et al., 2014). 각 구간에 대해 Misterlich 함수(Falge et al., 2001, Eq. (1))를 활용하여 광 반응 곡선을 도출하였으며, 14일 단위로 최대 순 CO_2 흡수량을 기록한 구간을 식생의 최대 생장 기간으로 정의하였음.

$$NEE = -(F_{csat} + R_d) \cdot \left(1 - e^{-\alpha \cdot PPFD} / (F_{csat} + R_d)\right) + R_d \quad \text{Eq. (1)}$$

- 다음 함수는 3가지 매개변수(Fcsat, α, Rd)를 포함하며, Fcsat은 광포화 상태에서의 플럭스(Fcsat) 매개변수는 최대 순 CO_2 흡수량을 나타내며, 이는 PPFD가 더 증가해도 식물의 CO_2 흡수에 영향을 미치지 않는 상태를 의미함. Rd는 PPFD가 0일 때(야간)의 CO_2 플럭스, α는 곡선의 기울기로 표시되며, 기울기가 클수록 낮은 광량 조건에서의 더 높은 기울기가 클수록, 낮은 광량에서도 더 높은 광합성(CO_2 흡수) 효율성을 나타내는 매개변수임 (Table 20).

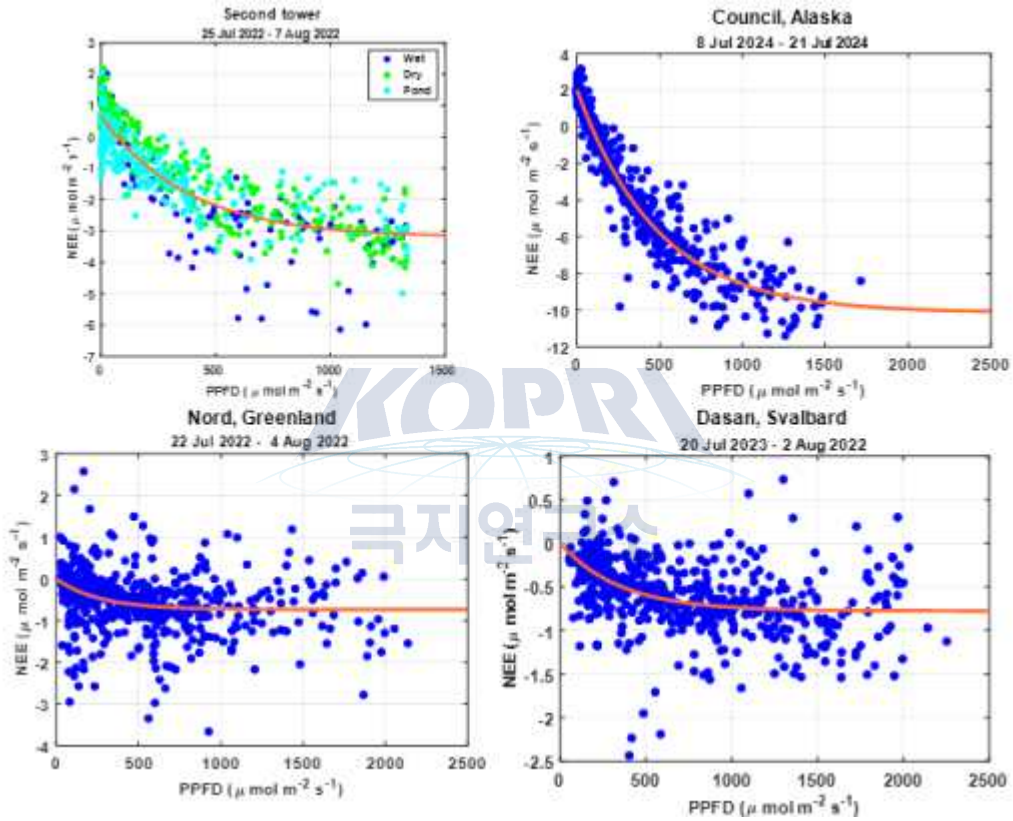


Fig. 88. Response of NEE to light condition observed at the Cambridge Bay (upper left), Council (upper right), Nord (lower left), and Dasan (lower right) sites.

Table 20. Light response parameters of each permafrost sites.

Site	Peak period (14 Days)	Fcsat	Rd	alpha	Temp.
Cambridge Bay	2022. 7/25 - 8/7	3.21	0.68	0.010	11.1
Council	2024. 7/8 - 7/21	10.14	2.01	0.030	10.3
Dasan	2023. 7/20 - 8/2	0.77	0.00	0.002	6.8
Nord	2022. 7/22 - 8/4	0.73	0.00	0.002	7.1

- Fig. 89에서는 알래스카 카운실 사이트에서 2012년부터 2024년까지 여름철(6~8월) 누적 순생태계교환량(NEE), 광합성량(GPP), 생태계호흡량(Reco)의 변동을 제시하였음. 2020년과 2021년은 COVID-19 상황으로 인해 알래스카 방문이 금지되어 관측자료를 생산하지 못하였음. 여름철 생장기 자료이기 때문에 NEE는 약 -200 ~ -100 gC/m2 값을 보여 뚜렷한 탄소 흡수를 보이며 2022년 여름에 최소 흡수량을 보였다가 2023년 여름에 최대 흡수량을 보였음.
- 광합성량(GPP)의 경우 2012년부터 2024년 기간 중 300 ~ 650 gC/m2 범위를 나타내어 약 2배의 범위에서 경년변동을 보였으며 전체 기간에 대한 추세는 확정적이지 않음. 최근 3년(2022~2024)으로 제한한다면 광합성량이 증가했다고도 볼 수 있어 경년 변동에 대한 지속적인 모니터링이 필요함.
- 생태계호흡량(Reco)의 경우 140~500 gC/m2 수준의 변동을 보여 경년 변동성이 3배에 이르렀으며 GPP와 유사하게 2012~2024년 전체 기간에 대한 추세는 뚜렷하지 않으나 최근 3년은 약한 증가세라고도 볼 수 있는 양상을 보여줌. 한편 GPP와 Reco 두 성분 모두 2016~2019년에 비해 2022~2024년에 크기가 감소한 것을 알 수 있음. 알래스카 지역 내에서도 녹화(greening)과 갈화(browning)이 혼재되어 나타나고 있기 때문에 카운실 지역 툰드라 생태계의 변화 양상에 대해서도 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단됨.

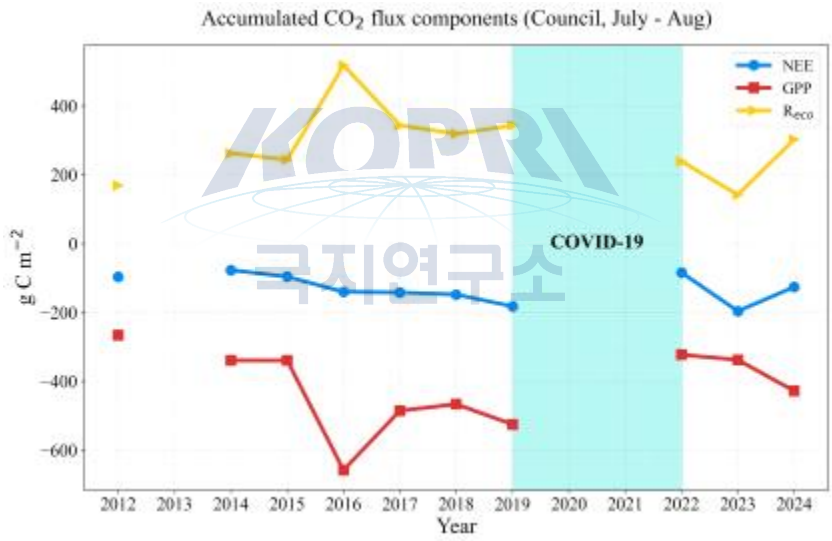


Fig. 89. Accumulated NEE (blue), GPP (red), and Reco(yellow) of the Council site for summer-time (June to August) from 2012 to 2024. Data for 2020-2021 are missing due to COVID-19 situation.

- Fig. 90은 캠브리지베이 사이트에서 2012년부터 2024년까지 여름철(6-8월) 누적 순생태계교환량(NEE), 광합성량(GPP), 생태계호흡량(Reco)의 변동을 제시하였음. 여름철 누적 NEE는 약 -50 ~ -25 gC/m2 값을 보여 탄소 흡수를 나타내지만 카운실 사이트와 비교하면 약 25% 수준으로 약한 탄소흡수량을 보여주고 있음.
- 광합성량(GPP)의 경우 역시 150 gC/m2 미만을 나타내어 카운실 사이트와 비교하면 약 25% 이하 수준을 보여주었음. 연도별 변동성은 약 2배의 범위에서 경년변동을 보였으며 전체 기간에 대한 추세는 약한 감소 추세로 보임.
- 생태계호흡량(Reco)의 경우 30~70 gC/m2 수준의 변동을 보여 카운실 사이트 대비 약 25% 이하의 크기를 보이며 경년 변동성은 약 2배로 관측되었음. 관측기간 추세는 GPP와 유사하게 약한 감소 추세로 볼 수 있음.

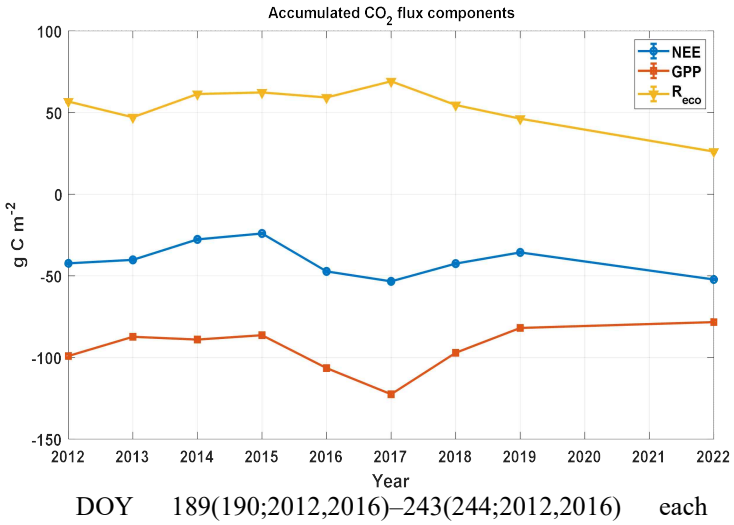


Fig. 90. Accumulated NEE (blue), GPP (red), and Reco(yellow) of the Cambridge Bay site for summer-time (June to August) from 2012 to 2024. Data for 2020-2021 are missing due to COVID-19 situation.

- Fig. 91은 사이트 4곳의 여름철 누적 NEE를 비교해 제시하고 있음. 2021년 노르드를 제외한 모든 지역이 여름철에는 탄소흡수원(NEE < 0)임을 확인할 수 있으며 가장 큰 탄소흡수 지역은 알래스카 카운실이고 그 다음으로 캠브리지베이, 스발바르 사이트임. 지면 식생이 거의 없는 노르드 사이트가 4 곳 중 가장 약한 탄소 흡수원으로 파악되었음.

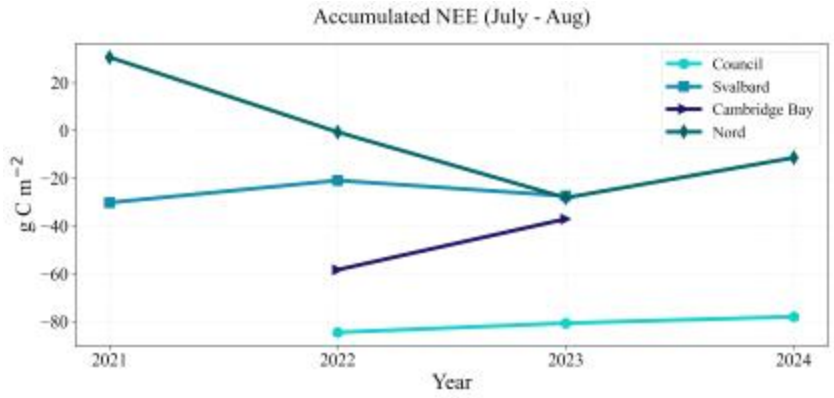


Fig. 91. Comparison of the accumulated NEE(gCm^{-2}) of the four sites for summer-time (July to August) from 2021 to 2024.

○ 모델과 실측자료 비교

- Fig. 92에서 알래스카 카운실 사이트에서 측정된 탄소순환 성분(NEE, GPP, Reco)의 일적산값과 카운실 거점에 가장 근접한 격자에서의 BESS-Polar 모델 결과값을 비교제시하였음. 이를 통해 BESS-Polar 모델이 실제 북극 고위도 툰드라 지역에서 어떠한 양상으로 탄소순환을 모의하는지 평가하고자 하며 두 자료가 공통적으로 존재하는 2019년 여름(6월 11일부터 9월 30일) 기간을

선정하여 제시하였음. 비교결과 시기별로 차이는 존재하지만 생태계호흡량(Reco)는 1:1 대응에 가까운 기울기를 보였지만 광합성량(GPP)에 있어서 BESS-Polar 모델이 약 43% 수준 높은 값을 보였음. 결과적으로 BESS-Polar 모델의 순생태계호흡량(NEE)이 관측값보다 약 25% 큰 것으로 확인되었으며 이는 BESS-Polar 모델이 알래스카 툰드라 지역의 여름철 탄소흡수량을 과다모의하고 있음을 시사함.

- 캐나다 캠브리지베이에서는 2016년 5월 1일부터 8월 31일까지의 기간을 선정하여 제시하였음(Fig. 93). 비교 결과 알래스카 카운실 거점과 비슷하게 시기별로 차이가 있었고 생태계호흡량(Reco)는 1:1 대응에 가까운 기울기와 시계열 분석시 비슷한 범위의 호흡값을 보였지만 광합성량(GPP)에 있어서 BESS-Polar 모델이 13% 정도 높은 값을 보였음. 결과적으로 BESS-Polar 모델의 순생태계호흡량(NEE)이 관측값보다 약 56% 큰 것으로 확인되었으며, BESS-Polar 모델이 캠브리지베이 툰드라 지역에서는 여름철 탄소흡수량을 과소모의하고 있음을 시사함. 추후 BESS-polar 모델에 현장의 식생정보와 유사한 식생정보가 사용되어 있는지 확인하는 것이 중요할 것으로 보이며, BESS-Polar 모델의 중요한 입력변수를 관측거점의 변수와 비교하는 과정이 필요할 것으로 보여짐.

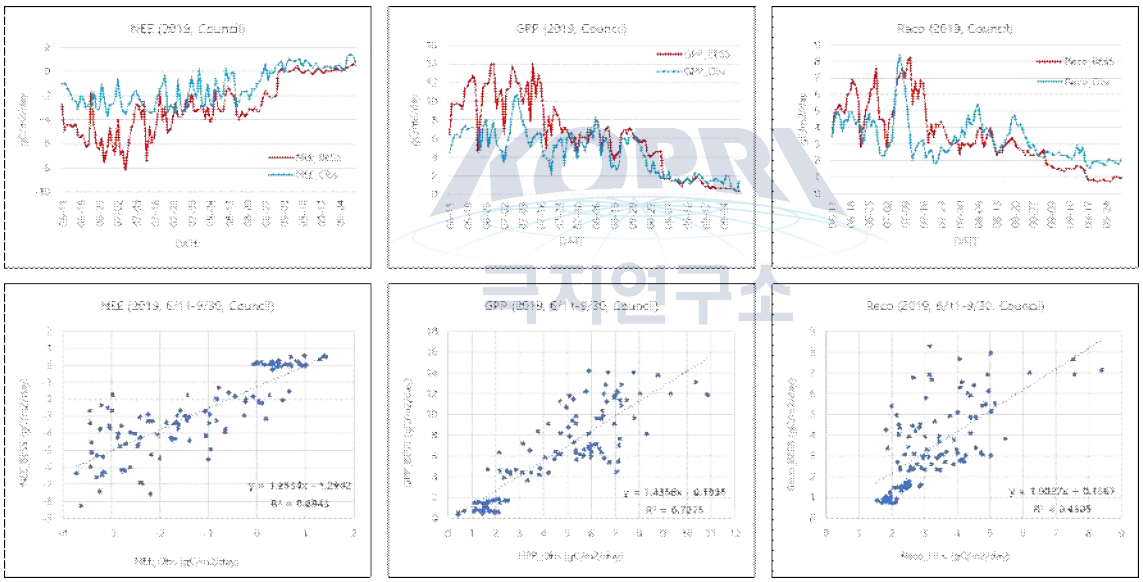


Fig. 92. Comparison of daily CO2 fluxes (NEE, GPP, Reco) of the BESS_Polar model and observation at the Council site for the summer of 2019.

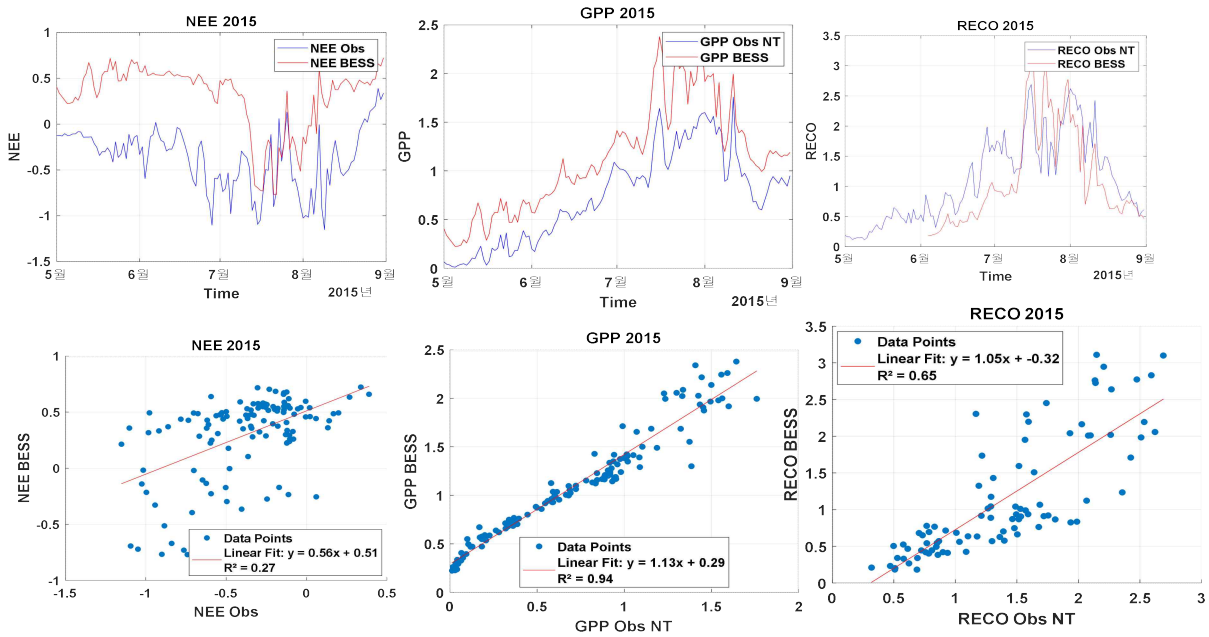


Fig. 93. Comparison of daily CO2 fluxes (NEE, GPP, Reco) of the BESS_Polar model and observation at the Cambridge Bay site for the summer of 2015.

KOPRI
극지연구소

2) (주제-2) 북극 동토 기반 현장 관측을 통한 에어로졸의 기후적 역할 규명

○ 주요 추진 내용 및 연구 개발 결과 요약

- 북극 다산과학기지 구름 응결핵 수농도 연속 관측 및 에어로졸 흡습성 연구
  - 구름 응결핵 수농도 장기 현장 관측 수행 및 시계열 농도 분석 (2021년 1월~2024년 12월)
  - 에어로졸 물리특성 관측자료를 활용한 에어로졸 흡습성 특성 분석
  - 구름 잔여 입자의 구름 응결핵 재활성화 특성 분석
- 캐나다 캠브리지베이 관측 거점 기반 블랙카본 연속 관측 수행
  - 블랙카본 농도 장기 현장 관측 수행(2013년 7월~2024년 6월)
  - 블랙카본 농도 분석
- 북극 대기 에어로졸 화학적 특성 분석을 통한 에어로졸 형성 기작 이해
  - 북극 대기 주요 입자 생성 원인 가스인 DMS와 나노입자, 구름 응결핵 형성 상관성 파악
  - 북극 대기 황 에어로졸 입자 형성의 계절 변화 양상 파악
  - 북극 스발바르 제도 인근 주요 에어로졸 전구물질들의 계절별/지역별 중요성 평가
- 2022-23년 북극 항차 기반 위도별 해양 에어로졸 발생 특성 이해
  - 실험실 제조 입자 생성 챔버 시스템을 활용한 극지 미세입자 생성 모사 실험 수행
  - 2023년 북극 항차를 활용한 해수 및 에어로졸 샘플링 수행 및 초고분해능 질량분석기를 활용한 정밀 화학적 특성 분석 진행
  - 2022년 북극 항차를 활용한 해수 및 에어로졸 샘플링 수행 및 해양 입자의 화학적 특성 분석
  - 북극권 미생물의 해양-대기 상호작용 이해
- 에어로졸 및 미량기체 현장 관측용 선도 연구 장비 도입 및 운영
  - 에어로졸 화학 성분 실시간 분석 질량분석기(Aerosol Mass Spectrometer) 도입, 작동환경 최적화 및 현장 캠페인 수행
  - 실시간 탄소 입자 분석기 (SP2-D) 도입 및 시험 운영
  - 실시간 양자전이 비행시간 질량분석기(high sensitivity proton-transfer-reaction time-of-flight mass spectrometer; PTR TOF MS) 도입 및 작동환경 최적화 진행
- 이동식 에어로졸 및 미량기체 관측 플랫폼 구축 및 집중 현장 캠페인 수행
  - 이동식 에어로졸 및 미량기체 관측 플랫폼 신규 구축을 위한 사전 조사 수행 및 설계
  - 신규 에어로졸 관측 플랫폼 활용성 제고를 위한 연구 장비 조사
  - 신규 에어로졸 관측 플랫폼 제작
  - 이동식 에어로졸 및 미량기체 관측 플랫폼 제작 및 시험 운영
- 아이슬란드 기반 해양 기원 DMS 배출 특성 및 에어로졸 생성 연구
- 북극 관측 거점 기반 국제 공동 연구 네트워크 구축
  - 아이슬란드 스토르호푀이 관측 거점 기반 국제 공동 연구 강화
  - 아일랜드 골웨이 대학 연구진과 국제 공동 연구 네트워크 구축

○ 북극 관측거점 기반 현장 연구 활동 수행

- **북극 다산과학기지 현장 활동** (기간: 2021.11.08.~11.15, 출장자: 김연태)
  - 제플린 관측소와 그루바뎃 관측소에서 현장 활동을 11월 8일부터 11월 15일까지 수행함 (Table 1). 제플린 관측소에 구름 응결핵 입자를 측정하는 구름 응결핵 계수기(Cloud Condensation Nuclei Counter, CCNC)와 입자크기 범위 2nm부터 60nm까지 크기별 농도를 측정하는 nano-SMPS를 재설치함(Fig. 1). 입자크기 2.5nm 이상의 총 수농도를 측정하는 CPC3776의 노후로 인하여 내부 부품 교체 및 유량 점검을 수행하여 정상 관측을 수행하

도록 함. 제플린 관측소의 장비는 노르웨이 극지연구소(NPI)의 담당자에게 정상적인 유지를 위한 방법을 안내함.

- 그루바뎃 관측소에서는 황 동위원소 분석을 위해 설치된 대용량 대기 시료 포집기(High Volume Sampler)의 점검과 시료를 회수함. 공동 연구를 수행하는 이탈리아 그룹으로부터 시료 포집 중 발생한 문제에 대해 대처 방법을 논의함(Fig. 2).

Table 1. Daily working log.

날짜	업무 내용	장소
2021.11.08	현장 상황 파악 및 공동 연구자와 업무 일정 조율	다산과학기지
2021.11.09	대용량 대기 시료 포집기 점검 및 시료 회수	그루바뎃 관측소
2021.11.10	CCNC 재설치 및 재가동	제플린 관측소
2021.11.11	CCNC 점검 및 nano-SMPS 재설치	제플린 관측소
2021.11.12	CPC 3776 점검 및 재설치	제플린 관측소
2021.11.15	연구장비 점검	제플린 관측소

Fig. 1. Reinstalled CCNC(left) and nano-SMPS(right) at Zeppelin observatory.

Fig. 2. Maintenance High Volume Sampler(left) and CPC3776(right).

- Fig. 3은 제플린 관측소에서 11월 11일부터 11월 25일까지 측정한 구름 응결핵 수농도 결과를 나타냄. 정상 관측 수행 후 기간이 짧아 유의미한 경향성을 분석할 수 없으나 관측 장비의 정상적인 운영이 이루어지는 것을 보임.

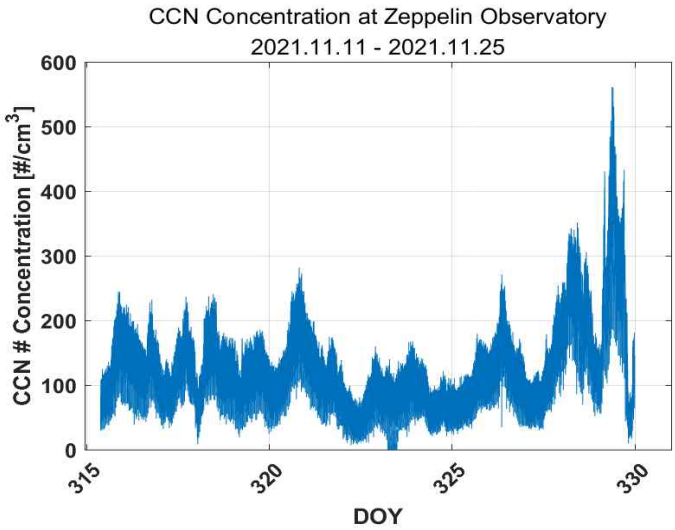


Fig. 3. CCN number concentration with ambient air line at Zeppelin observatory (2021.11.11.~11.25).

- **북극 다산과학기지 현장 활동** (기간: 2023년 3월 19일 ~ 4월 7일, 출장자: 박기태, 장은호, 강효진)
  - 북극 다산과학기지 제플린 관측소 DMS 분석기기 및 그루바뎃 기지 대용량 대기 시료 포집기 점검 (Fig. 4).
  - 북극 다산과학기지 및 Drigibile station 내 보관 중이던 2022년 북극 대기 미세입자 시료회수 및 신규 필터 보급.
  - 북극 다산과학기지 제플린 관측소 내 에어로졸 관측장비(구름 응결핵 계수기 2대, 3nm 이상 입자 수농도 계수기 및 Nano-SMPS) 점검, 수리 및 정상화.

Fig. 4. in-situ DMS analyzer installed at the Zeppelin observatory (left), High volume sampler on the roof of the Gruvebadet observatory.

- **아이슬란드 현장 활동** (기간: 2023년 7월 12일 ~ 7월 25일, 출장자: 박민지, 양승훈)
  - 아이슬란드 스토르호피이 관측 거점에 설치된 DMS 분석기기 점검
  - 노후화 된 전처리 장치를 한국으로 반출하고 신규 자동화 전처리 장치 설치.

- **북극 다산과학기지 현장 활동** (기간: 2024년 3월 8일 ~ 3월 18일, 출장자: 김연태, 장은호)

※ 제플린(Zeppelin) 관측소 기반 활동

– 스웨덴 스톡홀름대학교와 국제 공동연구 일환으로 제플린 관측소에서 극지연구소가 보유한 구름 응결핵 계수기(CCNC)와 입자 계수기(CPC3776) 그리고 광주과학기술원의 나노입자 크기별 계수기(NANO SMPS)를 이용하여 대기 중 에어로졸의 물리 특성을 관측 수행 중으로 연속적인 측정을 위하여 점검이 필요함.
– 구름 응결핵 계수기 부품 노후로 인하여 일부 부품 교체(Fig. 5).

Fig. 5. Replacing old consumables of cloud condensation nuclei counter.

– 입자 계수기의 유량과 제로 카운팅 테스트로 정상 여부 파악
– 나노입자 크기별 계수기의 중화장치 교체 및 테스트 수행
– 북극 대기 DMS 농도 실시간 연속 관측을 위하여 제플린 관측소 내에서 기운영 중인 DMS 분석기기의 소모품 교체 및 검교정 작업 수행(Fig. 6).

Fig. 6. After maintenance of the DMS analyzer in operation at Zeppelin Observatory.

※ 그루바뎃(Gruvebadet) 관측소 기반 활동
– 그루바뎃 관측소에는 대기 중 에어로졸 화학 성분 분석을 위한 다양한 샘플러가 운영 중임. 극지

연구소는 이탈리아 연구팀과 공동 연구의 일환으로 대용량 대기 시료 포집기(high volume sampler)를 이용하여 황 동위원소 성분 분석을 목적으로 72시간 주기로 필터 포집을 수행 중임.

- 지난 2023년 대용량 대기 시료 포집기 고장으로 인하여 연속적인 측정이 불가하여 새로운 대용량 대기 시료 포집기를 보급하여 2024년 현장 활동 기간 동안 설치 및 정상 측정을 재시작하였으며 안정적인 포집을 위하여 이탈리아 담당자에게 교육을 수행함.

※ 다산과학기지 내 활동

- 포항공대 수은(Hg) 분석을 위한 눈 샘플링 지원.
- 제플린 관측소 방향 실시간 구름 변화 감시를 위한 웹캠 설치 지원.
- 향후 연구 지속을 위해 다산과학기지 에어로졸 연구 물품 조사.

▪ **캐나다 캠브리지베이 현장 활동** (기간: 2024년 6월 12일 ~ 6월 28일, 출장자: 김연태)

※ 블랙카본 관측장비 점검(Aethalometer, AE-22)

- 캐나다 캠브리지베이에서는 2009년부터 aethalometer를 이용하여 대기 중 블랙카본을 실시간으로 측정 중이나 장비의 노후로 인하여 현장 점검이 필요한 상황이었음.
- 장비 운영에 필수적인 광학센서 상태와 내장 펌프 상태 점검을 비롯하여 외부 인렛 임팩터 세척을 수행하였으며 측정 중 장비 노후로 인하여 시간 초기화가 발생하는 문제를 발견하여 현장 관리자가 수기로 작성한 기록을 근거로 하여 자료를 선별함
- 향후 연구 활동 지속 및 추가적인 연계 가능성을 고려하여 주변 관측 환경과 연구시설을 파악함.

※ 현장 기상타워(메인, 세컨드타워) 및 연구 장비 정상화 지원

- 현장 순복사계와 데이터로거 해체 및 교체 지원.
- 장거리 블루투스 통신 설치 및 정상화 지원.
- 현장 이산화탄소 호흡 챔버 설치 지원.

▪ **아이슬란드 현장 활동** (기간: 2024년 6월 16일 ~ 2024년 6월 29일, 출장자: 양승훈)

- 아이슬란드 스토르호퍼이 관측 거점에서 기운영 중이었던 DMS 분석기기의 디텍터 문제 발생으로 소모품 교체 및 수리 진행.
- DMS 분석기기 정상화를 통한 대기 DMS 관측 수행 및 2023년도 아이슬란드 대기 DMS 관측 데이터 확보(Fig. 7).

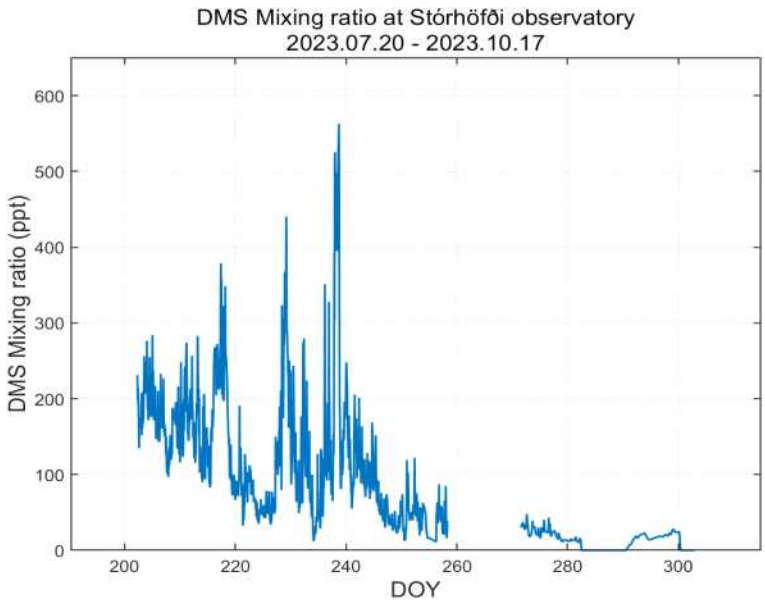


Fig. 7. Atmospheric DMS mixing ratios observed at Storhofoi observatory (2023.07.21. ~ 2023.10.17).

가) 북극 다산과학기지 구름 응결핵 수농도 연속 관측 및 에어로졸 흡습성 연구

- **구름 응결핵 수농도 장기 현장 관측 수행 및 시계열 농도 분석 (2021년 1월~2024년 12월)**

– 노르웨이 스발바르 제도의 가장 큰 섬인 스피츠베르겐 섬에 니알슨 과학연구 기지촌이 있으며, 여기에 북극 다산과학기지가 위치함. 북극 다산과학기지로부터 약 2km 떨어진 제플린 산의 마루(474m) 부분에 제플린 관측소가 위치함.

– 제플린 관측소는 노르웨이 극지연구소(Norwegian Polar Institute, NPI)의 소유이며 북극 대기 중 미량기체와 에어로졸을 실시간 관측함으로써 기후 변화에 의한 대기 에어로졸의 기준 농도 변화가 대기 에어로졸–구름 상호작용에 미치는 영향을 관측하기 위해 운영됨.

– 제플린 관측소에는 극지연구소에서 설치한 두 대의 구름 응결핵 계수기 (Cloud Condensation Nuclei Counter (CCNC), 제조사: Droplet Measurement Technologies, Model: CCN–100, SN: 0107–038, 1608–144)가 있음. 두 대 중 한 대의 CCNC는 2007년에 설치되어 북극 에어로졸의 구름 응결핵 (Cloud Condensation Nuclei, CCN) 수농도를 실시간으로 관측하며 (SN: 0107–038), 2015년에 설치된 다른 한 대의 CCNC는 2017년부터 역유량 가상 임팩터 (Ground Counterflow Virtual Impactor, GCVI)에 연결되어 구름 잔여 입자의 구름 응결핵 수농도를 관측함 (SN: 1608–144).

– 2007년에 설치된 CCNC가 문제없이 잘 작동하는 경우 본 데이터를 사용하지만, 고장난 경우에는 GCVI에 연결된 CCNC 데이터를 대체하여 분석에 사용함. GCVI에 연결된 CCNC는 구름이 없는 경우에 대기 에어로졸의 구름 응결핵 수농도를 관측함.

– CCNC는 온도 차이를 통해 만들어진 과포화도 컬럼에 에어로졸을 통과시켜 CCN으로 성장한 입자를 계수하는 원리임. 본 연구에서는 과포화도를 7단계(0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.75% 및 1.0%)로 설정하였으며, 1.0% 과포화도 관측이 완료된 후에는 다시 0.1%부터 관측이 시작되도록 설정됨. 각 과포화도의 유지 시간은 0.1%일 때 10분, 0.2%부터 1.0%까지 각각 5분으로 설정되어 모든 과포화도에 대한 스캔이 끝나면 총 40분의 시간이 소요됨. 데이터 분석 시에는

온도 안정화가 완료된 이후의 구름 응결핵 수농도 값만 사용함.

- 장비 유지보수 및 수리 내역은 다음과 같음: 온도 컨트롤러 및 수 농도가 낮게 측정되는 문제가 지속되어 2021년 9월에 반출됨. 점검 및 미국 본사 수리를 진행한 후 2022년 4월에 제플린 관측소에 재설치됨. 제플린 관측소에 재설치되기 이전에, Fig. 8과 같이 수리 부위 확인(온도 컨트롤러 케이블 수리, 필터 연결부위 교체 및 광학렌즈 교체) 및 관측 전 테스트(필터 테스트 및 누출 테스트)를 수행함으로써 장비의 정상 작동을 확인한 후 제플린 관측소에 재설치함. 2022년 4월과 2023년 4월에 정기 유지보수 및 유량보정이 수행되었으며 2023년 11월 이후 장비 고장으로 인해 데이터 공백이 발생함. 하지만 GCVI에 연결된 CCNC 데이터 중 구름 이벤트가 없을 때의 데이터를 사용하여 2021년 11월–2022년 3월 및 2023년 11월–2024년 7월의 데이터 공백을 채움. 2024년 8월에 수리 완료하여 재가동하였으나 제플린 관측소 대수선 공사로 인해 2024년 9월 26일 이후 제플린 관측소에 설치된 모든 관측 장비가 가동 중단됨.

Fig. 8. Check repaired parts by the manufacturer (SN: 0107–038) (temperature controller cable (left) and filter connecting part (right).

- 2022년 4월 13일부터 4월 30일까지 2대의 CCNC가 북극 대기 중 구름 응결핵 수농도를 동시에 관측했기 때문에, 두 구름 응결핵 계수기의 비교를 위해 Fig. 9와 같이 시계열 관측 결과를 사용하여 장비의 정상 작동을 확인함. 이때, 두 CCNC의 과포화도 (0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5%, 0.75%, 1.0%)를 동일하게 설정되었으며, 동일한 농도와 경향성을 보임으로써 두 장비의 정상 작동을 확인함.

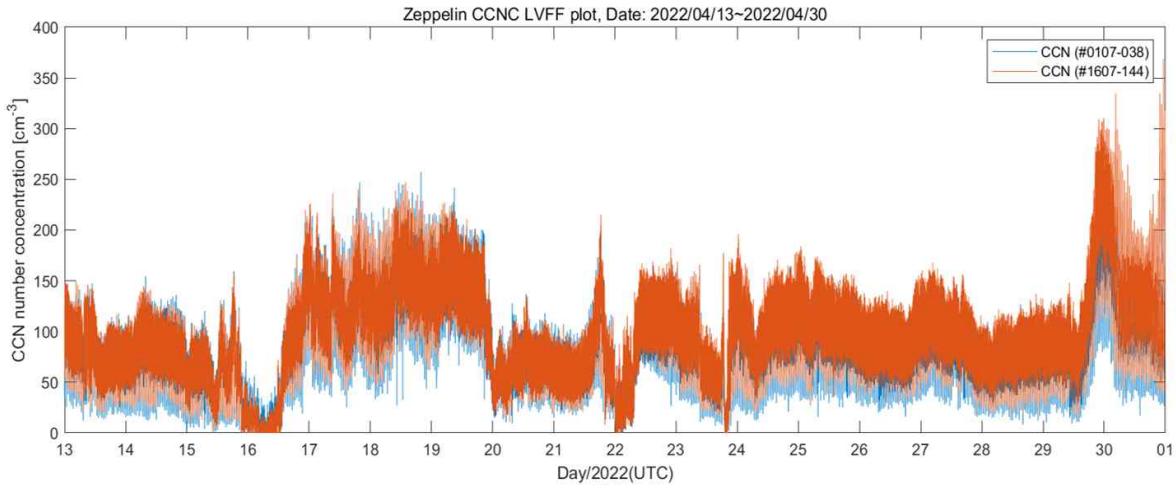


Fig. 9. Time series of CCN number concentration observed using both CCN counters reinstalled at Zeppelin station (2022/April/13 ~ 2022/April/30).

– 두 관측 장비의 정확성을 추가로 확인하기 위해, Fig. 9의 시계열 데이터를 사용하여 각 과포화도에 따른 구름 응결핵 수농도 산점도를 Fig. 10에 보임. 모든 과포화도에서의 기울기와 결정계수는 각각 0.95~1.00 및 0.76~0.83를 보임으로써 두 구름 응결핵 계수기의 높은 상관성을 확인할 수 있음. 따라서, 본 결과를 통해 북극 지역에 설치된 두 구름 응결핵 계수기 데이터의 신뢰성을 확보함.

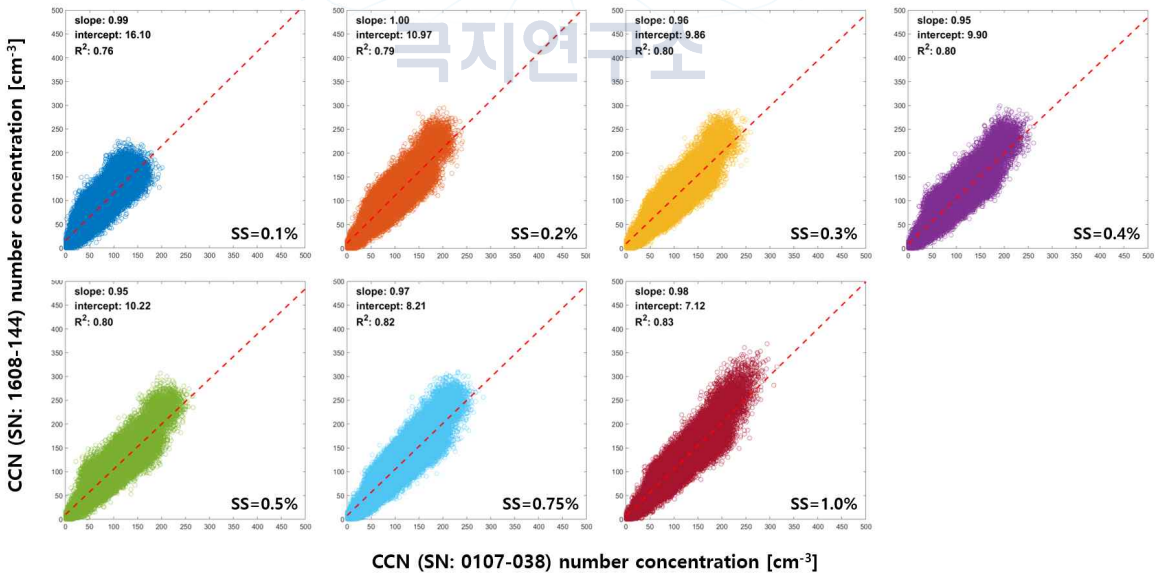


Fig. 10. Scatter plot of CCN number concentrations for each supersaturation using both CCN counters at Zeppelin station (2022/April/13 ~ 2022/April/30).

– Fig. 11은 2021년 1월부터 2024년 12월까지 약 4년간의 북극 에어로졸 구름 응결핵 수농도 데이터 획득률임. 2021년부터 2024년까지 매년 데이터 획득률은 각각 12.8, 92.0, 69.5, 63.5% 였으며, 약 4년간의 전체 평균 데이터 획득률은 59.4%임.

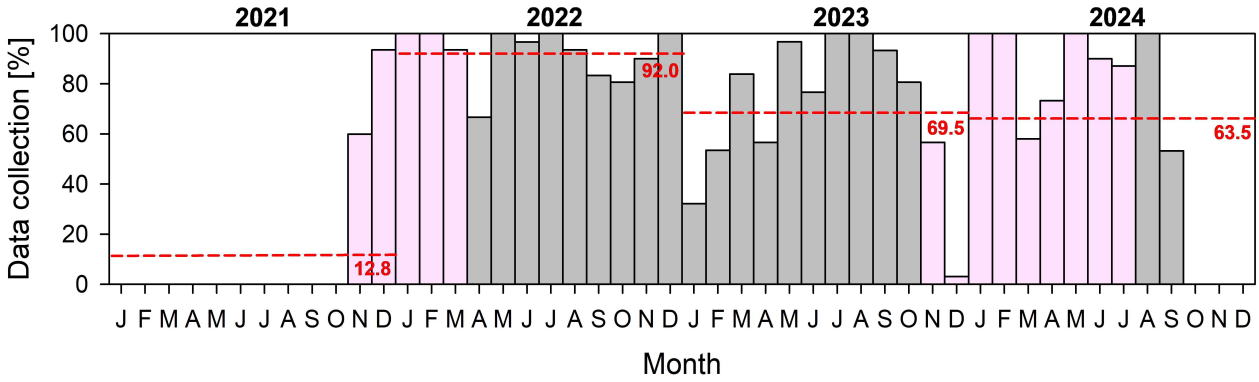


Fig. 11. The percentage of monthly data collection (bar) from January 2021 to December 2024, (Gray: CCNC data behind Ambient Inlet; Pink: CCNC data behind Ground-based C ounterflow Virtual Impactor without cloud events) and yearly data collection over the obser vation period for each year (red dashed line).

- Fig. 12는 북극 구름 응결핵 수농도의 월평균 및 표준편차 시계열이며, (2021년 1월~2024년 12월) 상단에 과포화도가 0.5, 0.75, 1.0%일 때의 구름 응결핵 수농도, 하단에 0.1, 0.2, 0.3, 0.4% 일 때의 구름 응결핵 수농도 시계열 그래프를 나타냄.
- 월평균 북극 구름 응결핵 수농도는 2023년 4월에 최댓값을 보였고 (199.1-368.6 cm^{-3}, 과포화도 0.1-1.0%), 2022년 11월과 2023년 12월에 최솟값 (3.1-10.9 cm^{-3} 및 0.9-8.1 cm^{-3}, 과포화도 0.1-1.0%) 를 보임. 2023년 12월 결과는 분석에 사용된 데이터가 1일밖에 되지 않아 월평균 값으로 사용되기에 부적합할 수 있음.
- 관측 기간 동안의 월별 북극 구름 응결핵 수농도 시계열 그래프를 통해, 북극 구름 응결핵 수농도의 월별 및 계절별 변동성을 확인함: 초봄 (2-3월) 및 여름 (5-7월)에 구름 응결핵 수농도 피크가 발생한 후, 수농도가 감소하기 시작하여 가을 및 겨울에 상대적으로 낮은 구름 응결핵 수농도가 관측됨.

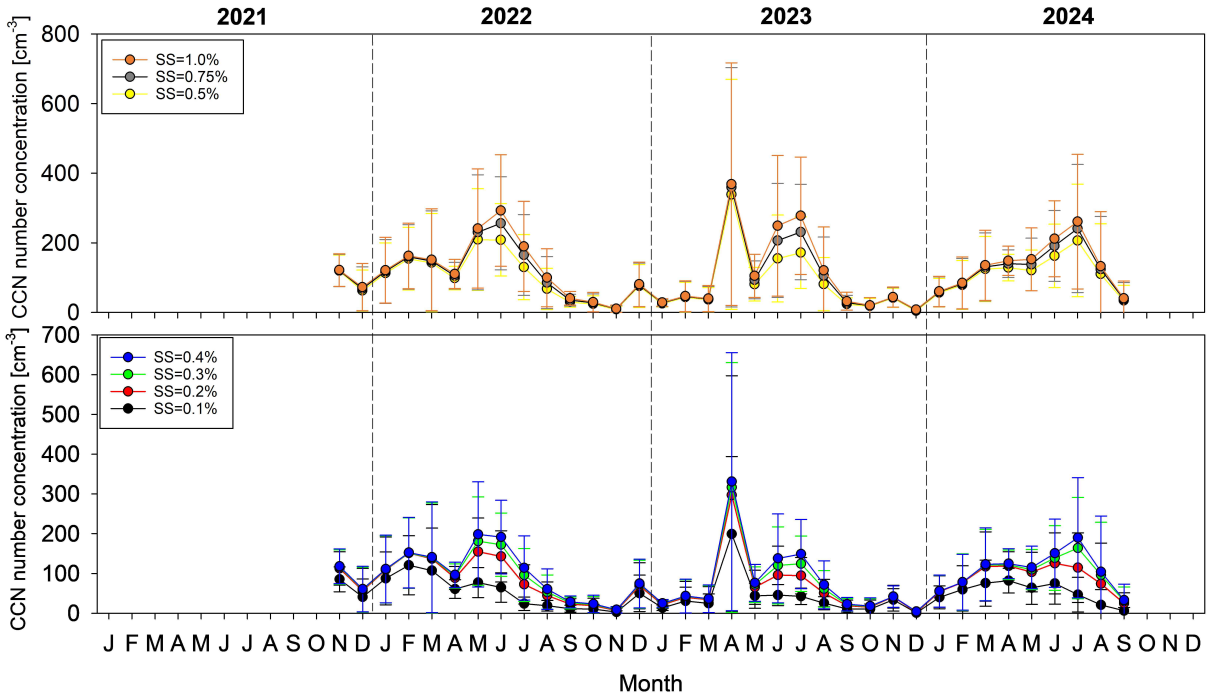


Fig. 12. Monthly mean and standard deviation of Cloud Condensation Nuclei (CCN) number concentration according to each supersaturation settings (top plot: 0.5, 0.75 and 1.0% and bottom plot: 0.1, 0.2, 0.3, and 0.4%) from January 2021 to December 2024.

- Fig. 13은 과포화도가 0.1%일 때 및 1.0%일 때의 2021, 2022, 2023, 2024년 및 2021-2024년도의 월평균 구름 응결핵 수농도 그래프임.
- 낮은 과포화도(0.1%)일 때의 월평균 구름 응결핵 수농도는 4월에 최댓값(114.0 cm^{-3}) 및 9월에 최솟값(9.6 cm^{-3})을 보였으며, 높은 과포화도(1.0%)의 경우 6월에 최댓값(251.3 cm^{-3}) 및 10월에 최솟값(25.0 cm^{-3})을 보임.
- 위 결과를 통해, 북극의 봄철 에어로졸은 낮은 과포화도 환경에서도 구름 응결핵으로 활성화될 수 있는 입자로 구성되어 있고, 여름철 에어로졸은 높은 과포화도 환경에서 구름 응결핵으로 활성화될 수 있는 입자로 구성되어 있을 수 있음을 시사함. 또한 가을 및 겨울철에는 저농도 환경으로 인해 모든 과포화도에서 낮은 구름 응결핵 수농도를 보임.

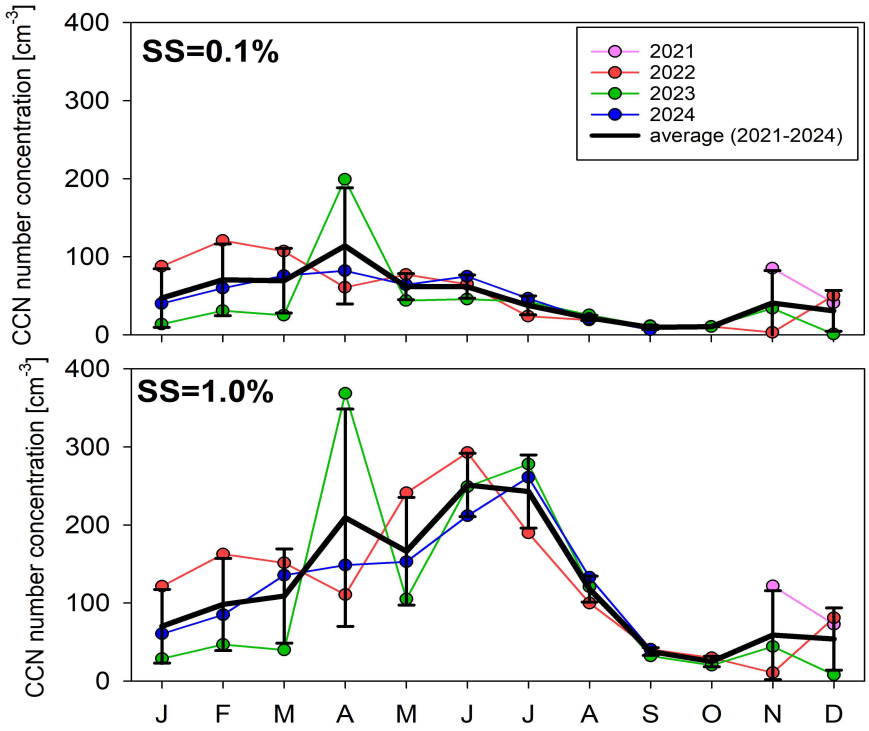


Fig. 13. Monthly mean and standard deviation of Cloud Condensation Nuclei number concentration for supersaturation 0.1% and 1.0% from January 2021 to June 2024.

KORRI
금지연구소

▪ **에어로졸 물리특성 관측 자료를 활용한 에어로졸 흡습성 특성 분석**

– 에어로졸은 미세물리 (크기), 화학조성 및 혼합 상태에 따라 구름 응결핵으로 활성화되기 시작하는 임계 직경 및 과포화도가 결정되고, 기상학적 환경에 의해 만들어진 대기 과포화도 환경에 노출되어 구름 응결핵으로 활성화되기 시작함.

– 에어로졸이 구름 응결핵으로 활성화되기 위해서는 미세물리 특성이 가장 중요한 역할을 한다고 알려져 있으나, 신규 입자 생성 (New Particle Formation, NPF) 이벤트로부터 발생한 수 나노미터~수십 나노미터 크기의 에어로졸이 일반적인 구름 응결핵 크기로 알려진 약 100nm까지 성장하기 위해서는 에어로졸의 화학조성이 중요한 역할을 할 수 있음.

– 어떤 물질이 주변 수증기를 흡수하는 능력을 흡습성이라고 정의함. 에어로졸의 흡습성은 에어로졸을 구성하고 있는 화학조성에 따라 달라짐. 예를 들어서, 친수성 에어로졸의 경우 대기 상대습도의 영향을 받아 주변 수증기를 흡수하면서 에어로졸의 크기가 증가하고, 소수성 에어로졸의 경우 대기 중 상대습도의 영향을 받지 않으며 크기변화 또한 발생하지 않음.

– 복잡한 화학조성으로 구성된 대기 에어로졸의 흡습성 성장과 구름 응결핵 활동성을 정량화하기 위해 단일 매개변수인 κ를 고안하였으며, 미세물리, 화학조성, 흡습 성장 관측장비(HTDMA)를 활용하여 κ를 계산할 수 있는 방정식을 제시하였음. 그 이후로, 전 세계 여러 지역에서는 에어로졸 화학조성을 간접적으로 이해하고 흡습성을 정량화하기 위해 κ 관측이 수행되고 있음.

– 제플린 관측소에서는 스톡홀름대학교와의 공동 연구를 통해 에어로졸의 미세물리 특성 관측을 수행해 오고 있음. 따라서, 에어로졸 미세물리 관측데이터를 활용한 북극 대기 에어로졸의 흡습성 (physical κ, 이하 κ_{phy})은 다음과 같이 계산됨.

$$\kappa_{phy} = \frac{4A^3}{27D_c^3 dln^2 SS_C}$$

$$A = \frac{4\sigma_{s/a}M_w}{RT\rho_w}$$

- 위의 방정식에서, A는 물방울과 공기 사이의 열역학 특성을 계산하기 위해 사용되는 상수로써 용질과 공기 사이의 표면장력(0.0722J/m^2), 물의 분자량(18g/mol), 이상기체 상수(8.314J/mol/K), 절대온도(298.16K) 및 물의 밀도(1g/m^3)를 통해 0.0021로 계산되었고, 임계 과포화도 (SS_c)는 CCNC에 설정된 과포화도 (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0%) 값을 대입하였음. 마지막으로 임계 직경 (D_c)은 *Furutani et al.* (2008)이 제시한 방정식을 사용하여 계산하였음.

$$\int_{D_C}^{D_{\max}} n(D)*dlogD_p = \left(1 - \frac{CCN_{SSc}}{CN}\right)*N_{total}$$

- D_c 계산에 사용되는 미세물리 관측데이터는 다음과 같음: 1) 응결 입자 계수기 (Condensation Particle Counter, 이하 CPC3010)로부터 얻은 10nm 이상 에어로졸 수농도 데이터(CN), 2) 입자 크기분포 계수기(Differential Mobility Particle Sizer, DMPS)로부터 얻은 에어로졸 크기별 수농도 데이터(n(D), $dlogD_P$ 및 N_{total}), 3) 구름 응결핵계수기(CCNC)를 통해 얻은 구름응결핵 수농도 데이터(CCN_{SSc}). CPC3010과 DMPS는 스톡홀름대학교 소유의 장비이며, CCNC는 극지연구소 소유의 장비임.
- 따라서, κ_{phy}는 과포화도와 임계 직경(D_c)의 함수로 나타낼 수 있음.
- 북극 에어로졸의 흡습성을 정량적으로 분석하기 위해 시간 평균한 에어로졸 미세물리 관측데이터를 사용하여 시간별 D_c와 κ_{phy}를 계산하였고, 시간별 데이터를 순서대로 일, 월 평균함으로써 월평균 데이터를 사용하여 분석을 수행함.
- κ_{phy}의 신뢰성을 확인하고 북극 대기 에어로졸의 화학조성에 대한 상관관계를 이해하기 위해, 연구 및 적용을 위한 현대 시대 회고 분석 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Application, version 2, MERRA-2)으로부터 제플린 관측소의 5가지 대기 화학조성(Black Carbon, BC), 유기물(Organic Matter, OM), 황산 암모늄(Ammonium sulfate, AS), 2.5㎛ 미만 크기의 해염(Sea Salt Aerosol, $SSA_{2.5}$) 및 2.5㎛미만 크기의 먼지(Dust2.5)의 질량 농도를 얻었으며, 5가지 화학조성 질량 농도 데이터를 활용하여 에어로졸의 흡습성을 계산함(chemical κ, 이하 κ_{chem}).
- 분석 기간은 κ_{phy} 계산을 위해 필수적인 에어로졸 미세물리 관측데이터 획득률이 가장 높았던 2007년 4월부터 2013년 3월으로 선정됨.
- Fig. 14는 (a) 에어로졸 물리특성 데이터를 활용하여 계산된 북극 에어로졸 흡습성의 월별 획득률 및 (b) 에어로졸 물리특성 및 화학조성 데이터를 활용하여 계산한 에어로졸 흡습성 (κ_{phy} 및 κ_{chem})의 월평균 및 표준편차 그래프임.

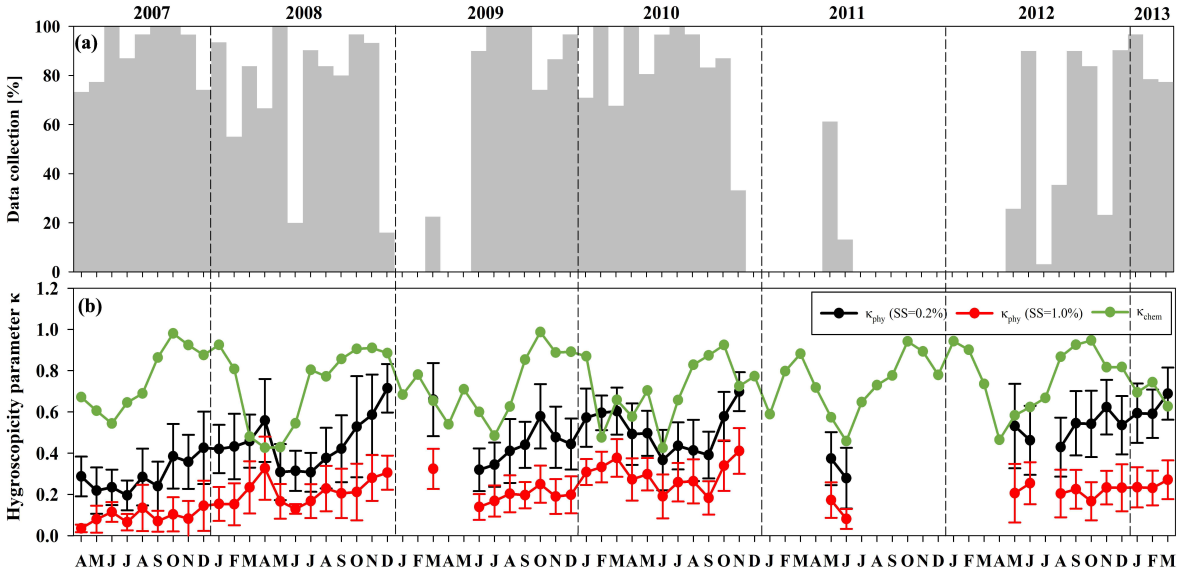


Fig. 14. (a) The percentage of monthly data collection for hygroscopicity parameter κphy and (b) monthly- mean hygroscopicity parameter (κphy and κchem).

- Fig. 15는 (a) 과포화도가 0.2 %일 때의 κ_{phy} 및 κ_{chem}의 월별 평균과 표준편차, (b) MERRA-2 재분석 데이터로부터 얻은 5가지 화학조성의 질량 분율임.
- 월평균 κ_{phy} 및 κ_{chem}의 범위는 각각 0.32-0.60 및 0.53-0.95를 보임으로써 계산 방법에 따른 흡습성 절대값의 차이를 보임. 하지만 겨울에 높고 여름에 낮은 월별 및 계절별 변동성은 동일하였음.
  - 관측기간 동안의 북극 에어로졸의 평균 질량 분율은 해염 에어로졸 (57%)이 가장 지배적이였으며, 그 다음으로 먼지 (18%), 황산암모늄 (17%), 유기 에어로졸 (6%) 및 블랙 카본 (1%)의 순서를 보임. 겨울철 높은 흡습성은 높은 해염 에어로졸의 질량 분율이 원인일 수 있으며, 여름철 낮은 흡습성은 유기 에어로졸의 증가가 원인일 수 있음.
  - 북극 에어로졸의 월별 및 계절별 D_c와 κ를 정량적으로 제시함으로써, 추후 에어로졸- 구름 상호작용에 의한 복사 강제력 변화 예측에 적용할 수 있을 것으로 기대함.

KOPRI 극지연구소

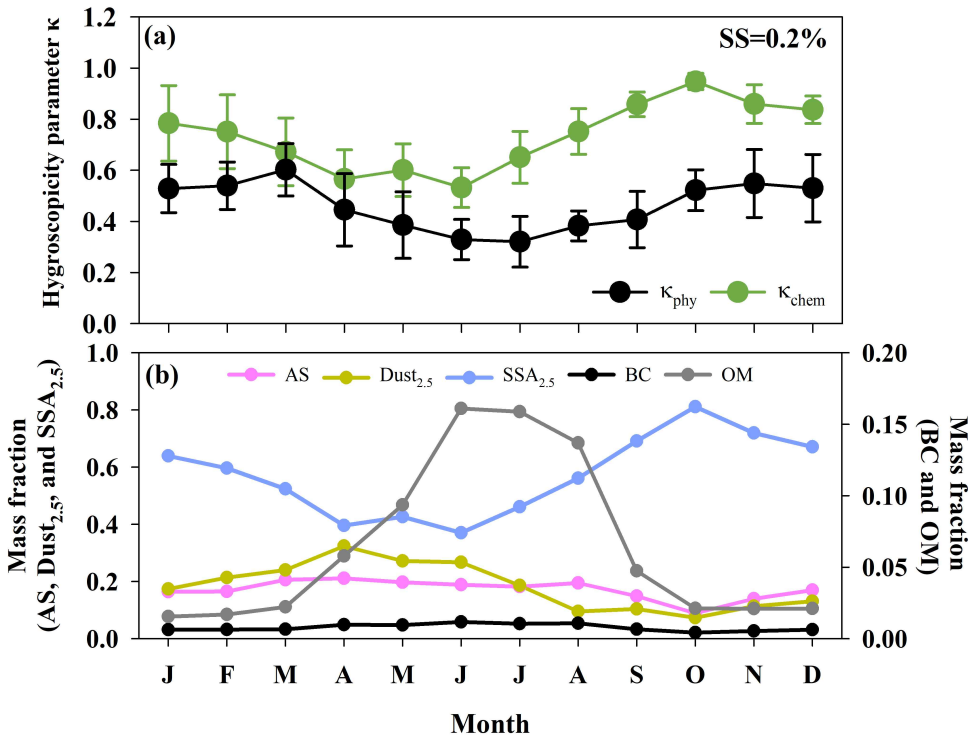


Fig. 15. (a) Monthly mean and standard deviation of hygroscopicity parameter κphy (supersaturation at 0.2%) and κchem (b) Monthly mean mass fraction of chemical composition.

KORRI 극지연구소

▪ 구름 잔여 입자의 구름 응결핵 재활성화 특성 분석

- 제플린 관측소는 북극 지역의 에어로졸-구름 형성 매커니즘 연구를 수행하기에 적합함.
- 2017년 3월에 스웨덴 스톡홀름대학교 소유의 지상 역유량 가상 임펙터 (Ground-based Counterflow Virtural Impactor, GCVI)가 제플린 관측소에 설치됨.
- GCVI의 원리는 다음과 같음: 구름이 존재할 때, 인렛 바깥쪽에서 안쪽으로 공기가 흡입됨과 동시에 인렛 안쪽에서 바깥쪽으로 역유량이 발생하여 관성력에 의해 큰 입자가 인렛 안으로 통과됨. 반면에 구름이 존재하지 않으면 GCVI는 작동하지 않으며 일반 대기 관측을 위한 인렛으로 벨브가 변경되어 대기 에어로졸 관측을 수행함.
- 본 연구에서는 약 6~7㎛ 이상의 구름 입자가 GCVI 내부를 따라 이동하며 건조되었으며 건조되고 남은 입자를 "구름 잔여 입자" 라고 명칭함. 따라서, GCVI 하단에 구름 응결핵 계수기(Cloud Condensation Nuclei Counter(CCNC), 제조사: Droplet Measurement Technologies, Model: CCN-100, SN: 1608-144)를 연결함으로써 구름 잔여 입자의 구름 응결핵 수농도를 관측하여 에어로졸-구름 성장 매커니즘에 대한 특성을 역으로 이해하고자 함.
- 2021년 1월부터 2024년 12월까지 약 4년간의 대기 에어로졸의 구름 응결핵 수농도와 구름 잔여 입자의 구름 응결핵 수농도가 관측됨.
- 구름이 있을 때, GCVI 인렛의 강력한 유량으로 인해 GCVI 하단에 설치된 에어로졸 장비에 대해 농축 인자 (Enrichment Factor, EF) 보정이 필요함. 하지만 스톡홀름대학교로부터 GCVI데이터(구름 여부 및 GCVI 유량과 관련한 데이터)를 얻지 못했기 때문에 구름 잔여 입자의 구름 응결핵 활성화 특성 분석은 아직 보류 상태임.

- Fig. 16은 GCVI에 연결된 CCNC의 월별 데이터 획득률임. 2021년 1월~2021년 10월 및 2022년 10월~2023년 2월까지 약 15개월 동안 관측 장비의 고장으로 인해 데이터 공백이 발생했으며, 2021년 11월~2022년 9월 및 2023년 3월~2024년 6월까지의 관측데이터가 수집됨.
- 장비 수리 내역은 다음과 같음: 2021년 11월에 GCVI에 연결된 CCNC의 고장으로 반출되었음. 따라서 2021년 11월부터 2022년 3월까지 일반 대기 관측용 구름 응결핵 계수기를 GCVI용 CCNC로 대체하여 사용함. 이후 2022년 3월에 재반입되어 GCVI에 재연결하기 전 장비의 유지보수(내장 펌프, 필터 및 건조 튜브, 증류수 순환 확인 등)를 수행하였음. 2024년 7월부터 Nafion dryer 문제로 장비에 물이 차는 문제가 발생하여 가동을 중지하였으며 제플린 관측소 대수선 공사로 인해 2024년 9월 26일 이후 제플린 관측소에 설치된 모든 관측 장비가 가동 중단되었음.

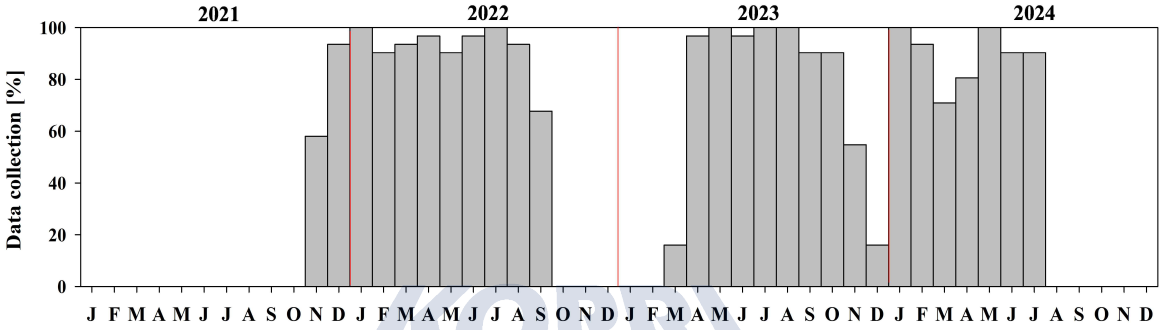


Fig. 16. The percentage of monthly data collection of CCN number concentration behind Ground-based Counterflow Virtual Impactor (GCVI) from 2021 to 2024.

극지연구소

- Fig. 17은 2021년 1월부터 2024년 12월까지 GCVI에 연결된 CCNC로부터 관측된 구름 응결핵 수농도의 시계열 그래프임. CCNC의 과포화도는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1.0%로 설정되었으며 본 그래프에는 모든 과포화도에 대한 에어로졸 및 구름 잔여 입자의 구름 응결핵 수농도가 포함되어 있음. 따라서, 구름이 없을 때에는 대기 에어로졸의 구름 응결핵 수농도가 관측되었고, 반면 구름 이벤트가 발생하면 구름 잔여 입자의 구름 응결핵 수농도를 관측하기 때문에 대기 에어로졸의 구름 응결핵 수농도와는 다른 패턴의 시계열을 확인함으로써 구름 이벤트가 발생했음을 추론할 수 있음.
- GCVI 데이터 없이 시계열을 통해 시각적으로 확인한 구름 이벤트의 경우 최소 수 분에서 최대 수일 동안 발생함을 확인함. 시계열을 통해 확인한 구름 이벤트는 다음과 같음: 2021년에는 구름 이벤트를 확인할 수 없었음. 2022년 6월부터 8월까지 각각 5회, 12회, 13회의 구름 이벤트가 발생함. 2023년 7월부터 10월 및 12월에 각각 11회, 20회, 8회, 2회, 2회의 구름 이벤트가 발생함. 마지막으로 2024년 1월, 3월에서 7월까지 각각 1회, 1회, 3회, 19회, 8회, 10회의 구름 이벤트가 발생함.
- 구름 여부와 관계 없이, GCVI에 연결된 CCNC로부터 측정된 구름 응결핵 수농도의 연평균은 다음과 같음: 2021년 58.8–92.1 cm^{-3} (0.1%–1.0%), 2022년 80.8–168.1 cm^{-3} (0.1%–1.0%), 2023년 52.5–144.4 cm^{-3} (0.1%–1.0%), 2024년 60.3–153.1 cm^{-3} (0.1%–1.0%). 따라서 관측기간 동안 GCVI에 연결된 CCNC로부터 측정된 에어로졸 및 구름 잔여 입자의 구름 응결핵 수농도 평균은 63.1–139.4 cm^{-3} (0.1%–1.0%)를 보임.

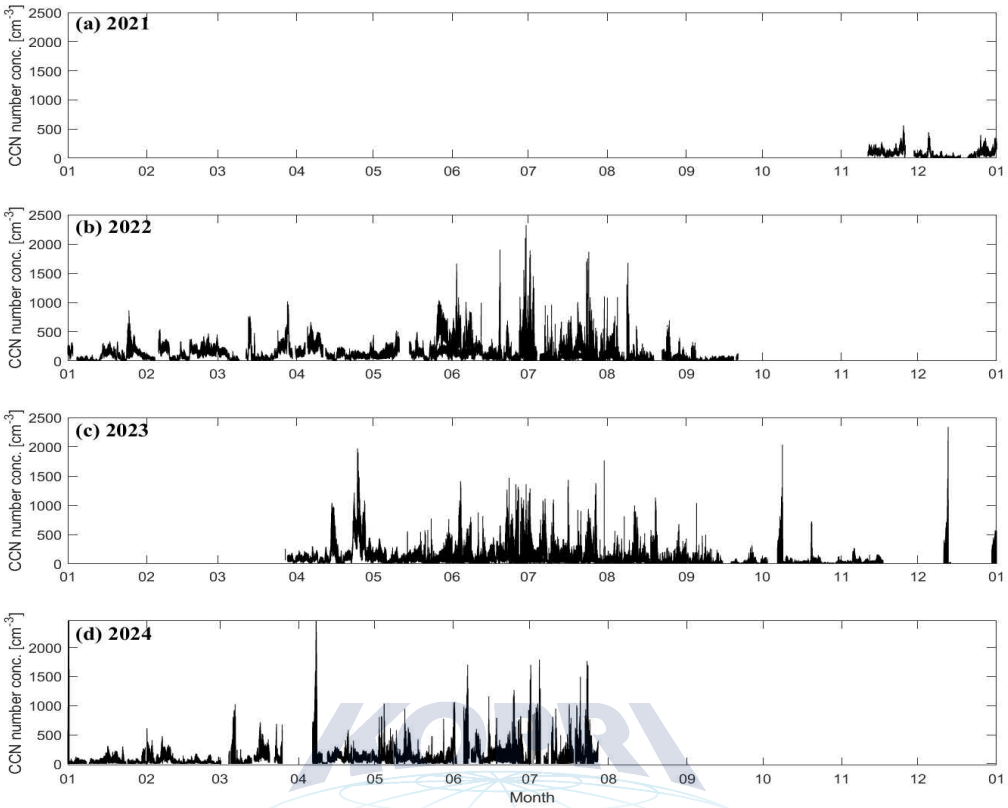


Fig. 17. Timeseries of CCN number concentration behind GCVI from 2021 to 2024.

KOPRI 극지연구소

나) 캐나다 캠브리지베이 관측 거점 기반 블랙카본 연속 관측 수행

▪ **블랙카본 농도 장기 현장 관측 수행 (2013.07월 ~ 2024.06월)**

- 블랙카본(Black carbon, 이하 “BC”)은 화석연료와 바이오매스의 불완전 연소에 의하여 형성되어 대기 중으로 직접 배출되는 에어로졸임.
- 블랙카본은 대기 중 빛을 산란시키기도 하지만 주로 흡수하여 보유하는 성질이 있으며 에어로졸(aerosol) 중 가시광선을 가장 강하게 흡수하는 광 흡수 물질로 알려져 있음.
- 블랙카본은 수농도가 주로 100nm 이하에 집중되어 나타나는 나노입자이기 때문에 타 대륙과 극지역까지 쉽게 이동함. 눈과 얼음 표면에 쌓일 때 지구가 태양 빛을 반사하는 정도인 알베도를 감소시키는 직접 효과가 있어 에어로졸 성분으로서 기후 변화 측면에서 연구의 중요성이 큼.
- 북극 캐나다 캠브리지베이의 대기 중 블랙카본 농도를 측정하기 위해 2013년 7월 마을로부터 북쪽으로 약 800m 떨어진 고층 관측동 (Upper Air Observatory) 내에 블랙카본 분석기 (Aethalometer, AE-21, Magee Scientific Corporation)를 설치함. 고층 관측동으로부터 북쪽으로 약 100m 떨어진 곳에선 2012년 7월부터 10m 기상 타워가 설치되어 상시 기상요소들을 동시에 관측하고 있음(Fig. 18).
- 블랙카본 분석기는 내부 진공펌프를 이용하여 고층 관측동 외벽 4.6m 높이에 있는 흡입구를 통해 외부 공기를 흡입함(설정값: 유량 5.0lpm). 흡인된 공기는 블랙카본 분석기 내부의 Quartz filber fiter tape에 축적되며, 이를 광학적인 방법으로 블랙카본의 양을 연속적으로 측정함. 내부의 Quartz filber fiter tape는 정해진 주기(설정값: 5분)마다 자동으로 전진하는 구조로 이루어져

있으며 데이터는 CF 메모리카드에 저장됨.

- 2013년 7월부터 2024년 6월까지 관측데이터를 확보함.
- 2020년 11월부터 2021년 4월까지 관측 중단(원인: filter tape drive motor 고장)으로 해당 기간동안의 관측값은 없음.
- Fig. 19는 북극 캐나다 캠브리지베이에 설치된 고층 관측동, 기상 타워 및 블랙카본 분석기(Aethalometer) 모습임.

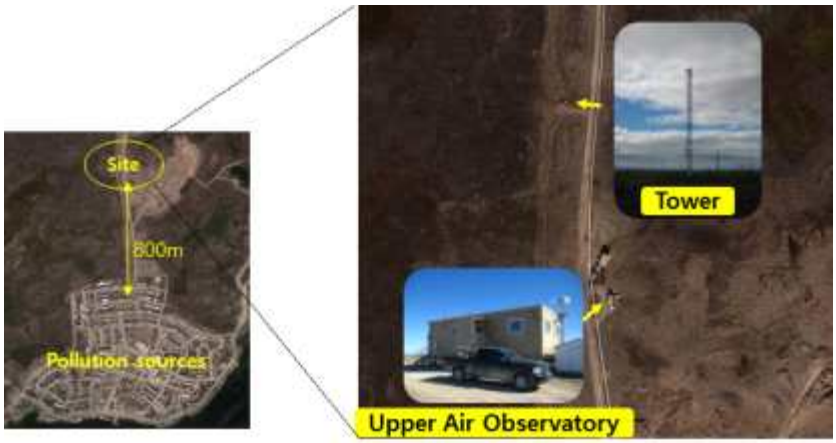


Fig. 18. Upper air observation site located in Cambridge Bay, Canada.

Fig. 19. Aethalometer installed in upper air observation.

▪ **블랙카본 농도분석**

- 블랙카본 농도값이 1000ng/m^3 이상의 인위적인 오염값은 제거하고 사용하였으며 일별, 월별 데이터 획득률이 50% 미만이면 평균에서 제외함.
- Fig. 20은 2013년 7월부터 2024년 6월까지 캐나다 캠브리지베이에서 관측된 블랙카본의 연도별 월평균 농도 변화임.
- 2013년 7월부터 2024년 6월까지 관측 기간동안 블랙카본의 월평균 농도 범위는 2022년 9월에 최소 약 12.0ng/㎥에서 2015년 2월에 최대 약 102.1ng/m^{3}를 보임. 전체기간 중 2015년 2, 8월을 제외한 모든 달의 블랙카본 월평균 농도는 100ng/m^3 이하의 수준으로 나타남.

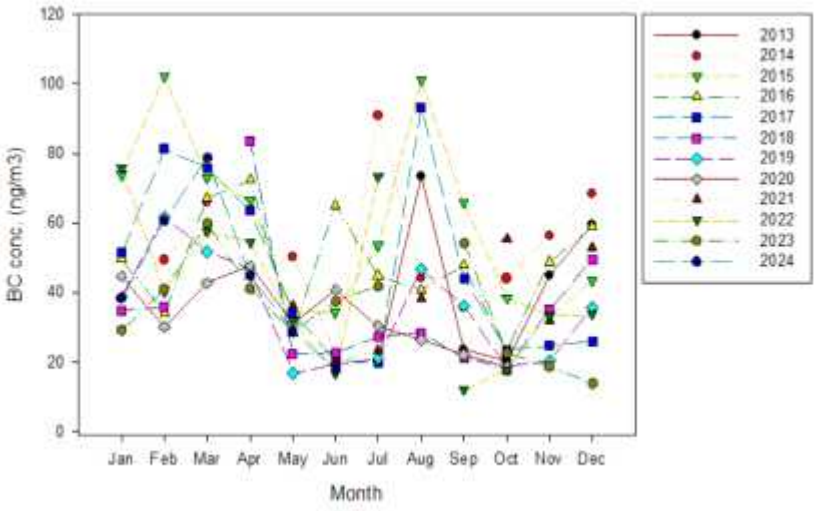


Fig. 20. Monthly mean of black Carbon from July 2013 to June 2024.

- Table 2는 관측 기간동안 블랙카본의 월평균, 연평균 값을 나타냄. 2018년 3월, 2021년 9월, 2022년 8월, 2023년 8월에 데이터 획득률이 50% 미만으로 월 평균값을 나타내지 않았음.
- 연평균을 보면, 2013년은 40.3±22.7ng/m^3(*n*=6), 2014년은 50.9±17.8ng/m^3 (*n*=12), 2015년은 60.0±24.7ng/m^3(*n*=12), 2016년은 48.4±15.5ng/m^3(*n*=12), 2017년은 46.6±26.2ng/m^3(*n*=12), 2018년은 34.5±18.5ng/m^3(*n*=11), 2019년은 34.5±15.2ng/m^3(*n*=12), 2020년은 33.5±9.9ng/m^3(*n*=10), 2021년은 36.9±13.5ng/m^3(*n*=7), 2022년은 40.7±22.1ng/m^3(*n*=11)로 나타났고, 2023년은 35.4±14.3ng/m^3(*n*=11), 2024년 6개의 평균은 44.9±22.0ng/m^{3}로 나타남. 연평균 30~60ng/m^3 사이의 값을 보임.
- 월평균을 보면, 1월 평균은 47.5±15.9ng/m^3(*n*=10), 2월 평균은 53.7±23.2ng/m^3 (*n*=10), 3월 평균은 63.6±11.8ng/m^3(*n*=9), 4월 평균은 56.6±14.2ng/m^3(*n*=10), 5월 평균은 31.2±8.4ng/m^3(*n*=11), 6월 평균은 28.9±14.6ng/m^3(*n*=11), 7월 평균은 40.6±23.6ng/m^3(*n*=11), 8월 평균은 54.7±27.6ng/m^3(*n*=9), 9월 평균은 36.3±16.9ng/m^3(*n*=10), 10월 평균은 27.4±12.7ng/m^3(*n*=11), 11월 평균은 34.8±12.2ng/m^3(*n*=10), 12월 평균은 44.2±16.9ng/m^3(*n*=10)의 값을 보였음. 월평균을 보면, 25~65ng/m^3 사이의 값을 보임.

Table 2. Monthly and annual average values of BC during the observation period.

연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균 농도
2013							20.2	73.4	23.5	20.3	45.0	59.5	40.3± 22.7
2014	38.2	49.4	65.9	45.0	50.3	22.5	90.8	44.2	35.7	44.1	56.5	68.5	50.9± 17.8
2015	73.9	102.1	73.0	66.6	34.5	34.4	53.6	101.0	65.8	38.5	33.1	43.3	60.0± 24.7
2016	49.6	34.2	67.3	72.5	28.4	65.1	44.9	40.7	47.8	23.1	48.8	58.8	48.4± 15.5
2017	51.4	81.5	75.8	63.8	34.1	20.6	19.8	93.3	44.2	23.5	24.8	26.0	46.6± 26.2
2018	34.8	36.0		83.5	22.4	22.8	27.4	28.6	21.3	17.9	35.3	49.4	34.5± 18.5
2019	38.8	61.9	51.7	46.7	16.9	19.4	21.0	46.8	36.2	18.8	20.5	35.9	34.5± 15.2
2020	44.7	30.2	42.7	47.7	31.0	40.8	30.5	26.4	22.2	18.8			33.5± 9.9
2021					36.3	20.0	23.3	38.2		55.4	32.0	52.9	36.9± 13.5
2022	75.8	40.4	57.6	54.4	32.0	16.8	73.3		12.0	17.9	33.5	33.7	40.7± 22.1
2023	29.2	40.9	60.0	41.2	28.7	37.6	41.9		54.3	22.7	18.8	13.9	35.4± 14.3
2024	38.5	60.8	78.8	44.8	28.8	18.0							44.9± 22.0
월평균 농도	47.5± 15.9	53.7± 23.2	63.6± 11.8	56.6± 14.2	31.2± 8.4	28.9± 14.6	40.6± 23.6	54.7± 27.6	36.3± 16.9	27.4± 12.7	34.8± 12.2	44.2± 16.9	

- 계절적으로 보면, 12월부터 4월까지 겨울철, 봄철 농도가 상대적으로 높은 것을 알 수 있었음. 이는 북극에 위치한 타 관측소의 블랙카본 관측 결과와 비슷한 경향을 보이는데, 1998년부터 2007년까지 Zepplin 관측소에서 관측한 결과에 따르면 (*Eleftheriadis, K. et al.*, 2009)[2], 월평균 값이 2, 3월에 약 80ng/㎥으로 최대, 6~9월까지 0~10ng/㎥로 최소를 보였으며 Alert, Barrow 관측소 역시 봄, 겨울에 높고 여름에 감소하는 경향의 계절적 순환을 보인다고 보고되었음.
- Fig. 21은 2013년도 7월부터 2019년 12월까지 기상타워에서 관측한 풍향/풍속 자료와 블랙카본 관측자료가 동시에 있을 때 풍향별 블랙카본 농도를 scatter plot으로 나타낸 것으로 중심에서 멀어질수록 블랙카본의 농도가 높은 것을 의미함. 왼쪽 그림은 블랙카본의 전체 농도 0~1000ng/m^3, 중간 그림은 100ng/m^3 미만의 저농도, 오른쪽 그림은 100~1000ng/m^3 사이의 고농도를 나타냄.
- 겨울(12, 1, 2월)보다 여름(6, 7, 8월)에 남쪽에서 고농도의 블랙카본이 관측되는 것을 알 수 있었음. 관측소로부터 남쪽으로 약 800m 떨어진 곳에 원주민들이 거주하고 있으며, 여름철에 기온이 오르면서 원주민들의 외부 활동 증가로 국소적인 오염원 배출이 많아져 7. 8월에 블랙카본 농도가 높게 관측된 것으로 판단 되어짐.

2) Eleftheriadis, K., Vratolis, S., Nyeki, S., 2009, Aerosol black carbon in the European arctic: measurements at Zeppelin station, Ny-Ålesund, Svalbard from 1998-2007. Geophys Res. Lett. 36 n/a-n/a.

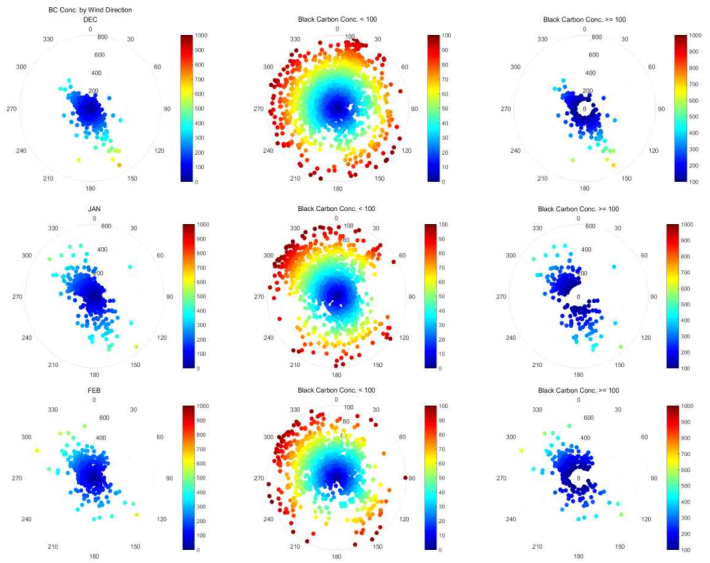
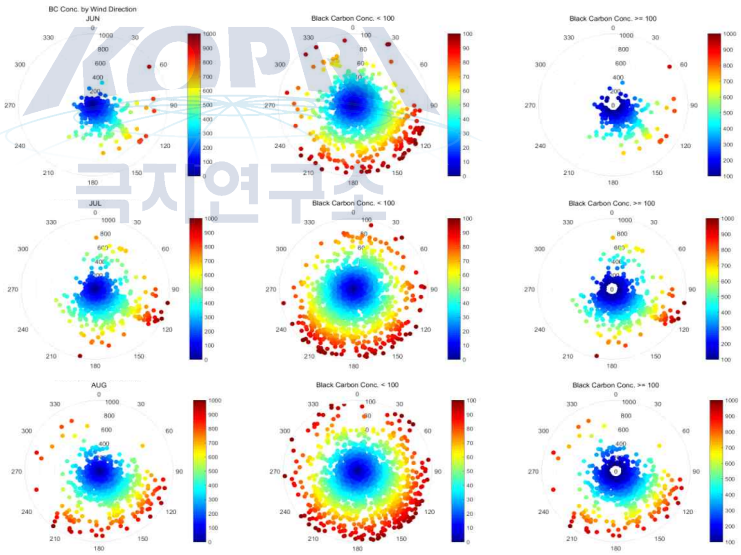
	풍향별 블랙카본 농도 (왼: 전체 농도, 중: 100ng/m^{3}이하, 오: 100ng/m^3 이상)
겨울 (12, 1, 2월)	
여름 (6, 7, 8월)	

Fig. 21. Wind direction/wind speed data observed from the meteological tower from July 2013 to December 2019. When black carbon observation data are present at the same time, the scatter plot of black carbon concentration by wind direction.

다) 북극 대기 에어로졸 화학적 특성 분석을 통한 에어로졸 형성 기작 이해

- **북극 대기 주요 입자 생성 원인 가스인 DMS와 나노입자, 구름 응결핵 형성 상관성 파악**

– 북극 다산과학기지 인근 제플린 관측소 기반 대기 DMS 농도 변화를 지속적으로 장기간 관측하였음(Fig. 22). 북극 대기 DMS 농도는 뚜렷한 계절 변화를 보임. 특히 북극해의 해양생물 활동이 증가하는 봄–여름철에 수십~수백 ppt 수준으로 농도가 증가하며, 공기궤의 기원지 특성에 따라서 봄–여름철에도 급격한 일변화를 보임. 선행 연구를 통해, 북극 대기 DMS 농도 변화는 인근 북극해의 해양 미세조류의 일차생산량 뿐만 아니라 종 특이성에 큰 영향을 받음을 확인하였으며, 당해 연도 연구를 통해 북극 대기 DMS가 나노입자 및 구름 응결핵 형성에 미치는 영향에 대해 파악하고자 함.

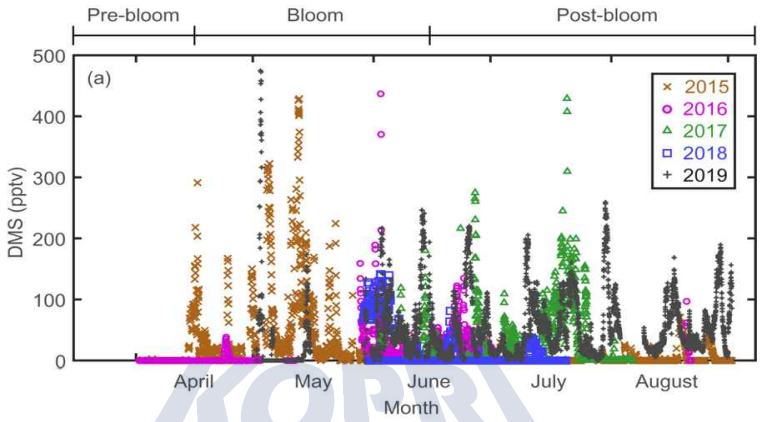


Fig. 22. Dimethylsulfide concentration at Zeppelin station (2015 ~ 2019).

– 북극 제플린 관측소를 기반으로 북극 대기 구성물질에 관한 현장 연구를 수행하고 있는 국내외 우수 연구 그룹(극지연구소, 포항공과대학교, 스톡홀름대학교, 피렌체대학교, 노르웨이 대기연구소 등)과의 협업을 통해 나노크기 입자 (nucleation mode particles, 직경 3~10nm), 에이트켄 모드 입자 (Aitken mode particles, 직경 50~100nm)를 포함하는 에어로졸 입자의 수농도 크기 분포, 구름 응결핵 수농도 등과 같은 현장 관측자료를 확보함. 또한, 그루바뎃 관측기지에서 확보된 에어로졸 입자 화학 특성 분석 자료를 활용하여 2.5um 크기 이하 입자 중 DMS의 산화작용을 통해 생성된 MSA (methylsulfonic acid) 성분의 1~2일 간격 농도 변화 자료를 확보함(Fig. 23).

– DMS에 의한 나노입자의 형성, 성장 그리고 구름 응결핵 발생 기여도를 분석하기 위하여, DMS 및 나노입자의 농도 조건에 따라 다음과 같이 서로 다른 4개의 case를 나누어 다양한 환경인자들을 비교함. 1) Case A: high nucleation mode particles, low DMS mixing ratio, 2) Case B: high nucleation mode particles, high DMS mixing ratio, 3) Case C: moderate nucleation mode particles, high DMS mixing ratio, 4) Case D: low nucleation mode particles, high DMS mixing ratio.

– Case A–D에 해당하는 시기 동안에 ‘nucleation mode particle concentration, DMS mixing ratio, aitken mode particles concentration, critical diameter, solar radiation, kappa value, MSA concentration, CCN concentration’ 등을 포함하는 에어로졸의 물리화학 특성에 관한 다양한 요인들에 대한 상호비교 연구를 수행함.

– DMS의 농도가 높은 상태에서 new particle formation이 활발히 일어난 경우 (즉, case B), 다른 경우들(즉, Case A, C, D)에 비해서 수십 nm 크기의 에어로졸 입자의 성장이 활발하게 일어났으며,

DMS 산화 물질인 MSA 농도가 높게 나타남. 또한, 에어로졸 입자의 흡습성을 나타내는 인자인 critical diameter (Dc), kappa value (κ) 역시 가장 높은 수치를 보임. 결과적으로, Case B 조건에서 구름응결핵 (CCN)의 수농도가 다른 조건들에 비해 2배 이상 높은 값을 보임.

- DMS 농도가 높았음에도 불구하고, new particle formation event가 활발하지 않았던 시기(Case C and Case D)는 대체로 solar radiation 강도가 다른 경우 (Case A and Case B)에 비해 상대적으로 낮았음. 즉, nucleation mode 입자의 전구물질인 DMS의 농도는 충분하였지만 낮은 광량으로 인해 gas-to-particle conversion이 효과적으로 발생하지 않았던 것으로 추정됨.
- DMS 농도가 낮은 상황에서 new particle formation event가 확인된 Case A의 경우, 대체로 북쪽 해빙 인근에서 공기궤가 유입된 경우가 많았으며, 나노입자의 수농도는 높았지만 에어로졸 입자의 성장 속도와 흡습성은 Case B에 비해 현저히 낮게 나타남.

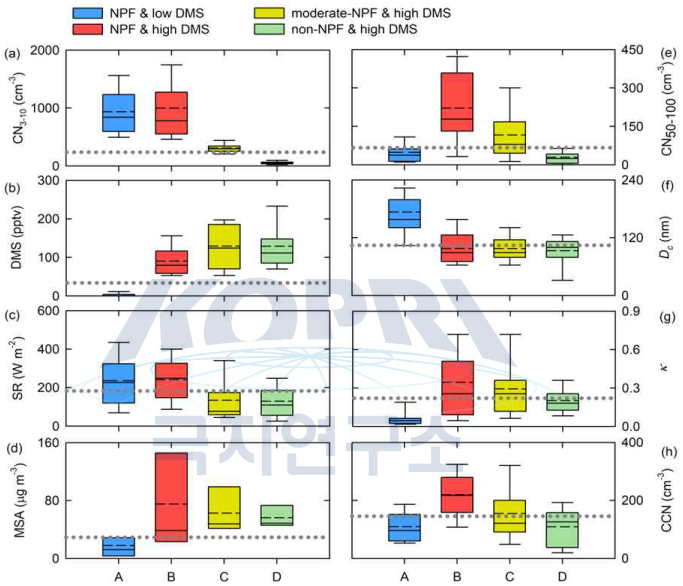


Fig. 23. Various factors connected with dimethylsulfide (DMS) concentration and the new particle formation (NPF)(Case A-D).

- 본 연구를 통해, 북극해 미세조류에 의해 생성되는 DMS 성분이 나노크기 입자의 형성에 기여할 뿐만 아니라, 북극 대기 입자의 효과적인 성장과 함께 구름 응결핵 작용에 기여할 수 있음을 다양한 현장 관측자료로 증명함.

▪ 북극 대기 황 에어로졸 입자 형성의 계절 변화 양상 파악

- 2010~2019년 북극 스발바드 지역에서 장기간 관측된 대기 DMS, PM10 입자 내 MSA 농도, 그리고 에어로졸 입자의 크기별 분배 자료를 바탕으로 북극 대기 중 황 에어로졸 입자 형성의 계절 변화 양상이 분석됨.
- 전체 식물성 플랑크톤 번성 기간은 크게 pre-bloom (90~110일), bloom (110~160일), 그리고 post-bloom (160~250일) 기간으로 세분화 되었음.
- 대기 DMS 혼합비는 식물성 플랑크톤의 pre-bloom부터 post-bloom 기간까지 점차적으로 증가하는 양상을 나타내었으며 (14.8 ± 35.0 pptv, 35.4 ± 60.8 pptv, and 37.9 ± 54.6 pptv for

pre-bloom, bloom, and post-bloom, respectively), 5월에 첫 번째 피크를, 7월 또는 8월에 두 번째 피크를 나타내었음.

- PM10 입자 내 MSA 농도는 phytoplankton bloom 기간동안 33.4 ± 35.5 ng m^{-3}의 최댓값을 나타내었으며, post-bloom period(21.6 ± 29.4 ng m^{-3})와 pre-bloom period(3.6 ± 5.5 ng m^{-3})의 순으로 높은 수치를 나타내었음.
- new particle formation (NPF) event의 월평균 발생률은 bloom (4.0 ± 6.2 %), post-bloom (29.5 ± 9.2 %), 그리고 pre-bloom (24.6 ± 6.4 %) 기간의 순으로 높게 나타남.
- 특이적으로, 대기 DMS와 DMS의 대표적인 산화물 중 하나인 MSA는 비선형적인 계절 변화 양상을 나타내었으며, 이는 DMS의 배출량과 산화 효율의 계절적 차이로부터 야기되었음을 암시할 수 있음.
- 대기 DMS와 MSA 간의 계절적 불일치를 규명하기 위하여 HYSPLIT model 기반의 Concentration Weighted Trajectory (CWT) 분석이 수행되었음.
- 대기 DMS의 배출 지역과 배출 강도는 뚜렷한 계절 변동성을 나타내었음. 세부적으로, pre-bloom과 post-bloom 기간동안의 대기 DMS는 대부분 open ocean으로부터 기인하였지만 bloom 기간동안의 경우 특이적으로 marginal ice zone으로부터 유입된 공기궤에 주요한 영향을 받았음. 더불어, 대기 DMS의 배출 강도는 스발바르에서 관측된 대기 DMS의 계절 변화 양상과 동일하게 post-bloom (5.7 ± 9.7 pptv), bloom (8.8 ± 12.8 pptv), 그리고 post-bloom (10.3 ± 15.0 pptv) 기간의 순으로 증가하는 양상을 나타내었음.
- 대기 DMS와 MSA의 CWT값은 bloom과 post-bloom 기간동안 양의 상관관계를 나타내었음 (r = 0.68, p < 0.001 그리고 r = 0.76, p < 0.001). 여기서, DMS와 MSA의 CWT값의 양의 상관관계는 MSA가 대부분 관측지 인근으로부터 배출된 생물학적 DMS의 대기 중 산화 과정을 통해 기인하였음을 의미함. 특이적으로, pre-bloom 기간동안은 DMS와 MSA의 낮은 상관성이 확인되었으며 이는 대기 DMS의 매우 낮은 농도로 인해 황 에어로졸 입자 형성이 촉진되지 못했거나 장거리 수송된 MSA의 영향으로 추정해볼 수 있음. 실제로, 해당 기간동안 대기 DMS는 대부분 open ocean으로부터 기인하였지만 MSA의 경우 packed ice zone에서 상당 부분 기인하였음을 확인할 수 있음.
- 대기 DMS와 MSA의 CWT값에 대한 선형회귀 분석을 통해 얻어진 기울기는 bloom 기간동안 (slope = 0.59) post-bloom 기간 (slope = 0.37)과 비교하여 대략 60%가량 높은 수치를 나타내었음. 다음과 같은 결과는 bloom 기간동안 post-bloom 기간에 비해 상대적으로 높은 대기 산화 효율을 갖는다는 사실을 암시할 수 있으며, 이는 앞서 분석된 대기 DMS와 MSA 간의 계절적 불일치의 주요한 원인으로 해석될 수 있음(Fig. 24).
- 여기서 대기 DMS 산화 과정에 영향을 미치는 주요한 원인을 규명하기 위하여 주요 대기 산화제들에 대한 모델 및 현장 관측 기반의 추가적인 분석이 요구됨.

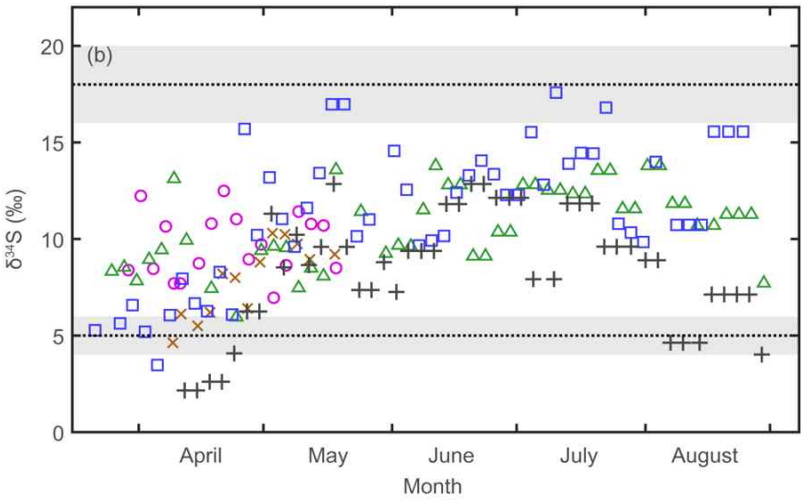


Fig. 24. Sulfur isotope ratio variation for the period 2015 ~ 2019.

▪ **북극 스발바르 제도 인근 주요 에어로졸 전구물질들의 계절별/지역별 중요성 평가**

– 북극 대기 에어로졸의 기원지 특성 및 수송과정에서의 주요 성분 변화를 파악하기 위하여 PM2.5 (직경 2.5㎛ 이하) 대기 입자 시료의 중요 화학 특성의 계절별 변화를 분석함. 북극 대기 PM2.5 시료의 충분한 확보를 위하여 그루바뎃 기지의 (Gruvebadet laboratory) 옥상에 설치된 대용량 대기 시료 포집기를 활용하여 약 3일 간격으로 4,000m^3의 북극 대기 시료를 쿼츠 필터에 포집함. 극지연–포항공대–이탈리아 연구진의 협업을 통해 국내 연구진의 북극 기지 부재기간 동안에도 북극 대기 시료를 확보하였음.

– 확보된 시료는 냉동보관 후 국내로 반입하여 고성분 분석기기(15T FT–ICR 질량분석기, Isotope–ratio 질량분석기, 이온크로마토분석기 등)를 활용하여 북극 에어로졸 화학특성 분석에 활용함 (Fig. 25, 26).

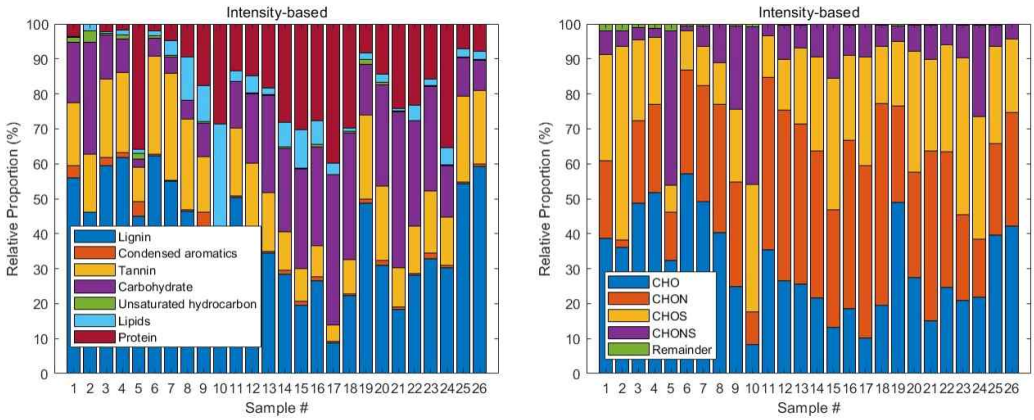


Fig. 25. Organic composition of atmospheric particles from March 2017 to September 2017.

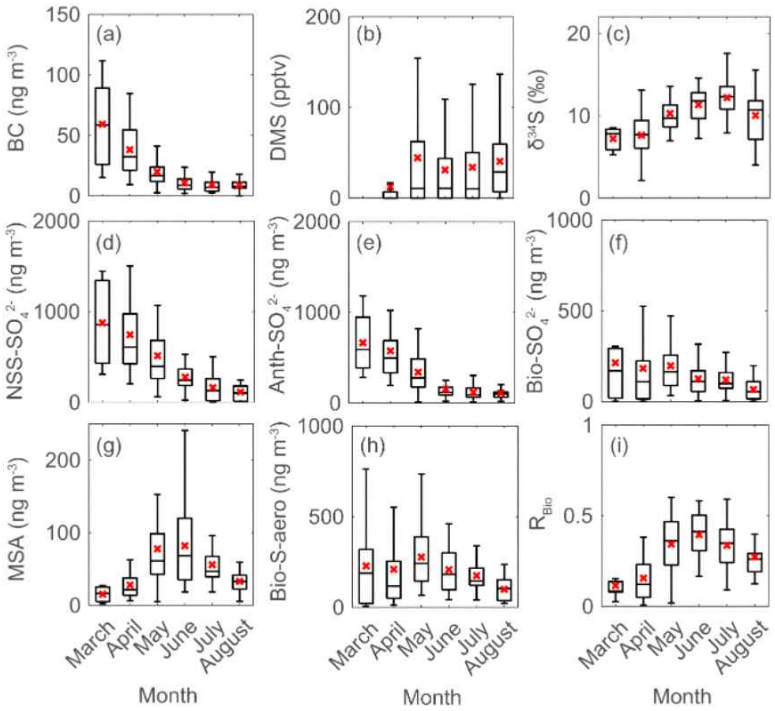


Fig. 26. Seasonal characteristics of sulfur related compositions in the Arctic atmosphere.

- 북극 대기 에어로졸의 주요 화학 특성은 뚜렷한 계절별 차이를 보임. 특히, 인위적 오염원의 지표 성분으로 알려진 black carbon (BC), 인위적 황화염 (Anthropogenic SO_4^{2-})의 농도는 이른 봄철(3~4월)에 월등히 높은 값을 보이는 반면, 자연기원 황화합물인 DMS, MSA, Bio-SO_4^{2-}는 5~6월 가장 높은 농도 값을 보임. 또한, 유기 에어로졸 성분 중 미세조류의 지표 성분으로 알려진 protein, carbohydrate 역시 5월 이후 급격한 증가 추세를 보임.
- 북극 대기 에어로졸의 황동위원소 비율은 인위적 오염원의 유입이 활발히 일어나는 3~4월에는 상대적으로 낮은 값을 보이지만 (화석 연료의 황 동위원소 비율이 낮기 때문에), 인근 해양 미세조류 활동 증가로 인해 자연 기원 황화합물의 발생이 증가하는 5~7월 동안에는 상대적으로 높은 값을 보임. 황화염의 황 동위원소 비율 변화 자료와 주요 이온 분석 자료를 통해 북극 대기 중 황화염 전체 농도 중 인위적 오염원 (anthropogenic), 해염 (sea-salt) 및 미세조류 DMS (bio) 기원 황화염의 상대적 기여도를 추정할 수 있음.
- 북극 미세조류 기원 DMS에 의한 계절별 황화합물 입자 형성 특성을 파악하기 위하여 MSA, 황화염, 황 동위원소 비율의 계절별 변화를 정밀히 분석하였음(Fig. 27). 북극 대기 DMS, MSA, 황화염 농도는 Arctic haze기간 동안의 오염원 북향 수송과 봄-여름철 북극해 미세조류의 일차 생산 증가에 의해 뚜렷한 계절별 농도 변화를 보임. 뿐만 아니라, 배경 대기 성분의 화학 특성 역시 DMS 산화 및 그로 인한 황화합물 입자 형성에 큰 영향을 미침을 확인함. 특히, 북극 대기 중 OH radical, BrO, black carbon 성분의 배경 대기 농도 차이는 DMS의 산화 경로 및 선별적 침적과정에 직간접적인 영향을 미쳐 북극 대기 황성분 및 황성분 기원입자 형성에 큰 영향을 미치며, DMS 기원 주요 황입자인 MSA 와 Bio-SO_4^{2-}의 비율(R_{bio}) 변화에도 중요한 영향을 미치는 것을 확인함.

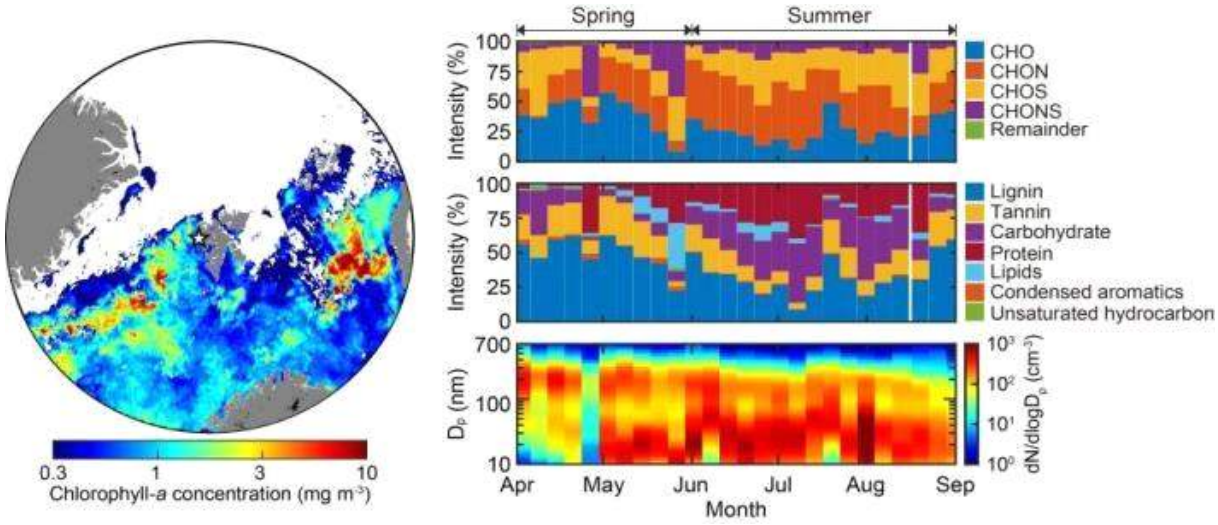


Fig. 27. (a) The chlorophyll *a* concentration in the vicinity of Arctic Svalbard (white star symbol; 78.5° N, 11.8° E) in June 2017. Time series of (b) elemental and (c) biomolecular compositions of Arctic aerosols, as well as (d) aerosol size distributions within the range of 10~700 nm in diameter during the spring–summer seasons.

- 북극 다산과학기지에서 포집된 PM2.5 샘플들의 화학적 특성을 규명하기 위하여, 초고분해능 질량분석기 (15T FT-ICR MS)를 활용하여 원소조성 (CHO, CHON, CHOS, 그리고 CHONS 화합물) 및 생체 분자 구성(lignin, tannin, carbohydrate, protein, lipid, unsaturated hydrocarbon, 그리고 condensed aromatics) 분석 완료(Fig. 28).
- 봄철 및 여름철 기간 동안 북극 에어로졸 입자의 화학적 특성은 큰 차이를 나타내었으며, 특히 여름철에 식별된 분자 수와 그 강도가 각각 40% 및 70% 가량 증가함(아래 그림).
- 구체적으로, CHO 화합물은 봄철에 전체 유기 함량의 39%를 차지하는 주요한 원소 클래스로 나타났으며, 반대로 여름철의 경우 CHON 화합물이 39%로 가장 우세하였음.
- CHO와 CHON 화합물의 강도는 각각 lignin과 tannin 그리고 protein과 carbohydrate와 밀접한 상관관계를 나타내었으며, 특히 연구 기간동안 lignin, tannin, protein, 그리고 carbohydrate는 북극 에어로졸의 총 유기 함량의 90% 이상을 기여하는 주요 성분으로 나타남.
- 여름철에는 미생물 기원 유기물로 알려진 protein과 carbohydrate의 분자 수와 그 강도가 봄철과 비교하여 2배 이상 급증하였으며, 반면에 육상식생 기원 유기물로 알려진 lignin과 tannin의 경우 계절적인 변화가 크게 나타나지 않았음.
- 그 외 lipid, unsaturated hydrocarbon, 그리고 condensed aromatic은 전체 관측기간 중 10% 미만을 차지하는 유기 성분으로 나타났으며, 그 중 unsaturated hydrocarbon과 condensed aromatic의 경우 인위적인 소스로부터 유입된 것으로 추정되었음.
- 결과적으로, 봄철과 여름철의 북극 에어로졸 입자 내 유기 구성의 변화에는 미생물 기원 유기물의 계절변화가 가장 주요한 영향을 미치는 것으로 확인됨.
- 북극 유기 에어로졸을 구성하는 주요 생체 분자로 확인된 MOM 및 TOM의 계절변화 양상을 결정하는 주요 요인을 식별하기 위하여, HYSPLIT 모델 기반의 공기궤 역궤적 분석을 수행하고 대표적인 수용모델로 알려진 Concentration Weighted Trajectory(CWT) 분석을 진행하였음.

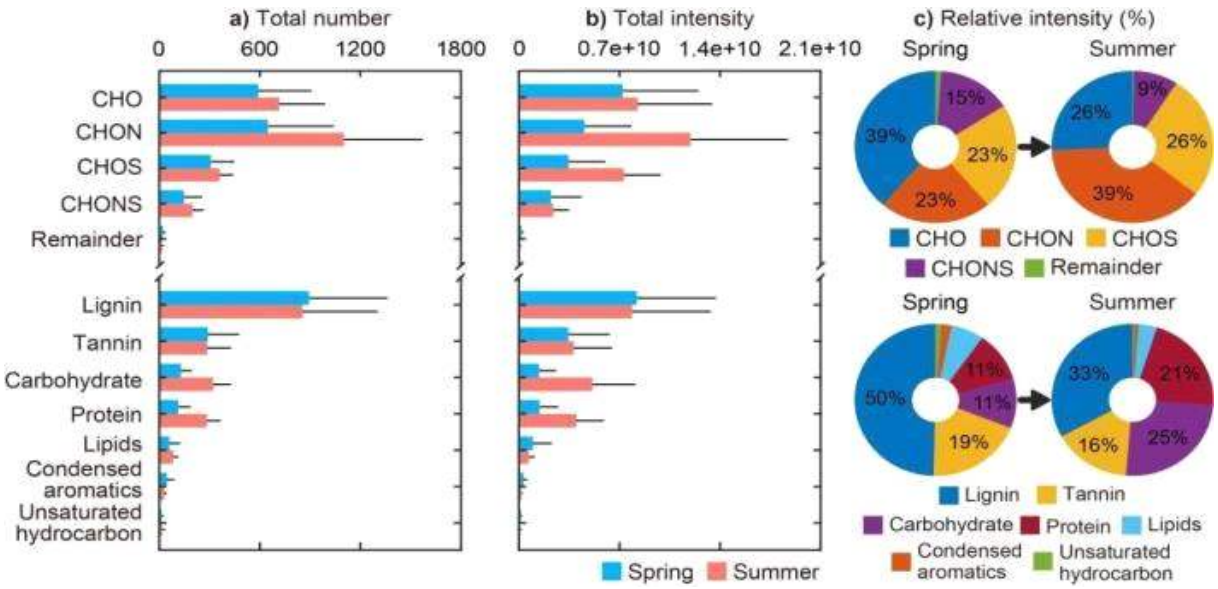


Fig. 28. Bar plots for (a) total number and (b) total intensity, and pie charts for (c) relative intensity of assigned elemental and molecular compositions of Arctic aerosols during the spring–summer seasons.

- 봄철(4-5월) 및 여름철(6-8월) 기간 동안 북극 스발바르 제도로의 대기 수송 패턴은 계절별 기상장의 변화에 따라 뚜렷한 변화 양상을 나타내었음. 구체적으로, 봄철과 여름철 기간 동안 대부분의 공기궤는 각각 고위 북극 지역과 그린란드해로부터 기인한 것으로 나타남(Fig. 29. (a)).
- 봄철에서 여름철로 진행되면서 해양 생물학적 활성도가 높은 그린란드 해역으로의 주요 대기 수송 패턴의 변화는 북극 유기 에어로졸의 화학적 조성이 단순히 식물성 플랑크톤이나 육상 식생의 계절적 진행 외에도 대기 수송 과정의 변화에도 주요한 영향을 받을 수 있음을 나타냄(Fig. 29. (b)).
- 전체 관측기간 동안 북극 유기 에어로졸을 구성하는 MOM과 TOM의 발생원을 추적한 결과, MOM과 TOM의 지역별 배출 강도는 매우 유사한 공간 분포를 나타냄(Fig. 30.(a-b)).
- MOM과 TOM의 배출 강도는 상호간 강한 양의 상관관계를 나타내었으며, 이는 이들 생체분자 그룹들이 동일한 배출 지역으로부터 유사한 에어로졸 형성 과정을 통해 기인하였음을 암시할 수 있음(Fig. 30.(c)).
- 기존 선행 연구 결과들에서 봄철 고위 북극에 쌓인 눈에서 높은 TOM 성분과 낮은 MOM 성분들이 지속적으로 검출되었음을 고려했을 때, 대부분의 공기궤가 고위 북극으로부터 기인한 봄철의 경우 적설된 눈에 축적된 유기 성분들의 재방출 과정으로 인해 높은 TOM과 낮은 MOM 농도를 야기하였을 것으로 추정됨.
- 여름철의 경우 해양 생물학적 과정들이 활발하게 이루어지는 그린란드 해역으로의 대기 수송 경로 변화에 따른 MOM 성분의 증가와 융설, 융빙 등에 의한 담수 유입을 통한 TOM의 그린란드 해로의 유입이 높은 MOM 및 TOM 농도를 야기하였을 것으로 추정됨.

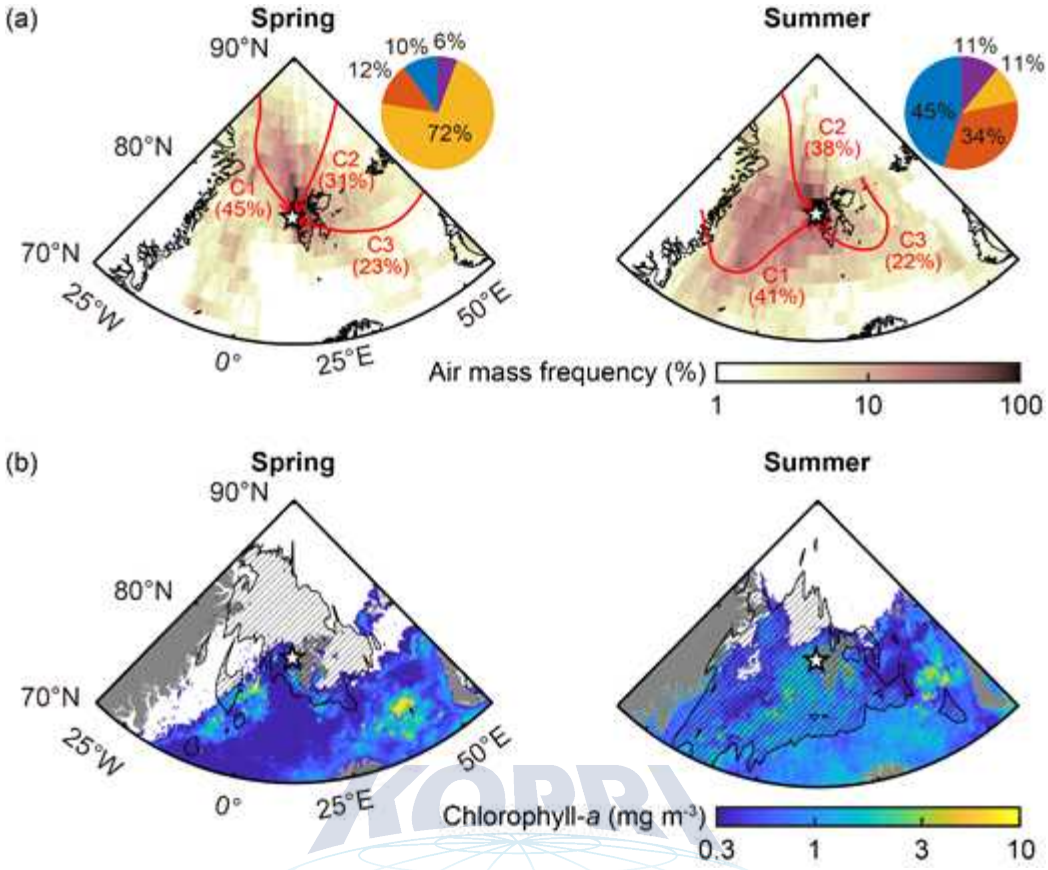


Fig. 29. Maps showing (a) air–mass frequency (AMF) overlain with the three main clusters of the 5–day air–mass back trajectory and (b) chlorophyll *a* concentrations during the spring and summer periods of 2017.

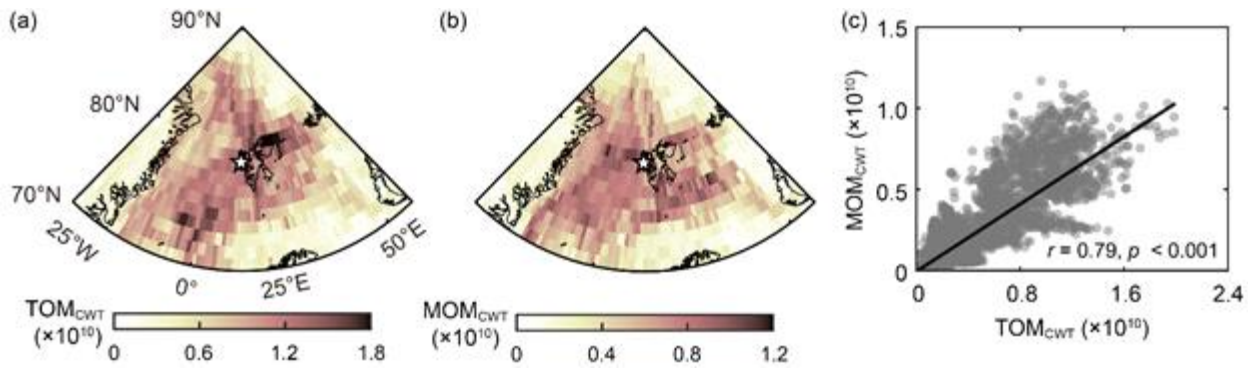


Fig. 30. Maps showing CWT values for signal intensity of (a) TOM(TOMCWT) and (b) MOM(MOMCWT) during the observation period. (c) The relationship between the TOMCWT and MOMCWT during the period.

– 북극권 주요 생체 분자들의 계절적 거동이 에어로졸 입자의 크기별 분배에 미치는 영향을 평가하였음(Fig. 31).

– 아미노산과 단당류와 같은 작은 단위체로 구성된 MOM의 경우 일반적으로 1~100nm 범위의 작은 분자크기를 갖는 특징이 있음. 전체 관측기간 동안 MOM의 검출 강도는 직경 25~100nm 범위

에 해당하는 Aitken mode particle의 수농도와 밀접한 양의 상관관계를 보였으며(Fig. 31.(a)), 직경 32.3-71.8 nm 범위의 입자들의 주요 구성성분으로 확인됨(Fig. 31.(c)).

- TOM의 경우 상대적으로 복잡한 분자구조를 갖는 페놀계 화합물로 일반적으로 100nm 이상의 분자 크기를 갖는 특징이 있음. 전체 관측기간 동안 TOM의 검출 강도는 직경 100-400nm 범위에 해당하는 작은 accumulation mode particle들의 수농도와 밀접한 양의 상관관계를 보였으며(Fig. 31.(b)), 직경 132.7-202.9nm 범위의 입자들의 주요 구성성분으로 확인됨(Fig. 31.(d)).
- 다음과 같은 연구 결과들을 토대로 비추어봤을 때, 각각의 생체 분자들의 분자 크기가 직접적으로 대기 에어로졸의 크기별 분배에 영향을 미칠 수 있음. 따라서, 북극권 에어로졸의 미래 거동을 정확히 예측하기 위해서는 계절별 대기 수송과정이나 해양 및 육상 생태계의 변화에 대한 종합적인 이해가 필요함.

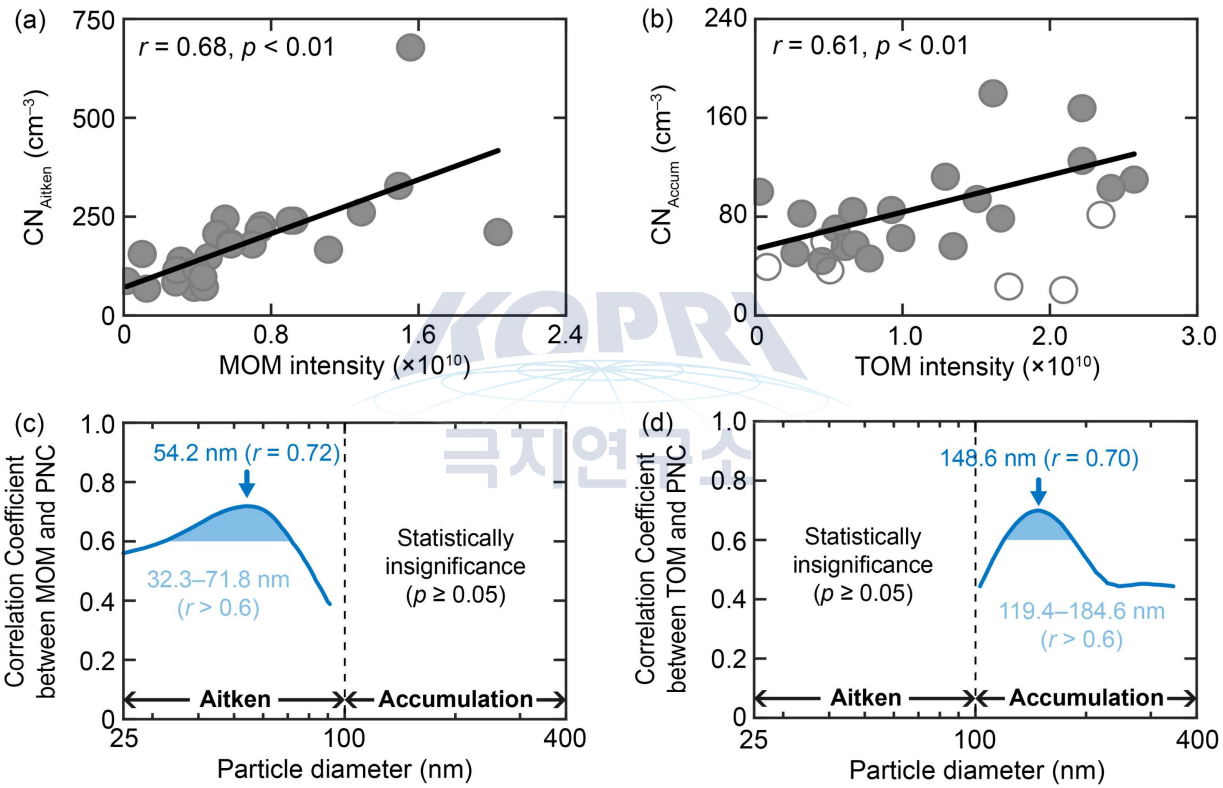


Fig. 31. Relationship between (a) the total intensity of MOM and number concentration of Aitken mode particles (CNAitken) and (b) the total intensity of TOM and number concentration of accumulation mode particles (CNAccum). The size-resolved relationships between particle number concentration within the range of 25-400 nm with the intensity of (c) MOM and (d) TOM.

라) 2022-23년 북극 항차 기반 위도별 해양 에어로졸 발생 특성 이해

- **실험실 제조 입자 생성 챔버 시스템을 활용한 극지 미세입자 생성 모사 실험 수행**

- 실험실 제조 입자를 활용한 바닷물 속 해양염이 일차 에어로졸 생성에 미치는 영향을 파악하기 위해, 다양한 농도 범위로 제조한 인공해수 (500, 1000, 5000, 10000, 15000, 20000, 30000, 35000 ppm)에 대해 20℃와 0℃의 두 온도 조건에서 1차 에어로졸 개수 분포를 관측함(Fig. 32).

– 20℃ 조건에서 진행했을 때보다 0℃ 조건에서 진행했을 때 인공해수에 따른 에어로졸 총 수농도가 더 크게 변화함 (Fig. 33; 20℃: 1.4×10^{3}~$2.7\times10^{4}$$cm^{-3}$, 0℃: 1.0×10^{3}~3.3×10^{4} cm^{-3}). 이는 해수에 농도차가 생길 경우 생성되는 에어로졸의 수농도 분포가 중위도 지역보다 온도가 낮은 고위도 지역에서 더 크게 영향을 받을 수 있음을 시사함.

Fig. 32. Sea spray chamber system.

– 그러나 두 온도 조건에서 에어로졸 총 수농도가 모두 인공해수 농도와 정비례하여 증가하다가 일정 농도의 인공해수에서 더 이상 증가하지 않는 경향을 보임. 즉, 20℃ 조건에서는 10000, 15000ppm에서 가장 높은 수농도를 보인 후 30000, 35000ppm에서 다소 낮아지는 경향을 보였으며, 0℃ 조건에서는 30000ppm에서 수농도가 가장 높았으나 35000ppm에서는 15000, 20000ppm보다 낮은 수농도가 확인됨. 따라서, 해염은 연안 해양계에서도 1차 에어로졸을 발생시키는 중요한 요인으로 보이며, 외해에서는 실제 해수 등을 이용하여 특히 높은 농도에서 에어로졸 발생 기작 확인을 위한 연구 필요함.

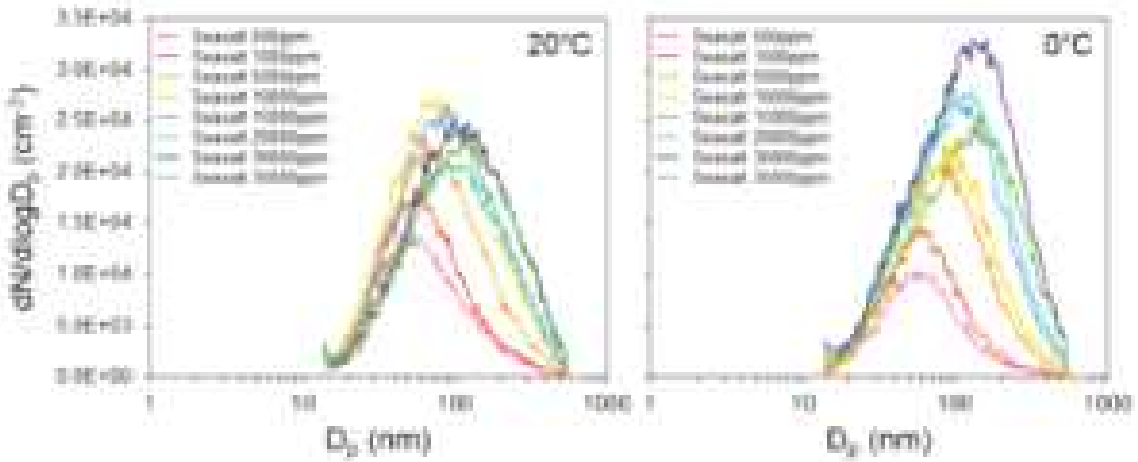


Fig. 33. The number size distributions of primary aerosol particles produced from sea–salt solutions with varying salinity (500~35000 ppm) at two different water temperature condition: 20℃ and 0℃.

– 해양 유래 에어로졸 발생 기작 확인을 위해 실제 바닷물 샘플을 이용하여 실험실 테스트를 진행함. 이를 위해, 중위도–북극권(베링해)에 이르는 해역에서 2022년 7월 4일~17일, 9월

20일~10월 4일까지 해수를 채취하여 현장에서 에어로졸 발생 모사 챔버 실험을 수행함. Fig. 34는 *R/V* Araon의 항해 경로와 함께 시료를 채취한 위치들을 나타냄. 57개의 위치에서 해수를 채취하여 유기물 화학적 특성을 위한 전처리를 진행하였으며, 그 중 30개는 에어로졸 발생 모사 챔버 실험에 사용됨.

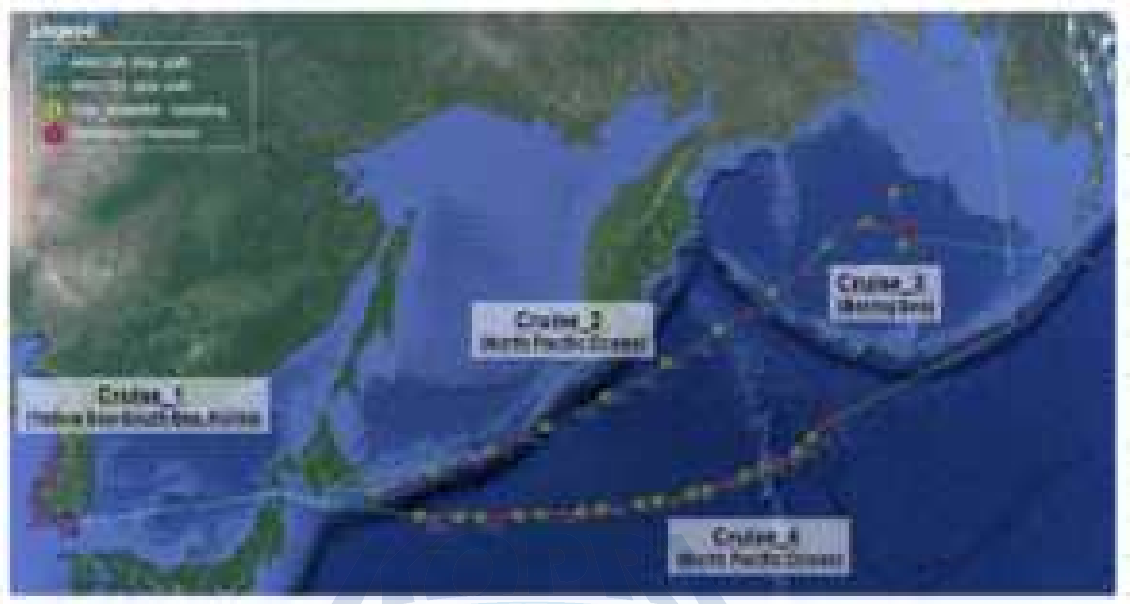


Fig. 34. Sampling stations along with ship path of R/V Araon. Chamber tests were immediately operated after collecting samples at the stations (red).

극지연구소

– 발생 된 에어로졸의 물리적 특성을 관측함과 동시에, 화학적 특성 분석을 위한 시료를 쿼츠 필터에 포집함. 또한 대기 에어로졸 내 유기물의 화학적 특성과 비교를 위해, 중위도 또는 북극권 바닷물 속 유기물의 화학적 특성 분석을 위한 시료도 채집함.

▪ **2023년 북극 항차를 활용한 해수 및 에어로졸 샘플링 수행 및 초고분해능 질량분석기를 활용한 정밀 화학적 특성 분석 진행**

– 북극권–중위도 간 에어로졸의 거동 연구를 수행하기 위해 2023년 7월 12일~10월 4일까지 쇄빙연구선 아라온 이동 항차를 활용하여 에어로졸 샘플을 채집함(Fig. 35).

– 아라온 선수의 콤파스덱에 설치한 대용량 대기 시료 포집기(high–volume air sampler)를 이용하여, 24시간 간격으로 1항차 (n=9), 2항차 (n=8), 3항차 (n=16), 4항차 (n=7) 동안 총 40개 샘플을 채집함.

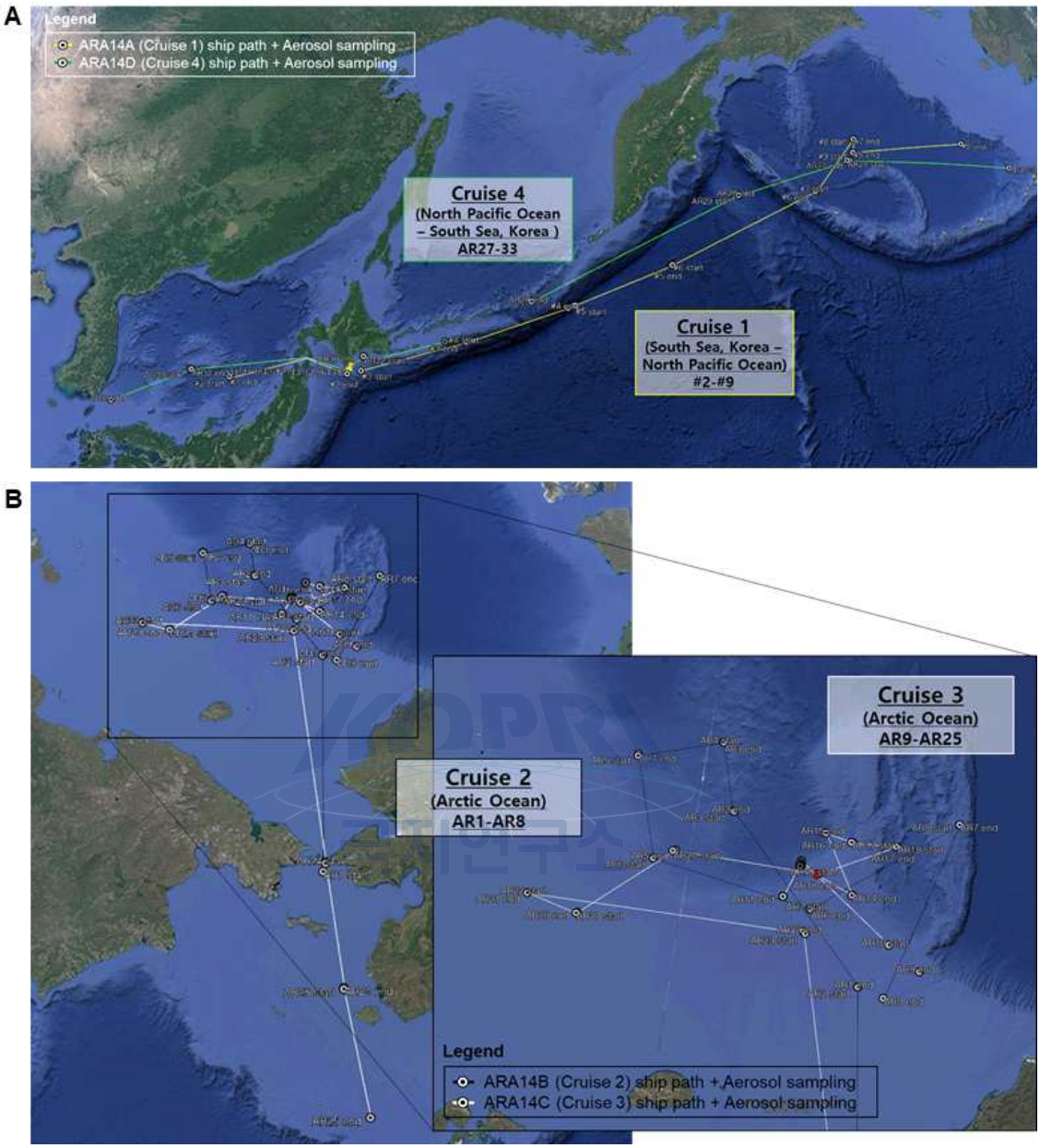


Fig. 35. Aerosol sampling stations along with ship path of R/V Araon during 2023 Arctic Cruise.

– 해양–대기 상호작용을 확인하기 위해, 에어로졸 샘플과 동시에 73개의 위치에서 해수를 채취하여 유기물 화학적 특성을 위한 전처리를 진행함.
– 추후, 초고분해능 질량분석기를 활용하여 에어로졸 샘플과 해수 샘플 내 유기물의 화학적 특성을 분석 및 비교하여, 북극권–중위도 간 에어로졸의 거동과 해양–대기 상호작용에 대해 확인하고자 함.

▪ **2022년 북극 항차를 활용한 해수 및 에어로졸 샘플링 수행 및 해양 입자의 화학적 특성 분석**

– 2022년 아라온 북극 항차에서 채집한 12개의 에어로졸 샘플과 57개의 해수 샘플에 대해 초고분해능

질량분석기를 활용하여 유기물 특성을 분자 수준에서 분석함(Fig. 36~39).

- 초고분해능 질량분석기를 통해 분석 및 할당된 유기물의 분자구조를 바탕으로 Van Krevelen diagram에 나타냄.
- Van Krevelen diagram에서 유기물의 특성은 H/C와 O/C 비율의 조합에 따라 크게 7가지 유기 성분(지질, 단백질, 탄수화물, 불포화 탄화수소, 리그닌, 탄닌, 응축 방향족 화합물)으로 분류되었음.
- 에어로졸 샘플의 7가지 유기 성분의 상대적 비율을 확인해 보았을 때, 해역에 따라 유기 성분의 화학적 특성이 다르게 나타남: 국내 연안 (AS01)에서는 리그닌 성분이 우세 (34%), 북태평양 해역 (AS02~06, AS10~12)에서는 지질과 단백질 성분이 각각 (22±14%), (18±3%)으로 우세하게 나타남, 베링해 (AS08~09)에서는 지질 성분이 (31±13%)으로 우세하게 나타남.
- 해수 샘플의 유기 성분 결과는 에어로졸과 다르게 대부분의 해역에서 지질 성분이 우세한 경향을 보임 (34±17%).
- 따라서, 에어로졸과 해수의 유기물 상호작용은 해역의 물리/생물학적 특성과 유기물의 화학적 특성(소수성 등)으로부터 기인한 것으로 사료됨.
- 국내 연안의 에어로졸에는 해수에 우세했던 지질보다 리그닌 성분이 더 우세했는데, 리그닌은 육지 유래 유기 성분의 지표자로 지질보다 높은 소수성을 가지고 있어 대기 중으로 더 많이 에어로졸화가 되었을 것으로 추측됨.
- 북태평양 및 베링해의 에어로졸과 해수에는 주로 지질과 단백질 성분이 우세하게 나타났고, 지질과 단백질은 일반적으로 해양 미생물로부터 유래된 유기물이기 때문에, 해당 샘플링 시기의 높은 생물량과 연관이 있을 것으로 보임.
- 중위도-고위도 해역의 해양 유기물 기원과 유기물의 해양-대기 상호작용에 대한 깊은 이해를 위해서는 유기물 특성과 더불어 다양한 수질, 대기질 자료와 함께 통합적인 추가분석이 요구됨.

KOPRI 극지연구소

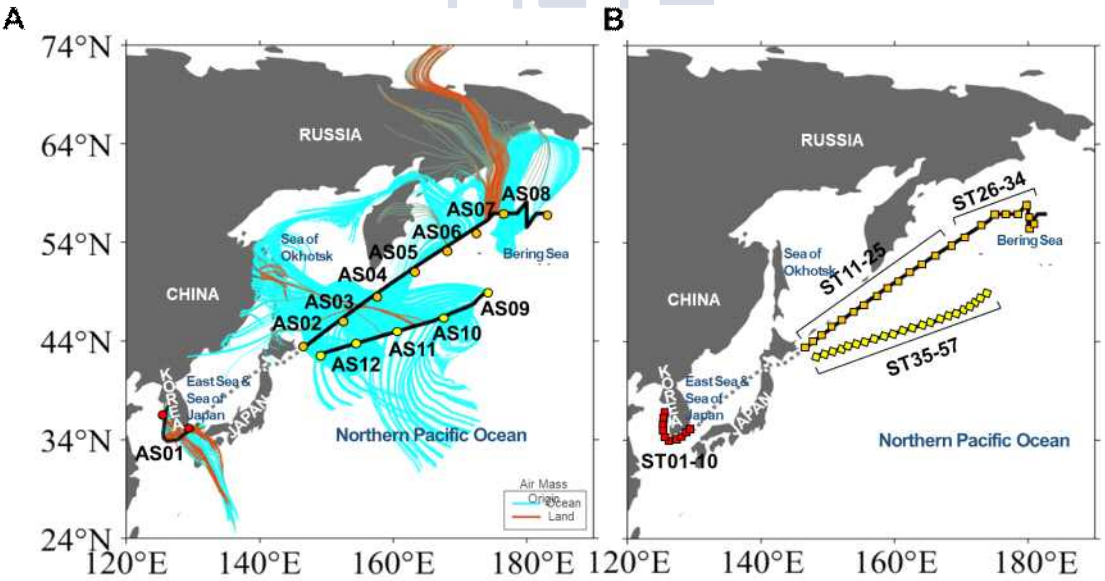


Fig. 36. (A) Aerosol sampling stations with back trajectories of air mass. (B) Seawater sampling stations with sea surface temperature.

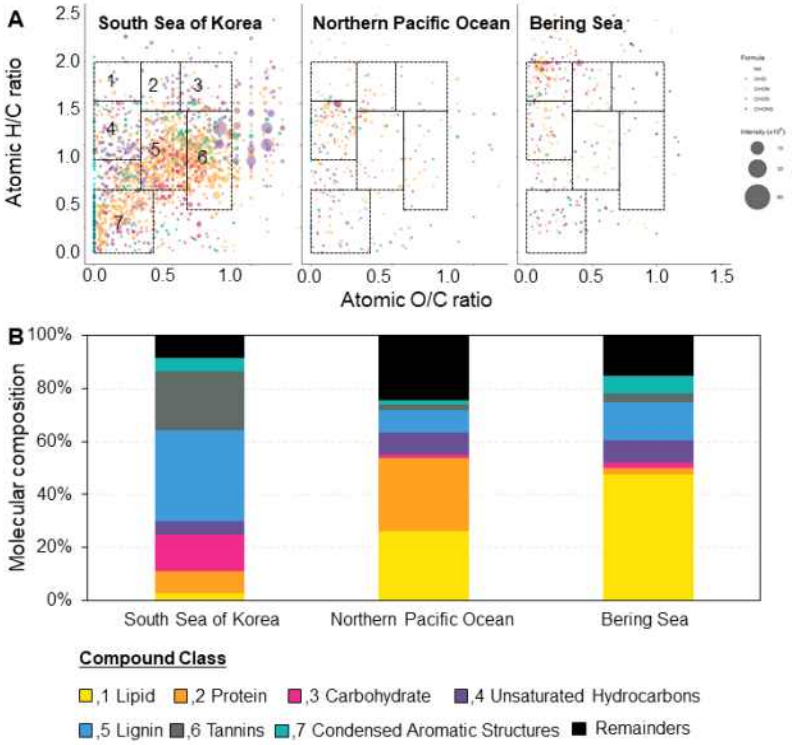


Fig. 37. (A) Van Krevelen plots showing the distribution of compound classes of aerosol samples. (B) Molecular compositions.

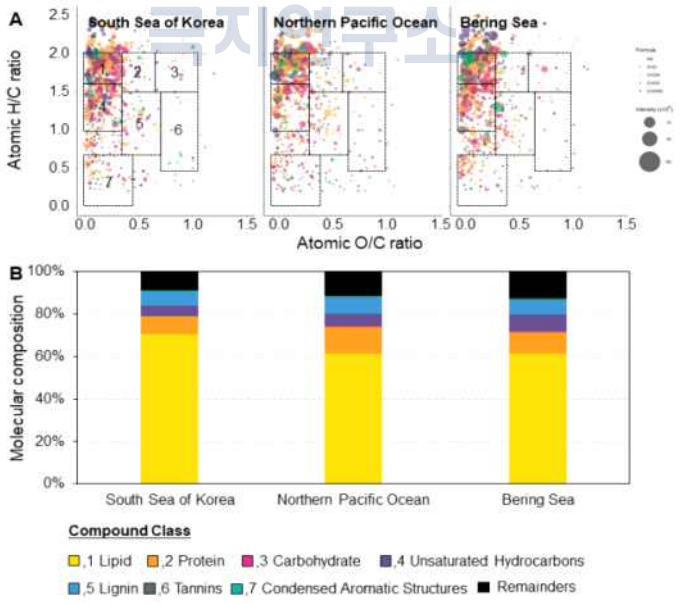


Fig. 38. (A) Van Krevelen plots showing the distribution of compound classes of seawater samples. (B) Molecular compositions.

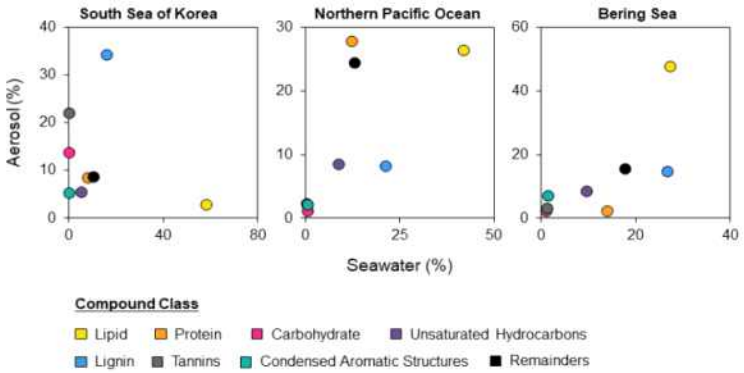


Fig. 39. The compounds shared between seawater and aerosol samples.

▪ **북극권 미생물의 해양–대기 상호작용 이해**

– 2022년 7월 4일부터 14일, 그리고 9월 25일부터 28일 동안 아라온 북극 항차에서 북태평양의 해양과 대기 사이의 박테리아 전이를 조사하기 위해 해수와 PM2.5 에어로졸 샘플을 동시에 수집함(Fig. 40. (A~B))

– 해수 샘플은 56개 위치에서 200mL에서 5L의 용량으로 수집한 후, 3.0μm 및 0.2μm 폴리카보네이트 멤브레인 필터를 통해 필터링하여 미세 박테리아를 수집하였으며, PM2.5 에어로졸 샘플은 HV–1000R 공기 샘플러를 사용하여 하루 동안 수집함.

– 수집된 샘플은 16S rRNA 유전자 염기서열을 분석하여 박테리아의 분류학적 다양성을 평가하고, 아믹론 시퀀싱 및 생물 정보학적 분석을 통해 각 샘플의 박테리아 군집의 상대적 풍부도를 계산함.

– 해수 샘플에서 세균의 문(phylum) 수준 분포를 확인한 결과, 모든 정점에서 *Bacteroidota* (13–80%; 평균 40%)와 *Proteobacteria* (13–58%; 평균 34%)가 주요 세균군으로 확인되었으며, *Cyanobacteria* (평균 6.5%), *Actinobacteriota* (평균 2.6%), *Verrucomicrobiota* (평균 1.9%) 등은 소수 세균군으로 나타남.

– *Bacteroidota*는 해양 유기물 분해에 중요한 역할을 하며, *Proteobacteria*는 다양한 해양 환경에서 널리 분포하는 특성을 보임. *Cyanobacteria*는 주로 연안 지역에서 상대적으로 높은 비율(평균 17%)을 보였으며, 해수 온도(SST)와 염분(SSS)에 따라 분포가 달라짐. 군집 분석 결과, 연안 해양 샘플은 *Cyanobacteria*의 높은 상대적 풍부도를 보여 Cluster 1로 분류되었으며, 북태평양 샘플은 시기별 생물학적 활동 차이에 따라 Cluster 2(7월)와 Cluster 3, 4(9월)로 나뉨.

– 특히, Cluster 2는 *Bacteroidota*의 높은 비율과 엽록소–a 농도의 증가와 관련이 있는 것으로 나타남 (Fig. 40.(C)).

– 반면, 위도별 에어로졸 샘플은 *Proteobacteria* (39%)와 *Bacteroidota* (20%)가 주요 군집으로 우점하며, *Cyanobacteria* (5.1%) 및 *Firmicutes* (3.2%)가 그 뒤를 이음. 주요 OTUs로는 *Proteobacteria*의 OTU225(*Cupriavidus sp.*)와 *Bacteroidota*의 OTU035(*Formosa sp.*) 등이 기여함. 세균 분포는 위도와 관계없이 유사하며, 해양 환경에서 바람 속도로 인한 에어로졸 내 세균 전이가 강화됨을 시사함(Fig. 40.(D)).

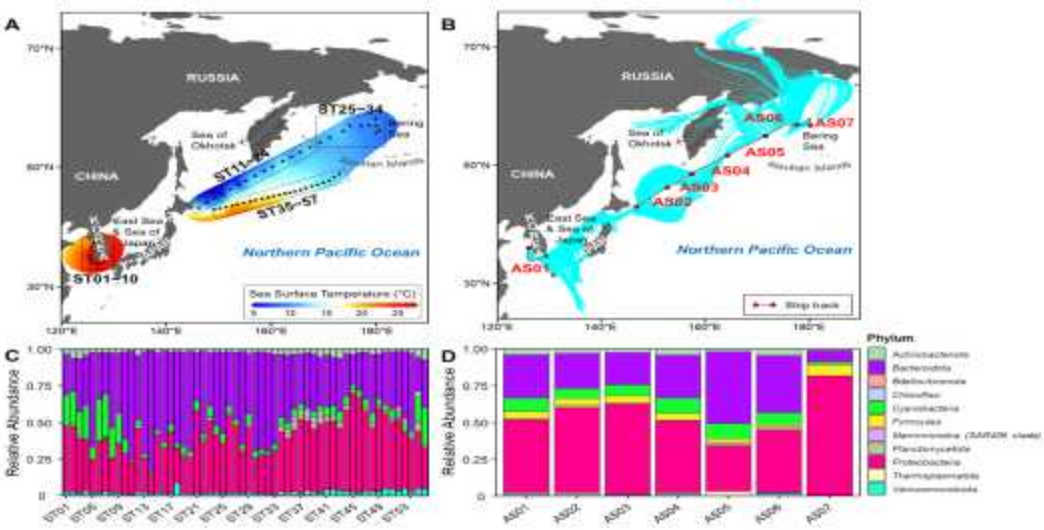


Fig. 40. (A) Locations of seawater samples collected in July (ST01-33) and September (ST34-56) in 2022, along with surface seawater temperature (SST; ° C) data. (B) Sampling tracks for aerosol samples and their respective back trajectories. Relative abundance of marine phyla (C) in seawater samples and (D) in aerosol samples for taxa observed in more than 1% of the samples.

- 해양에서 대기로의 세균 전이는 세균의 기원, 소수성, 세포 크기와 같은 특성에 따라 영향을 받으며 연구 결과, *Proteobacteria, Firmicutes, Cyanobacteria*는 에어로졸 샘플에서 해수 샘플보다 상대적으로 높은 풍부도를 보임.
- *Proteobacteria*와 *Firmicutes*는 육상 환경, 특히 토양과 식물에서 유래한 것으로 추정됨. 특히, *Colwellia spp.*는 육상 환경 인근의 해안에서 발견되며, 이는 대기 중 세균이 육상에서 유래했을 가능성을 시사함. 에어로졸 샘플 중 AS06에서 *Colwellia spp.*의 풍부도가 다른 에어로졸 샘플보다 17~60배 높았으며, 이는 해당 지역에서 육상 유래 공기의 영향을 받았음을 나타냄.
- *Proteobacteria*와 *Firmicutes*는 소수성 세포 표면을 가지고 있어 에어로졸화가 용이하며, 세균의 소수성은 에어로졸화에 중요한 역할을 함. 특히, *Firmicutes*는 내포자 형성을 통해 대기에서 오랜 시간 생존할 수 있음. 세포 크기는 해수에서 에어로졸로의 전이에 중요한 역할을 함. 작은 세균은 에어로졸화가 용이하며, SAR11 clade Ia와 같은 *Proteobacteria*는 매우 작은 크기를 가져 대기 중으로 쉽게 전이됨.
- 반면, *Cyanobacteria*는 연안에서 더 큰 크기를 가지며, 이는 에어로졸화 효율에 영향을 미치며 개방 해역에서는 세포 크기가 작은 단세포 형태로 변화하면서 에어로졸화가 더 잘 일어남(Fig. 41).
- 본 연구는 세균의 전이가 해양과 대기 간의 상호작용에서 중요한 역할을 하며, 세균의 기원과 특성에 따른 대기 내 전이 메커니즘을 규명하기 위한 후속 연구의 필요성을 강조하며 이는 세균의 기원, 소수성, 세포 크기와 같은 특성이 에어로졸 조성에 중요한 영향을 미침을 시사함.
- 특히, *Proteobacteria*는 구름 형성에 중요한 역할을 하며, 일부 *Gamma-proteobacteria*는 얼음 핵 형성 단백질을 통해 구름 내 얼음 결정 형성을 촉진함. *Cyanobacteria*는 기후 변화로 인해 고위도 지역에서도 확산 가능성이 있으며, *Firmicutes*는 대기에서 병원체 전파 매개체로 작용할 수 있음.
- 예를 들어, *Staphylococcus sp.*는 에어로졸 샘플에서 검출되었으며, 식중독 및 피부 질환 등과 관련된 병원성 특성을 가질 수 있음. 따라서, 세균 군집의 해양-대기 상호작용을 장기적으로 모니터링하여 기후변화 및 인류 건강에 미치는 영향을 이해할 필요가 있음.

KOPRI 극지연구소

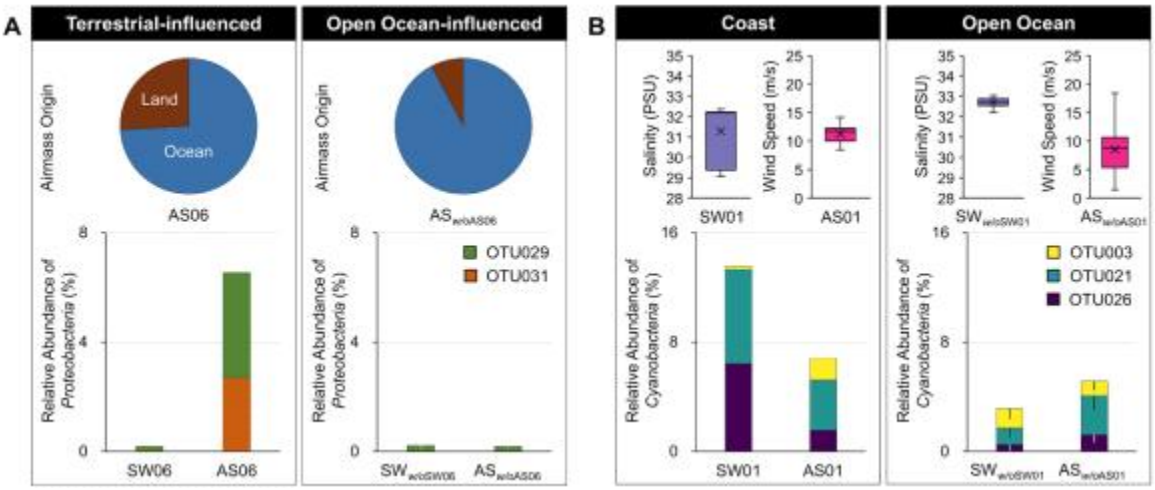


Fig. 41. Commonly found bacteria and their relative abundance (%) in both seawater and aerosol samples. (A) Comparison of airmass origin between AS06 (terrestrial-influenced) and aerosol samples without AS06 (open ocean-influenced) and relative abundance (%) of *Colwellia spp.* (OTU029 and OTU031) in seawater and aerosol samples between ST06 (SW06 and AS06) and samples without ST06 (SWw/oSW06, ASw/oAS06). (B) Comparison of salinity (PSU), wind speed (m s 1), and relative abundance (%) of *Synechococcus spp.* CC9902 (OTU003, OTU021, and OTU026) in seawater aerosol samples between ST06 and aerosol samples without ST06. Salinity between SW01 and SWw/oSW01 and wind speed between AS01 and ASw/oAS01 were significantly different ($p < 0.05$).

마) 에어로졸 및 미량기체 현장 관측용 선도 연구장비 도입 및 운영

- **에어로졸 화학성분 실시간 분석 질량분석기(Aerosol Mass Spectrometer) 도입, 작동환경 최적화 및 현장 캠페인 수행**

– AMS(Aerosol Mass Spectrometer)는 공기 중의 입자상 물질을 실시간으로 입자의 크기에 대한 화학성분을 분석함. AMS는 매우 빠른 응답 시간을 가지며, sub-micron 에어로졸 입자의 성분 분석과 크기에 따른 성분 분석이 가능함.

– 에어로졸 입자는 입구의 핀 홀과 에어러다인 렌즈(Aerodyne lens)를 통과하면서 0.04~1.0 ㎛ 범위로 선별된 후, 연속된 입자 빔(beam)의 형태로 진공 챔버로 유입됨. 유입된 입자는 600℃로 가열되는 기화기(vaporizer)로 유입되어 충돌하고, 기화기 표면에서 열적으로 기화되는 동시에 전자충돌(Electron Impaction)방식을 통해 이온화 된 후, 이 이온들은 비행 시간챔버로 유입됨. 그러므로 양이온들의 질량 크기(질량대전하비: mass of charge: m/z)에 따라 분석할 수 있고, AMS는 주로 유기물과 수용성 이온 성분의 황산염, 질산염, 암모늄염, 염소 성분을 분석할 수 있음.

– AMS의 이온화 효율 교정은 질산암모늄의 이온화 및 이온 전달 효율을 측정하며, 교정 장치는 입자 발생기-드라이어-SMPS-AMS, CPC의 순서로 구성됨.

– AMS 캘리브레이션 과정은 크게 1) Calibration mass axia, 2) Measurement single ion, 3) Determination of ion efficiency 로 나뉘어지며, 차례로 캘리브레이션을 진행한 결과 AMS의 캘리브레이션이 정상적으로 진행되는 것을 확인함(Fig. 42~44).

Fig. 42. Aerosol Mass Spectrometer calibration (mass axis) results.

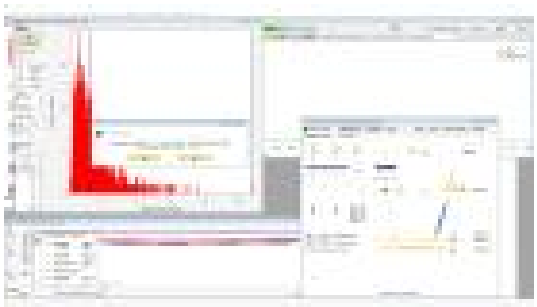


Fig. 43. Aerosol Mass Spectrometer calibration (single ion) results.

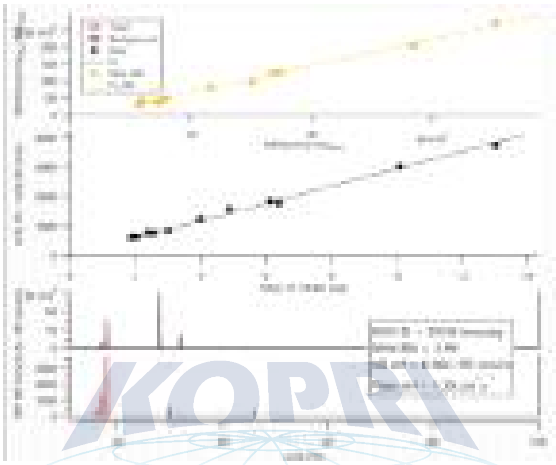


Fig. 44. Aerosol Mass Spectrometer calibration (ion efficiency) results.

KOPRI 극지연구소

- 극지역의 극한 환경에서 에어로졸 정밀 관측을 고도화하기 위해, 울진 동해연구소에 이동식 에어로졸 관측 플랫폼을 설치하고, AMS(Aerosol Mass Spectrometer) 장비를 활용하여 실시간으로 에어로졸 화학 성분 변화를 관측함.
- 캠페인 전, 장비가 정상적으로 작동하는지 확인하기 위해 다음과 같은 교정 과정을 진행함: 1) Calibration mass axis, 2) Measurement single ion, 3) Determination of ion efficiency(Fig. 45~46).

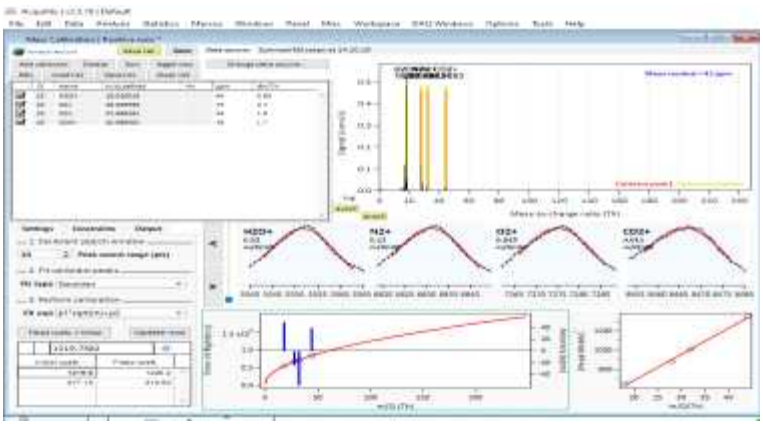


Fig. 45. Aerosol Mass Spectrometer calibration (mass axis) results before campaign.

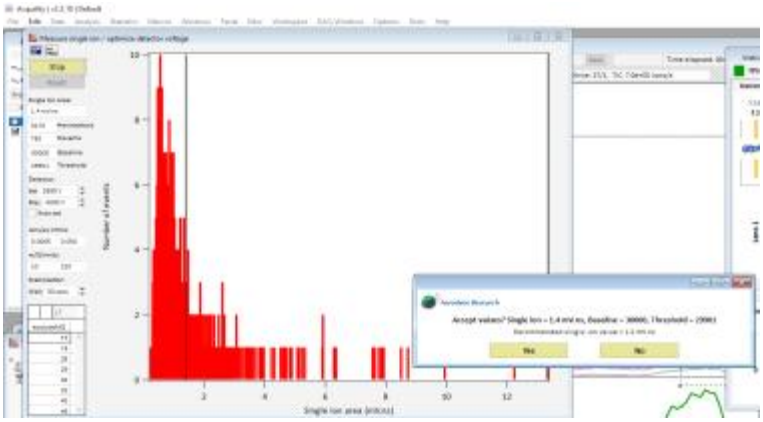


Fig. 46. Aerosol Mass Spectrometer calibration (single ion) results before campaign.

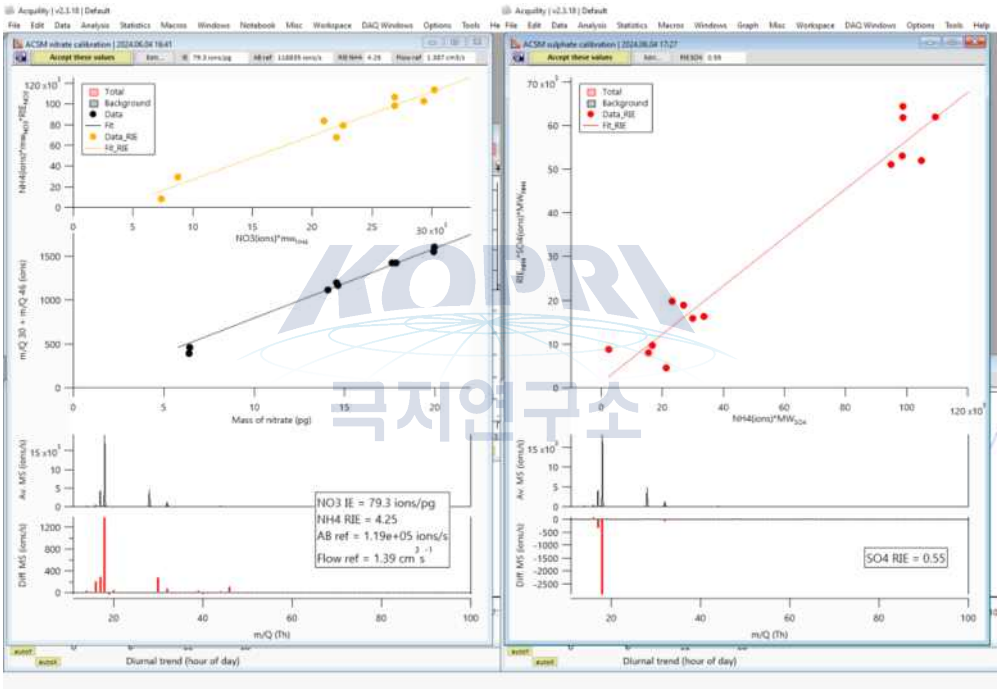


Fig. 47. Aerosol Mass Spectrometer calibration (ion efficiency) results before campaign.

- 2024년 6월 5일부터 6월 10일, 그리고 6월 26일부터 7월 3일까지, 울진 동해연구소에 설치된 이동식 에어로졸 관측 플랫폼을 통해 대기 중 주요 성분에 대한 현장 관측을 수행함(Fig. 48).
- 본 관측은 극지 환경에서의 에어로졸 배경 농도를 측정하기 위한 기초 데이터를 확보하는 것을 목표로 하였으며, 국내 청정 대기에서의 배경 농도를 측정함으로써 향후 극지에서의 에어로졸 농도 분석을 위한 기준을 마련하고자 하였음.

KOPRI 극지연구소

Fig. 48. Aerosol Mass Spectrometer installed at mobile Aerosol measurements platform installed in Korean Institute of Ocean Science and Technology, East Sea Environment Research, Uljin.

- 관측 결과, 대기 중 유기물, 황산염, 질산염, 암모늄염, 염소 성분의 평균 농도는 각각 2.76 ug/m³ , 0.93 ug/m³ , 0.32 ug/m³ , 0.39 ug/m³ , 0.01 ug/m³ 으로 측정됨. 특히, 유기물과 황산염은 평균 2.76 ug/m³ 와 0.93 ug/m³ 로 상대적으로 높은 농도를 보였으며, 이는 플랫폼의 지리적 위치 특성상 해양 생물 활동에 의해 유입된 것으로 예상됨(Fig. 49).
- 이번 관측을 통해 확보된 배경 농도 데이터는 향후 극지에서의 에어로졸 농도분석과 장기적인 환경 변화 추적에 중요한 기준으로 활용될 예정임.

KOPRI 극지연구소

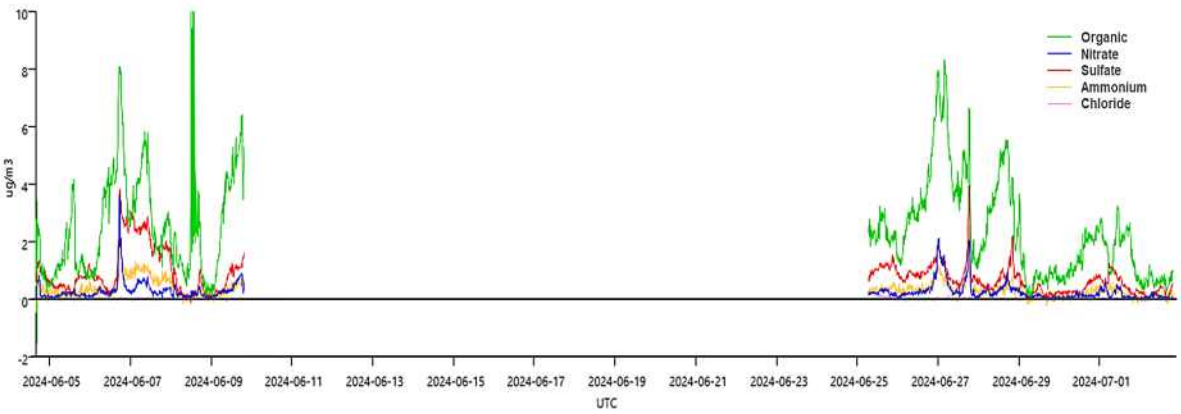


Fig. 49. Time series data by Aerosol Mass Spectrometer.

▪ 실시간 탄소 입자 분석기 (SP2-D) 도입 및 시험 운영

- 실시간 탄소 분석기는 적은 유량으로 대기 중 블랙카본 성분의 질량과 수농도 그리고 각종 물리적 특성을 분석하는 실시간 관측 장비로 연구 현장 연속 관측, 이벤트성 집중 관측 그리고 연구실 챔버 실험시 이용이 가능한 관측 장비임(Fig. 50).
- 실시간 탄소 분석기는 7월에 설치하여 연구실에서 안정성 테스트를 수행하였으며 교육을 통하여 연구환경에 맞는 연구 장비 최적화를 수행하였음. 본 장비의 최적화를 위해서는 사용자가 자체적으로 제공

하는 논리회로 시스템을 이용하여 연구 환경에 맞는 별도의 시퀀스를 만든 뒤 적용해야 함.

- 실시간 탄소 분석기는 1초마다 관측을 수행하며 집록된 자료는 PAPI를 이용하여 데이터 추출 – 데이터 변형 - 데이터 표출 3단계를 거쳐 최종 결과값을 생산함.
- 결과값은 블랙카본 수농도(number concentration), 질량(mass ng/m^3), 입자의 크기별 분포, 성분별 블랙카본의 비율, 입자의 코팅 상태 등을 알 수 있으며 향후 극지 현장에서 에셀로미터에서 관측된 전체 입자의 블랙카본 농도와 비교를 비롯하여 입자 계수기 수농도에 따른 블랙카본 비율 등 다양한 관측 장비의 결과물과 상호 분석이 가능함.
- 실시간 탄소 분석기는 1분당 80MB 크기의 자료가 집록되기 때문에 정상적인 운영을 위해서는 추가적인 외부 기록장치가 반드시 필요하며 숙련된 이용자의 효율적인 시퀀스 작성과 적정한 수준에서 장비 성능 조절이 요구됨.

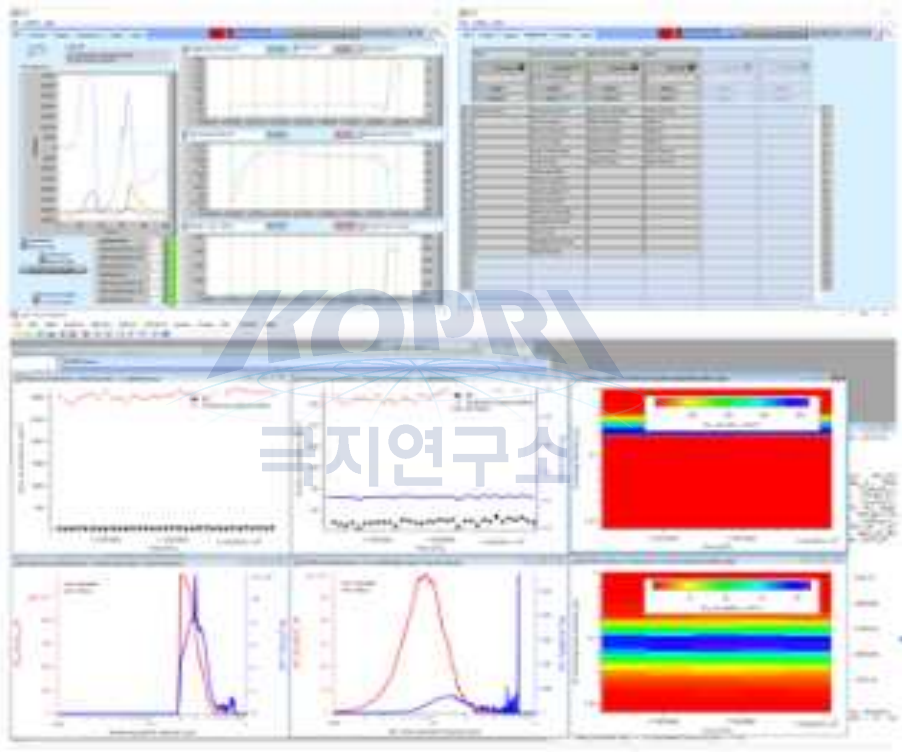


Fig. 50. Results of black carbon numbser concentration, mass and size distribution by SP2-D.

- 실시간 탄소입자 분석기 시험 운영 집록한 자료를 분석하기 위해 이용해 온 후처리 프로그램 PAPI의 기술지원 불가 및 기능 제한으로 인하여 후처리 프로그램을 PSI로 대체함.
- PSI는 제조사인 DMT에서 제공한 프로그램으로 기존 PAPI의 경우 후처리시 자료의 불러오기, 추출 그리고 그림표출 수준의 제한적인 이용이 가능하였으나 PSI는 시각화된 다양한 분석 방법을 선택할 수 있으며 PAPI에서 없던 여러 기능이 추가된 프로그램임.

▪ **실시간 양자전이 비행시간 질량분석기(high sensitivity proton-transfer-reaction time-of-flight mass spectrometer; PTR TOF MS) 도입 및 작동환경 최적화 진행**

- 자연 유래 다양한 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds)는 질소, 황, 탄소 성분 등을 포함하고 있으며, 대기 중 산화 과정을 거쳐 초 미세입자 형성에 기여함.
- 기존에 북극 대기 휘발성유기화합물 분석에 활용되고 있는 가스크로마토그래피 기반 가스분석 시스템은 중요 황 성분 분석에 우수한 성능을 보이지만, 분석 가능한 휘발성 유기화합물의 종류가 극히 한정적이며, 상대적으로 긴 분석주기(수십분~1시간)를 보이고, 고위험 고압가스(수소, 질소 등)를 필요로 하기 때문에 극지역에서의 연구에 한계가 있음.
- 따라서 다양한 자연 유래 VOC 성분의 농도 변화를 실시간 관측하고 북극 대기 에어로졸 물리화학 특성 변화와의 상관성을 비교하기 위하여 'VOC 실시간 관측 질량분석기 (제작사명: IONICON, 모델명: PTR-TOF 4000X2)'를 도입함.
- 'VOC 실시간 관측 질량분석기(PTR-TOF 4000X2)'의 주요 특징 및 성능은 아래와 같음
  - ✓ Ion source: hollow cathode discharge를 통해 reagent ion 생성 (H+, O2+, NO+)
  - ✓ Drift tube: 생성된 reagent ion이 drift tube 전단에 주입되어 sample과 반응하여 product ion 생성
  - ✓ Analytic Quantitation: 생성된 product ion이 time of flight mass filter (분자당 비행시간 차이 이용)를 통해 질량 별로 분리되어 분석 대상 물질의 농도 관측
  - ✓ **Mass resolution : typical > 4000 m/Δm(FWHM) for m/z > 147**
  - ✓ Detection Limit: m/z 181 < 10 pptv (1 sec), m/z 181 < 1 pptv (60 sec)
  - ✓ Mass Range : 0 ~ 10,000amu
  - ✓ Response time: < 100ms
  - ✓ Linearity range (limited by ionization): 5 pptv - 5 ppm
- 해당 장비 구입을 위해 2022년에 국가연구시설장비 심의 평가를 실시하였으며 아래와 같이 장비 구축의 타당성이 인정되었음 (심의일자:2020-05-24, 심의번호:심22-254).
- 'VOC 실시간 관측 질량분석기' 도입 관련 상세 일정은 아래와 같음.
  - ✓ 연구시설 장비 예산심의 결과 발표: 2022년 5월 24일
  - ✓ 연구 장비 구매(외자) 발의: 2023년 4월 18일
  - ✓ 연구 장비 국내 입항 및 통관: 2023년 11월 23일
  - ✓ 연구 장비 납품 및 극지연구소 소내 설치: 2023년 11월 24일
  - ✓ 연구 장비 안정화: 2023년 11월 27일 이후
- PTR-TOF MS(Proton Transfer Reaction Time-of-Flight Mass Spectrometry)는 고감도 분석, 고순도 Primary Ion 사용, 실시간 분석 및 다양한 VOC 분석의 가능성 등 여러 가지 기술적 장점을 제공하는 분석 장비임.
- 특히, 고순도 H_3O^+ 이온을 Primary Ion으로 사용하여 99.5% 이상의 순도를 유지하며, 이를 통해 mass filter 없이 실시간으로 VOC의 화학적 변화를 정확히 분석할 수 있음. 이로 인해 ppt 수준의 매우 낮은 농도의 VOC도 효과적으로 분석할 수 있으며, 다양한 환경에서 대기질을 효율적으로 모니터링 할 수 있음.
- PTR-TOF MS는 또한 CI(Chemical Ionization) 방식의 이온화 기술을 활용하여 VOCs를 분석함으로써 분자 손상 없이 정확한 데이터를 제공함. 이 이온화 방식은 기존의 전자 충격 기반 이온화(EI) 방식에 비해 높은 감도와 효율을 보이며, 신뢰할 수 있는 정밀한 결과를 도출함.
- 특히, PTR-TOF MS는 CHemical Analysis of aeRosol ON-line(CHARON) 기능과 결합하여 에어로졸의 화학적 성분과 크기 분포를 실시간으로 측정하는 독보적인 기능을 제공함.
- CHARON을 사용함으로써 대기 중의 가스 및 에어로졸의 물리화학적 특성을 정확하게 분석할 수 있으며,

이 결합된 시스템을 통해 극지 환경을 포함한 다양한 환경에서 가스 및 에어로졸의 농도와 변화를 실시간으로 모니터링함으로써, 대기질 변화에 대한 좀더 정밀한 분석이 가능함.

- PTR-TOF MS 교정 과정은 크게 가스 영역에서의 교정과 결합된 CHARON을 이용한 입자 교정으로 이루어지며, 가스 영역에서의 교정 과정은 다음과 같음. 1) TO14 standard gas를 활용하여 희석농도 10ppb에서 1ppb까지 PTR-TOF MS를 통해 측정, 2) 측정된 데이터를 활용해 Mass Calibration, 3) determine and update the transmission, 4) xCU Calibration.
- PTR-TOF MS와 결합 된 CHARON을 이용한 입자의 이온화 효율 교정은 레보글루코산의 이온화 및 이온 전달 효율을 측정하며, 교정 장치는 입자 발생기-드라이어-SMPS-PTR TOF MS, CPC의 순서로 구성됨(Fig. 51).
- 입자 교정의 순서는 다음과 같음. 1) 레보글루코산의 수농도를 100nm부터 500nm까지 조절하여 CPC와 PTR-TOF MS with CHARON으로 측정함, 2) 측정한 CPC의 수농도를 질량농도로 변환함, 3) PTR TOF MS와 CPC의 질량 농도비를 구해 Enrichment factor값을 산정.

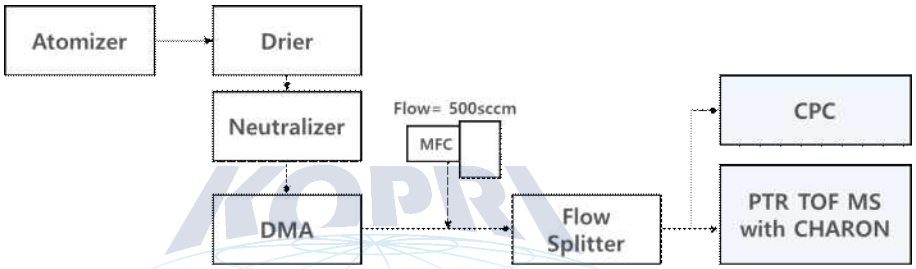


Fig. 51. Schematic diagram of high-sensitivity proton-transfer-reaction time-of-flight mass spectrometer (PTR-TOF MS) combined with CHARON for calibration.

바) 이동식 에어로졸 및 미량기체 관측 플랫폼 구축 및 집중 현장 캠페인 수행

- **이동식 에어로졸 및 미량기체 관측 플랫폼 신규 구축을 위한 사전 조사 수행 및 설계**

- 타 기관 및 해외 연구 사례를 바탕으로 에어로졸 현장 관측에 적합한 형태의 이동식/고정식 관측 플랫폼 제작 및 운영 방식을 조사함. 다양한 지역에서의 에어로졸 현장 조사를 위한 에어로졸 관측 플랫폼은 주로 1) 컨테이너, 2) 차량형, 3) 카라반 타입으로 구분되며 각각 아래와 같은 특징을 보임(Table 3)(Fig. 52~53).

Table 3. Mobile aerosol measurement platform characteristics.

플랫폼 유형	이동 방식	특 징
컨테이너	중장비 및 차량 필요	✓ 다양한 장비를 안정적으로 설치 가능 ✓ 한 장소에서 집중 관측시 안정적 내부 공간 활용 용이
차량형	자체 이동 가능	✓ 이동이 가능하며 이동 중 관측 가능 차량에서 발생하는 오염원 처리 필요 ✓ 상대적으로 공간 제약이 크며 연구장비 외에 관리 필요
카라반	차량 필요	✓ 이동과 거치에 용이 ✓ 집중 관측시 연구장비 외에 관리 필요

Fig. 52. Aerosol Observing System (AOS) operated by NOAA (National Ocean and Atmosphere Administration, USA).

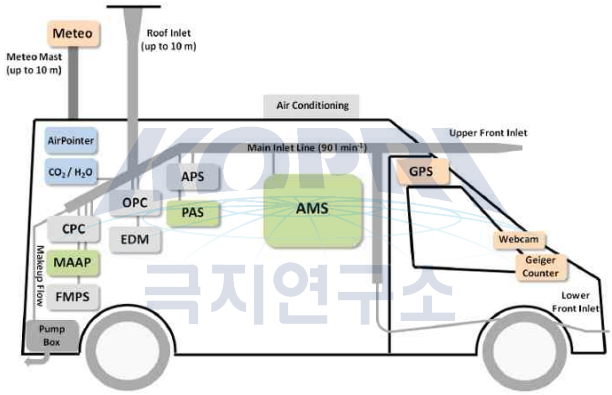


Fig. 53. Mobile Aerosol monitoring platform operated by Max Plank Institute (Germany).

- 극지역의 험한 주변 환경과 에어로졸 정밀 관측을 위한 필수 장비 수요 등을 고려할 때, 안정적인 장비 운영 및 현장 설치가 가능한 컨테이너 타입의 모바일 플랫폼의 활용이 용이하다고 판단함 (선박 또는 트럭을 활용한 이동이 용이하며, 동시에 현장 관측지에서의 시설물의 안정적 고정이 가능함).
- 20ft 크기의 컨테이너를 개조하여 외부로 돌출되는 에어로졸 인렛(공기 흡입구)을 안정적으로 설치할 수 있으며, 컨테이너 내부에는 다양한 에어로졸 관련 연구 장비의 고정 및 각종 전기, 네트워크 배선이 가능하도록 구성함(Fig. 54).
- 아이슬란드 대학 연구팀과의 지속적인 온라인 연구 협의를 통해 신규 구축 예정 관측 플랫폼의 스토르호피이 지역 설치 가능 여부 및 현장 연구 방안에 대한 논의를 진행함.

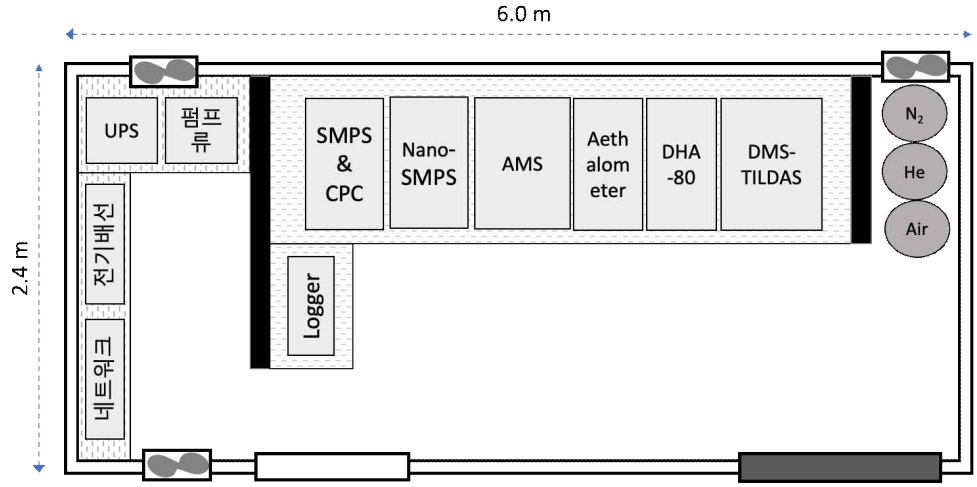


Fig. 54. Conceptual assembly of container type serosol measurements platform.

▪ **신규 에어로졸 관측 플랫폼 활용성 제고를 위한 연구 장비 조사**

– 컨테이너 타입 관측 플랫폼의 특성과 극지역에서의 연구 효율성 및 수월성을 고려하여, 본 연구 사업에서 목표로 하는 북극 대기 에어로졸 형성–성장 연구를 위한 필수 에어로졸 현장 관측 장비에 대한 조사를 수행함.

– 에어로졸 연구장비 선정에 대한 주요 고려 사항은 다음과 같음. 1) 극지역의 제한적인 접근성을 고려하여 최소한의 인력으로 상시 작동이 가능한 연구 장비 (예: High volume air sampler), 2) 온라인 연결을 통해 장비 상태 및 데이터 백업이 가능한 실시간 관측 장비 (예: DMS–TILDAS, Aethalometer), 3) 일정 수준의 장비 운영 노하우 및 유지 인력을 필요로 하지만 집중 관측 기간 동안에 반드시 가동되어야 하는 연구 장비임 (예: Scanning Mobility Particle Sizer, Condensation Particle Counter, Aerosol Mass Spectrometer).

– 위 장비 선정 고려 사항을 기준으로 1), 2)에 해당하는 연구 장비는 현지 인력을 활용하여 상시적인 운영이 가능하도록 구성하며, 3)에 해당하는 연구 장비는 전문 연구인력의 현장 조사 시기에 맞추어 집중 현장 관측 연구가 가능하도록 연구 장비를 구성함 (아래 그림)(Table 4).

KOPRI 극지연구소

Table 4. Proposed aerosol monitoring instruments in the mobile platform.

장비명	목적	크기[mm] /무게[kg]	소비전력	소모품	관리 사항
High volume air sampler (DIGITEL/ DHA-80)	에어로졸 입자 필터 포집	600x310x1360 /65	Max. 600W 100 to 240VAC 50/60 Hz	-	상시 가동 (정기적 단순 필터 교체 필요)
DMS-TILDAS (Aerodyne)	실시간 DMS 분석	530x660x710 /72	500W 100 to 240 VAC 50/60 Hz	-	상시 가동 (온라인 연결)
Aethalometer (MAGEE/ AE33)	블랙카본 실시간 측정	280x430x330 /20	25W (최대 90W) 100 to 240VAC 50/60Hz	-	상시 가동
Scanning Mobility Particle Sizer (TSI/ 3938 Series SMPS)	입자 크기별 실시간 측정	480x440x670 /30	100 to 240 VAC 50/60Hz	부탄올	집중 관측기간 가동
nano-SMPS (TSI 3938E57 1nm SMPS)	1nm부터 크기별 입자 실시간 측정	580x440x653 /40	100 to 240 VAC 50/60Hz	부탄올	집중 관측기간 가동
Condensation Particle Counter (TSI/ CPC3756, CPC3750)	2.5, 7.0㎚ 이상 입자수농도 측정	301x281x354 /9.1	100 to 240 VAC 50/60Hz	부탄올	집중 관측기간 가동
Aerosol Mass Spectrometer (Aerodyne)	에어로졸 화학특성 실시간 측정	1050x600x1340 /170	600W 110VAC/60Hz or 220VA/50Hz	-	집중 관측기간 가동

KOPRI 극지연구소

▪ **신규 에어로졸 관측 플랫폼 제작**

- 위 연구 목적 및 운영 장비 사양을 고려하여 20ft 컨테이너(가로 5.9m, 폭 2.3m, 높이 2.4m) 기반 이동식 실험실 제작 완료.
- 이동식 컨테이너는 안전한 작업환경을 유지하기 위해 펌프 및 분전함 공간과 연구장비 설치 공간을 분리하여 제작.
- 옥상부에 대기 에어로졸 및 가스 시료 유입을 위한 인렛 공간 4곳을 타공하였으며 분석 목적에 따라 필요한 인렛의 형태를 달리할 수 있음.
- 다양한 연구장비 (에어로졸 물리화학특성 실시간 관측 장비, 미량기체 분석 장비 등) 운영을 위한 충분한 공간을 확보하였으며, 환기시설, 소방시설 및 응급 용품을 설치 및 비치하여 연구자의 안전한 업무 수행을 고려함.
- 외부에서 공급되는 전기선과 통신선을 쉽게 연결하기 위하여 일원화된 함체를 외부에 설치하였으며 통신의 경우 유/무선 통신 모두 이용 가능하도록 유/무선통신기기를 설치함.
- 실내 공기 순환을 위해 3대의 환기시설이 있으며 극지역의 강풍으로 인한 직접적인 피해를 방지하기 방풍막을 설치함.
- 가스 실린더 적재 공간은 다양한 크기의 실린더를 고려하여 범용적인 시설을 설치함.
- 옥상부 활동시 이동성과 안전성을 고려하여 설치와 해체가 가능한 안전난간을 설치했으며 연구 확장성을 고려하여 옥상부 바닥은 그릴 형태로 마감하여 추가적인 장비 설치시 더욱 유용하게 함.

▪ **이동식 에어로졸 및 미량기체 관측 플랫폼 제작 및 시험 운영**

– 극지역의 극한 환경에서 에어로졸 정밀 관측 고도화의 일환으로, 필수 장비를 탑재할 수 있는 컨테이너 타입의 이동식 에어로졸 관측 플랫폼을 제작 완료하여, 2023년 8월 10일 울진 동해연구소로 이전 설치함(Fig. 55).

Fig. 55. Exterior of the mobile Aerosol measurements platform installed in Korean Institute of Ocean Science and Technology, East Sea Environment Research, Uljin.

KOPRI 극지연구소

– 2023년 8~9월 울진 동해연구소에 설치되어 있는 이동식 에어로졸 관측 플랫폼에 에어로졸 관측을 위한 다수의 필수 연구 장비를 이전 설치함.

– 이동식 에어로졸 관측 플랫폼 내부에는 설치된 주요 관측 장비는 다음을 포함함: DMS-TILDAS(Aerodyne), GC-PFPD(Agilent Technologies), High volume air sampler(DIGITEL/DHA-80), Condensation Particle Counter(TSI/CPC3776), Aethalometer(MAGEE/AE22), Wind sector controller(Fig. 56).

Fig. 56. (left) Aethalometer, Condensation Particle Counter installed inside of the mobile platform and (right) wind sector controller located on the roof of the mobile platform.

- 현재 이동식 에어로졸 관측 플랫폼 내부에 설치되어 DMS-TILDAS는 대기 중 ppt 수준의 DMS 성분을 양자 폭포 레이저 방식을 활용하여 초단위로 분석할 수 있는 최초의 광학기반 DMS 분석 장비임.
- 2023년 3월부터 극지연구소 연구실에서 장비 성능과 관련하여 개별 검증 및 GC-PFPD 장비와 상호 비교 검증을 수행하였고, 현재는 울진 동해연구소에 위치한 이동식 에어로졸 관측 플랫폼에 이전 설치하여 현장 관측을 수행함(Fig. 57).
- GC-PFPD 방식의 DMS 분석 장비는 현재 스발바르 제플린 관측소 및 아이슬란드 스토르호퍼이 관측 거점에서 DMS 현장 관측에 활용되고 있는 장비와 동일한 장비로 약 30~1시간 간격으로 대기 중 ppt 수준의 DMS 연속 관측할 수 있음. 반면, TILDAS 장비는 기존 장비에 비해 현저히 빠른 시간 간격으로 ppt 수준의 DMS를 분석할 수 있음(아래 그림).
- 해양 유래 DMS 성분 대발생이 일어나는 2024년 봄철에 두 장비의 유사성 분석 및 에어로졸 입자 발생과의 연관성에 관한 집중 관측을 진행할 예정임.

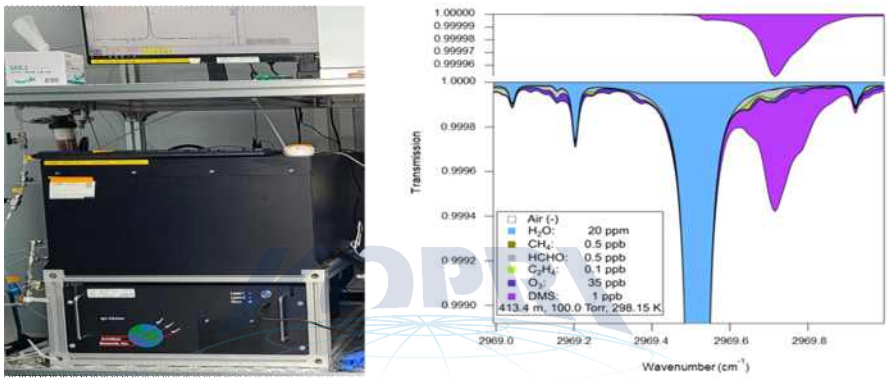


Fig. 57. DMS-TILDAS for in-situ DMS analysis.

- DMS-TILDAS 장비는 QC 레이저, 광학 반사 거울, 샘플 셀, 검출기를 포함한 다양한 광학 구성 요소로 이루어져 있음.
- 울진 동해연구소의 이동식 에어로졸 관측 플랫폼에 설치된 DMS-TILDAS 장비는 Aerodyne Research Inc.(ARI, Boston, USA)에서 ppt 수준의 DMS를 현장에서 관측하기 위해 맞춤 제작되었으며, 원활한 관측을 위해 일련의 구조를 설계하였음(Fig. 58).
- DMS-TILDAS는 2L/min의 유량으로 샘플 공기를 측정하며, 외기 측정 및 표준 가스를 통한 장비 보정을 위해 각 벨브를 이용하여 교차 측정을 수행하였음.

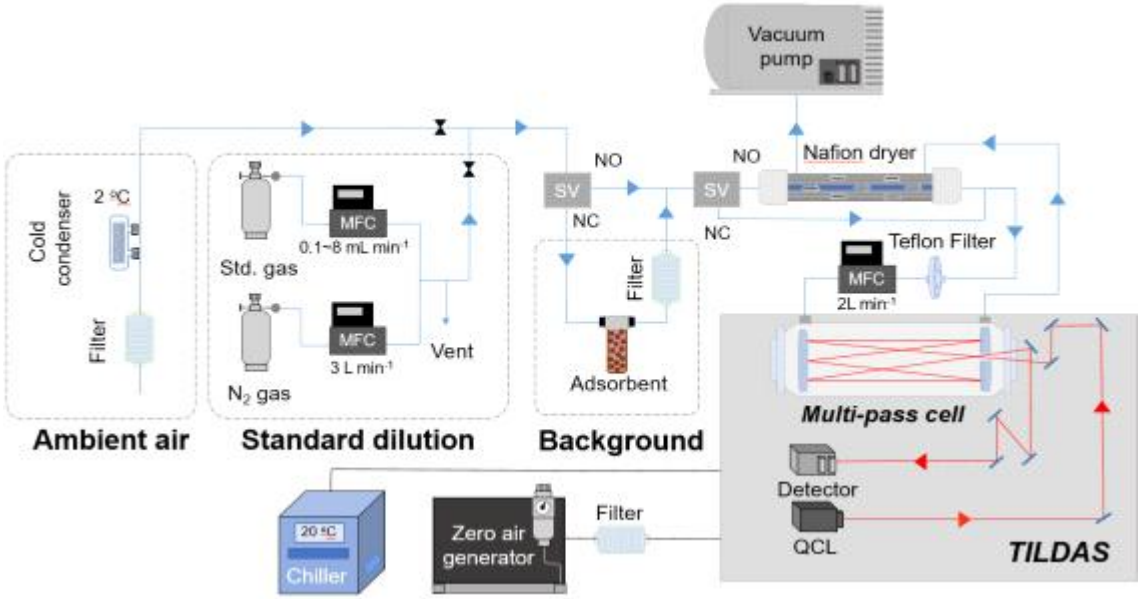


Fig. 58. Schematic representation of the proposed real-time DMS analytical system (DMS-TILDAS).

- DMS 보정은 1.0ppm의 DMS 표준 가스를 초고순도 N_2 (g)로 희석하여 수행하였으며, 효율적인 가스 희석을 위해 DMS 표준 가스는 1/16인치 O.D. PEEK 튜빙을 통해 공급되었고, N_2 (g)는 1/8인치 O.D. PFA 튜빙을 통해 공급되어 가스가 입구에 도달하기 전에 교차 희석을 수행하였음.
- DMS 표준 가스의 유량(0.1~8mL/min)과 N_2 (g) 유량(3L/min)은 고정밀 질량 유량 제어기(MFC)를 사용하여 제어하였으며, 이러한 희석 방법을 통해 50-3,000pptv 범위의 혼합비를 가진 DMS 농도를 정확하게 생성하였음.
- DMS-TILDAS의 보정은 달마다 정기적으로 수행되었고, 10개월 기간 동안 평균 기울기 1.00을 나타냈으며, 평균 분석 오차는 일관되게 10% 이하로 유지되어 본 결과를 통해 DMS 관측의 우수한 정확성 및 정밀성을 관찰하였음(Fig. 59).

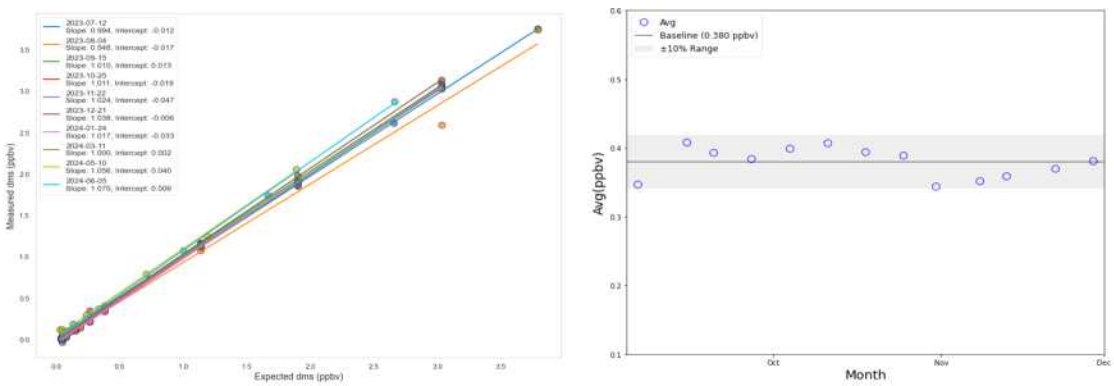


Fig. 59. Calibration data using by diluted standard gas (left), detector response for all measurements of a single DMS standard (right).

- 봄철 조류 대번성으로 인해 대기 중으로 활발히 방출되는 DMS 농도 관측을 위해 2024년 DMS-TILDAS와 이전에 검증된 맞춤 제작 DMS 분석기 GC-PFPD를 활용하여 교차 검증을 수행하였음.
- DMS-TILDAS의 정기적인 제로잉 시간과 GC-PFPD의 샘플 트랩 시간을 고려했을 때, 두 장비에서 관측된 DMS 농도 간에 매우 높은 상관관계(r = 0.92)가 확인되어 DMS-TILDAS의 관측 신뢰성을 검증하였음(Fig. 60).

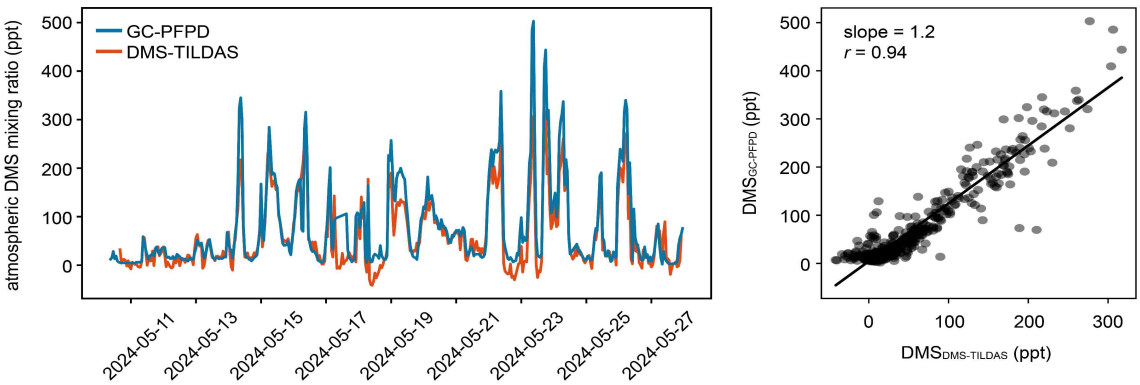


Fig. 60. Mixing ratio of atmospheric DMS measured by DMS-TILDAS and GC-PFPD analyzer (left), and Comparison data between DMS-TILDAS and GC-PFPD for the Uljin measurements (right).

- 인천 극지연구소에서 수행한 DMS-TILDAS와 GC-PFPD의 상호 비교 결과(Slope = 0.91, r = 0.92)와 울진 동해연구소에서의 결과(Slope=1.20, r = 0.92)를 비교하였음.
- 본 결과를 통해 DMS-TILDAS 장비의 현장 관측 신뢰성을 추가적으로 검증하였음(Fig. 61).

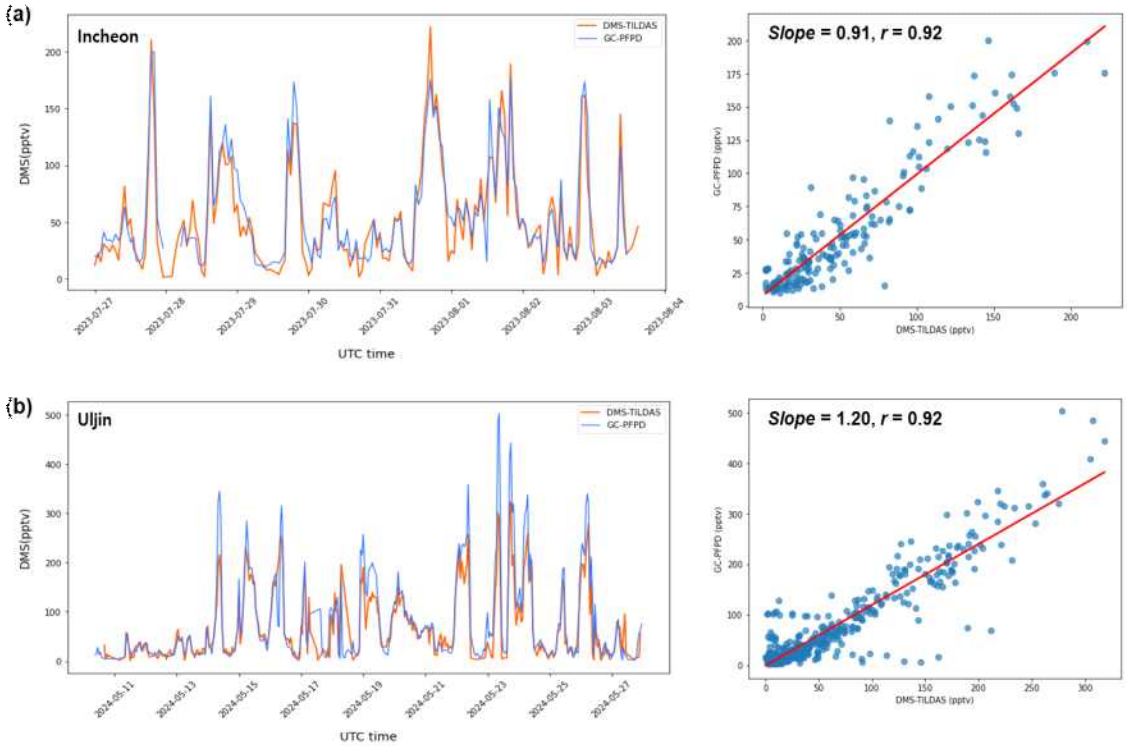
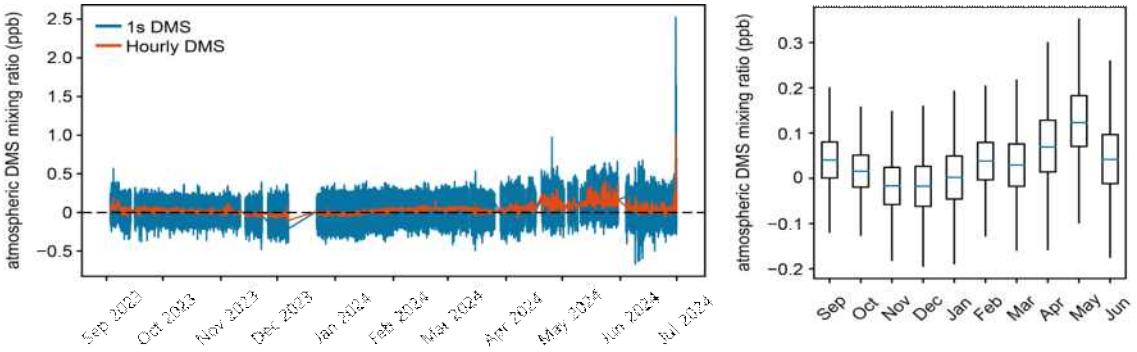


Fig. 61. (a) Comparison of atmospheric DMS mixing ratios measured in Incheon using the proposed DMS-TILDAS (red) and GC-PFPD analyzer (blue). (b) Comparison of atmospheric DMS mixing ratios measured in Uljin using the same instruments.

KOPRI 극지연구소

- 2023년 9월부터 2024년 7월까지 정기적인 보정과 함께 울진 동해연구소에서 장기 관측을 수행하였으며, 기존에 잘 알려진 해양생물 기원 물질인 DMS의 계절 변동성을 관찰하였음 (Fig. 62).
- 겨울철 동안 DMS 농도는 대부분 0 ppt에 수렴했으나, 봄이 시작되면서 농도가 증가하기 시작해 5월에는 최대 평균 농도 약 135 pptv까지 검출되었음.
- 본 연구 결과는 기존의 DMS 관측 기술 GC-PFPD에 비해 실시간 관측 및 유지보수 측면에서 중요한 실용적 이점을 입증하였으며, 이러한 이점을 바탕으로 본 기술은 장기 현장 관측에 유리할 것으로 기대되며, 향후 극지 연구에서 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 예상됨.



	Autumn			Winter			Spring			Sum
Month	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
DMS (pptv)	40.3	15.8	-17.1	-18.1	1.3	38.0	28.8	75.7	134.8	47.7

Fig. 62. Seasonal variations of atmospheric DMS mixing ratios in Uljin by DMS-TILDAS analyzer(left). The data is presented at two temporal resolutions 1Hz (blue) and Hourly data (red). Monthly boxplot showing the seasonal variability of DMS concentrations (right).

- 이동식 관측 플랫폼을 시험 운영하는 기간동안 내부 환경 변화 여부를 파악하기 위하여 실내에 온도-습도 센서를 설치하였으며 에어로졸 전용 인렛에도 추가적인 온도-습도 센서를 설치함. 우리나라의 겨울과 봄은 상대적으로 건조한 특성으로 인하여 특이한 문제는 없었으나 고온다습하고 집중적인 강우가 발생하는 여름에는 에어로졸 인렛 내부 상대습도가 100%까지 도달하는 등의 문제가 발생하여 정상적인 관측을 수행함에 있어서 치명적인 문제가 발생함.
- 2024년 5~10월 기간동안 에어로졸 물리특성 측정을 위해 구름 응결핵 계수기(DMT/CCN-100), 입자 크기별 입자 측정기(TSI/SMPS)를 운영하였으며 기설치되었던 Aethalometer(AE-22)의 노후로 인하여 AE-33 모델로 대체하여 측정을 수행함.
- 시험 운영기간 중 집록된 바람 성분을 분석한 결과 주풍향은 남서풍(210~240°) 계열로 나타났으며 그 외에는 북풍 계열(330~30°)의 바람의 빈도가 높게 나타났으며(아래 그림), 강한 바람이 불어오는 경우 해안가가 위치한 동풍계열(60~120°)로 풍속 14m/s 이상이 측정된 경우가 있었으나 주풍향인 남서풍의 경우는 2m/s 이하로 약한 바람이 높은 빈도로 측정됨. 이러한 풍속 차이는 현지 위치가 동쪽으로는 개방된 해안 지역인 것에 반해 서쪽으로는 낮은 산이 위치해 있기 때문인 것으로 판단됨 (Fig. 63~64).

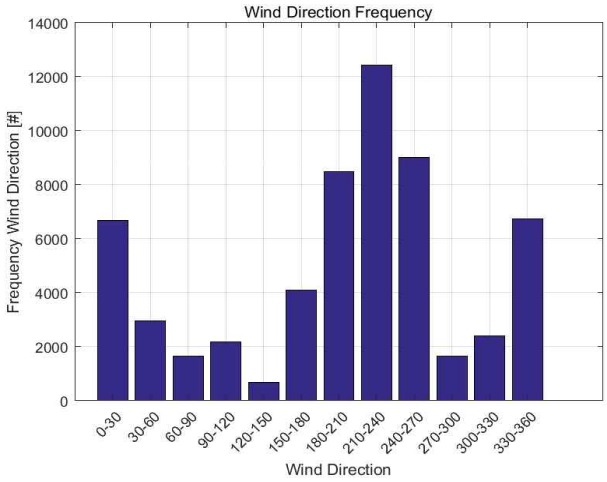


Fig. 63. Frequency of wind direction for each wind direction.

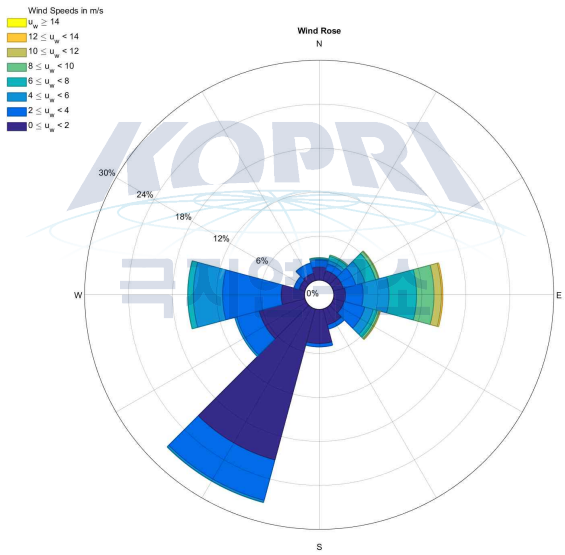


Fig. 64. A main wind direction is generally southwest and strong windy is coming east direction from east sea.

- AE-33을 이용하여 측정한 블랙카본 질량 농도는 5월 609.8±354.4ng/m^{3}로 가장 높았으며 8월 250.0±293.4ng/m^{3}로 가장 낮게 측정되었으나 전체적인 경향성을 판단하기에는 측정자료가 부족함 (Fig. 65).

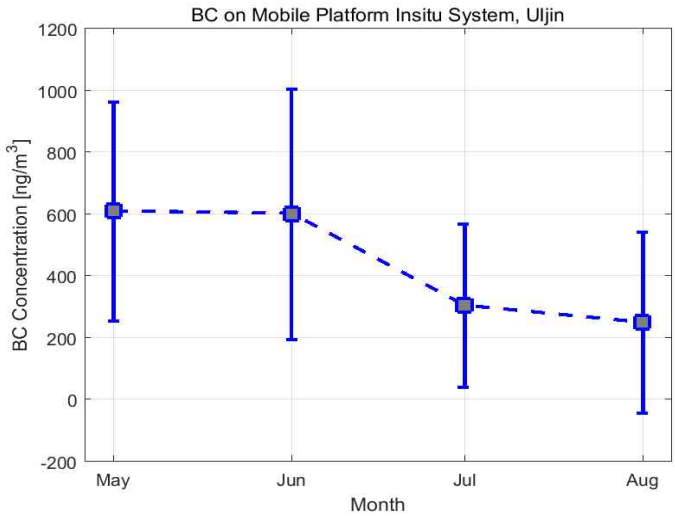


Fig. 65. Black carbon mass concentration[ng/m^3] monthly mean and standard deviation on mobile plaform in Uljin.

– 구름 응결핵 계수기를 이용하여 대기 중 입자가 얼마나 구름 응결핵으로 성장이 가능한지를 연속 측정함. 시험기간 동안에는 0.2부터 1.0%까지 0.2% 단계로 측정하였으며 많은 선행연구에서 이용하는 과포화도 0.4%를 기준으로 가장 높았던 것은 5월 1,969±1,169/㎤로 측정되었으며 대표적인 특성 또는 계절적 특성 등을 분석하기 위해서는 추가적인 측정이 필요함(Fig. 66).

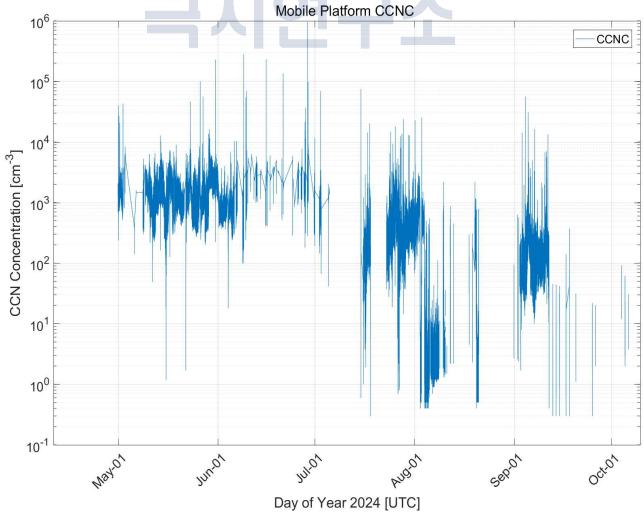


Fig. 66. Time series of CCN number oncentration by cloud condensation nuclei counter(CCNC) 1st May to 1st Oct 2024.

– 대기 중 에어로졸 입자의 생성과 성장을 분석하기 위하여 SMPS를 설치 운영하였음(Fig. 67).

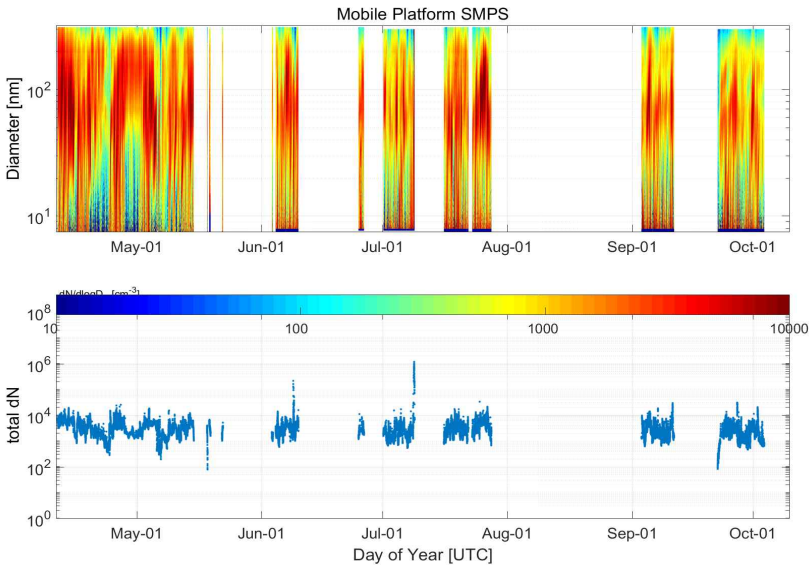


Fig. 67. Time series of scanning particle number concentration[dN/dLogD$_p$] for each diameter and total number concentration[#/cm^3] by SMPS from 1st May to 1st Oct 2024.

– 일부 소모품성 장비의 문제로 인하여 10nm 이상의 입자 총 수농도를 측정하는 입자 계수기만을 이용하여 측정을 이어가고 있음(Fig. 68).

KOPRI 극지연구소

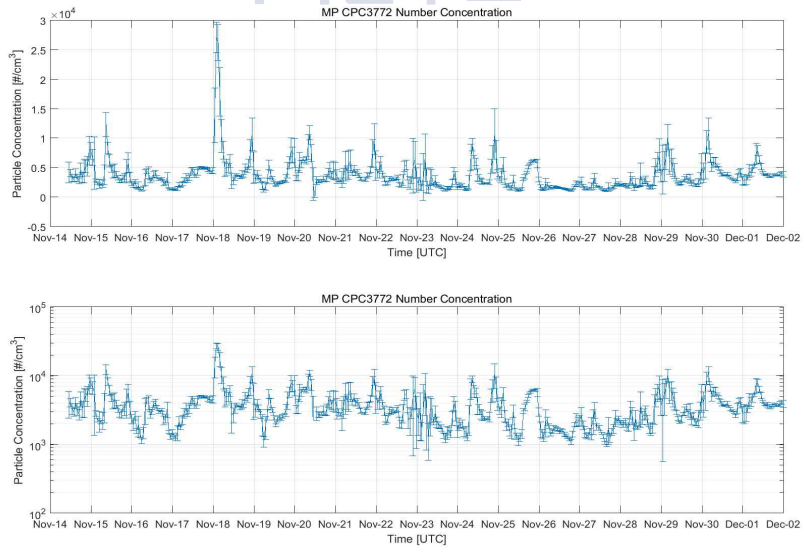


Fig. 68. Time series of hourly mean particle number concentration with standard deviation by CPC3772 from 14th Nov to 2nd Dec 2024.

– 단일 입자 탄소의 특성 분석을 목적으로 single particle soot photometer(SP2-D)를 시험적으로 설치하여 운영하였으나 주변 관측 환경의 영향으로 인한 장비 성능 저하로 인해 제한적인 수준에서 측정을 수행하였으나 향후 시설 보완을 통하여 양질의 측정이 가능함을 확인함(Fig. 69).

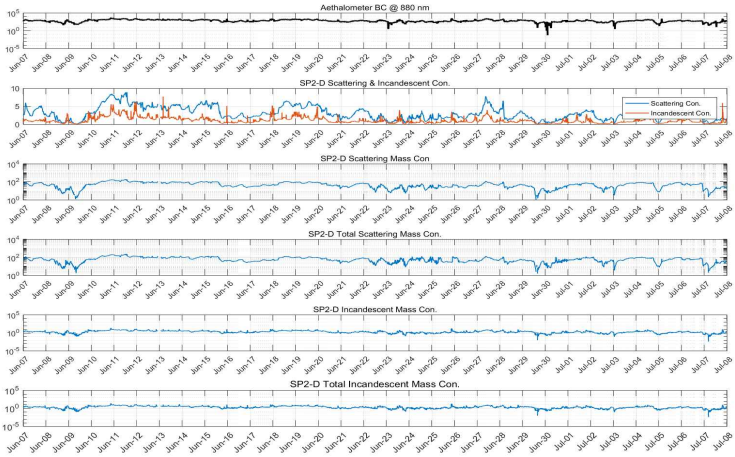


Fig. 69. A Time series of comparison between aethalometer(AE-33) and single particle soot photometer(SP2-D) from 07th Jun 2024 to 08th Jul 2024.

– 시험 기간 중 우리나라의 고온다습한 여름 계절 특성과 함께 강우로 인하여 에어로졸 물리 특성 측정 장비에 심대한 문제가 발생하여 정상적인 측정에 문제가 발생함(Fig. 70). 이를 해결하기 위해 향후 이동식 관측 플랫폼 내에 항온 항습 시설이 보완 및 에어로졸 장비 인렛 개선이 필요함. 또한 현장에서 잦은 정전으로 인하여 연구 장비에 영향을 줄 수 있으므로 무정전 전원공급장치 등의 대책이 필요함.

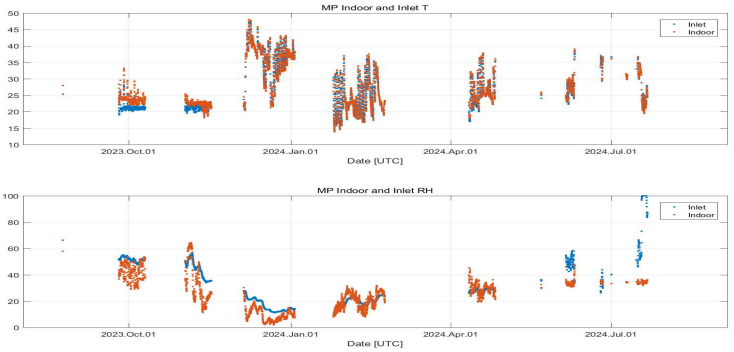


Fig. 70. Time series of temperature and relative humidity both indoor(orange) and aerosol main inlet(blue).

사) 아이슬란드 기반 해양기원 DMS 배출 특성 및 에어로졸 생성 연구

– 아이슬란드 스토르호퍼이 관측소에서 확보한 대기 DMS 농도 변화자료와 공기궤 역궤적 추적 자료 및 인공위성기반 해양생산력 자료를 비교 분석함.

- 분석기간 (2019년 5월 11 ~ 31일) 동안 아이슬란드 대기 DMS 농도는 급격한 일변화를 보였으며, 주요 해양기원지별 DMS 발생특성 차이를 유추해 보기 위해 공기궤 역궤적 자료를 바탕으로 DMS 기원지 해역을 북동(NE), 북서(NW), 남동(SE), 남서(SW) 지역으로 분류함(Fig. 71).
- 대기 DMS 농도 변화가 분석된 기간 동안의 공기궤 역궤적 자료와 인공위성 기반 해양 표층 엽록소 농도 변화 값을 병합하여, DMS가 스토르호피이에서 관측된 시간에 공기궤가 해양 일차생산자에 노출된 정도(air mass exposure to chlorophyll *a*; Echl)를 수치화함.
- 주요 기원지별 DMS 평균 농도는 유의미한 차이를 보이지 않았지만, Echl 값은 주요 해역 별로 큰 차이를 보임. 특히, 북동(NE) 지역에서 유입된 공기궤는 가장 높은 Echl 값을 보인 반면, 남동(SE) 지역에서 유입된 공기궤는 가장 낮은 Echl 값을 보임.
- DMS-to-Echl 계산을 통해 해양 일차생산자의 단위 생물량 당 DMS 발생 능력을 유추 할 수 있음. 즉, DMS-to-Echl 값이 높은 지역은 DMS 및 DMSP(DMS 전구물질)의 생산이 상대적으로 활발한 지역임을 유추할 수 있음.
- SE 지역의 DMS-to-Echl 값은 다른 두 주요 기원지 (즉, SW, NE)에 비해 약 2배 이상 높음 값을 보임.

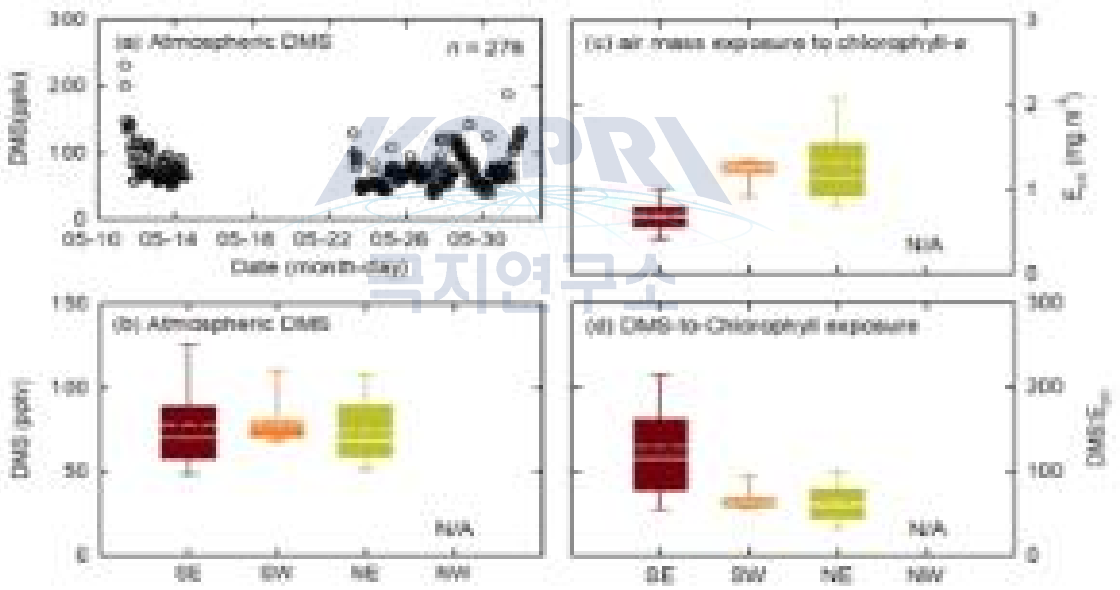


Fig. 71. (a) Atmospheric DMS mixing ratios measured at Heimaey, Iceland in May 2019. Box plots for (b) the atmospheric DMS mixing ratio, (c) the air mass exposure to chlorophyll *a* (Echl), (d) the DMS:Echl ratio for the air masses originated from the SE, SW, NE and NW domians, respectively.

- 동 시기에 '포항공과대학교-아이슬란드 Marine and Freshwater Research Institute' 간 협업을 통해 확보한 해양 생물특성 자료(표층 DMSP, Chlorophyll *a* 농도 등)를 분석 진행 중.
- 추후 대기 DMS 관측자료 및 위성 자료를 통해 확인한 주요 해양별 DMS 발생 능력 차이 값과 (즉, DMS-to-Echl), 실제 선박을 통해 확보한 해양 생물 특성 자료와의 일치성 여부를 확인하고자 함.
- 아이슬란드 스토르호피이 관측 거점에서 확보한 대기 DMS 농도 변화자료를 인공위성 기반 해양 생산력 자료, HYSPLIT 모델 기반 공기 이동 경로 자료 및 아이슬란드 공동연구팀 (아이슬란드 대학 및 아이슬란드 Marine and Freshwater Research Institute)에서 제공하는 해양 생물 특성 자료와 비교

분석함.

– 아이슬란드 스토르호피이 관측 거점에서 관측된 DMS 성분은 급격한 계절 변화 및 일변화를 보이며, 이러한 변화는 공기궤의 기원지 이동 및 해양생물 특성에 영향을 받음. 해양 특성 및 기원지 특성을 효과적으로 구분 짓기 위하여 연구 대상 지역을 아이슬란드 관측 거점을 기준으로 북동(NE), 북서(NW), 남동(SE), 남서(SW) 지역으로 분류함(Fig. 72).

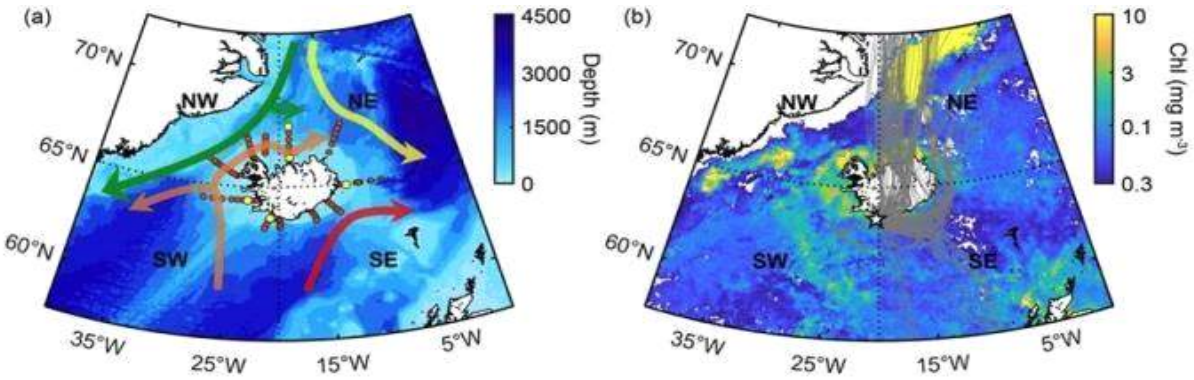


Fig. 72. Location of research domains. (a) Circles indicate seawater sampling locations in the vicinity of Iceland. The arrows indicate major currents around Iceland. (b) Monthly meam chorophyll *a* concentration for May 2019 overlaid with the 2 day air mass back trajectory. The star symbol shows the location of atmospheric DMS observation site.

– 아이슬란드 Marine and Freshwater Research Institute 및 포항공과대학교와의 협업을 통해 DMS 대기 관측기간 동안 아이슬란드 인근 해양의 주요 식물플랑크톤 특성 변화 및 DMSP (DMS 전구물질) 농도 변화 자료를 확보하였음.

– 전체 연구 기간에 걸쳐 해양 일차 생산량(chlorophyll *a*) 증가는 해양 표층 DMSP 농도 증가로 이어졌으니, 각 해양별 해양 일차 생산량과 DMSP 농도는 상이한 상관성을 보임. 특히, 2019년 SE 2018년 NW 지역의 경우 두 인자 간 강한 상관관계 (r^2 = 0.81, 0.87)를 보임과 동시에 DMSP–to–chlorophlly *a* ratio가 각각 25.2, 26.2 수준으로 다른 해역에 비해 월등히 높은 값을 보임 (Fig. 73).

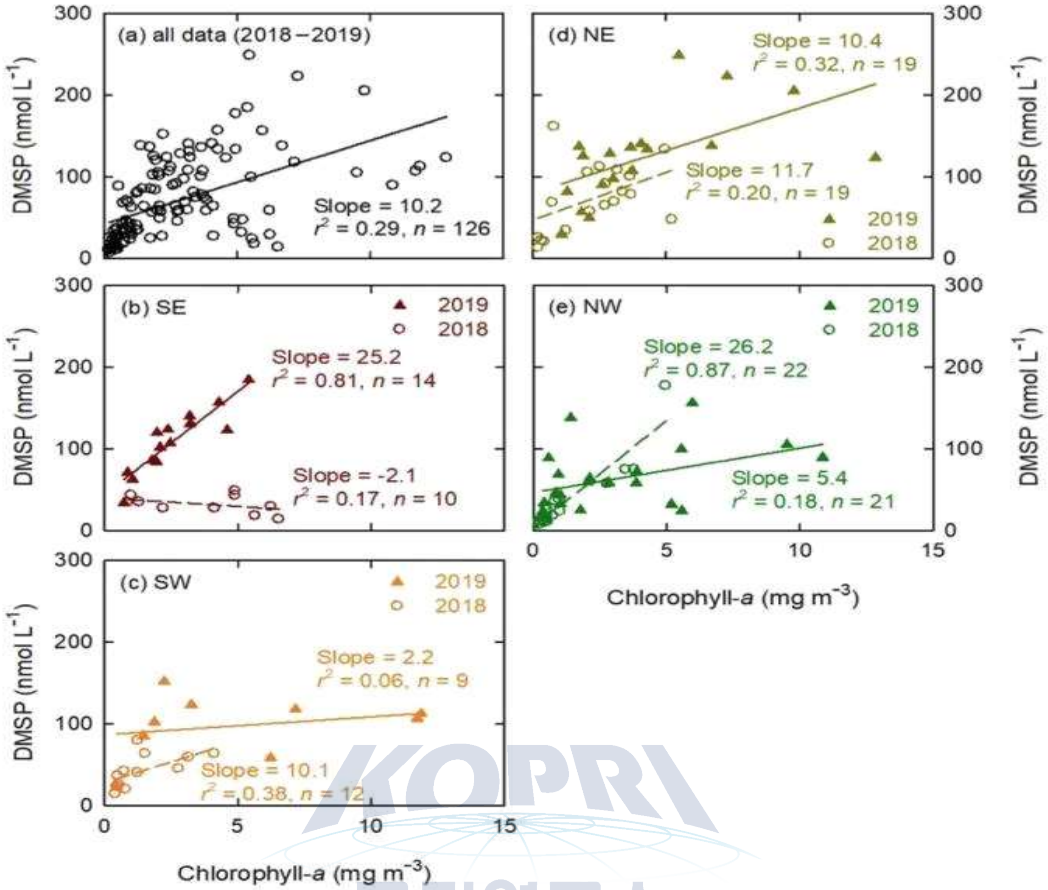


Fig. 73. Relationship between the seawater DMSP and chlorophyll *a* concentration overall and as a function of domain.

- 2019년 SE 2018년 NW에서 높은 DMSP-to-chlorophlly *a* ratio를 보인 이유는 해당 시기 해당 지역에 *prymnesiophyte*와 같이 DMSP 생산에 유리한 식물플랑크톤이 우점하였기 때문임을 확인함. 반면, 상대적으로 두 인자 간에 상관성이 약하게 나타나는 지역에서는 DMSP 생산능력이 극히 낮은 *diatom* 군의 식물 플랑크톤의 상대적 우점도가 높았음을 확인함.
- 아이슬란드 인근 해양 일차 생산자의 종 특성 차이 변화는 아이슬란드 대기에서 관측된 DMS 발생량 변화에 직접적인 영향을 미쳤음. 공기궤 역궤적 분석을 통해 대기 DMS 성분의 주요 기원지를 동일하게 북동(NE), 북서(NW), 남동(SE), 남서(SW) 지역으로 분류한 결과, 스토르호피이에서 관측된 대기 DMS 농도는 남동(SE) 지역에서 공기궤가 유입되었을 때 가장 높은 값을 보이는 것을 확인함.
- 본 연구 결과는 해양 일차 생산력 뿐만 아니라, 해양 식물플랑크톤의 종 조성 변화가 해양 유래 에어로졸 전구물질의 발생에 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사함. 또한, 고정관측 거점에서의 대기 관측, 인공위성 자료 기반 해양 특성 분석 및 광범위한 해양 현장 조사를 동기간에 수행함으로써 관측 결과의 높은 신뢰성을 확보하였음.

아) 북극 관측거점 기반 국제공동 연구 네트워크 구축

- **아이슬란드 스토르호피이 관측거점 기반 국제공동 연구 강화**

- 극지 현장 연구의 수월성과 우수성 확보를 위해 아이슬란드 스토르호피이 관측거점 기반 국제공동 연

구를 강화함(Fig. 74).

- 아이슬란드 Marine and Freshwater Research Institute (MFRI, https://www. hafogvatn.is/en)과의 협업 강화를 통해 해당 기관의 연구선 R/V Bjarni Saemundsson을 공동 활용하고, 다년간 MFRI에서 확보한 해양관측 자료를 공유함.
- 광범위한 아이슬란드 인근 해양 현장 관측 자료를 스토르호피이 관측거점에서 생산된 대기 관측 자료와 상호 비교하여 해양-대기-동토 상호작용 연구의 우수성과 신뢰성을 강화함.

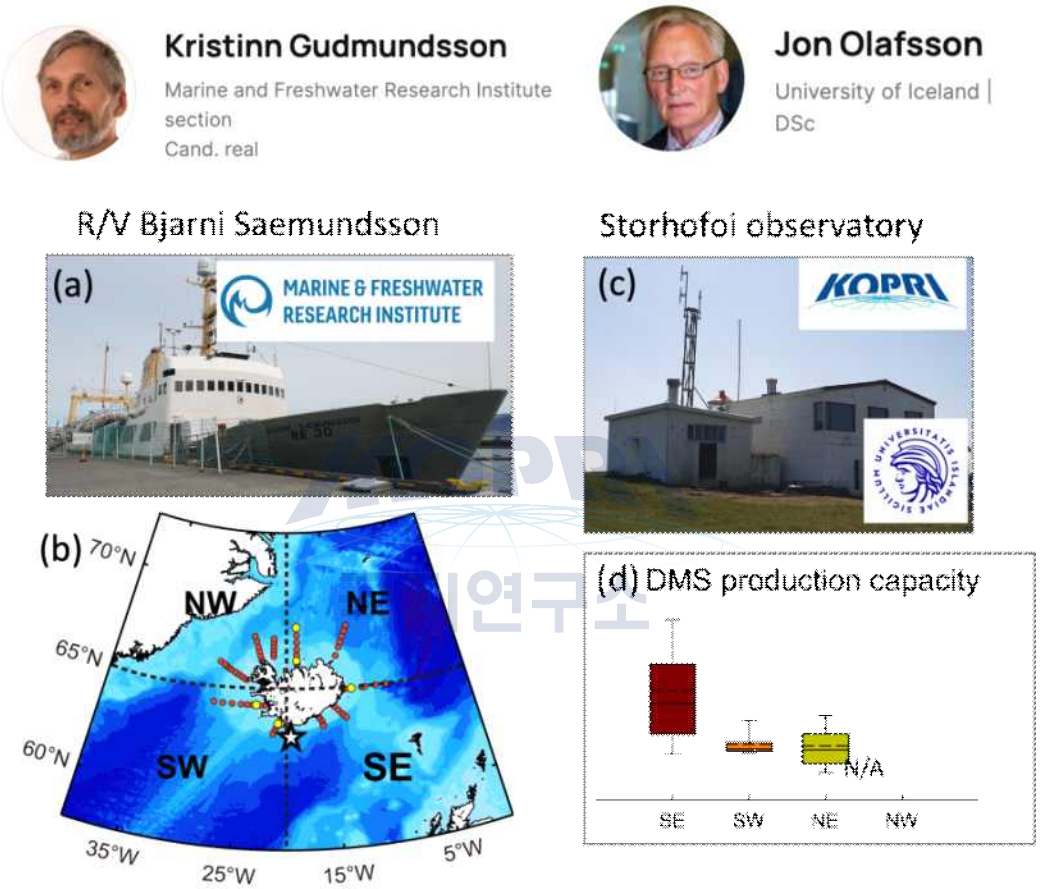


Fig. 74. (a) R/V Bjarni Saemundsson operated by the Marine and Freshwater Research Institute (MFRI), Iceland (Dr. Kristinn Gudmundsson), (b) MFRI sampling locations around Iceland for phytoplankton identification, (c) Storhofoi observatory operated in collaboration between the University of Iceland (Professor Jon Olafsson) and KOPRI, and (d) key results estimated from in-situ DMS measurements at Storhofoi observatory.

- **북극권 에어로졸 흡습성 관측 국제 공동연구 네트워크 구축**

- 북극 대기 중 구름 형성 응결핵의 수농도 데이터 분석 및 에어로졸의 흡습성 측정을 위해서 아이랜드 골웨이 대학과 공동 연구를 진행함.
- 북극 거점 대기 중 HTDMA 및 mono CCN 설치 및 현장 관측 방안 논의.
- 극지 에어로졸 대기 관측 자료 논문화 방법 및 향후 북극 집중 관측 공동연구 자문 수행.

3) (주제-3) 동토 환경인자 관측 및 분석을 위한 Smart Polar Platform 구축 주제

※ 알래스카 카운실 거점 현장 활동(기간 : 2021.09.29~10.04, 2022.09.15.~09.27, 2023.05.29~2023.06.09, 2023.09.10~2023.09.22, 202409.01~2024.09.13)
※ 북극 다산과학기지 현장 활동(기간 : 2022.07.11~07.14. 2023.07.02~2023.07.13)

가) 핵심 목표

글로벌 기후환경변화에 가장 민감 지역인 북극권 육상(동토)-대기 통합 연구개발을 통한 글로벌 이슈 대응 및 활용 기술 개발을 목표로 장기간 고품질의 환경 데이터를 관측을 위해 극지역에 최적화된 하드웨어와 소프트웨어로 구성된 Smart Polar Platform(SPP)을 개발하기 위해 환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 개발, 모니터링 시스템 원격 및 에너지 하베스팅 기술 고도화, CPS/무선센서 네트워크 기반 환경인자 관측시스템 구축 및 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현의 연구를 수행하였음. 이를 통해 환경인자 데이터 신뢰성 향상 및 멀티센서 성능시험, 센싱 데이터 원격 전송 기술 및 복합전원제어 모듈 기술 성능 평가에 대한 연구개발을 수행하여 동토층 환경인자 수집용 자가발전형 통합 복합센서 모듈 개발하고 로깅 시스템 고도화 및 센서 설치를 위한 현장시험 및 위성통신용 게이트웨이 이중화를 통한 성능개선을 적용함. 또한 128개 이상의 환경인자 센싱 데이터를 무선으로 취득하고 데이터수집 상황 악화시 센서 취득부, 위성 통신, 게이트웨이 부분에 이중화를 통한 성능개선을 적용하였음. 본 연구에서는 SPP를 개발하기 위한 용역을 ㈜이커넥트와 극지연구소가 같이 공동업무를 수행하였으며 이에 관한 내용이 포함되어 있음.

※ 본 주제(동토 환경인자 관측 및 분석을 위한 Smart Polar Platform 구축)에서는 북극권 육상-대기 환경인자 기초 데이터 확보를 위해 여러 에너지원을 통합하여 효율적으로 환경변화량을 확보할 수 있도록 고도화를 진행하였음. 본 주제에서의 고도화는 데이터 수집 및 통신의 전력 고도화(안정적인 전력 시스템 구축, 또한 작은 전력에너지를 이용한 센싱 및 통신 기술, 배터리 등의 개수를 최소화 하고 태양열 발전 등을 이용하고 저전력 시스템을 개발) 및 장거리 전송이 가능한 LP-WPAN기반의 인터페이스 모듈을 개발로 관측지역 확대 고도화, 관측센서 개수 확대로 한번에 얻을 수 있는 데이터 확대, 환경인자 관측 요소 추가, 관측 시스템 자료전송 체계 안정화를 주안점으로 자료 수득률을 제고하였음.

나) 추진내용 및 결과

■ 환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 개발(1단계 1차년도)

▪ 동토층 환경인자 통합형 멀티 모니터링 센서 시스템 개발

※ 무인 관측 시스템

- 센서에서 데이터를 수집하여 무선으로 데이터를 전송하는 네트워크를 무선 센서네트워크(Wireless Sensor Network, WSN) 기술이라 하며 이러한 WSN 기술은 인간을 중심으로 하던 정보 운용 형태를 확장하여 인간과 사물뿐만 아니라 사물 간의 정보 공유를 언제 어디서든 가능하게 하는 유비쿼터스 환경을 구현하기 위한 시스템 개발에 초점을 맞춤.
- 특히 WSN은 최근 인기를 끌고 있는 CPS/IoT를 포함하여 더욱더 많은 분야에서 적용되고 있으며 과거에 가격이 부담되었던 기기들은 시간이 지나고 기술이 발전하면서 경제적으로 접근하기 편리해졌고, 이에 따라 많은 분야에서 센서 및 제어 장치를 소형화 한 형태로 만든 후 각종 환경 상태 확인 및 조정에 사용되고 있음.
- 과거에 전력 감당 및 기술의 부족함 때문에 크고 다루기 불편한 기기들이 유선으로 연결되어 네트워크로 구성되었지만, 최근에는 기기의 소형화와 같이, 네트워크를 유선에서 무선으로 바꾸면서

설치 및 유지의 편리함과 미적으로 깔끔한 네트워크가 가능해졌음. 여기에 해당되는 대표적인 예가 바로 무선 센서네트워크임(WSN).

- WSN은 일정 공간 내에 있는 다양한 장치를 연결시켜주는 역할을 함. 예를 들면 공간적으로 분포된 센서들이 온도 및 환경에 대한 정보를 측정한 후, 센서들의 정보를 관리하는 데 유용하게 쓰이는 통신 방식임. 이 센서네트워크 내에서 무선으로 정보를 모으면, 이 데이터는 한곳으로 모여진 다음 유/무선 네트워크를 통해 외부로부터 접속 및 제어 가능하도록 설계되어 있음.
- 극지 환경 관측시스템에 적용하기 위한 사이버-물리 시스템(Cyber-Physical System, CPS)은 관측사이트에 설치된 모든 센서노드와 인터넷 공간의 컴퓨팅 자원이 네트워킹을 통해 유기적으로 융합되어 사물들과 서로 소통하며 자동적, 지능적으로 제어됨.
- CPS는 반응형 처리(Reactive computation)를 통해 입력과 출력을 통해 지속적으로 환경과 상호작용함. 또한 여러개의 연산들이 병행적(Concurrency)으로 처리되고 이들 사이에 정보의 상호 교환이 일어나면서 보다 최적화된 정보를 제공하는데 효과적임.
- 피드백을 통한 물리 센서노드 제어는 센서를 통해 환경 정보를 얻고 구동기(actuator)를 통해 환경에 영향을 미치는 방식으로 물리 공간과 상호 작용도 가능함. 더 나아가 실시간 처리(Real-time computation)는 CPS의 매우 중요한 요소임.
- Fig. 1은 북극 동토층 환경인자 수집을 안정적으로 수행하기 위한 CPS/IoT 기반 무선 센서네트워크를 사용한 무인 관측시스템의 개념도를 나타냄. 무인 관측시스템은 관측 현장에 설치 운영되는 센서를 포함하는 관측 장비와 관측 데이터를 수집 · 저장 · 분석 · 제공하기 위한 플랫폼으로 구성됨.
- 이러한 플랫폼의 실행은 다음과 같은 과정이 필요함.
  ① 센서노드가 근거리 무선 통신을 사용하여 IoT 게이트웨이에 접속
  ② IoT 게이트웨이는 센서노드로부터 수신된 관측 데이터를 인공위성(Iridium-satellite)을 통해 메일서버로 전송
  ③ 메일서버에 전송된 데이터는 SMTP, POP3, IMAP4 프로토콜 변환기를 통해 데이터 관리 서버로 전송
  ④ 전송된 데이터는 데이터베이스에 저장
  ⑤ 저장된 데이터는 시계열 방식으로 시각화되어 연구자에게 제공

※ 성능개선 및 고도화를 위한 위성 통신 이중화 및 게이트웨이 이중화

- 위성 게이트웨이에 적용하기 위한 위성 통신 기술인 이리듐의 경우 전 기간 지구 전역에서 24시간 서비스가 가능한 것을 알 수 있음. 따라서 이리듐 위성 통신 방식을 사용하여 설계하였음.
- Fig. 2는 위성 통신을 사용하는 단말(위성전화기)을 비교 분석한 도식도임. 여기에서 보는 것과 극지방을 포함하여 서비스가 가능한 위성 통신 단말기는 이리듐 통신 방식임. Thuraya와 Globalstar는 서비스 지역이 한정되며 inmarsat의 경우 서비스지역이 전 세계적이긴 하나 본 과업의 결과물을 설치할 지역인 극지방 서비스가 제한적임.
- 위성 게이트웨이는 모든 센서노드로부터 데이터를 수신하여 저장하는 주 장치로 이상 발생시 물리 공간과 사이버 공간의 통신 불능 상태가 되어 CPS 운영 관리 서버로 데이터를 송신하지 못하게 됨. 이를 방지하기 위한 목적으로 위성 게이트웨이 이중화를 Fig. 3(빨간표시)과 같이 제안하였음. 시스템은 전원 충전 시스템과 위성 게이트웨이를 포함하여 하드웨어 장치를 완전 이중화하여 구성하였음. 주 시스템과 보조 시스템의 배터리 충전 상태는 항상 공유하며 보조 시스템은 정상 동작 상태에서 슬립모드 동작으로 저전력으로 동작함. 주 시스템이 정상 동작 상태에서는 항상 주 시스템이 우선 동작하므로 보조 시스템은 배터리가 완충되어 대기(standby) 상태로 동작함.

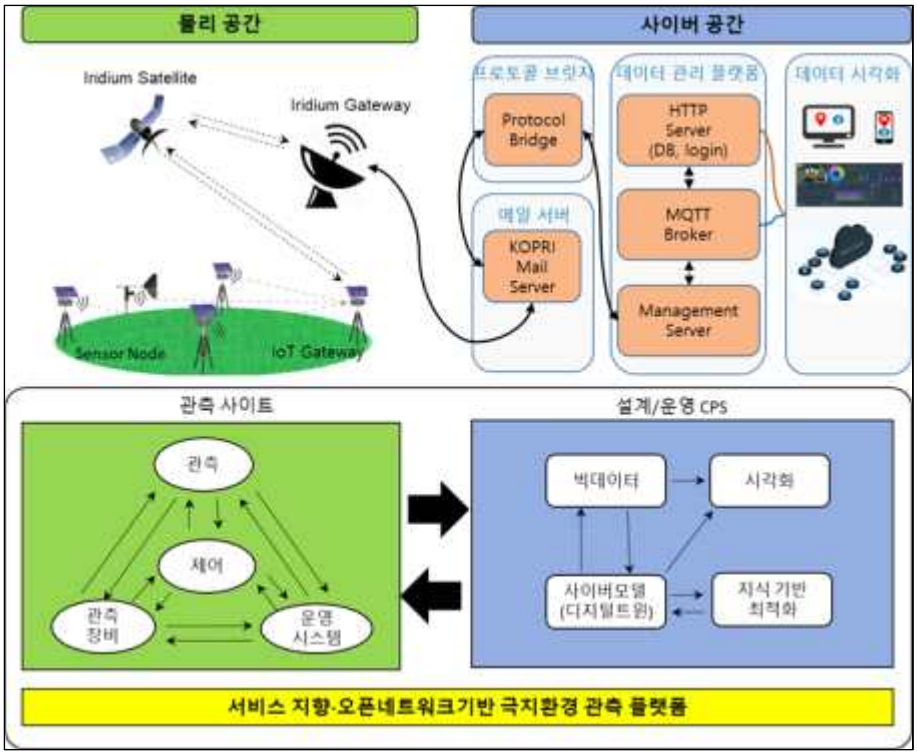


Fig.1. CPS/IoT-based polar environment observation platform.

KOPRI 극지연구소

- Fig. 4는 위성 게이트웨이 구성도를 도식화하여 나타낸 것으로 하드웨어 구성은 태양광 패널(풍력 발전기), 충전 제어기, 위성 통신모뎀, 저전력 근거리(중장거리) 통신 모듈, 제어기 등 주 시스템과 보조 시스템 모두 완전 동일함. 주 시스템의 WPAN 통신 모듈은 코디네이터로 동작하며 앤드디바이스가 전송하는 측정값을 비휘발성 메모리(ROM, μSD, Flash memory)에 저장하고 주기적으로 위성 통신을 통해 인터넷 환경으로 데이터를 전송함. 보조 시스템의 지그비 통신 모듈은 앤드디바이스로 동작하고 또한 위성 통신 모뎀과 제어기는 휴지모드로 동작하여 배터리 소모를 최소로 하여 충전 배터리에 충전되는 용량을 최대로 유지하게 됨. 주 시스템과 보조 시스템은 무선 통신을 통해 상태 정보를 공유하면서 시스템의 이상 유무를 판단함.

- Fig. 5는 설계 제작한 하드웨어를 나타냄. 게이트웨이용 CPU 보드는 ARM Cortex-A8 프로세서, 512MB DDR3, 4GB eMMC, 이더넷 통신 포트, USB 2.0 호스트, UART 3포트, 32GB SD 카드, 확장 I/O 포트로 구성됨. 이리듐(Iridium) 모뎀과 지그비(ZigBee) 통신 모듈은 UART 포트를 통해 연결하게 됨. 센서노드로부터 수집된 센서 값은 실시간으로 SD 카드에 저장되고, 사용자가 설정한 주기로 평균된 값(또는 샘플값)을 이리듐 모뎀을 통해 원격지 서버로 송신함.

	Iridium 9555	Iridium 9575 Extreme	Globalstar GSP-1700	Thuraya XT-Pro	Inmarsat IsatPhone2
Size	143 x 55 x 30 mm	140 x 60 x 27 mm	135 x 55 x 37 mm	128 x 53 x 27mm	169 x 75 x 29 mm
Weight	266g	247g	200g	212g	316g
Battery	3 hours talktime, 30 hours standby	4 hours talktime, 30 hours standby	2.5 hours talktime, 24 hours standby	9 hours talktime, 100 hours standby	8 hours talktime, 160 hours standby
Satellite Coverage	Truly Global	Truly Global	Regional	Regional	Global*
Location Based Services	No	Share location via SMS, Online tracking via SBD, SOS button with GEOS	No	Yes	Tracking button, Programmable assistance button, share location via SMS
SOS Buttor	No	Yes	No	Yes	Yes
Tracking	No	Yes	No	Yes	Yes
Display	Monochrome	Monochrome	Color	Color	Color
Durability	Not Rated	Military Standard 810F	Not Rated	IK05	IK04
Ingress Protectior	Not Rated	Dust Proof, jet water resistant (IP65)	Not Rated	Dust Proof, jet water resistant, shock proof (IP55)	IP65
Send/Receive SMS Messages	Supported	Supported	Supported	Supported	Supported
Ability to use laptop o	Supported	Supported	Supported	Supported	Supported

* Polar regions excluded

Fig. 2. Comparative analysis of satellite communication terminals.

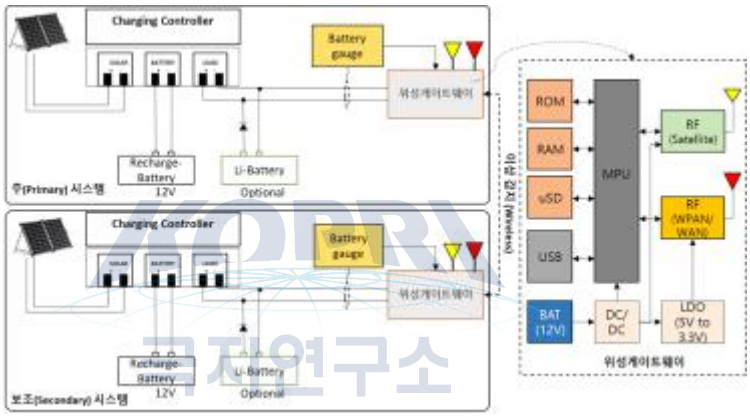


Fig. 3. Configuration of satellite gateway multiplexing system.

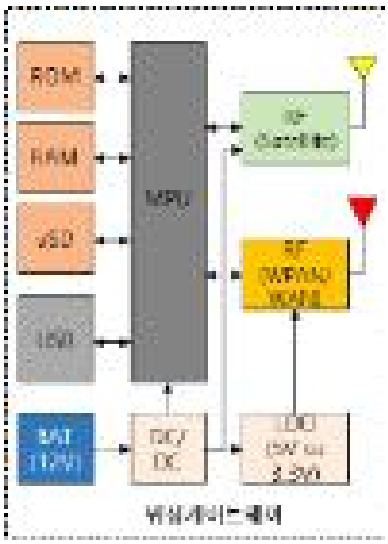


Fig. 4. Schematic diagram satellite gateway.

Fig. 5. Satellite gateway.

- Fig. 6은 알래스카 카운실 사이트에 본 연구에서 개발된 게이트웨이를 설치한 사진이며 배터리를 포함한 전원구성과 게이트웨이가 데이터 손실 방지를 위해 완전 이중화 구조로 되어 있음.

Fig. 6. Installation of satellite gateway in Alaska council.

- Fig. 7은 알래스카 카운실 사이트에 본 연구에서 개발된 위성 통신을 설치한 사진이며 위성 통신은 데이터 손실 방지를 위해 완전 이중화 구조로 되어 있음.

Fig. 7. Installation of satellite in Alaska council.

- Fig. 8의 switching 알고리즘은 저전력 통신 모듈에서 실행되는 프로그램의 동작 개념을 나타내며 저전력 통신 모듈의 내장형 프로그램은 동일하며 상황에 따라 코디네이터 또는 앤드디바이스로 동작함. 전원이 인가되거나 리셋이 되면 기존 네트워크(PAN 식별자, 물리적 무선 채널)에서 탈퇴하고, 먼저 가입 가능한 네트워크가 주변에 있는지 후보 부모 라우터를 찾는 동작을 수행함. 주변에 가입 가능한 네트워크가 존재하면 앤드디바이스로 가입하고, 신규 네트워크가 존재하지 않으면 코디네이터로 동작하면서 신규 네트워크를 구성함. 전자와 같이 기존 네트워크에 가입한 경우 보조(Secondary) 시스템으로 동작하게 되며 후자와 같이 신규 네트워크를 구성한 경우 주(Primary) 시스템으로 동작함. 보조 시스템으로 동작하는 경우 주기적으로 깨어나 시스템 상태를 주 시스템에게 보고. 주 시스템은 보조 시스템으로부터 상태 보고 메시지를 수신하면 배터리 충전상태, 위성 접속 상태, 저전력 무선 통신 모듈의 수신 세기로 이루어지는 상태 응답 메시지를 보조 시스템에 전송. 보조 시스템에서 상태 보고 후 상태 응답 메시지를 수신하지 못한 경우 재시도를 수행하며 상태 응답 메시지를 재차 수신하지 못하는 경우 주 시스템에 이상이 발생한 것으로 판단하여 기존 네트워크 탈퇴, 네트워크 찾기, 신규 네트워크 구성의 순으로 주 시스템으로 스위칭하여 동작함.

- Fig. 9의 설명도는 주 시스템과 보조 시스템, 센서노드로 구성되는 네트워크가 형성되는 과정을 시간순으로 도식화한 것임. 센서노드는 주기적으로 코디네이터를 찾기 위해 네트워크 가입 요청 메시지를 주기적으로 송신함. 센서노드도 소형 배터리로 동작하며, 대기 상태일 때는 휴지모드로 동작함. 위성 게이트웨이에 전원이 인가되면 앞서 설명한 것과 같이 네트워크 찾기 동작 후 주변에 가입할 네트워크가 존재하지 않으면 신규 네트워크를 구성하고, 신규 네트워크가 구성된 후 센서노드로부터 네트워크 가입 요청 메시지가 수신되면 네트워크 가입 응답으로 네트워크 식별자를 할당하고 이때 센서노드는 네트워크 가입이 완료됨. 시스템에서 설정된 주기(인터벌)로 환경인자를 센싱하여 보고하고 코디네이터는 그에 대응하는 응답 메시지를 송신함. 이런 동작은 시스템에서 보고 주기를 변경하지 않는 이상 동일하게 반복 동작함. 다음은 보조 시스템이 주 시스템에 가입하는 절차로 센서노드가 주 시스템에 가입하는 절차와 동일하게 동작함. 보조 시스템에 전원이 인가되면 네트워크 가입 요청 메시지를 송신하고 주 시스템으로부터 네트워크 가입 응답 메시지를 수신받게 되어 가입이 완료됨. 보조 시스템은 센서노드와 다르게 센싱 정보가 아닌 시스템 상태 정보 보고하고 그에 대응하는 응답을 수신함. 센서노드와 유사하게 시스템에서 상태 보고 주기를 변경하지 않는 이상 동일하게 반복 동작함.

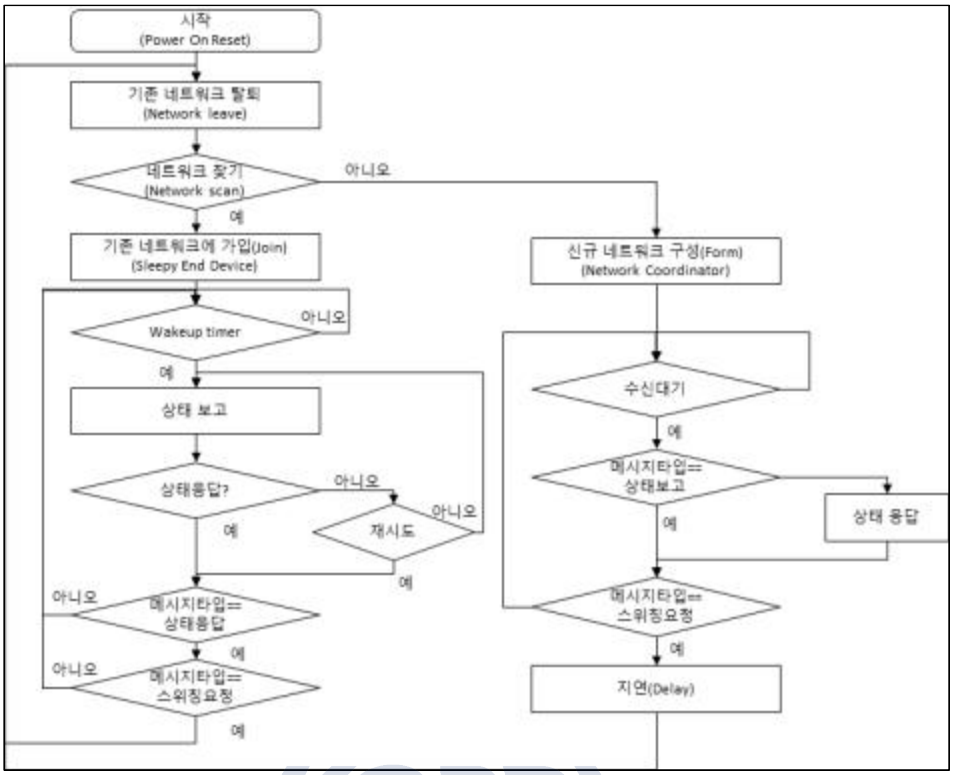


Fig. 8. Flowchart of network configuration and switching algorithm.

KORI 국지연구소

- Fig. 10은 주 시스템과 보조 시스템이 상태 정보를 교환하면서 시스템 이상 유무를 판단하여 스위칭을 요청하는 동작을 시간순으로 도식화한 것임. 주 시스템의 배터리 충전상태가 시스템에서 설정한 값 이하가 되면 배터리 충전을 위해 전력 소모가 적은 보조 시스템으로 스위칭함. 또한 주 시스템의 위성 접속 상태가 양호하지 않거나 시스템에서 설정한 횟수만큼 데이터 전송에 실패하는 경우 등 이상이 감지되면 보조 시스템과 주 시스템이 스위칭하여 동작함. 기존의 보조 시스템은 신규 네트워크를 구성하게 되고 기존의 주 시스템은 보조 시스템으로 동작함.
- Table 1은 주 시스템과 보조 시스템 간에 공유하는 상태 정보를 나타냄.

Table 1. Satellite gateway system status information.

구분	정보	설명
상태 정보	동작 모드	주/보조 시스템
	배터리 충전 상태	본 시스템의 배터리 충전 상태
	위성접속상태	위성 모뎀의 불량 확인
	저전력 통신 모듈 수신 세기	송수신 동작 이상 유무 확인(RSSI)

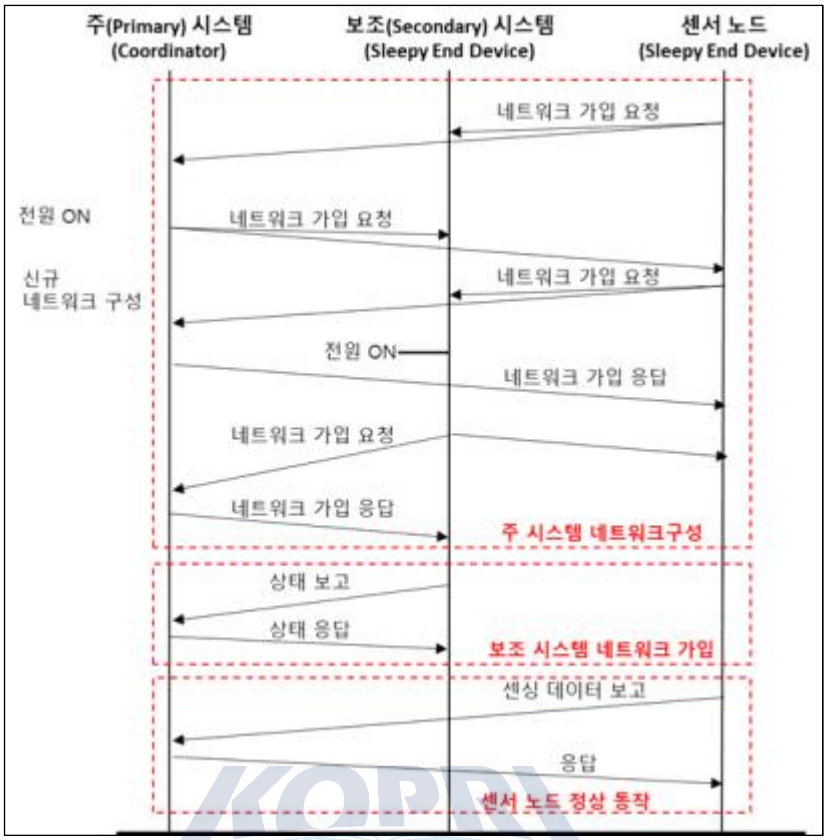


Fig. 9. Diagram of network configuration and status information.

KOPRI
극지연구소

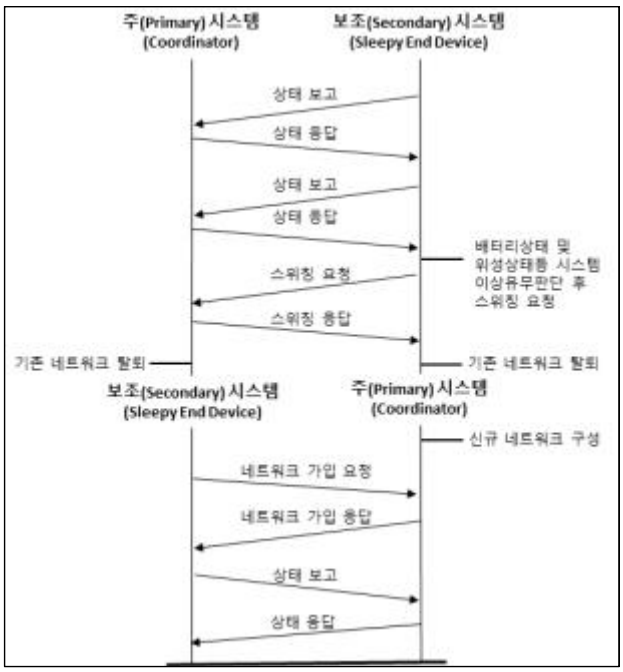


Fig.10. Error detection algorithm when communication is possible.

– Fig. 11은 또 다른 예로 주 시스템이 전원 또는 통신 모듈에 불량이 발생하여 보조 시스템으로 상태 응답 메시지가 송신되지 않는 경우를 시간순으로 도식화한 것임. 정상적으로 상태 정보를 교환하는 경우는 앞서 설명한 것과 같은 동작을 유지하며 아래와 같이 상태 응답이 없는 경우 시스템에서 설정한 횟수만큼 재시도를 수행하고 그 이상 응답이 없는 경우 보조 시스템은 기존 네트워크를 탈퇴하고 신규 네트워크를 구성함. 즉, 주 시스템으로 동작됨.
– 상기 위성 통신 및 게이트웨이 성능개선 및 고도화(Fig. 8 ~ 11)를 통해 국내 특허를 출원하였음.

※ 복합센서 모듈 개발

– 환경인자 측정용 복합센서 모듈은 토양온도, 토양함수비, 토양 CO_2, 및 토양 CH_4를 측정할 목적으로 Fig.12와 같이 설치되며 무선으로 데이터를 송신할 통신 모듈을 포함하는 인터페이스는 통합된 형태로 복합센서 모듈 상단부에 설치(복합센서 모듈 블록도는 Fig. 13). 또한 이것은 태양광 충전을 통한 에너지 수확 부분과 센서 인터페이스를 포함한 무선 통신 모듈로 구성됨. 최대 전력점 추적 (Maximum Power Point Tracking, MPPT)은 태양광 발전에 사용되는 기법으로, 광전지 배열로부터 가능한 최대 전력을 얻기 위한 것임. 태양광 전지는 태양 복사, 온도, 전체 저항과 복잡한 관계를 가지고 있어 I–V 곡선이라고 부르는 비선형 출력 효율 특성을 가짐. MPPT 시스템의 목적은 전지의 산출을 측정하고 저항(부하)을 적용하여 어떠한 환경 조건 아래에서도 최대 전력을 얻는 것임. MPP(Maximum Power Point)는 MPP 전압과 MPP 전류로 구성되며, MPP 전압과 전류는 각각 Solar Panel 이 최대한 만들어 낼 수 있는 전력으로 환산되므로, 큰 수치를 갖으며 큰 전력을 만들어 냄.

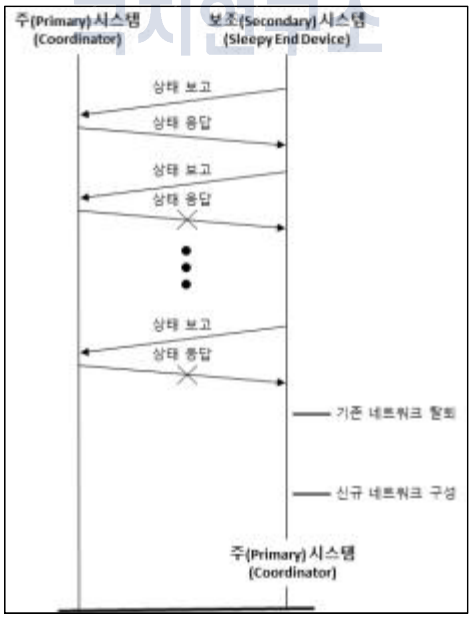


Fig. 11. Error detection algorithm when communication is abnormal.

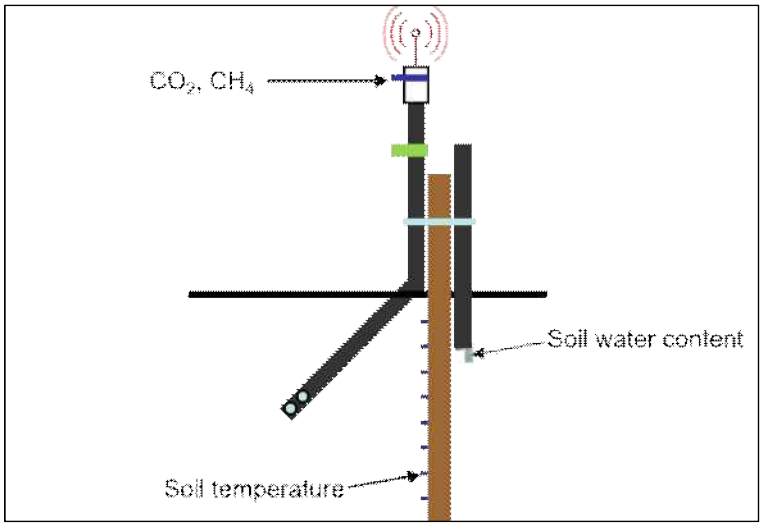


Fig. 12. Schematic diagram for monitoring system.

– 또 다른 하나의 구성 부는 토양온도 센서(8개), 토양함수비, 토양 CO_2, 토양 CH_4 센서를 연결하기 위한 센서 인터페이스 부분과 제어기(MCU), RF 통신 부분으로 구성된 무선 센서노드임. 센서 인터페이스(Sensors Measurement Unit)는 극지연구소에서 선정한 센서를 연결하기 위한 하드웨어와 소프트웨어를 모두 포함함.

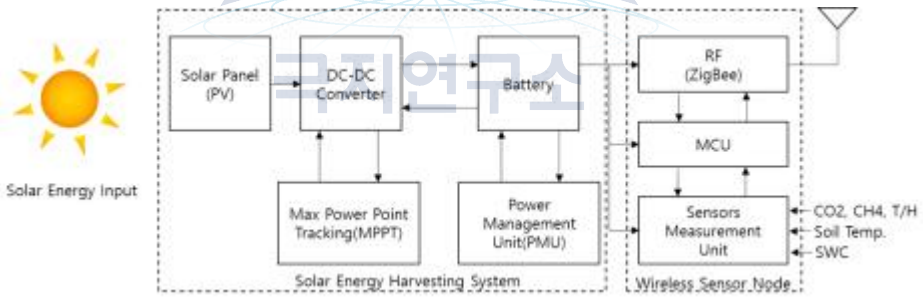


Fig. 13. Composite sensor module block diagram.

– 복합센서 모듈의 통합형 통신 인터페이스 및 하드웨어

- 실시간 무선 토양온도, 토양함수비, 토양 CO_2, 및 토양 CH_4의 환경인자를 모니터링하기 위해서는 원격 모니터링 시스템의 구현하기 위한 통신 인터페이스 단말기가 필요함.
- 토양온도, 토양함수비, 토양 CO_2, 및 토양 CH_4의 센서를 통해 얻어진 데이터는 통합형 통신 인터페이스를 통해 이리듐 게이트웨이로 전송됨. 따라서, 직접 센서가 설치된 위치로 이동하지 않고 다양한 위치의 토양온도, 토양함수비, 토양 CO_2, 및 토양 CH_4를 측정 및 실시간 모니터링할 수 있는 원격 모니터링 시스템을 구축할 수 있음.
- 본 연구에서는 토양온도, 토양함수비, 토양 CO_2, 및 토양 CH_4의 환경인자 데이터를 무선 센서 네트워크에 연결할 수 있도록 함. 환경인자 데이터를 측정하는 센서의 노드에서 본 연구에서 개발되는 시스템을 구성하기 위한 핵심 통합형 무선 통신 모듈로 송신 출력과 안테나로 구성하였으며 특히 데이터 손실 방지를 위하여 각각의 통합형 통신 인터페이스 내부에 저장장치를 구성하여

데이터를 수집 및 전송을 같이 할 수 있도록 함. 통합형 통신 인터페이스의 전원은 태양광을 이용한 충전방식 배터리를 사용하였으며 센서와 무선 통신 모듈은 대기 상태에서 많은 전류를 소비하므로 휴먼 모드(Sleep mode)로 동작하도록 설계됨. Fig. 14와 15의 그림은 토양 CO_2, 및 토양 CH_4의 환경인자 관측을 위한 하드웨어 설계 회로도 및 PCB를 각각 나타낸 것임.

- Fig. 16은 지중 수분함량을 측정하는 인터페이스이며 RCM(Radio Communication Module)은 무선 통신 모듈로 설치 환경을 감안해 최대한 작은 크기로 설계함. Fig. 17은 온도 센서를 연결하기 위한 인터페이스며 Fig. 18은 태양과 충전을 위한 충전 제어기 임. Fig. 19는 설계한 회로도의 PCB 제작 설계도를 나타냄.

– Fig. 20은 제작 완료된 통합형 통신 인터페이스를 나타냄. 1개의 제어 보드(인터페이스 보드)에 4종류의 센서를 연결할 수 있음. 전원은 3.6V 배터리를 동작할 수 있게 하였으며, 극한 환경에서 장시간 운영되도록 −40 ~ 85℃ 범위에서 동작할 수 있게 하였음.

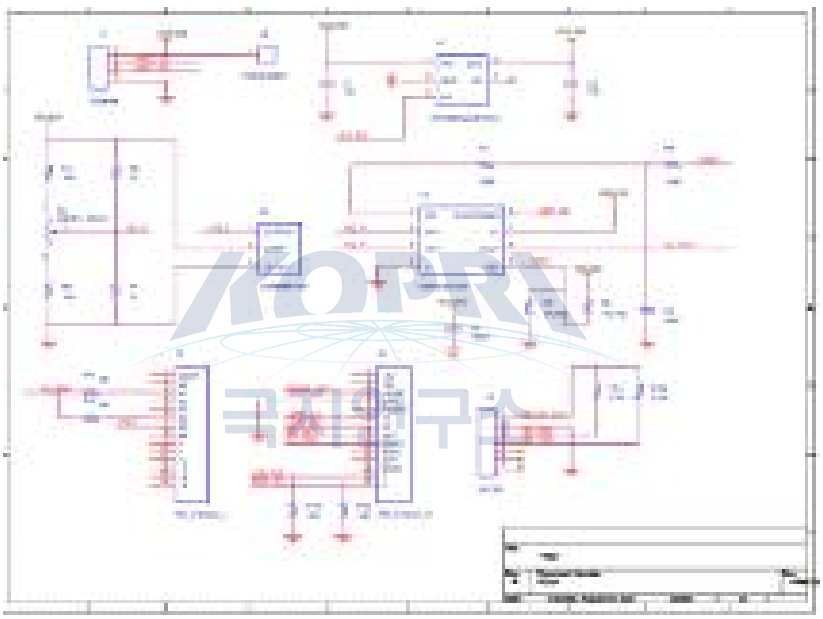


Fig. 14. Circuit diagram of CO_2/CH_4 gas.

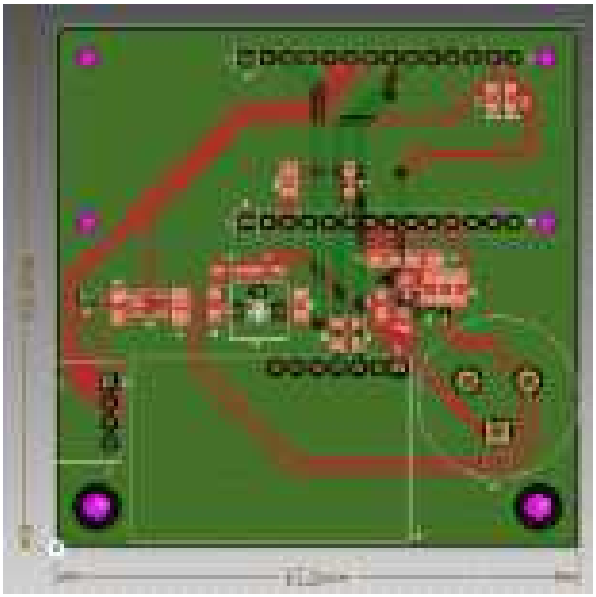


Fig. 15. PCB of CO_2/CH_4 gas.

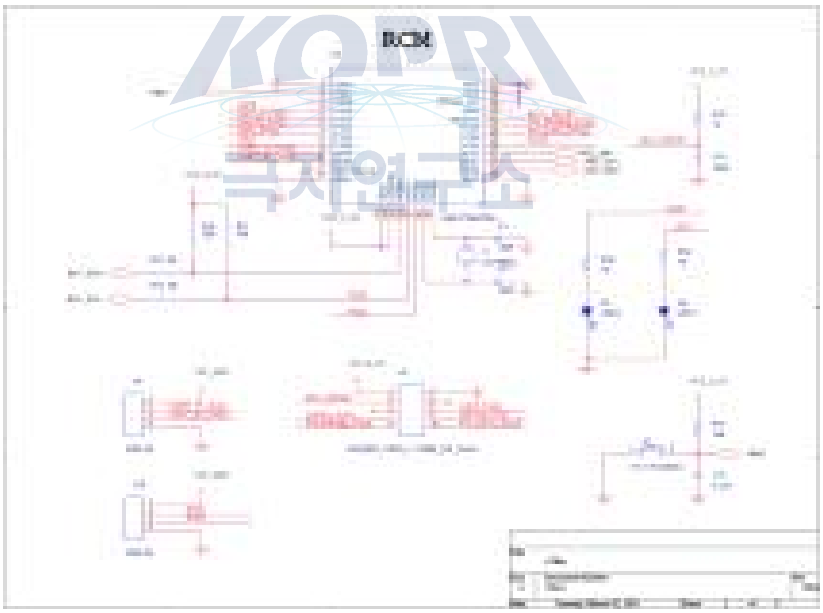


Fig. 16. Circuit diagram of Zigbee and volumetric water content.

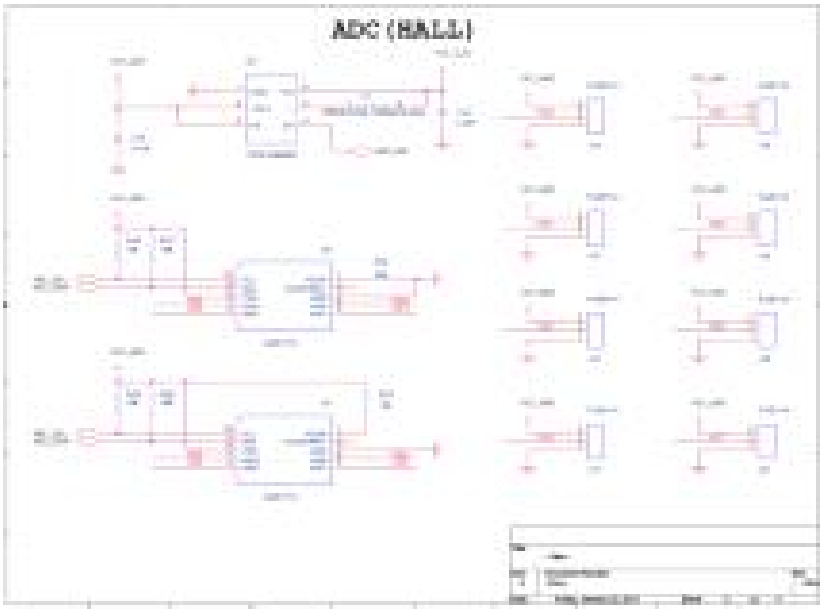


Fig. 17. Circuit diagram of temperature.

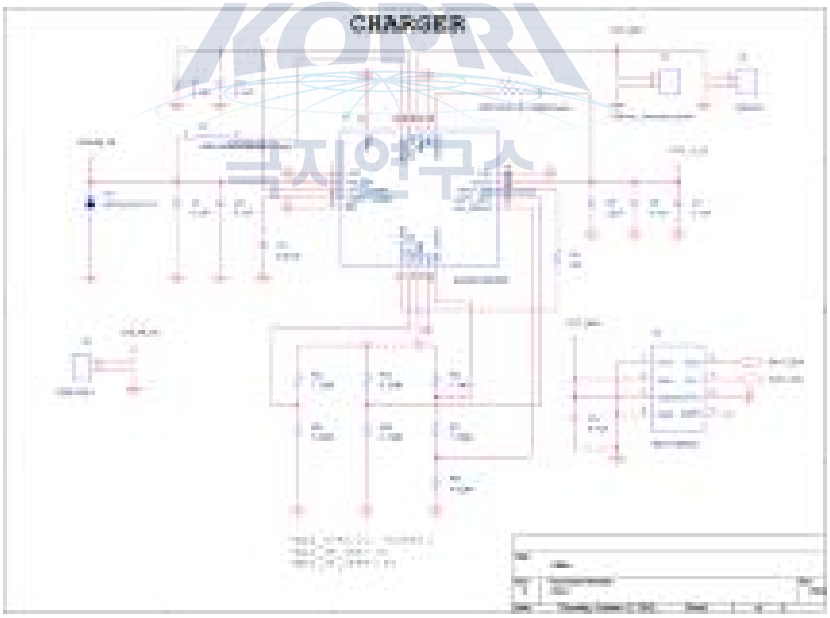


Fig.18. Circuit diagram of battery.

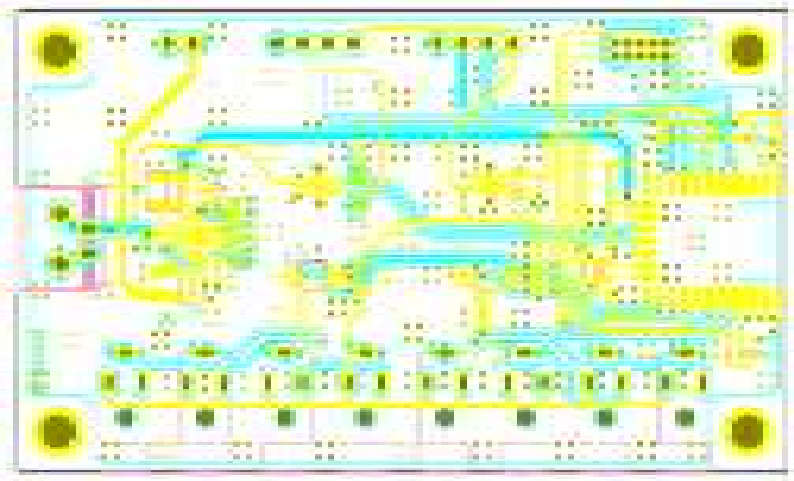


Fig. 19. PCB of volumetric water content, temperature, CO_2/CH_4 gas.

Fig. 20. Composite sensor module.

- Fig. 21은 알래스카 카운실 사이트에 본 개발 복합센서 모듈 및 통합형 통신 인터페이스와 토양 온도, CO_2, CH_4 센서 및 지중 수분함량 센서를 설치한 사진임. 개발된 통합형 통신 인터페이스는 저전력이며 소형의 구조로 되어 있음.

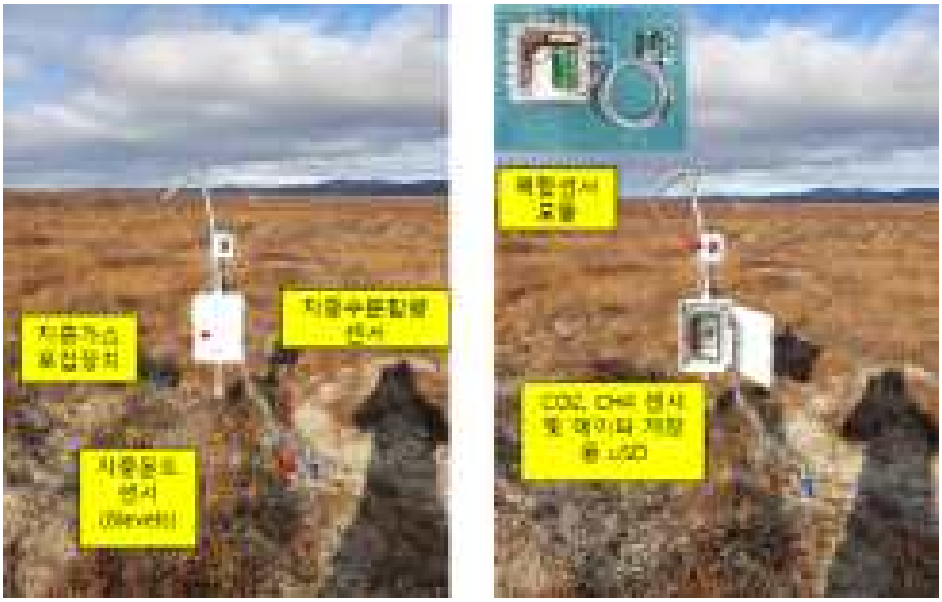


Fig. 21. Installation of composite sensor module.

– 개발 소프트웨어 구조

- Fig. 22는 센서노드의 MCU에 내장되는 소프트웨어 구조로 IEEE 802.15.4 규격의 MAC/PHY 계층의 상위에 ZigBee NWK와 API로 구성됨. 응용계층에서는 위성 게이트웨이에서 전송하는 측정 주기에 따라 센서값을 읽고 자체 uSD에 날짜와 시간, 센서값 형태의 시계열 값으로 저장하고 위성 게이트웨이에 결과값 전송. 센서노드의 휴지시간(Idle) 상태에서는 슬립모드로 동작하여 대기 전력을 최소화함.

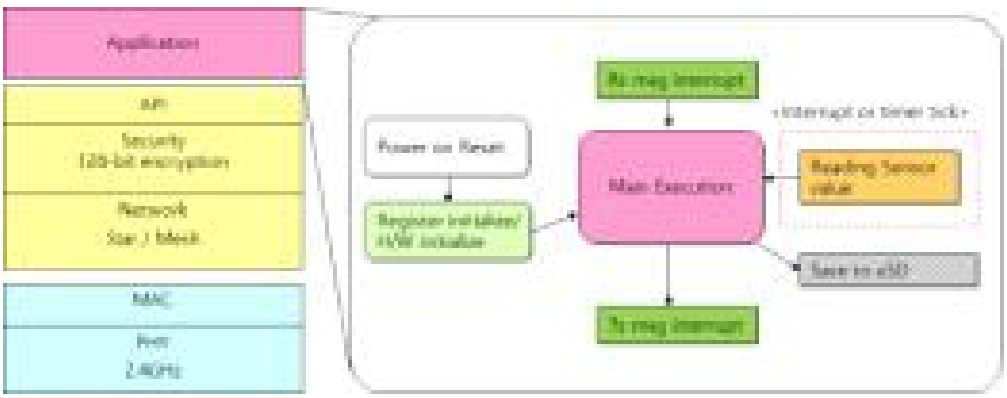


Fig. 22. Embedded software architecture of composite sensor module.

- 본 연구과제의 개발품으로 인하여 다음과 같이 북극권 환경인자 관측이 가능한 모니터링 시스템을 구축할 수 있으며 이를 통해 안정적인 환경인자 데이터를 확보할 수 있을 것으로 판단됨
  - ✓ 복합센서 모듈과 저전력 근거리 통신 방식 사용 가능
  - ✓ 위성 통신은 양방향 통신이 가능한 구조로 설계하며 측정 주기, 보고 주기, 평균 주기는 원격으로 변경 가능
  - ✓ 전원은 태양광 발전을 이용하는 자가 발전형으로 설계하고, 알래스카 카운실에서 1년 동안 끊김

없이 운영 가능한 구조

- ✓ 위성 통신시스템을 이중화하여 주장치(Primary)가 오동작할 경우 보조장치(Secondary)로 전환되어 안정적으로 동작
- ✓ 64GB이상의 uSD 카드를 장착할 수 있도록 설계 및 제작
- ✓ 전원 충전 시스템과 위성 게이트웨이를 포함하여 하드웨어 장치를 완전 이중화하여 구성
- ✓ 주 시스템과 보조 시스템의 배터리 충전 상태는 항상 공유하며 보조 시스템은 정상 동작 상태에서 슬립모드 동작으로 저전력으로 동작
- ✓ 주 시스템이 정상 동작 상태에서는 항상 주 시스템이 우선 동작하므로 보조 시스템은 배터리가 완충되어 대기(standby) 상태로 동작하도록 하여 제작

- **환경인자 데이터 신뢰성 향상을 위한 멀티센서 성능시험, 센싱 데이터 원격 전송 기술 및 복합전원제어 모듈 기술 성능 평가**

※ 개발된 시작품의 성능 평가

– 개발된 시작품의 성능 평가를 위해서는 알래스카 카운실의 평균온도를 이용하여 최고 및 최저 기온에 대한 성능 평가를 수행해야 함. 그러나 알래스카 카운실의 평균온도 데이터가 부족하여 70마일 떨어져 있는 알래스카 놈에서의 연평균 기온을 이용하여 성능 평가의 기준온도로 설정함. Table 2와 Fig. 23은 알래스카 놈의 월평균기온의 섭씨와 화씨 온도 변화를 나타내고 있으며, 그 평균온도 분포는 -17.2~8.3℃임. 또한 최저온도는 약 -31℃(−23°F)임. 따라서 현장 상황을 고려하고 지역적인 측면을 고려하여 개발된 시작품의 성능 평가는 평균온도 -20℃와 최저온도 -40℃로 선택하여 저온 시험을 수행함. 특히 북극권 환경인자 데이터는 극한 환경에서 수행되는 작업이므로 저온에서 하는 시험은 필수 조건임.

KOPRI 극지연구소

Table 2. Average temperature data of Nome, Alaska for Celsius.

Average	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
High,℃	−10.0	−9.4	−7.2	−2.2	6.1	12.2	14.4	13.3	9.4	1.7	−5.0	−8.9
Temp.,℃	−14.4	−13.3	−11.7	−5.6	2.8	8.9	11.1	10.6	6.1	−1.1	−7.8	−12.2
Low,℃	−17.2	−16.7	−15.0	−8.9	0.0	5.6	8.3	7.2	3.3	−3.9	−10.6	−15.6

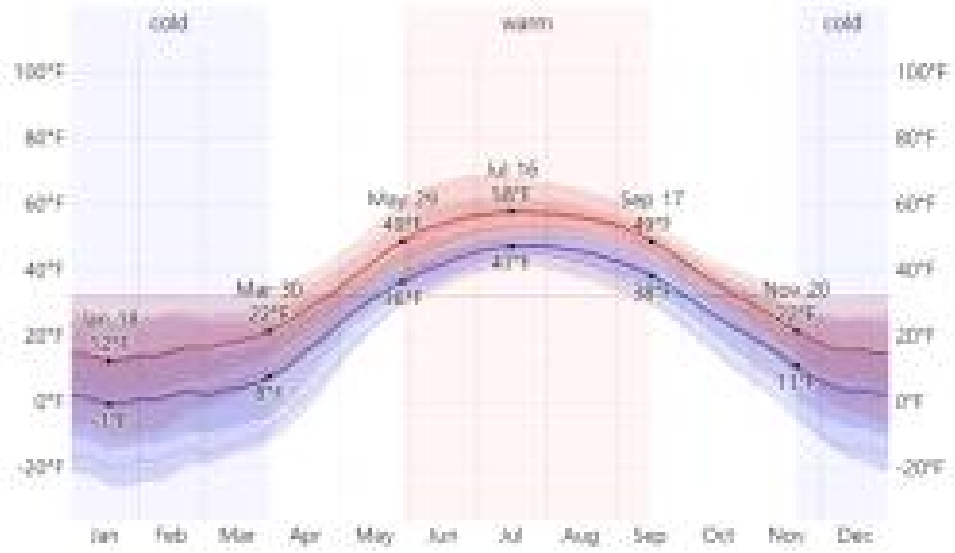


Fig. 23. Average temperature data of Nome, Alaska for Fahrenheit.

① −20℃ 저온 시험

[시험방법]

- 저온 챔버를 활용하여 -20, −40℃ 이하에서 24시간 이상 동작시켜 안정적으로 데이터가 수집되는지 검증. 아래 Fig. 24 및 25와 같이 복합센서와 게이트웨이를 각각 저온(−20℃)에서 150 시간 이상, 극저온(−40℃) 챔버에서 48시간동안 데이터 수집함. 데이터 측정 주기는 30초로 설정함. 데이터는 복합센서 모듈의 uSD와 게이트웨이의 uSD에 동시에 저장함. 수집할 데이터는 CO_2, CH_4, (지중)온도, 습도, 지중수분함량 센서값과 배터리 상태(전압, 충전용량) 및 RF 수신 세기임.

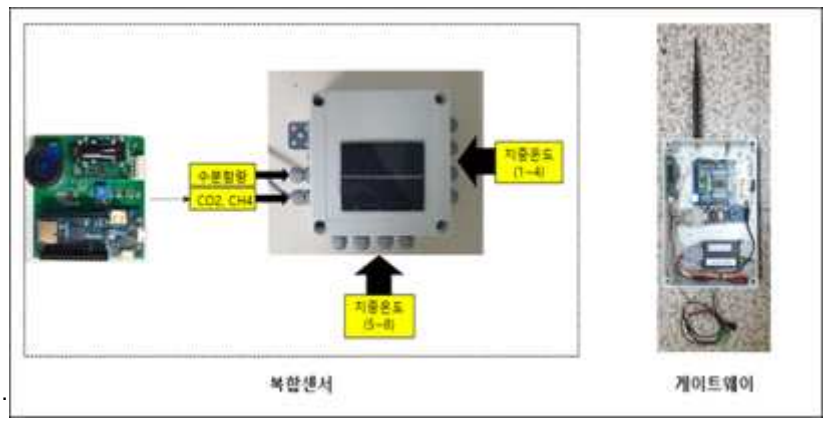


Fig. 24. Low−temperature chamber test.

Fig. 25. Low-temperature chamber test (-20℃).

- Fig. 25는 냉동챔버에 설치 전에 복합센서를 연결하여 챔버에 설치하는 작업내용으로서, 사진에서 A는 냉동챔버 앞에서 복합센서 모듈에 센서 연결, B는 챔버 온도 설정, C는 챔버 안에 위성 게이트웨이 설치, D는 챔버 안에 복합센서 모듈을 설치한 장면임.

[시험 결과]

- 현장 적용 센서 및 통신 인터페이스의 저온에서의 성능 평가를 모니터링하기 위하여, Fig. 25와 같이 각각 개발된 통신 인터페이스를 저온 챔버에 설치하여 시간에 따른 계측항목을 측정하며 저온 챔버내 온도로부터, 각각의 항목들을 획득함. Fig. 26에서 Fig. 28은 동작 온도가 -20℃인 저온 챔버의 온도에 대한 결과를 나타내고 있음. 저온 챔버 온도의 경우 내부 프로그램으로 운영되는데 내부 프로그램상 내부온도가 -15℃ 이상이 되면 냉방 기기를 실행하여 -20℃에서 멈추도록 프로그램되어 있음. 따라서 저온에서의 온도변화가 발생하고 있었음. 이에 대한 측정된 저온 챔버의 내부온도는 -14.8에서 -20.2℃로 변하면서 저온을 유지하고 있었음.
- 개발된 통신 인터페이스에 대한 온도 및 CO_2의 센서에서 얻어지는 데이터는 각각 Fig. 26~28에 나타내고 있음. 저온 챔버의 온도변화에 대해 얻어진 온도 및 CO_2의 결과도 온도에 따라 그 측정값이 변화하고 있으나 저온 챔버 시험 결과 1만회 이상의 데이터 샘플링이 잘 측정됨을 확인할 수 있었음. 따라서 전체 측정된 데이터는 외기온도가 -20℃라도 데이터를 잘 측정할 수 있을 것으로 판단됨.

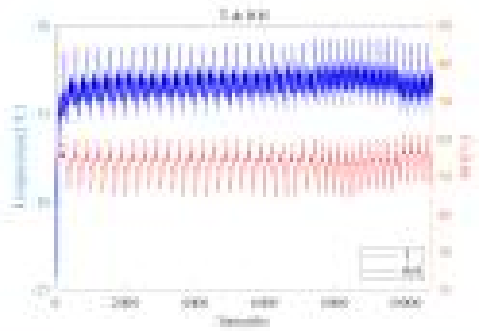


Fig. 26. Measurement result of temperature and humidity.

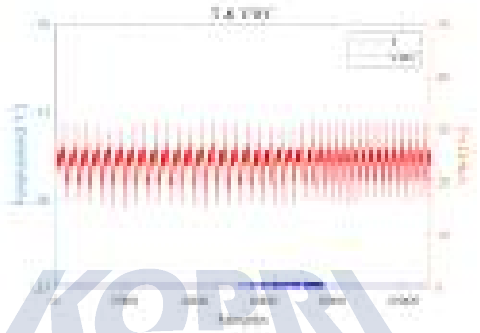


Fig. 27. Measurement result of temperature and VWC (GS3).

KOPRI
극지연구소

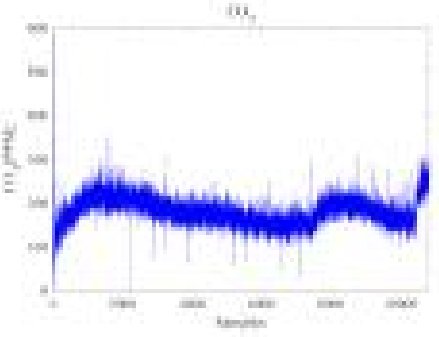


Fig. 28. Measurement result of CO_2 .

Fig. 29. Low-temperature chamber test(-40℃).

② -40℃ 저온 시험

[시험방법]

- -20℃ 저온 시험과 동일하게 -40℃ 이하에서 48시간 동안 동작시켜 안정적으로 데이터가 수집되는지 검증함. Fig. 29는 시험에 사용한 챔버 설치 모습임.

KOPRI 극지연구소

[시험 결과]

- 현장 적용 센서 및 통신 인터페이스의 저온에서의 성능 평가를 모니터링하기 위하여, Fig. 29와 같이 각각 개발된 통신 인터페이스를 -40℃ 저온 챔버에 설치하여 시간에 따른 계측항목을 측정함. Fig. 30은 저온 챔버내 온도 및 센서로부터 얻은 결과를 나타냄.
- 저온 챔버의 내부온도는 -25℃에서 시작하여 최종적으로 -38℃까지 변하면서 저온을 유지하고 있음. -40℃ 저온 챔버의 경우 계속해서 -40℃의 온도를 유지하도록 프로그램되어 있는 저온 챔버이나 내부온도 측정 결과 최대 약 -39.5℃ 정도이며 대부분 -38℃가 유지됨. 저온 챔버의 온도에 대해 얻어진 온도, 습도 및 CO_2의 결과도 온도에 따라 그 측정값이 변화하고 있으나 저온 챔버 시험 결과 3천회 이상의 데이터 샘플링이 잘 측정됨을 확인할 수 있었음. 따라서 전체 측정된 데이터는 외기온도가 -38℃라도 데이터를 잘 측정할 수 있을 것으로 판단됨.
- 따라서 약 -20 및 -40℃의 온도에서 장기간 환경변화 모니터링 장비를 운영할 수 있을 것으로 판단됨.

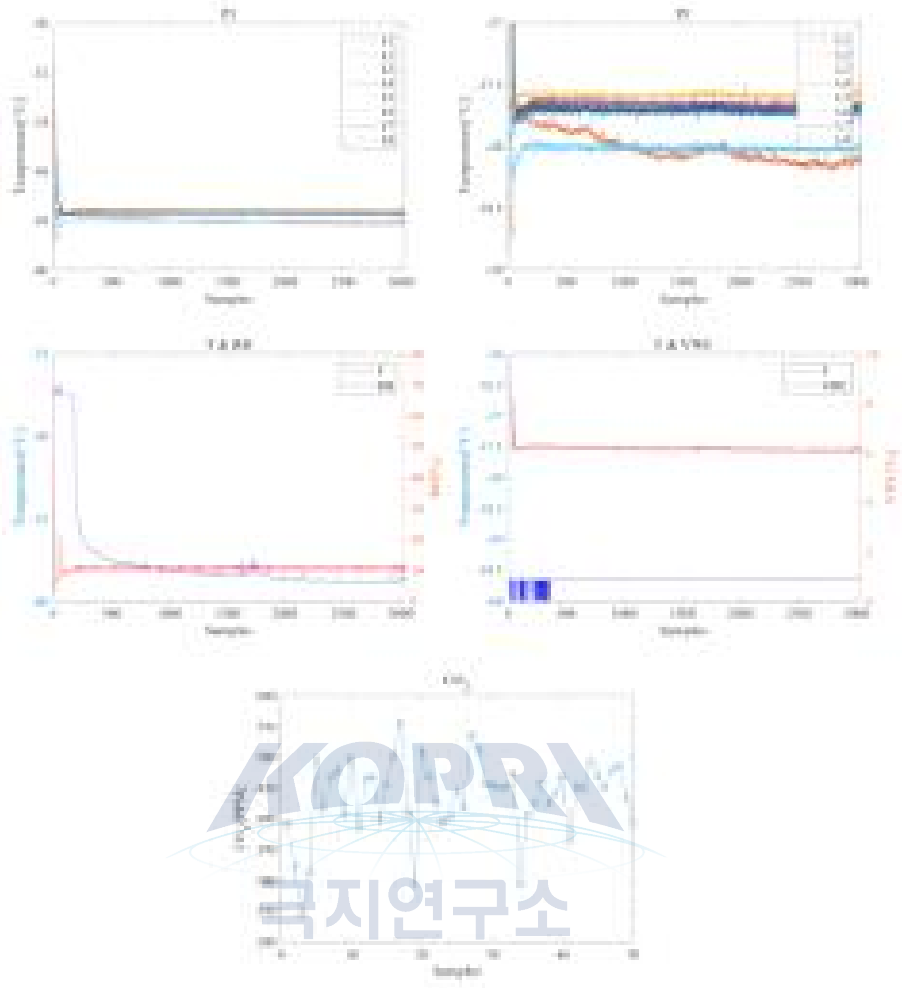


Fig. 30 Result of Low-temperature chamber test(-40℃).

③ 통신 모듈의 거리 테스트

[시험방법]

- 통신 모듈의 거리 테스트는 LOS(Line of Sight)환경에서 200m까지 수행하였으며 40m 단위로 수신 감도를 측정. Fig. 31과 같이 송신기와 수신기를 LOS 환경에서 40m 단위로 200m까지 이동하면서 수신 감도 측정하였음. 메시지는 10초에 한 번씩 송수신하도록 하였으며, 한 포인트에서 100개 이상의 샘플을 수집하였음.
- Fig. 32는 통신 테스트를 수행하는 모습이며, 통신 세기 측정 거리를 나타냄. A는 사용된 통신 모듈과 장치들에 대한 사진임. 위성 게이트웨이에 설치된 코디네이터(ZC) 모듈과 복합 센서 모듈에 사용된 앤드디바이스(ZED) 노드를 각각 2.5m 높이의 지지대에 부착하여 앤드디바이스를 이동하면서 수신 감도를 측정하였음. B의 사진은 통신 모듈의 설치 모습과 네트워크 분석기(ISA3)가 부착된 모습의 사진임. C의 사진과 같이 코디네이터에 연결된 컴퓨터에서 수신 감도를 저장함.

[시험 결과]

- Fig. 33과 같이 40m에서 200m로 거리가 멀어짐에 따라 수신 신호 세기가 약해지는 것을

확인할 수 있음. 40m에서 평균 수신신호세기 -55dBm, 200m에서 -88dBm으로 사용된 EM357 RF 칩셋에서 제공하는 평균 수신 감도 -100dBm 보다 12dBm의 링크 여유(Link Margin)을 가짐.

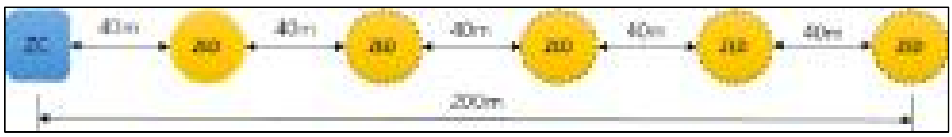


Fig. 31. Measuring point.

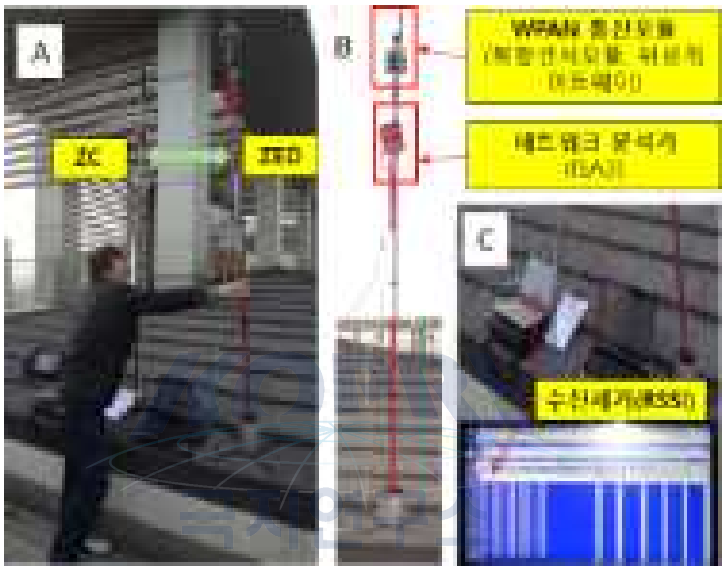


Fig. 32. Measuring the range of wireless communication module.

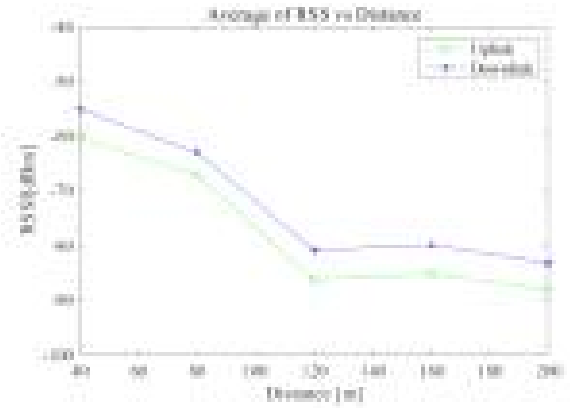


Fig. 33. Average of received signal strength.

※ 알래스카 카운실 관측거점 설치 사진 및 결과

- 모니터링 시스템을 설치하기 위하여 모니터링 시스템을 수어드 반도(Seward Peninsula)의 알래스카 카운실(64° 50.63′ N, 163° 42.64′ W)에 설치함. 카운실은 위도상 아북극 지역으로 볼 수 있는데, 해발 고도는 30m, 연평균 기온과 강수량은 각각 14 ℃와 258mm임. 알래스카 사이트의 활동층 깊이는 50~70 cm이였으며 연구 장소의 토양은 산성이었음. 토양 pH는 3.90에서 5.02 범위이고 상층 토양 pH는 하층 토양 pH보다 약간 더 산성임. 상층 토양은 대부분의 부지에서 하층 토양보다 높은 MC를 함유함. 상층 토양의 평균 TC와 TN 함량은 각각 40 %와 1.5 %이고 하층 토양은 TC 함량이 낮았으나 (36 %) 상층 토양과 동일한 함량을 보임. 따라서 탄소와 질소 (C / N) 비는 상층 토양에서 더 높았음. 암모니아 (NH4) 농도는 깊이와 모든 장소에서 질산염 (NO3) 농도보다 높았음. 암모늄 농도는 토양 g 당 8.6 ~ 93.1g g 이었지만 질산염 농도는 무시할 정도였음.
- 알래스카 카운실을 관측거점으로 선정한 이유는, 두꺼운 눈의 덮임이 영구 동토의 온도 및 환경 변화에 미치는 영향을 감시하고 자료획득과 분석하는 최적의 장소로 판단되었고 알래스카 원주민 단체 등과의 협력이 용이한 곳이었으며, 토양상태, 대기상태, 토양구조, 식물구조, 토양물성, 풍향, 풍속, 강우, 강설 등을 고려하여 카운실 사이트의 Fig. 34 위치에 100×100m의 간격으로 모니터링 시스템을 설치함. 향후 중장거리 무선 통신 시스템이 완성되면 더 넓은 간격의 모니터링 시스템을 구축하고자 함.
- 복합센서 모듈은 Fig. 34와 같이 토양온도, CO_2, CH_4 센서 및 지중 수분함량 센서 등을 6포인트에 신규 설치하였음. 위성 게이트웨이는 관측 사이트 중앙에 2셋트를 설치하였으며(Fig. 35) Fig. 36은 개발된 관측 시스템을 현장에 설치한 작업 결과임.
- 특히 관측지 중앙에 설치한 위성 게이트웨이는 완전 이중 구조로 설치하였으며, 태양광 충전 패널, 배터리, 충전 제어기를 포함한 전원을 설치하였음.

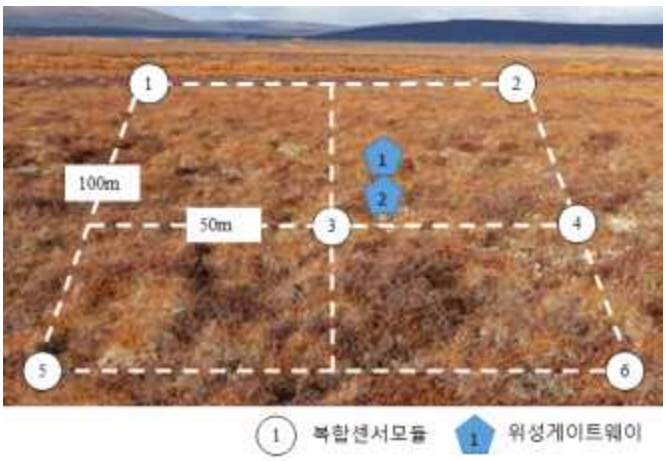


Fig. 34. Installation location.

Fig. 35. Installation of satellite gateway in Alaska council.

Fig. 36. Installation of combined sensor module at council, Alaska.

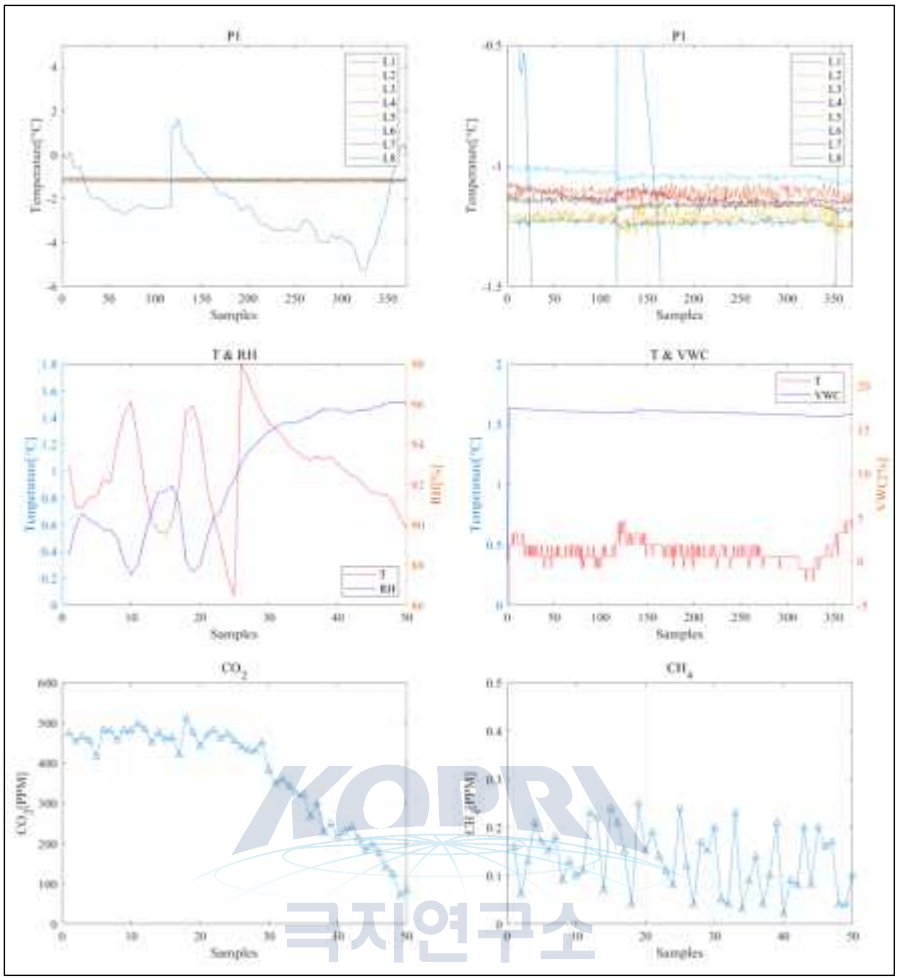


Fig. 37. Results of measurement at the site 1.

[2021년(1단계 1차년도) 관측 결과]

- Fig. 37은 알래스카 카운실에서 관측한 관측 결과를 나타내고 있음(site 2 ~ 6까지의 자료는 1단계 단계 보고서 참조). 개발된 모니터링 시스템을 이용한 알래스카 카운실의 환경인자 관측 결과 지중온도는 4℃에서 -6℃ 값 분포를 보임. 습도는 6% 정도의 값은 나타내고 지중수분 함량은 최대 1.8%까지 나타남. CO_2의 경우 500ppm을 나타내고 CH_4는 최대 0.2ppm까지 나타나고 있음. 얻어진 데이터는 최근까지 인공위성을 통해 현장 관측자료를 받아 정리한 데이터로 장기간 추가 분석이 필요함.
- 2021년 10월 5일부터 원격으로 데이터를 획득한 결과 다음과 같은 결과를 산출함.

✓ 개발된 시스템은 태양광 자가 발전형 전원 시스템 설계 및 구현 가능

✓ 지중온도, 지중 수분함량, CO_2, CH_4 인터페이스 개발 및 구축

✓ 위성 통신 게이트웨이와 통합 복합센서 모듈간 무선 통신 기술은 저전력 근거리 통신 방식으로 설계 및 적용

✓ 대기전력은 2uA 이하로 동작 가능 제작

✓ 회로의 전자 부품은 극지 환경(-40℃)에서 안정적으로 동작 가능 특성을 갖는 부품을 선정하여 설계, 제작 및 설치 완료

✓ 32GB 이상의 uSD 카드를 장착할 수 있어 환경인자 측정부에서도 데이터 저장 가능

KOPRI 극지연구소

✓ 66개의 센서노드에서 획득된 데이터를 센서 통신 모듈과 게이트웨이 모두에서 저장할 수 있는 시스템

✓ 환경인자 획득 위성 통신 모듈, 게이트웨이 이중화로 데이터 손실 최소화 가능

■ **모니터링 시스템 원격 및 에너지 하베스팅 기술 고도화(1단계 2차년도)**

▪ **모니터링 시스템 원격 무선전송 고도화**

– 현장 운용의 문제점을 파악하여 전원회로, 측정회로 등의 개선이 필요한 부분과 통신 장치의 개선 문제점 파악

① 센서의 저온 동작온도가 -20℃인 부품의 경우 극지의 저온에서 동작하지 않는 경우 발생. Fig. 38은 센싱 컨트롤러 부품인 오실레이터의 저온 동작온도가 −20℃인 부품을 사용하여 실내시험을 수행한 결과를 나타내고 있음. 스테인레스 케이스 내부에 온도계와 습도계 및 발열체를 장착하고 케이스내부 온도변화에 따라 오실레이터 작동 여부를 관찰하고자 시험을 수행함. 저온 문턱값은 −15℃, 고온 문턱값은 −5℃로 설정하였고 −15℃로 내부온도가 내려가면 발열체가 작동하여 내부온도를 −5℃로 상승시키도록 프로그램함. Fig. 38의 초기에서와 같이 설정된 온도 범위 내에서 케이스내부 온도가 −5℃에서 −15℃로 유지되는 것을 확인할 수 있음. 이때 대기중 온도는 −50℃로 설정함. 온도가 유지되는 상황에서 강제적으로 발열체를 OFF 시켜 −20℃ 이하에서의 오실레이터 동작여부를 확인함. −20℃이하로 케이스 내부 온도가 낮아지자 통신이 제대로 이루어지지 않아 데이터가 획득되지 않는 것을 확인할 수 있음.

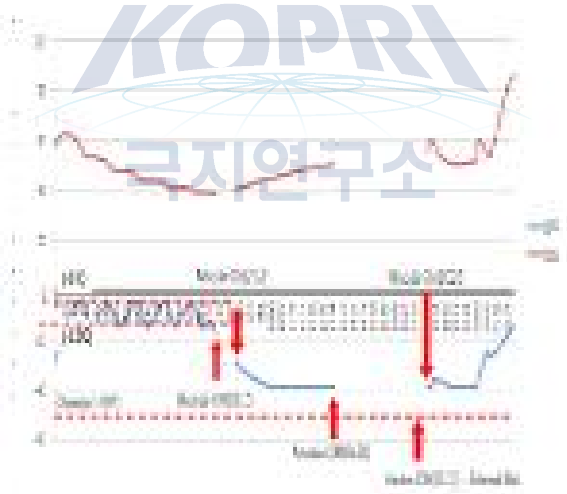


Fig. 38. Sensor operating temperature test.

② 습도 및 결로현상에 의한 무선통신 손상

③ 방수용 패킹 손상

④ 습기에 의한 커넥터 부식에 의한 접촉 불량

⑤ 케이스 방수로 인한 통신 모듈 손상

⑥ 낙뢰 및 리튬-이온 배터리 폭발 등의 화재로 인한 손상

⑦ 야생동물의 습격에 의한 전선 및 커넥터 손상

☞ 극지환경에서 센서 사용시 극지환경의 온도에서 작동 가능한 센서 및 상기 서술된 손상에 대한 고려가 반드시 필요함.

– **동토층 환경인자 탐지를 위한 멀티자료 분석 시스템 개발**

① 복합센서에 획득되는 환경인자 데이터는 탑재된 소프트웨어 센서 노드의 MCU에 내장되는 소프트웨어 구조로 IEEE 802.15.4 규격의 MAC/PHY 계층의 상위에 ZigBee NWK와 API로 구성됨.

② 응용계층에서는 위성 게이트웨이에서 전송하는 측정주기에 따라 센서값을 읽고 자체 uSD에 날짜와 시간, 센서값 형태의 시계열 값으로 저장하고 위성 게이트웨이에 결과값 전송. 센서 노드의 휴지시간(Idle) 상태에서는 슬립모드로 동작하여 대기 전력을 최소화함. 이러한 uSD를 센서부에(Fig. 39) 설치하여 데이터 유실을 최소화하고 얻어진 게이트웨이에서 얻어진 자료와의 분석을 통해 멀티자료 분석 시스템을 개발함.

Fig. 39. Multi data storage system.

– **통합형 멀티 센서 관측장치 성능 고도화**

① 극지의 환경인자를 다양한 공간좌표에서 환경인자 변화에 대한 데이터를 획득하기 위하여 쉽게 관측장비를 설치하고 효과적으로 데이터를 저장할 수 있는 고도화된 통합형 멀티 센서 관측장치를 개발함(Fig. 40).

② 관측장치는 토양 가스 수집, 토양온도센서, 토양함수비의 데이터를 획득할 수 있으며 태양광 패널을 통해 센서 및 통신에 소요되는 전력을 공급함. 또한 통신모듈을 통해 얻어진 데이터를 게이트웨이에 송신하며 지중가스 포집함 내부에 게이트웨이에 송신되는 원본 데이터를 저장하는 장치로 구성됨.

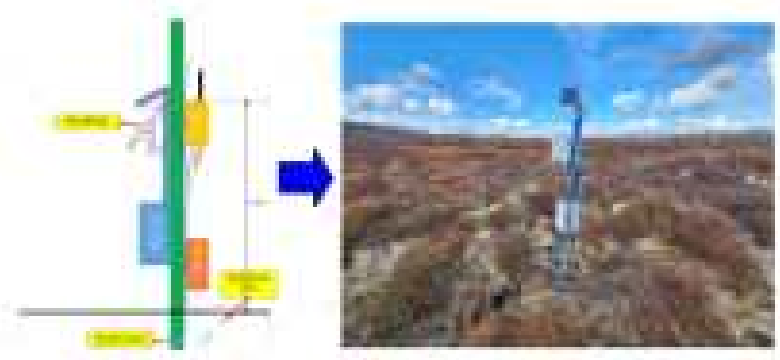


Fig. 40. Integrated multi-sensor observation device.

– 통합형 멀티 센서 모듈의 펌웨어 수정 설계

① 관측 거점의 센서 네트워크 구축을 위한 저전력 장거리 통신을 포함하는 구조로 극지 환경에서 최소 1km 이상의 통신 범위를 갖도록 설계

② 복합센서 64노드 이상 네트워크 구성과 데이터 수집이 가능한 하드웨어 설계 및 시제품 제작

③ 원격으로 측정 제어 및 보고(Reporting) 알고리즘 변경이 가능한 구조 : 게이트웨이에 내장된 프로그램 알고리즘과 센서 노드 제어 알고리즘을 원격으로 업데이트하고 복구할 수 있는 구조로 설계 개발. 펌웨어 프로그램 개발시 데이터 손실 방지를 위한 2중구조 이상의 작동 원리 탑재

④ 1차년도에 적용한 근거리 통신 기능을 지원하는 구조

⑤ 저전력 통신 모듈의 내장형 프로그램은 1차년도 시스템과 동일하나 거리를 늘린 시스템으로 구성되며 상황에 따라 코디네이터 또는 앤드디바이스로 동작함. 전원이 인가되거나 리셋이 되면 기존 네트워크에서 탈퇴하고, 먼저 가입 가능한 네트워크가 주변에 있는지 후보 부모 라우터를 찾는 동작을 수행함. 주변에 가입 가능한 네트워크가 존재하면 앤드디바이스로 가입하고, 신규 네트워크가 존재하지 않으면 코디네이터로 동작하면서 신규 네트워크를 구성함. 1차년도와 같이 기존 네트워크에 가입한 경우 보조(Secondary) 시스템으로 동작하게 되며 후자와 같이 신규 네트워크를 구성한 경우 주(Primary) 시스템으로 동작함. 보조 시스템으로 동작하는 경우 주기적으로 깨어나 시스템 상태를 주 시스템에게 보고. 주 시스템은 보조시스템으로부터 상태 보고 메시지를 수신하면 배터리 충전상태, 위성 접속 상태, 저전력 무선통신 모듈의 수신세기로 이루어지는 상태응답 메시지를 보조시스템에 전송. 보조시스템에서 상태 보고 후 상태응답 메시지를 수신하지 못한 경우 재시도를 수행하며 상태응답 메시지를 재차 수신하지 못하는 경우 주 시스템에 이상이 발생한 것으로 판단하여 기존 네트워크 탈퇴, 네트워크 찾기, 신규네트워크 구성의 순으로 주 시스템으로 스위칭하여 동작함. 설계내용은 '장단거리 혼합형 64노드 이상의 네트워크 구성, 시작품 설계 및 제작' 에 추가 설명됨.

– 통합형 멀티 센서 인터페이스 회로를 수정, 동토 환경인자의 원격 무선 전송 기술에 대한 성능 개선(Fig. 41)

① Campbell Scientific 社의 CR1000 또는 CR3000 데이터로거와 ModBus 연동이 가능한 구조로 설계

② 최저 동작 온도(−40℃)를 만족하여 정상적인 운전이 가능한 환경인자 측정시스템 개발

③ 프로그램을 통한 관측장치 전원 및 통신 성능 개선

④ 장단거리 혼합형 64노드 센서 이상 사용 가능한 펌웨어 프로그램 개발

⑤ 1단계 2차년도에서는 2단계에서 계획한 중거리 이상의 무선 전송 목표 달성을 위해 센서노드와 게이트웨이에 사용할 무선 통신 기술을 선정하기 위하여 저전력 중장거리 무선통신 기술인 LoRaWAN와 Sigfox 기술을 검토하였음. 통신 속도, 패킷 길이, 소비 전력, 통신거리을 중요한 성능으로 판단하여 통신 거리는 비교적 불리하나 다른 성능이 우수하여 최종 LoRaWAN을 선정하여 시제품 제작하였음. 개선내용은 '장단거리 혼합형 64노드 이상의 네트워크 구성, 시작품 설계 및 제작' 에 추가 설명됨.

– 환경인자 측정시 발생되는 소모전류 억제 및 발열감쇄 효과, 신호전송 손실 억제를 위한 차동 신호 전달, 이동식 관측장치의 케이스 설계 등 변경(Fig. 42).

극지연구소

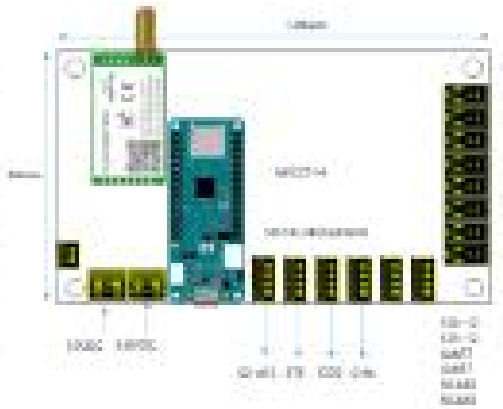


Fig. 41. Design and modification of sensor module.

Fig. 42. Case design and modification of sensor module.

① IEEE 802.15.4 규격의 MAC/PHY 계층의 상위에 ZigBee NWK와 API로 구성됨. 응용계층에서는 위성 게이트웨이에서 전송하는 측정주기에 따라 센서 값을 읽고 자체 uSD에 날짜와 시간, 센서값 형태의 시계열 값으로 저장하고 위성 게이트웨이에 결과값 전송. 센서 노드의 휴지시간(Idle) 상태에서는 슬립모드로 동작하여 대기 전력을 최소화함.

② 제어기, 위성통신모뎀 등을 보조시스템 활성시 모두 휴지모드로 동작하여 배터리 동작을 최소화함. 저전력 무선통신모듈 만 주기적으로 활성모드로 전환하여 주시스템과 각 시스템의 배터리 충전상태, 위성통신 접속 상태, 저전력 통신 모듈의 수신 신호 세기 등의 상태 정보를 교환함.

③ 눈, 온도, 장애물 등에 의한 환경에서 위성게이트웨이와 복합센서 모듈간 데이터 손실 없이 원활하게 통신하기 위해서는 충분한 여유분의 전력밀도(Power Spectral Density)를 보장하도록 개발

– 관측장치 전원 및 통신성능 개선

① 복합센서 모듈로부터 수신된 관측데이터를 uSD 카드에 센서 타입별로 측정 날짜와 시간으로 구분하여 손실 없이 저장

② 설정된 주기로 관측데이터의 평균, 순시 값을 극지연구소 서버로 전송

③ 무선통신 소프트웨어는 레이어(Layer) 구조의 모듈화된 스택을 사용하여 구현하고 안정적 동작과 하자보수가 용이한 구조로 설계 적용

④ 프로그램을 통한 관측 장치전원 및 통신 성능 개선

⑤ 충분한 여유분의 전력밀도(Power Spectral Density)를 보장하고 RF 출력을 분석하기 위해 스펙트럼 분석기를 활용하여(Fig. 43) 채널 특성과 안테나 이득에 따른 RF 출력을 분석하여 전원 및 통신 성능 개선 결과를 확인함.

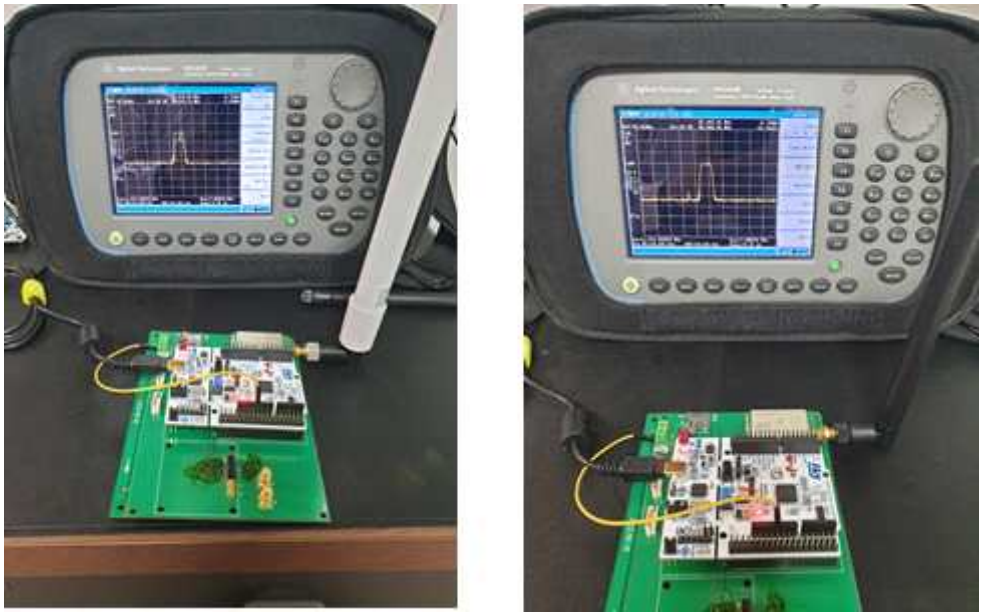


Fig. 43. RF Output Power vs. Antenna gain.

⑥ Fig. 44에 나타난 바와 같이 송신기에서 RF 출력을 동일하게 30dBm으로 설정한 경우 7dBi 안테나 사용시 -0.74dBm, 3dBi 안테나 -7.23dBm로 측정되어 RF 트랜시버 칩셋의 수신 감도 -129dBm을 고려하면 충분한 링크 버짓(link budget) 임.

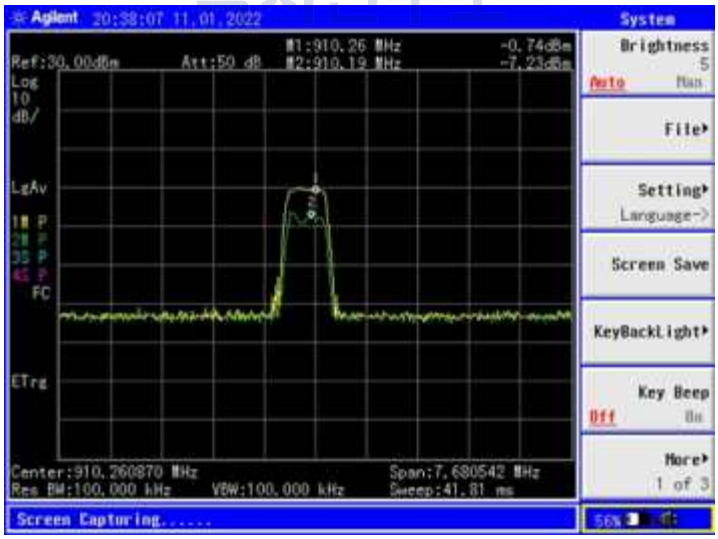


Fig. 44. RF Output Power vs. Antenna gain.

– 개발된 통합형 멀티 센서 성능시험

① 무선통신 성능 : 개발된 통신 모듈의 거리테스트를 진행하여 거리별 수신 감도 측정

② 거리테스트는 LOS 환경에서 최소 1km까지 수행

③ 대기전력 및 소비전력 : 최소 대기전력과 최대 소비전력를 분석

④ 저온동작시험 : 저온환경에서 안정적으로 데이터가 수집되는지 측정 시험내용은 '센싱 데이터 원격 전송 기술 및 복합전원제어 모듈 기술 성능 평가' 에 추가 설명됨.

– 원격 무선전송 시스템 장거리 무선전송 플랫폼 개발

① 토양센서, 토양함수비, CO_2, CH_4 센서를 동시에 연결 가능한 인터페이스 회로를 설계하여 적용
② 태양광 또는 풍력 등 자가발전이 가능한 충전 회로 설계하여 적용
③ 위성 통신 게이트웨이와 통합 복합센서 모듈간 무선통신 기술은 저전력 근거리 통신 방식은 지그비3.0(ZigBee 3.0)을 적용하여 개발하되, LOS(Line Of Sight) 환경에서 최소 200m에서 5dB 이상의 마진을 갖도록 설계
④ 위성 통신 게이트웨이와 통합 복합센서 모듈간 무선통신 기술은 저전력 중장거리 통신 방식으로 설계하여 적용하되, 최소 1km 이상 통신 반경을 갖도록 설계
⑤ 정밀도가 높은 센서를 접목한 기준 복합센서 모듈을 개발.
⑥ 회로의 전자 부품은 극지환경에서 안정적으로 동작 가능 특성을 갖는 부품으로 선정하여 설계
⑦ 대기전력은 2uA 이하로 동작 가능하도록 설계
⑧ 32GB 이상의 uSD 카드를 장착할 수 있도록 설계, 개발내용은 '장단거리 혼합형 64노드 이상의 네트워크 구성, 시작품 설계 및 제작' 에 추가 설명됨.

– 장단거리 혼합형 64노드 이상의 네트워크 구성, 시작품 설계 및 제작

① 토양온도, 토양함수비, CO_2, 및 CH_4를 센싱 하여 보고 할 수 있는 시스템을 구성하는 것까지 완료함. 향후 센서노드를 규격화할 예정임.
② Fig. 45는 중장거리 무선 통신이 가능한 자가발전형 복합센서 모듈의 구성도로 1차년도에 설계된 태양광 발전 기능을 포함. 무선 통신기술은 앞서 언급한 LP-WAN 기술을 사용하여 설계하였음.

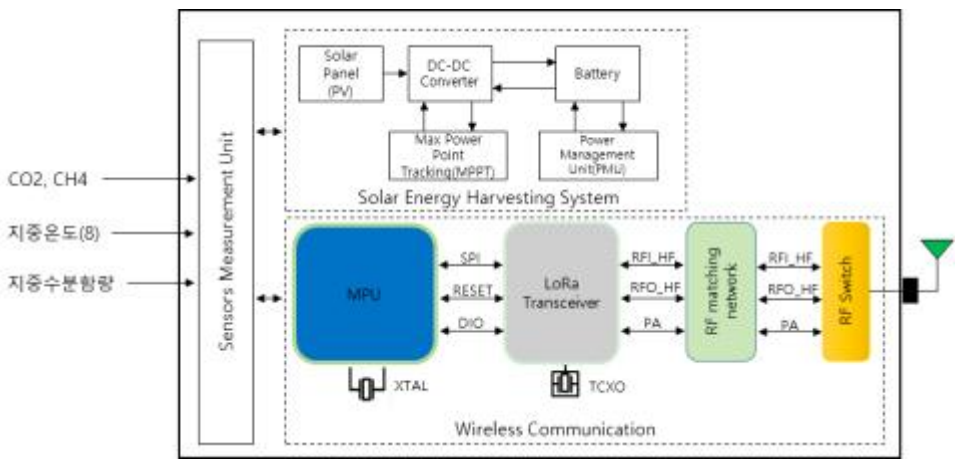


Fig. 45. Hardware architecture of composite sensor module.

③ Fig. 46은 저전력의 태양광에서도 충전기 가능한 충전회로로 1차년도에 설계된 소형 태양광전지 0.5W 전력을 동일 사이즈 1.4W 고효율 태양광전지를 적용하였음.

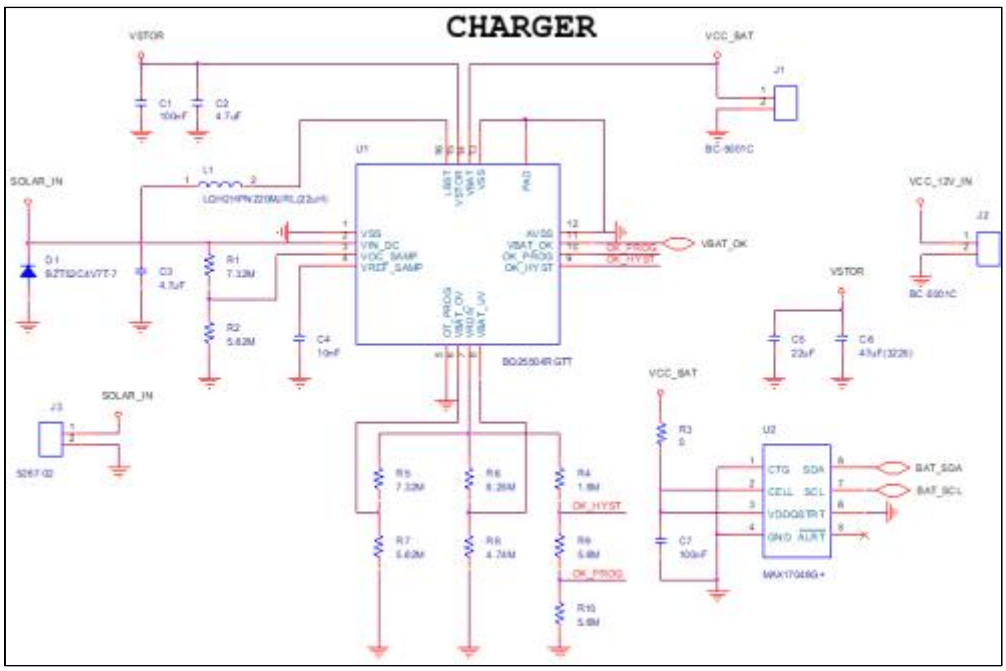


Fig. 46. Solar energy harvesting circuit.

④ Fig. 47은 설계된 무선 통신 모뎀의 회로로 동작 주파수 850.125 ~ 930.125MHz 대역에서 동작가능하며 무선 채널은 81개까지 설정 가능함. 무선통신속도(air data rate) 2.4 ~ 62.5kbps로 가변가능하며 센서 설치 환경에 따라 통신 속도를 낮춰 통신 도달 거리를 늘리거나 통신 속도를 높여 좀더 고용량의 데이터를 전송. 통신모뎀의 대기전류는 5uA로 아주 낮은 값이나 전원을 ON/OFF 제어함으로써 소비전류를 최소화할 수 있음.

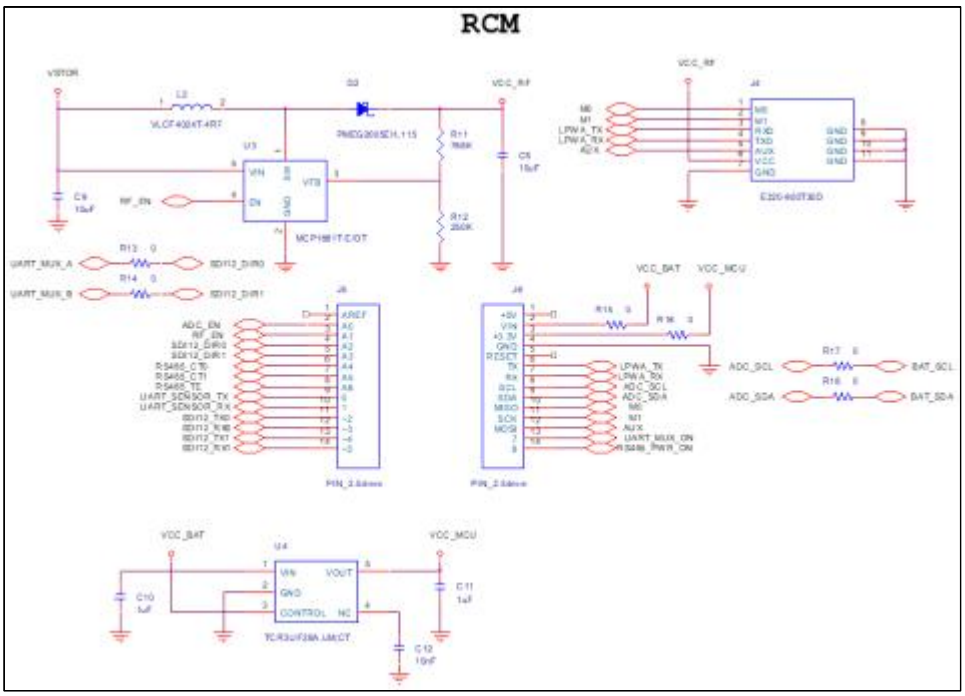


Fig. 47. Radio communication module circuit.

⑤ Fig. 48은 8개의 지중온도 센서를 동시에 연결하기 위한 멀티채널 ADC(Analog to digital converter) 회로임. ADC 는 16bits 의 고해상도로 설계하였음.

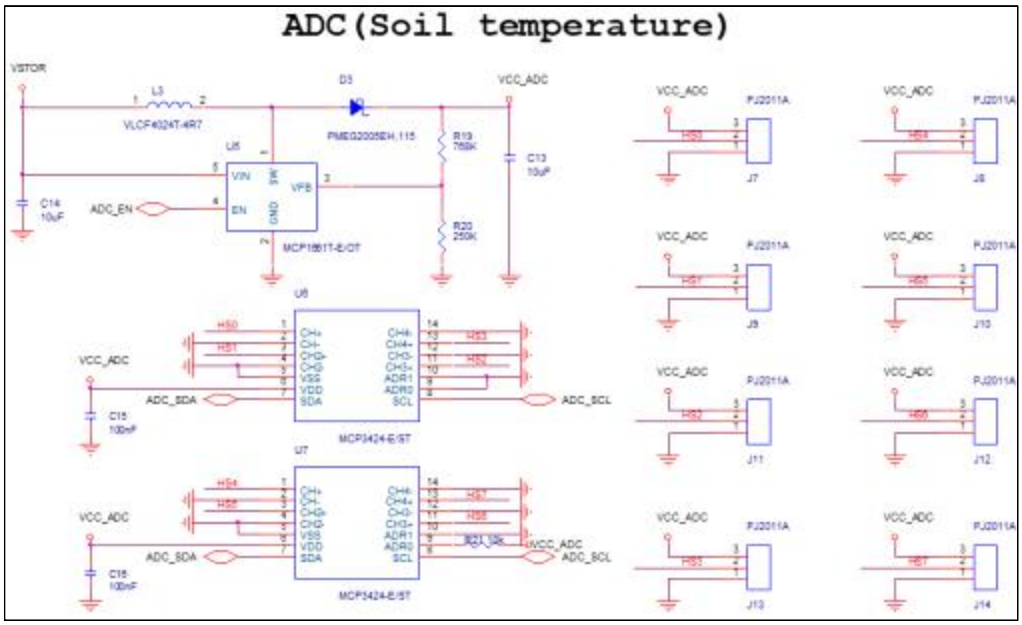


Fig. 48. Soil temperature sensor interface circuit .

⑥ Fig. 49는 지중수분함량, 식생지수 등의 환경인자 센서를 연결하기 위한 SDI-12 인터페이스 회로임. 지중수분함량, 식생지수 센서 뿐만아니라 표준 SDI-12 규격으로 설계된 다양한 환경센서와 호환인 가능함.

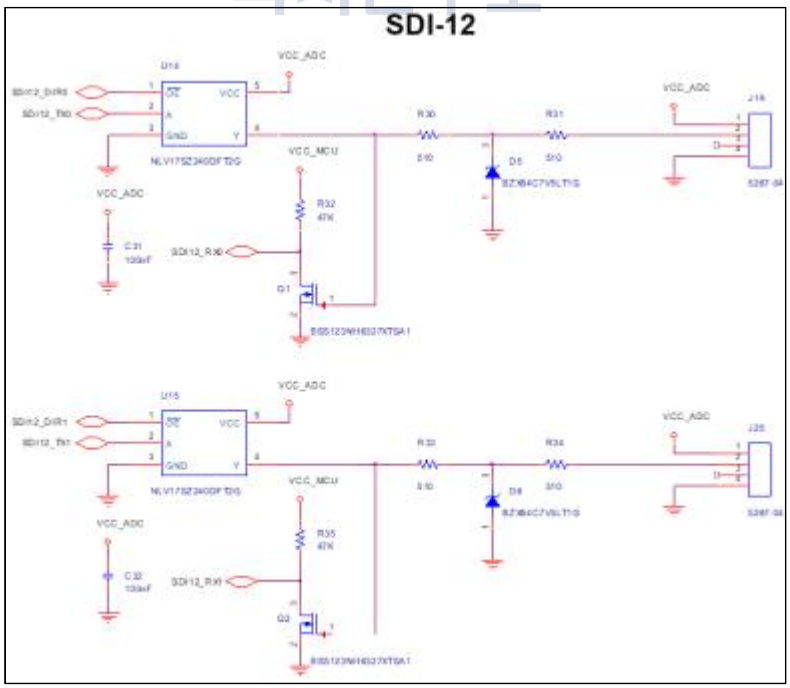


Fig. 49. Soil water contents sensor interface circuit.

KOPRI 극지연구소

⑦ Fig. 50은 앞서 언급된 회로도로 설계된 PCB 파일과 조립사진을 나타내며 2차년도 기준으로 6포인트 64노드이상 설치하여 알래스카 카운실 거점에서 운영 중임.

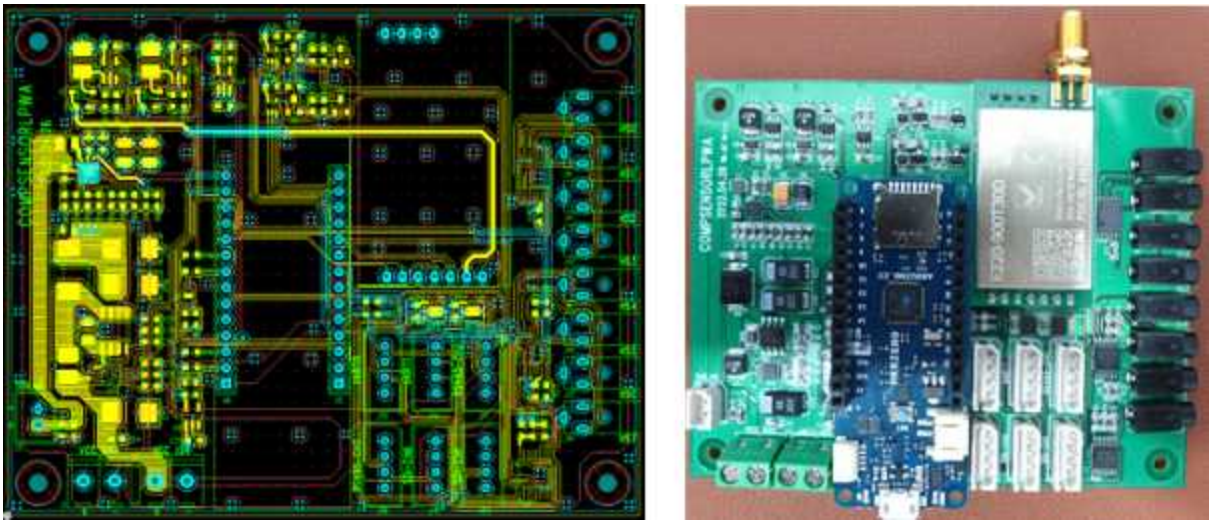


Fig. 50. PCB design(Left), assembly(Right) of composite sensor module.

▪ **개발된 시스템 자가발전 장시간 저전력 운용**

– 장시간 운용을 위한 에너지 하베스팅 기술 개발

① 배터리 절약형 지능형 센싱 기술을 접목한 저전력 동작 기술을 활용하여 수년간 무보수 가능하도록 설계하였음. 저전력 동작 알고리즘(Active, Sleep, Deep sleep, Wake-up 방식 등)과 지능형 에너지 하베스팅 기술을 접목하여 1년 이상 장시간 유지보수 없이 운영하기 위해서는 배터리 용량이 늘리거나 대기 전력을 최소화하여야 함. 배터리 용량을 늘리는 것은 한계가 있으며 동계에 태양 발전이 어려운 극지 환경을 감안하고 최소 3개월간 태양광 없는 극야시기에 맞춰 대기전력과 동작전류를 고려하여 설계하였음.

Table 3. Power consumption of low power sensor.

Name	Awake (ms)	Times (#/H)	Current (mA)	Current per hour (mA)	Current per year (mA)	Battery use (%)
Transmit	70	12	38	0.008866667	77.672	4.787616991
Receive	10	12	15	0.0005	4.38	0.269978402
T/RH	2000	12	5	0.033333333	292	17.99856012
Soil temperature	150	12	10	0.005	43.8	2.699784017
SWC	150	12	15	0.0075	65.7	4.049676026
CO_2	40000	1	19	0.042222222	369.8666667	22.79817615
CH_4	40000	1	35	0.077777778	681.3333333	41.99664027
NDVI	600	12	2	0.004	35.04	2.159827214
Sleep	1000	3600	0.002	0.002	17.52	1.079913607
Battery	1000	3600	0.004	0.004	35.04	2.159827214
합계				0.1852	1622.352	100
배터리 용량(mAH)				5000		
사용가능시간(Year)				3.081945225		

Table 4. Power consumption of high power sensor.

Name	Awake (ms)	Times (#/H)	Current (mA)	Current per hour (mA)	Current per year (mA)	Battery use (%)
Transmit	70	12	38	0.008866667	77.672	0.532468572
Receive	10	12	15	0.0005	4.38	0.030026423
T/RH	2000	12	5	0.033333333	292	2.00176155
Soil temperature	150	12	10	0.005	43.8	0.300264233
SWC	150	12	15	0.0075	65.7	0.450396349
CO_2	120000	0.2	120	0.8	7008	48.0422772
CH_4	120000	0.2	120	0.8	7008	48.0422772
NDVI	600	12	2	0.004	35.04	0.240211386
Sleep	1000	3600	0.002	0.002	17.52	0.120105693
Battery	1000	3600	0.004	0.004	35.04	0.240211386
합계				1.6652	14587.152	100
배터리 용량(mAH)				5000		
사용가능시간(Year)				0.342767389		

② Table 3은 저전력 가스센서 모델을 적용한 경우 배터리 용량과 사용 가능 시간을 예측한 것이며, Table 4는 비교적 성능이 우수하고 소비전력이 큰 고급형 가스 센서를 적용한 경우, 같은 배터리용량으로 사용 가능 시간을 예측한 것임. 즉, 상대적으로 소비전력이 높은 고정밀 가스센서를 적용한 경우 같은 배터리 용량으로 사용가능한 시간 예측한 것임.

③ Fig. 51은 리튬 배터리의 온도에 따른 방전 특성을 나타낸 것으로 25° C 경우 배터리 정격용량 500mAH을 모두 소비하지만 온도가 -30° C으로 내려간 경우는 부하 전류에 따라 사용할 수 있는 배터리 용량이 150mAH ~ 400mAH로 매우 낮아짐.

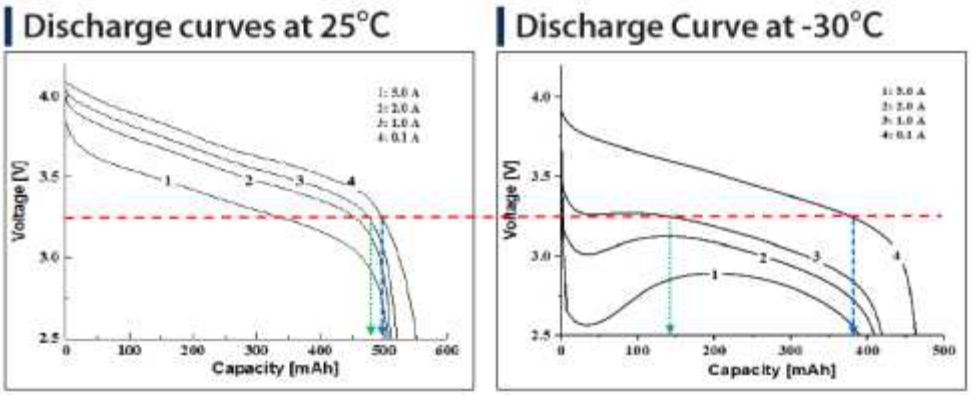


Fig. 51. Temperature vs. Discharge (Rechargeable lithium-ion batteries).

- 원격 데이터관리 등의 솔류션을 활용한 데이터 및 데이터 취득 핵심 기능인 전원공급장치 등의 이중화

① 위성 게이트웨이는 무선 통신을 위해 위성통신모뎀, ZigBee(LP-WPAN), LoRa (LP-WAN)을 선택적으로 사용할 수 있도록 모듈형태로 설계하였으며 LoRaWAN 구조는 Fig. 52와 같이 좀더 상세하게 제안함. 센서 노드로부터 수신된 센싱 데이터를 저장하기 위해 비휘발성 저장 장치인 uSD 카드를 포함하여 설계하였음.

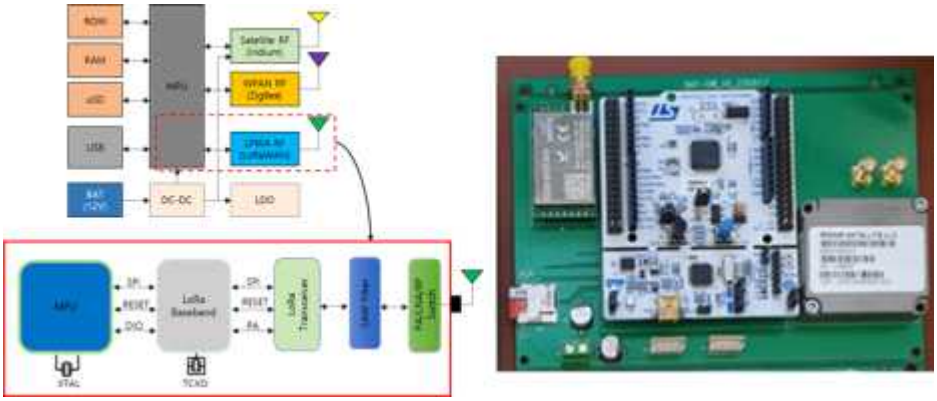


Fig. 52. Satellite gateway.

② 게이트웨이의 위성 통신 모뎀은 선택적으로 사용할 수 있도록 부착, 탈착이 용이하도록 Fig. 53과 같이 컨넥트(Board to Board)를 사용하여 설계하였으며 설치 결과는 Fig. 54와 55에 나타내었음.

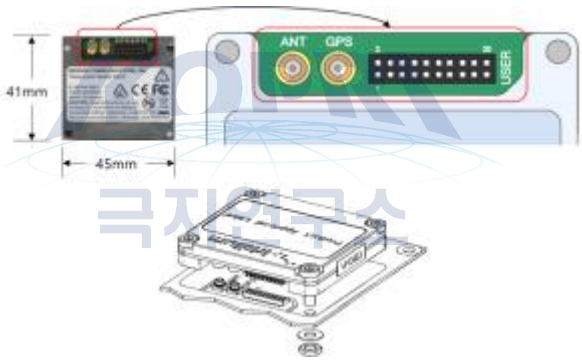


Fig. 53. Satellite communication modem combination structure.

Fig. 54. Statellite gateway multiplexing system.

Fig. 55. Battery multiplexing system.

- **배터리 절약형 지능형 센싱 기술을 접목한 저전력 동작 기술을 활용하여 수년간 무보수 가능 시스템 구축 및 Wake-up 전원관리(Active, Sleep, Deep sleep, Wake-up 방식 등)과 지능형 에너지 하베스팅 기술 접목(태양광, 풍력, 열, 진동 등)**
  ① 본 연구에서와 같이 계획한 휴지/활성 방식을 사용하면 소비전력을 최소화할 수 있음. 휴지(Sleep)시 소비전류는 RF와 MCU 합계가 2uA 이내이며 1분마다 센서값을 측정하여 위성 게이트웨이에 전송하는 시나리오로 설계되었으며, 선정하는 센서에 따라 달라질 수 있으나 여유분(Margin)을 포함하여 소비전류, 센서 활성 시간 등을 고려하여 설계함.
  ② Fig. 56은 센서에 전원을 단계적으로 공급하여 소비되는 전류의 소비 패턴을 나타낸 것임. 모든 센서에 전원이 인가된 경우 가장 큰 전류가 소비되며 단계적으로 응답시간이 짧은 센서부터 전원을 차단 또는 저전력 상태로 변경함으로써 전체 소비전류 합은 감소함. 가장 응답시간이 긴 CO_2, CH_4 센서의 전원을 차단하고 게이트웨이로 전송한 후에 저전력 상태로 진입하면 최소 대기전력 상태가 됨.

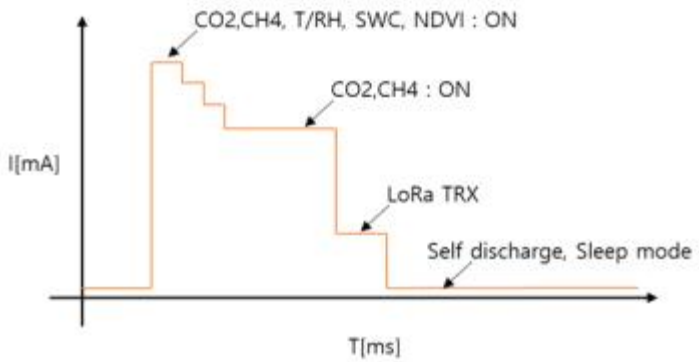


Fig. 56. Current profile of composite sensor module.

- **개발된 인터페이스 코팅**
- **Silicone Based, Solvent Based, Water Based 및 UV Curing 코팅을 실시하여 최적의 코팅 방법을 선정함**
  ① 전자 SMD Assembly PCB에 코팅은 사용하기가 어려웠음. 대부분의 코팅 방식이 까다로운 공정이어서 일부 군용. 철도. 항공. 선박 및 산업기기 등 High-tech 분야에서만 적용

② 최근 전자공학에 있어 견고성을 강조하는 요구가 늘어남에 따라 편리한 코팅 솔루션이 개발

③ 부품 간격이 조밀한 채로 작업할 경우 부식성 물질 있으며 이러한 부식을 막아주는 대안으로 전자기기를 코팅하는 방법이 있음. 전자제품은 현대인 생활의 일부가 되어 있으며 더욱더 견고한 제품이 요구됨. 견고하고 튼튼한 제품 생산을 위해서는 전자부품 어셈블리의 코팅이 매우 중요함.

④ 부품 조립후 코팅으로 막을 입히게 되면 고밀도 SMD PCB뿐만 아니라. 감전, 습기 및 부식 방지에 도움이 됨.

※ 코팅 타입

① Silicone Based (실리콘)
Coating력은 좀 약한 반면 탄력적인 코팅방식으로 60℃ 이하 열(2~5분)에서 Curing. 20%~35% 습도 필요 유해성 연기나 물질이 전혀 없음.

② Solvent Based (솔벤트)
Coating력은 강하지만 탄력적 코팅이 약함. 80℃ 이하 열 (8~10분)에서 Curing. 사용에 있어 위험하고 폭 발성 물질(curing동안 폭 발성 가스가 분출될 수 있음)

③ Water Based (물)
Coating력은 강하지만 탄력적 코팅이 약함. 실내온도 22℃ 이하(20분)에서 빠른 Curing. 코팅 및 세부 공정 시 향기나 자극성이 전혀 없음.

④ UV Curing
Coating력이 강하고 UV light에서 코팅됨. Belt 속도 1.5~7.5M/min. 유해성 연기나 물질이 전혀 없음. 조밀한 부품 사이에 코팅된 것은 curing되지 않음.

– 외부 함수비에 대한 PCB의 센서 코어 및 기타 연결부의 내구성 강화 및 최저온도(–40℃)를 만족하여 정상적인 운전이 가능한 환경인자 측정 시스템 개발

※ 코팅 공정

① 정전기 대책
② PCB 세척 및 건조
③ 코팅(코팅–건조–코팅–건조 반복)
④ 마스킹제거
⑤ 코팅검사

☞ 본 연구에서 사용된 PCB를 이용하여 감전, 습기, 부식 방지에 도움이 되는 PCB 코팅을 Fig. 57과 같이 수행함. 최저온도 시험 결과는 '–40℃ 저온 시험' 의 내용에 포함됨.

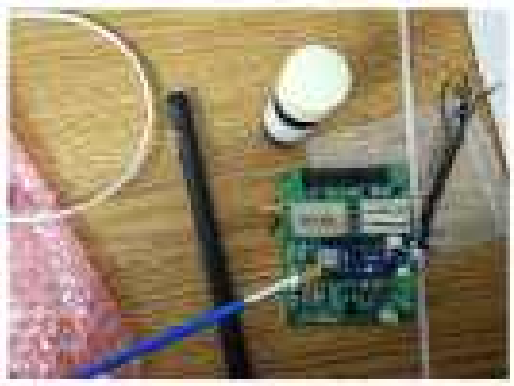


Fig. 57. PCB coating process.

- 데이터 취득의 핵심인 위성 게이트웨이의 신뢰성을 높이기위해서 태양광 충전 패널, 배터리, 충전 제어기를 포함한 전원과 위성게이트웨이의 무선 센서 네트워크를 완전 이중 구조로 설계하여 설치하였음(Fig. 58).
- Fig. 59는 알래스카 카운실에 '21~' 22년에 설치한 복합센서로 중단거리 혼합형으로 계획한 84노드(센서의 개수 84개) 이상 운영을 달성하였음.

Fig. 58. Installation of Satellite gateway in Alaska council('22).

- 토양함수비는 약 60% 정도의 값이 나타남. CO_2의 경우 1200ppm을 나타내고 CH_4는 최대 0.85 voltage까지 나타나고 있음. 장기데이터 관측결과 중간에 높은 값을 나타내는 것은 센서의 불안정으로 인해 높은 값을 측정한 결과로 판단되며 센서별 측정결과 일자가 다른 것은 알래스카 현장에 서식하는 동물로 인해 전원 또는 센서 케이블이 손상되어 데이터를 얻지 못한 경우임. 이러한 동물로 인해 피해를 최소화하기 위해 케이블 및 전력 박스의 보강을 계획함.
- 따라서 본 연구에서 측정된 결과를 바탕으로 개발된 시스템은 태양광 자가 발전형 전원 시스템 설계 및 구현 가능, 지중온도, 지중 수분함량, CO_2, CH_4 인터페이스 개발 및 구축, 위성 통신 게이트웨이와 통합 복합센서 모듈간 무선 통신 기술은 저전력 근거리 통신 방식으로 설계 및 적용, 대기전력은 2uA 이하로 동작 가능 제작, 회로의 전자 부품은 극지 환경(−40℃)에서 안정적으로 동작 가능 특성을 갖는 부품을 선정하여 설계, 제작 및 설치, 32GB 이상의 uSD 카드를 장착할 수 있어 환경인자 측정부에서도 데이터 저장 가능, 약 84개의 센서노드에서 획득된 데이터를 센서 통신 모듈과 게이트웨이 모두에서 저장할 수 있는 시스템 및 환경인자 획득 위성 통신 모듈, 게이트웨이 이중화로 데이터 손실 최소화 가능한 시스템임.

※ 북극 다산과학기지 관측거점 설치

- 북극권 지리적 환경변화 인자 관측을 위해 개발된 통합형 복합센서 시스템을 북극 다산과학기지(스발바르 군도 스피츠베르겐섬에 위치) 인근에 지중 CO_2 및 토양 표면 온도에 대해 관측하기 위하여 2022년(1단계 2차년도)에 설치함.
- 그러나 다산과학기지의 경우 여러 나라에서 다양한 장비를 사용하고 이러한 장비들이 전파에 민감하기 때문에 무선 통신을 이용한 데이터 수신이 아니라 현장에서 저장되는 형태로 환경인자 관측 시스템을 설치함. 또한 이러한 문제로 인하여 인공위성을 통한 데이터 취득이 아닌 차년도에 데이터를 획득해야함. Fig. 61은 설치된 시스템을 나타냄.

Fig. 59. Installation of Composite sensor module in Alaska council.

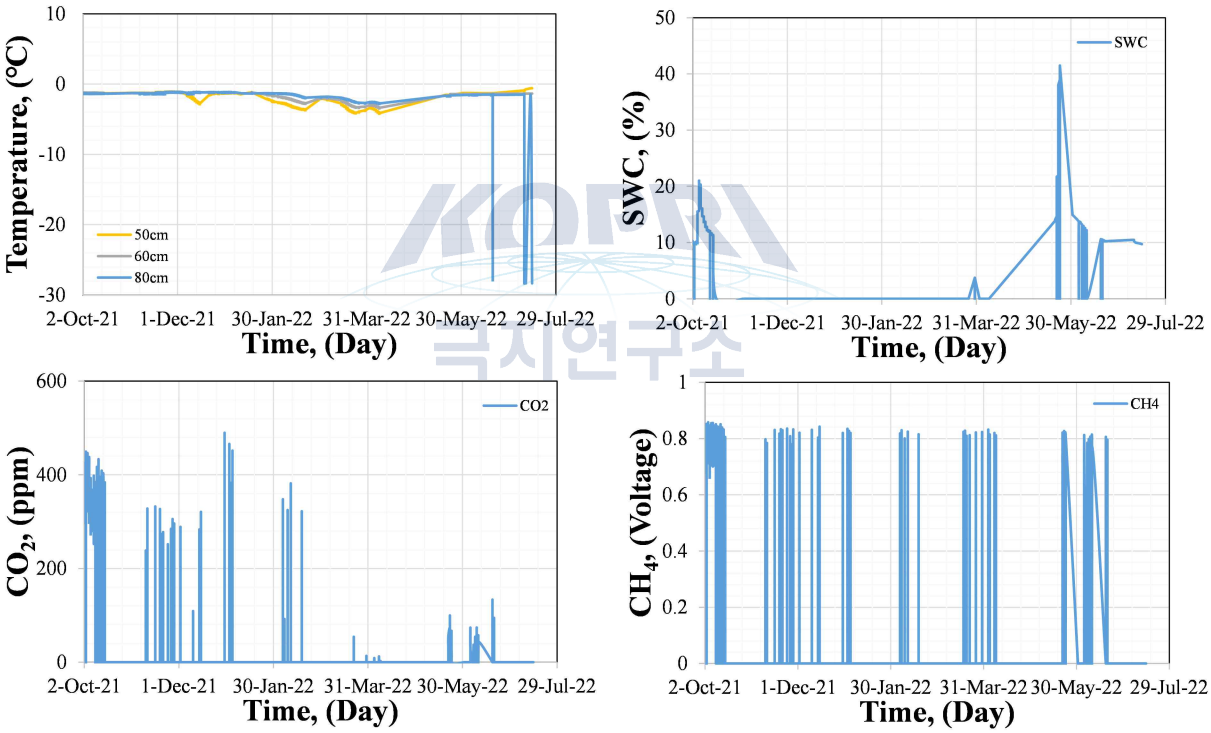


Fig. 60. Long-term measurement results at site 3.

[2022년(1단계 2차년도) 관측 결과]

- Fig. 60은 2021년 10월부터 2022년 9월까지 알래스카 카운실에서 관측한 결과를 나타내고 있음 (site 1, 2, 4, 5, 6은 2단계 단계보고서 참조). 개발된 모니터링 시스템을 이용한 알래스카 카운실의 환경인자 관측 결과 지중온도는 약 30℃에서 -13℃ 값 분포를 보임.

Fig. 61. Monitoring system at Dasan Station, Svalbard.

■ 모니터링 시스템 원격 및 에너지 하베스팅 기술 고도화(2단계 1차년도)

▪ 장/단거리 통신 프로토콜 결정

※ 네트워크의 구성에 대한 토폴로지 (topology) 결정

- 무선 통신 기술은 전자장치 및 네트워크에 편리함과 유연성을 제공하기 때문에 모니터링 시스템에 많이 적용되고 있음. 특히 고가의 케이블과 배선이 필요하지 않으므로 산업, 농업, 가전 제품 및 기타 많은 산업 분야에서 적용되고 있음. 그리고 각 산업은 용도와 환경에 따라 장거리 무선 통신 기술과 단거리 무선 통신 기술로 각기 다른 기술적 특성을 요구함. 모니터링 시스템 개발자의 경우 현장상황과 얻어지는 데이터의 종류에 의해 장/단거리 통신 기술을 선택해야 함.
- 극지 동토 지역에서 상시 모니터링 시스템을 유지하기 위해서는 데이터로거 및 저장장치, 범용성 있는 프로그램, 하드웨어, 소프트웨어, 펌웨어의 확장성, 비례 축소성 및 신축성이 확보, 전원 중단에 대비 등 많은 시스템 조건이 필요함. 특히 네트워크 구성 요소의 배열 또는 물리적 배치 상태(토폴로지)는 네트워크에 필요한 장비의 성능과 수량, 네트워크 확장성 및 관리 방법에 따라 토폴로지의 선택이 달라짐.
- 따라서 처리량(Throughput), 전력(Power), 노이즈(Noise), 주파수(Frequency), 자유 공간 손실(Free space loss), 회절(Diffraction), 다중 경로(Multipath), 흡수(Absorption), 지형(Terrain), 안테나 및 범위(Antennas and Range), 전원 관리, 절전 모드 등을 고려하여 프로토콜을 결정하여야 함.
- 무선센서네트워크의 대표적인 예 중 하나가 바로 ZigBee임. 이 방식은 단거리에서 저전력 데이터 통신을 하는 부분에서 우수한 성능이 가능함. 데이터수집 프로그램은 최초 미터 연결 시에는 미터들에 대한 상세한 정보를 요구하는데 이 데이터가 250바이트를 차지함. 하지만 ZigBee 패킷은 250바이트를 수용할 수 없기때문에 데이터를 여러개로 나누어 전송하는 Fragmentation을 이용함.
- ZigBee 무선모듈은 패킷의 크기에 따라 적당한 크기로 패킷을 나누어 전송하게 되고, 이 분할된 패킷을 받은 ZigBee 무선모듈은 다른 ZigBee 무선모듈로 전송하거나 수집 프로그램으로 전달하게 됨. 수집된 미터링 데이터는 ZigBee에 저장되어 ZigBee 네트워크에서 에너지 관리를 위해 활용됨.
- 중장거리 무선 통신 기술인 LoRaWan는(이하 LoRa) LPWAN의 기반을 형성하는 원격 IoT 무선 기술로 저에너지 최종 장치가 게이트웨이에 연결, 다른 네트워크 서버 및 장치로 데이터를 전송함. 네트워크 장치는 수신된 데이터를 평가하고 최종 장치를 제어함. 따라서, 프로토콜은 저전력 장치로 구성되어 있으며 운영 비용 절감 및 원격 기능 등 다양한 성능을 제공함. 또한 게이트웨이당 수천 개가 넘는 장치와 작은 페이로드에 최적화되었으며 저지연 전원 공급 장치 작동 및 저전력 배터리 작동에 사용할 수 있음. LoRa 통신은 감지 및 간섭에 다소 탄력적이며 도플러 바이어스의 영향을 받지 않으며 장애물을 통과할 수 있음. 규격은 Table 5에 나타냄.
- 극저온 환경에서 구현 가능한 통신방식 중 LoRa (Long Range Radio Wan)를 택하면, 측정범위

(통신가능 거리)는 도심 지역에서 킬로미터(kilometer) 단위로 가능하고, line of sight가 가능한 환경에서는 무려 20에서 30 킬로미터의 사정거리를 갖는 경우도 있음. LoRa 모듈을 만드는 Libelium사의 실험 결과에 의하면 21킬로미터까지 통신이 가능했음.

- 모니터링 시스템을 LoRa로 구현했을 때, LoRa 통신방식을 탑재한 Semtech사의 SX1278모듈의 성능을 확인해 보면, 동작온도는 -55℃에서 +115℃까지 사용 가능하므로, 극저온 환경에서도 사용 가능할 것으로 예상됨.
- 따라서 본 연구에서는 무선 통신을 이용한 센서 통신과 데이터 저장에 관한 연구로 단거리 통신에서는 IEEE 기반의 ZigBee를 장거리 무선 통신은 LoRa를 이용하여 시스템을 개발하였음.

Table 5. Specification of LoRaWAN.

Specification	LoRaWAN
Modulation	CSS
Frequency	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)
Bandwidth	250 kHz and 125 kHz
Maximum data rate	50 kbps
Bidirectional	Yes / Half-duplex
Maximum messages/day	Unlimited
Maximum payload length	243 bytes
Range	5 km (urban), 20 km (rural)
Interference immunity	Very high
Authentication &encryption	Yes (AES 128b)
Adaptive data rate	Yes
Handover	End-devices do not join a single base station
Localization	Yes (TDOA)
Allow private network	Yes
Standardization	LoRa-Alliance

KOPRI 극지연구소

※ 네트워크 안에 있는 노드간의 연결 방식 결정

- 네트워크의 구성에 대한 또 다른 부분은 Fig. 62와 같은 토폴로지 (topology)임. 이 부분에서 네트워크 안에 있는 노드간의 연결 방식, 즉 네트워크가 어떤 형태로 서로 데이터를 주고받는지 정해지는 부분임. 무선센서네트워크에서 자주 사용되는 토폴로지는 스타 (star), 클러스터 트리 (cluster tree), 그리고 메쉬 네트워크이며 각 형태에 대한 장단점이 있고, 환경에 따라 선택하면 됨.

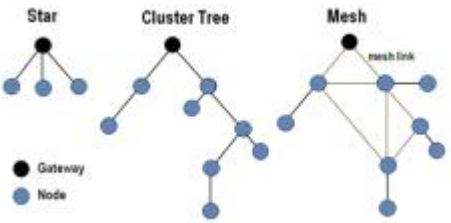


Fig. 62. Example of topology.

- 본 연구에서는 네트워크의 구성에 대해 중앙 서버 게이트웨이가 모든 노드를 관리하는 Star형으로 네트워크를 구성함. 이는 고장 발견 및 수리 용이, 노드 증설 및 이전이 편리하고, 한 노드 장애시, 전체 네트워크에 영향이 없어 동물의 침입, 자연환경으로 인한모니터링 장비의 훼손 등으로 인한 문제 해결이 용이해 효율적인 운용이 가능하기 때문임.

※ 실시간 무선 전송 네트워크 확인

- ZigBee의 경우, RSSI(Received Signal Strength Indicator) 값을 측정하여 PC에 자료를 수집함. 특히 안정적인 데이터 수집 여부를 판단하기 위하여 측정 횟수에 대한 RSSI 값을 측정하는 실험을 수행하였음. 각 실험 구간에서 100회 반복 측정하였으며 측정값은 Fig. 63에 나타내었음. 측정 결과, 60층 내외의 건물에 설치되는 수직 관로에 무선 시스템을 적용하는 데 문제가 없을 것으로 판단됨. 개발된 시스템에서는 무선 네트워크에서 ZigBee를 사용하므로 2홉핑 내에서 통신이 가능할 것으로 보임. 옥상에서 진행된 백본네트워크(B-NWK)을 위한 실험 결과 400m 내에서 1 홉핑으로 통신이 가능할 것으로 판단됨.

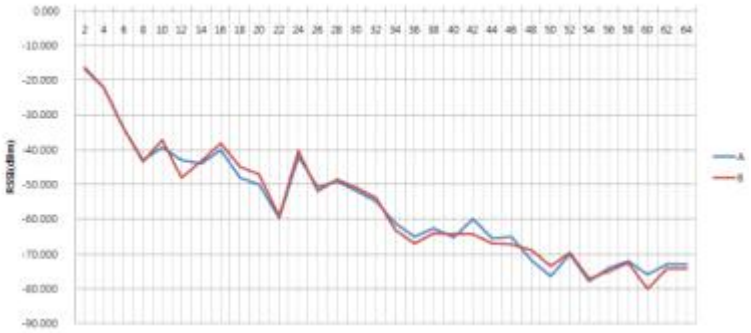


Fig. 63. Test results for RSSI - ZigBee Module.

- 중장거리 통신에 대한 RSSI 측정값은 Fig. 64에 나타내었으며 수신 감도 -129dBm을 감안하면 충분한 여유도가 있음.

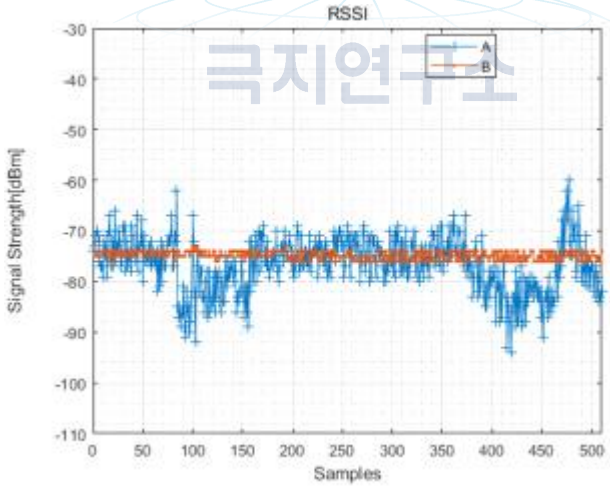


Fig. 64. Test results for RSSI - LoRaWAN Module(A:6.5km, B:9.5km).

※ 모니터링 서버에서는 계측의 시기, 기간 및 시스템의 운용 상태 등을 원격 제어 평가

- CPS/IoT 기반 북극 환경인자 수집용 스마트 관측 플랫폼은 관측 거점에 설치 운영되는 물리적 장치와 인터넷 환경에서 동작하는 소프트웨어로 구성되며 수집된 환경인자 데이터를 수집 · 저장 · 분석하여 연구자에게 제공함. 관측 거점에 설치된 모든 물리적 센서노드와 인터넷 공간의 컴퓨팅 자원이 네트워킹을 통해 유기적으로 융합되어 사물들과 서로 소통하며 자동적, 지능적으로 제어됨. 따라서 데이터가 저장되고 수집되는 과정은 다음과 같음.

KOPRI 극지연구소

① 센서노드는 측정된 센싱 데이터를 비휘발성 저장장치에 저장
② 센서노드는 저전력 무선 통신을(LP-PAN/LP-WAN) 사용하여 게이트웨이에 접속하여 센싱 데이터 전송
③ 게이트웨이는 센서노드로부터 수신된 센싱데이터를 비휘발성 저장장치에 저장하고, 인공위성(Iridium-satellite)을 통해 인터넷 공간의 메일 서버로 전송
④ 메일서버에 전송된 데이터는 프로토콜 변환기를(SMTP, POP3, IMAP4->MQTT) 통해 데이터 관리 서버로 전송
⑤ 전송된 데이터는 데이터베이스에 저장
⑥ 저장된 데이터는 시계열 방식으로 시각화되어 연구자에게 제공
⑦ 관측데이터 관측 주기, 보고 주기, 보고 방식(시간 평균, 일평균, 월평균 등) 설정
⑧ 극지환경 관측시스템에 적용하기 위한 사이버-물리(Cyber-Physic) 시스템은 관측사이트에 설치된 모든 센서노드와 인터넷 공간의 컴퓨팅 자원이 네트워킹을 통해 유기적으로 융합되어 사물들과 서로 소통하며 자동적, 지능적으로 제어됨.

- 본 연구에서 개발하는 사이버-물리 시스템(Cyber-Physical Systems; CPS)은 반응형 처리(Reactive computation)를 통해 입력과 출력을 통해 지속적으로 환경과 상호 작용함. 또한 여러개의 연산들이 병행적(Concurrency)으로 처리되고 이들 사이에 정보의 상호 교환이 일어나면서 보다 최적화된 정보를 제공하는데 효과적임. 피드백을 통한 물리 센서노드 제어는 센서를 통해 환경 정보를 얻고 구동기(actuator)를 통해 환경에 영향을 미치는 방식으로 물리 공간과 상호작용도 가능함.
- CPS에서 실시간 처리(Real-time computation)는 매우 중요한 요소이며, 인공지능(AI), 빅데이터(big data) 등의 기술과 접목하여 더욱 지능화될 수 있고 새로운 소자와 센서 기술의 발달로 독립 CPS 시스템에서 대규모 CPS SoS(system of systems)까지 구현이 가능함. 스마트 제조업, 운송, 재난 안전, 건강, 의료, 로봇, 스마트 그리드(smart grid), 스마트공장(smart factory), 스마트도시(smart city) 등 여러 응용 분야에 적용할 수 있음. 따라서 우리 생활과 밀접하게 관련되어 CPS 신뢰 가치(trust-worthy)가 중요함.

※ 복합센서 모듈 적용 128노드 이상 시제품 제작

- Fig. 65는 복합센서용 통신모듈의 구성도로 위성 게이트웨이에서 사용한 LP-WAN 방식의 중장거리 통신 기술을 적용하여 설계하였음. 태양광 충전을 사용하여 배터리를 충전함. 대기온습도, 지중온도, 지중수분함량, 이산화탄소, 메탄센서와 연동이 가능한 인터페이스 회로를 포함하고 있음.
- 단거리 및 중장거리에 사용한 RF 규격은 Table 6과 7에 나타내었음. 그리고 이에 대한 개발된 보드의 규격은 Table 8에 나타내었음.

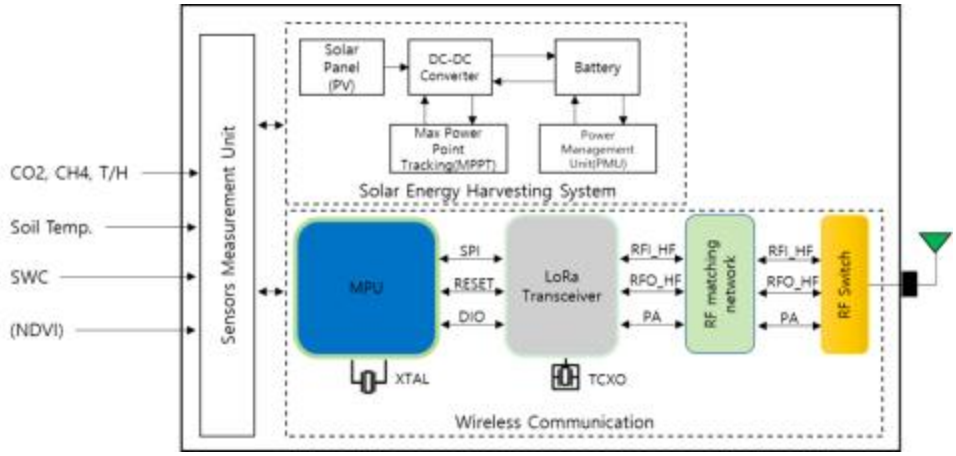


Fig. 65. Complex sensor communication module for LP-WAN.

Table 6. Specifications for WPAN(ZigBee) RF.

구 분		규 격	비 고
Input Voltage[V]	Normal	1.71 ~ 3.8 Vdc	
Current consumption	Max. current	180mA	@ +20 dBm TX
수신감도		-103.9 dBm	@ 1% PER at 250 kbps O-QPSK DSSS
사용 온도		-40 ~ +125℃	
대기 전력		10 mA	
RF	사용주파수	2.4 GHz ISM	
	Bandwidth	2 MHz	
	Max. TX POWER	+20 dBm	
	RX input impedance	50옴	
	RX NF (Max Gain)	3 dB	

Table 7. Specifications for LP-WAN(LoRaWAN) RF.

구 분		규 격	비 고
Input Voltage[V]	Normal	1.8 ~ 3.9 Vdc	
Current consumption	Max. current	128mA	@ +20 dBm TX
사용 온도		-40 ~ +125℃	
대기 전력		200nA @ Sleep mode 1.5uA @ Idle mode	
RF	사용주파수	915 MHz ISM	
	Bandwidth	7.8 ~ 500 kHz	
	Max. TX POWER	+20 dBm	
	RX input impedance	50옴	
	RX sensitivity	-148 dBm	

Table 8. Proposed Board Specifications.

구 분		규 격	비 고
Input Voltage[V]	Normal	+3.6 ~ 4.2 Vdc	
Current consumption	Typ.	+1 mA	
대기전력		2uA	
사용 온도		-40 ~ +125℃ 이내	
소모 전력		825[uW] (3.3V/250uA)	

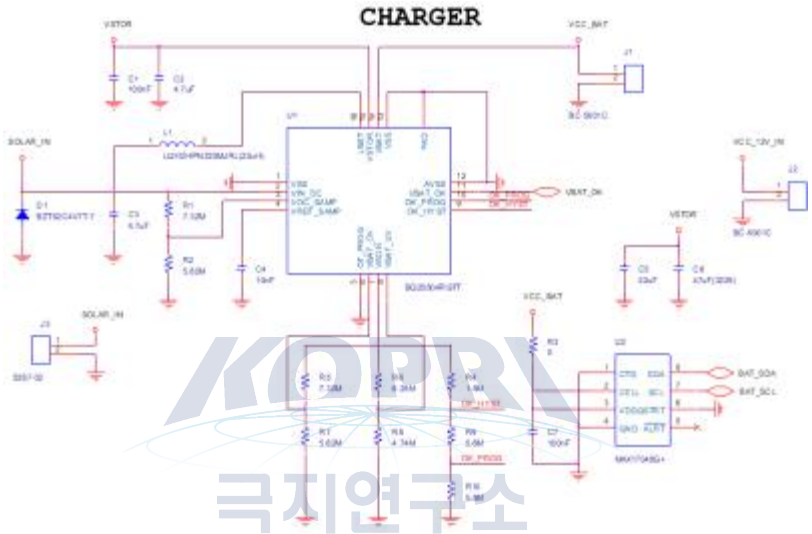


Fig. 66. Small solar charging circuit, BMS.

- Fig. 66은 중장거리 무선 통신이 가능한 자가발전형 복합센서 모듈의 구성중 태양광 발전 기능의 회로 설계도로 무선 통신기술은 앞서 언급한 LP-WAN 기술을 사용하여 설계하였음. 저전력의 태양광에서도 충전기 가능한 충전회로로 1차년도에 설계된 소형 태양광전지 0.5W 전력을 동일 사이즈 1.4W 고효율 태양광전지로 교체 적용하였음.
- Fig. 67은 설계된 무선 통신 모뎀의 회로로 동작 주파수 850.125 ~ 930.125MHz 대역에서 동작 가능하며 무선 채널은 81개까지 설정 가능함. 무선통신속도(air data rate) 2.4 ~ 62.5kbps로 가변가능하며 센서 설치 환경에 따라 통신 속도를 낮춰 통신 도달 거리를 늘리거나 통신 속도를 높여 좀더 고용량의 데이터를 전송. 통신모뎀의 대기전류는 5uA로 아주 낮은 값이나 전원을 ON/OFF 제어함으로써 소비전류를 최소화할 수 있음.
- Fig. 68은 16개의 지중온도 센서를 동시에 연결하기 위한 멀티채널 ADC(Analog to digital converter) 회로임. ADC 는 16bits 의 고해상도로 설계하였으며, RTD 타입과 열전대(Thermocouple) 타입의 온도계 모두 사용할 수 있도록 회로를 설계하였음.
- Fig. 69는 지중수분함량, 식생지수, 대기온습도, CO_2 등의 환경인자 센서를 연결하기 위한 SDI-12, UART, RS485 인터페이스 회로임. 앞서 기술한 센서뿐만 아니라 표준 SDI-12 규격으로 설계된 다양한 환경 센서와 호환인 가능하며, UART, RS485 타입의 다양한 센서를 연결하여 확장 가능함. RS485 회로는 소프트웨어로 종단 저항 삽입, 제거가 가능하도록 설계하여 멀티드롭 방식으로 여러개의 센서를 설치하는 경우 편리하게 종단 저항을 삽입할 수 있음.

– Fig. 70은 지중온도센서, 지중수분함량, 식생지수, 대기온습도, CO_2센서 등의 센서에 인가되는 전원을 각각 제어하여 소비전력을 최소로 하기 위한 부하 스위칭 회로임. 각 센서의 측정주기에 맞게 전원을 인가함으로써 대기 전력을 최소화할 수 있어 복합센서 모듈의 배터리 수명을 최대화할 수 있음.

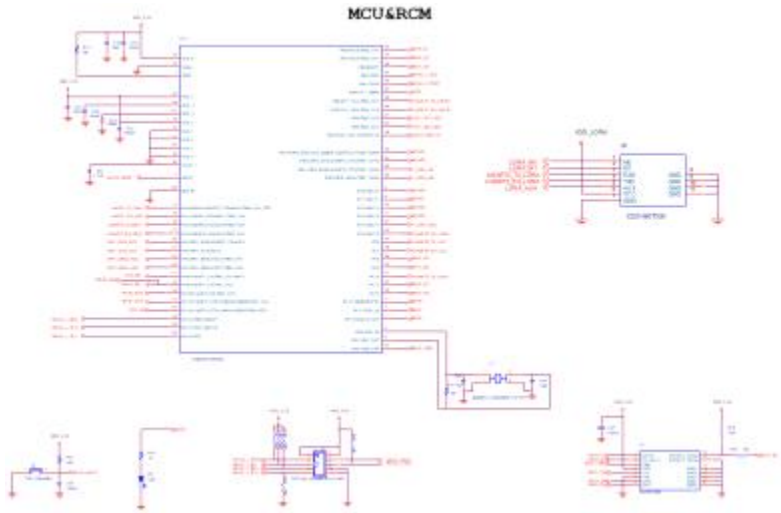


Fig. 67. LPWAN interface and MCU.

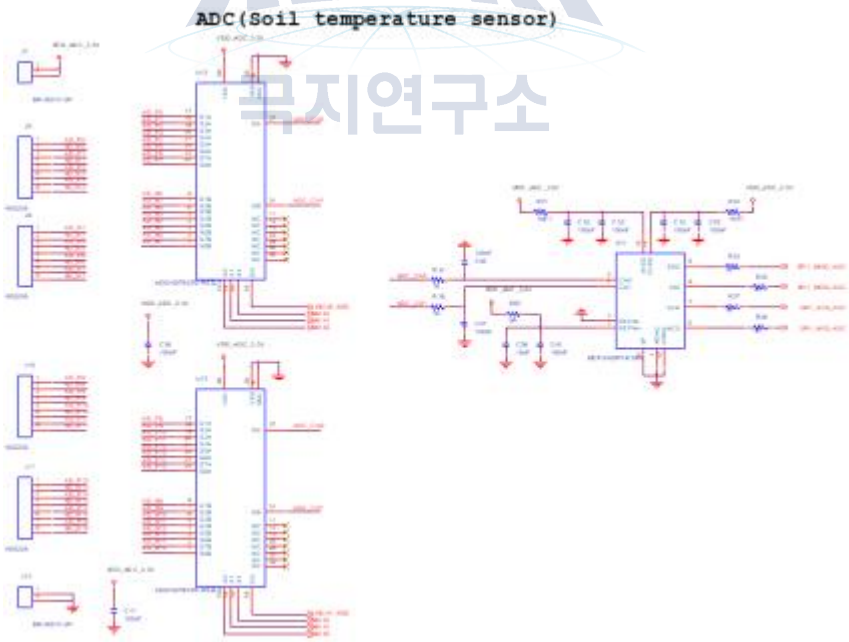


Fig. 68. Interface for soil temperature sensor.

KOPRI 극지연구소

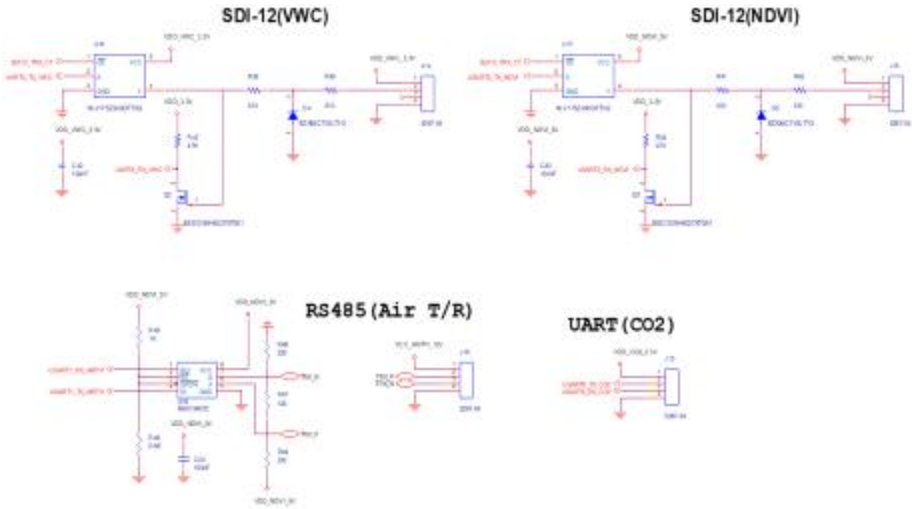


Fig. 69. Interface for soil moisture, NDVI, atmospheric temperature, humidity, and CO_2.

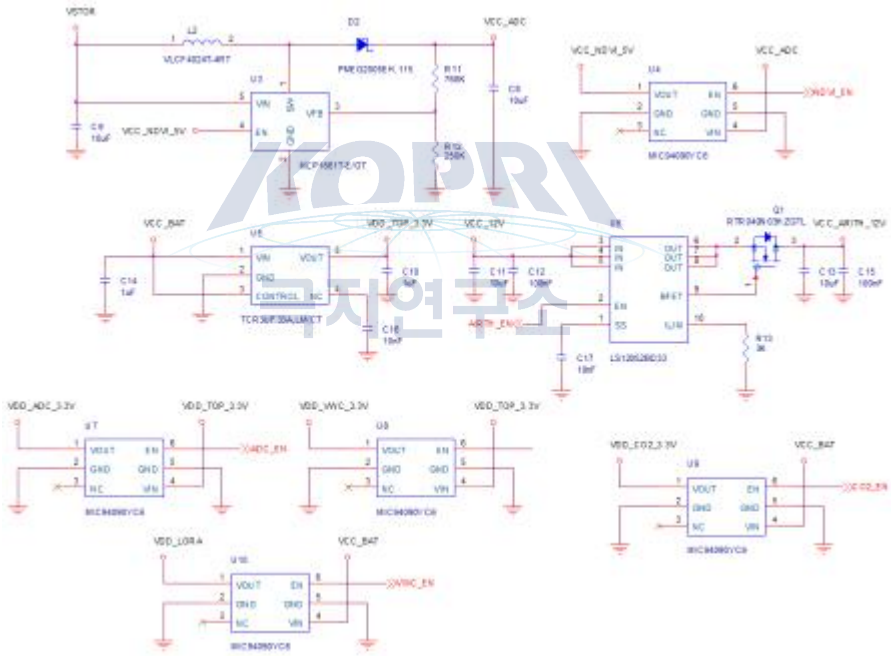


Fig. 70. Load switching circuit for low power control.

- Fig. 71은 앞서 설명된 회로도로 설계된 PCB 파일과 조립사진을 나타내며 143 센서노드를 설치하여 알래스카 카운실 거점에서 운영 중임

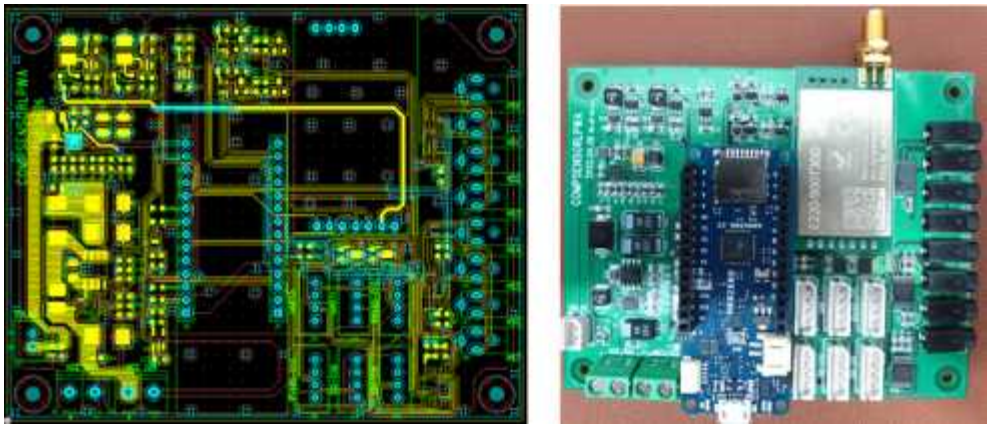


Fig. 71. Complex sensor module PCB design (left), prototype assembly (right).

※ 극지 무인관측 ≥5km 관측 거리 확보

- 극지에서 관측 거리 확보를 위해 무선 거리 테스트시험을 국내에서 수행하였음. LOS(Line of Sight)환경에서 최소 5km 이상 개발된 통신모듈의 거리테스트를 진행하였으며 Fig. 72와 같이 LOS 환경의 장소를 섭외하여 최소 5km 이상거리에서 패킷 오류율(PER)을 분석하였음.
- 복합세서 모듈용 통신 모듈은 시화거북섬로에 고정 설치하고 위성 게이트웨이 통신 모듈을 자동차에 부착하고 이동하면서 RF신호의 수신 세기와 수신 패킷을 확인하여 도달거리와 PER을 분석하였음 (Fig. 72 참조). 6.5km 지점의 시화나래휴게소(A지점), 9.5km 방아머리선착장(B지점)에서 각각 수신 확인. 9.5km 거리의 방아머리선착장의 경우 장애물이 없는 LOS로 수신신호세기가 시화나래휴게소 지점보다 더 안정적으로 수신됨.

KOPRI 극지연구소

Fig. 72. Wireless communication range test point (Sihwa Seawall, Turtle Island).

- 눈, 온도, 장애물 등에 의한 환경에서 위성게이트웨이와 복합센서 모듈간 데이터 손실 없이 원활하게 통신하기 위해서는 충분한 여유분의 전력밀도(Power Spectral Density)를 보장하여야 함. 따라서, RF 출력을 분석하기 위해 Fig. 73과 같이 스펙트럼 분석기를 활용하여 채널 특성과 안테나 이득에 따른 RF 출력을 분석하였음.
- Fig. 74의 결과에서 보이듯이 시화나래휴게소 경우 자동차 유무에 수신 세기가 많이 변화되는 것

으로 확인되나 송신기에서 RF 출력을 동일하게 30dBm으로 설정한 경우 7dBi 안테나 사용시 -0.74dBm, 3dBi 안테나 -7.23dBm로 측정되어 RF 트랜시버 칩셋의 수신 감도 -129dBm을 고려하면 충분한 링크 버짓(link budget)임.

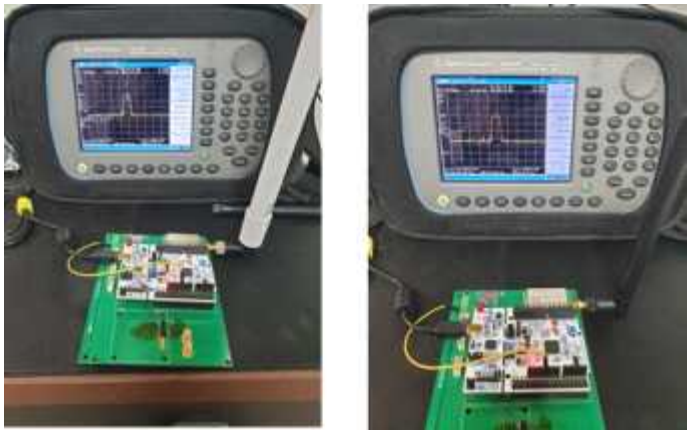


Fig. 73. RF Output Power vs. Antenna gain.

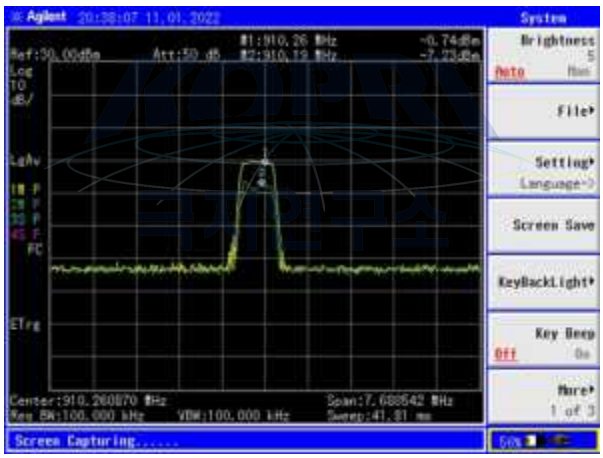


Fig. 74. RF Output Power vs. Antenna gain.

▪ CPS/무선센서 네트워크 기반 환경인자 관측시스템 구축

※ 모니터링 시스템 설치위치 선정

- 동토 지역 환경인자를 확보하기 위해서는 인접지반 및 주변환경의 변형과 같은 직접적인 영향 이외에 환경조건이나 지형조건의 변화와 같은 광범위한 사항을 포함해야 함. 특히 센서별 종류 및 용도, 센싱항목 선정기준, 센싱빈도 등을 반드시 고려해야 함.
- 알래스카 관측거점에서의 환경인자를 모니터링하기 위해 광역적 지형, 지질의 특성, 해당 지역의 지지 기반층 생성과 발달과정, 지질 및 토질의 공학적 특성 등을 평가하고 센서의 작동원리 및 설치기법, 측정범위 및 측정오차, 측정방법 및 경제성, 내구성 및 계기간의 상호 호환성과 목적에 부합되는 적용방법 등을 고려함.
- 따라서 다음의 항목에 의해 모니터링 위치를 선정함
  ① 센서 배치시에는 토양 및 환경조건을 고려하여 배치하며 일반적으로 환경변화가 크게 나올 것으로 예상되는 위치를 선정함.

② 모니터링 결과 해석시 상호 관련된 모니터링 항목에 대응되는 계기는 가능한 한 근접시켜 배치함.
③ 주변 토양에 의해 환경이 급격히 변화하는 위치에 대해서는 그 위치를 중심으로 센서를 설치함.
④ 모니터링의 불확실성에 의해 결정되는 항목에 대해서는 그 요인에 따라 배치함.
⑤ 환경 변화가 급격한 위치에 우선적으로 배치함.
⑥ 예측계산을 실시할 경우 필요항목의 모니터링 결과값이 연속해서 얻어지도록 배치함.
⑦ 계기의 설치 및 배선이 확실히 행해질 수 있는 위치로 정함.

※ 동토 환경인자 탐지기준 설정

- 센서에서 얻어진 데이터는 모니터링 시스템 구축을 통하여 환경변화의 거동을 파악하고, 이를 바탕으로 현재 상태를 판정하기 위하여 필요한 핵심 데이터들에 대해 조사 분석함. 환경변화의 거동과 이를 바탕으로 현재 상태를 판정하기 위하여 측정하는 핵심 데이터는 대기온도, 토양온도, 토양함수비, CO_2, CH_4, 등이며 이를 통해 동토층 환경의 현재 상태를 파악함.
- 온도 : 토양의 경우는 온도가 올라가면 팽창하고 온도가 내려가면 수축함. 온도에 의한 수축이 건조수축과 동시에 일어나면 토양 자체에 심한 균열을 유발함. 토양의 온도변화는 계절, 지역, 또는 대기 기온의 변화, 토양의 물성 특성, 풍향, 풍속, 토양함수비, 등에 따라 다름. 대기온도의 역시 계절, 지역, 풍향, 풍속, 강수량, 강설, 수분에 의한 반사 등에 따라 다름. 토양 및 대기의 온도 모니터링은 다음과 같은 용도로 사용됨.
  ① 온도에 의해 열팽창으로 받는 환경 변화를 측정.
  ② 토양 Mass 재료의 내부와 외부의 수화 열에 의한 온도차로 발생되는 재료의 변형을 방지하기 위한 목적으로 측정.
  ③ 토양 온도 및 대기 온도 측정은 가장 중요한 측정 요소임
  ④ 동결선을 결정하기 위하여 측정함.
  ⑤ 지하에서 발생되는 열에 의한 토양의 거동을 예측하기 위하여 측정.
  ⑥ 다른 센서의 온도에 의한 영향을 보정하기 위하여 사용됨.

※ Test-bed지역 (알래스카 카운실) 적용, 정확성 검증 및 모니터링 시스템 구축

[2023년(2단계 1차년도) 관측 결과]

- 본 과제에서 개발된 관측 시스템을 현장에 설치한 모습과 관측 결과임. 위성게이트웨이는 이중화하여 관측 사이트 중앙에 2셋트를 설치하였으며(Fig. 60 및 75 참조), 복합센서 모듈은 앞서 기술한 내용과 같이 지중온도센서 8개, 지중 수분함량센서, CO_2 센서, 식생지수 센서, 대기온도 센서, 대기습도 센서를 동시에 연결할 수 있도록 설계 개발되었으며 Fig. 76과 같이 설치하였음.
- 데이터 취득의 핵심인 위성 게이트웨이의 신뢰성을 높이기 위해서 태양광 충전 패널, 배터리, 충전 제어기를 포함한 전원과 위성게이트웨이의 무선 센서 네트워크를 완전 이중 구조로 설치하였음.

Fig. 75. Satellite gateway.

– 지중온도센서 8개, 지중 수분함량센서, CO_2 센서를 장착한 복합센서 모듈과 지중에서 발생되는 가스를 포집하기 위한 가스 포집기를 포함하고, 태양광 발전을 사용하여 자가 충전함(Fig. 76).

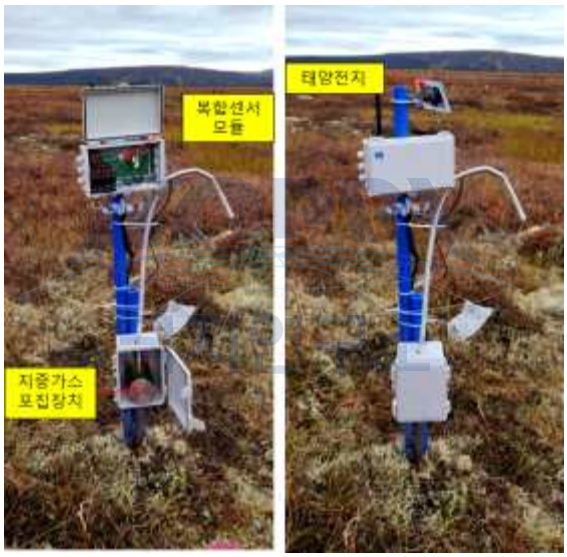


Fig. 76. Soil temperature and CO_2 sensor module installed in 2023.

– 식생지수 센서, 대기온도 센서, 대기습도 센서를 장착한 복합센서를 설치하였음(Fig. 77). 알래스카 카운실에 '23년에 설치한 복합센서는 중단거리 혼합형으로 계획한 143노드(Fig. 78) 이상 운영을 달성하였음.

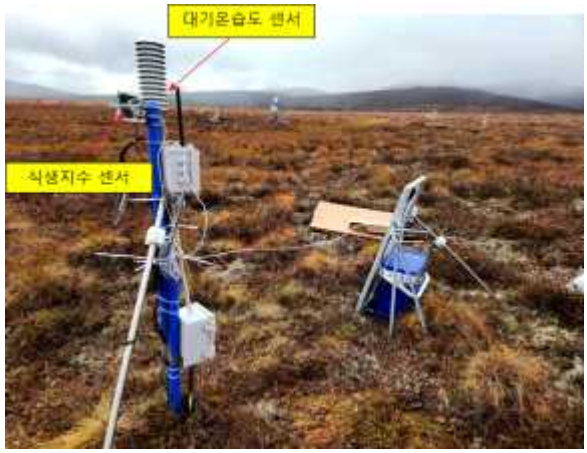


Fig. 77. Temperature and NDVI sensor module installed in 2023.

Fig. 78. Monitoring system installation in Council, Alaska.

- Fig. 79는 지중온도센서를 부착한 복합센서로 게이트웨이(위치 : 64.844101, −163.710917)로부터 1km 거리(위치 : 64.851212,−163.700524)에 설치하였음. 기존에 사용중인 안테나의 최대 감도를 실험하기 위한 테스트임.

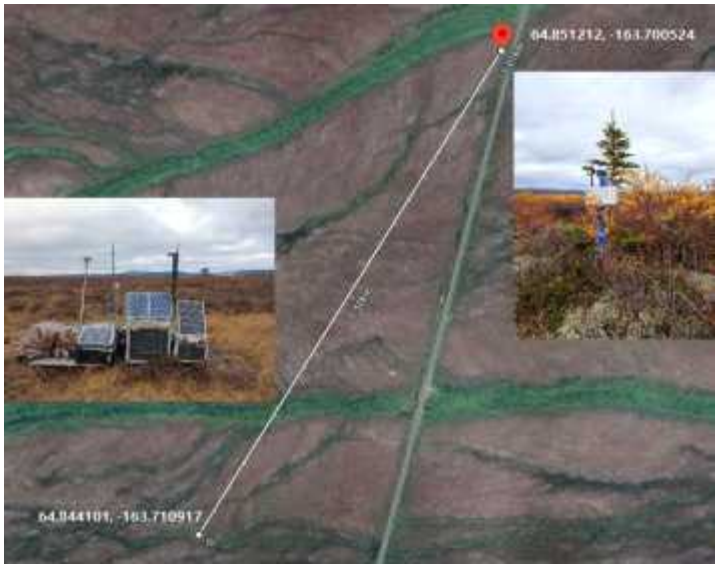


Fig. 79 Complex sensor for mid- to long-distance installation.

※ 토양 조건에 따른 동토 환경인자 발생특성 분석 및 알래스카 카운실 환경인자 평가

- 환경인자 측정 결과 : 2022년 9월 ~ 2023년 9월까지 알래스카 카운실에서 발생하는 CO_2, 활동층의 토양온도, 토양 CH_4 및 대기 CH_4를 측정함. 토양온도는 약 50cm 정도되는 토양층 깊이까지 10cm 간격으로 측정하였으며 각각 측정된 데이터는 Fig. 80 ~ 83에 나타냄. Fig. 80 ~ 83에 나타낸 바와 같이 지표면에 가까울수록 토양의 온도의 진폭 변화는 심하게 나타남. 특히 9월경 이후에는 온도가 점차로 감소하여 영하로 떨어지지만 그후 상대적으로 짧은 시간에 온도가 상승하다가 감소하고 이후에는 점차 영하의 온도를 유지함. 대기 온도의 경우 토양과는 다르게 영하의 온도 진폭의 변화가 심하게 나타남. 또한 토양 온도는 10월경에는 온도의 0℃와 영하의 기온으로 유지되다가 다시 5월 말경에는 온도가 서서히 증가하여 7월경에서 최고 온도를 나타내고 이후에는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있음. 이 시기는 알래스카의 여름을 나타내고 있음. 그러나 영하의 온도에서도 알래스카의 여름과 같지는 않지만 진폭의 큰 산란도 같이 발생하였음. 특히 깊이가 깊어짐에 따라 온도의 산란은 줄어들었음.
- 토양온도가 영상에서 깊이가 깊어질수록 토양 온도의 최대값은 작았으며 토양 온도의 타임 렉은 발생하지 않았음. 각 층별 토양 온도의 모양은 거의 일치하였으며 특히 산란(fluctuation)되는 토양 온도에서 각각의 최대값은 깊이가 깊어져도 거의 일치하였음.
- 각각 나타낸 그림에서 측정된 모든 깊이에서 site 3지역에(Fig. 34 참조) 비해 site 1, 2, 6지역의 온도가 측정된 온도보다 크게 측정되었음. 또한 영하의 영역에서는 site 1, 2, 6지역에서 측정된 온도가 낮았으며 1지역에서 측정된 온도가 상대적으로 가장 낮게 측정됨. 특히 영상의 경우 지표면에 가깝게 측정된 토양온도 일수록 진폭의 변화가 심하게 발생하였으며 영하의 경우 깊이가 깊어질수록 진폭의 변화 없이 일정해 짐을 알 수 있었음. 그러나 모든 온도 데이터에서 각각의 측정된 지역에서의 온도그래프의 크기가 다르더라도 각 온도에 대한 진폭의 최대값은 같은 일자에서 발생하였고 각 깊이별 온도 그래프의 형상은 일치하였음. 특히 이러한 온도 변화 발생이유는 토양의 흙 입자, 함수비, 밀도 및 토양의 물리적 성질에 의해서 그차이가 발생하는 것으로 판단됨. 따라서 약 100m의 차이를 보이는 토양의 상태가 변하면 최고 온도와 최저 온도가 각각 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있으며 이에 대한 더 많은 연구가 필요한 것으로 판단됨.

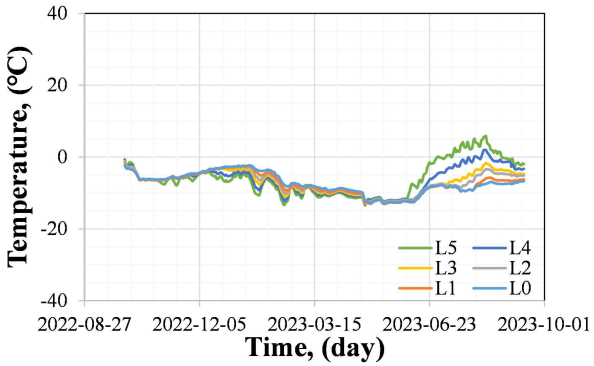


Fig. 80. Temperature measurements at the site 1.

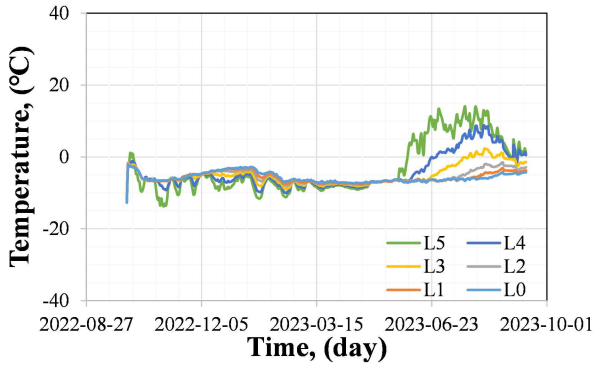


Fig. 81. Temperature measurements at the site 3.

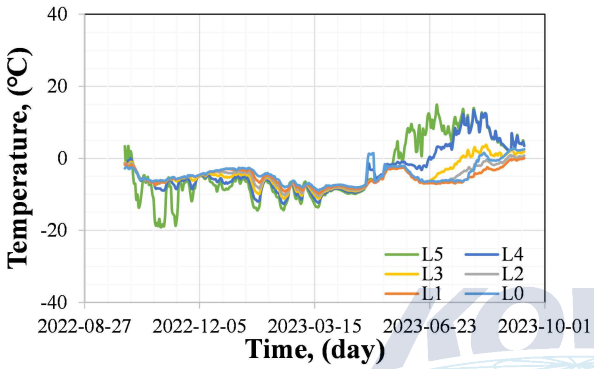


Fig. 82. Temperature measurements at the site 2.

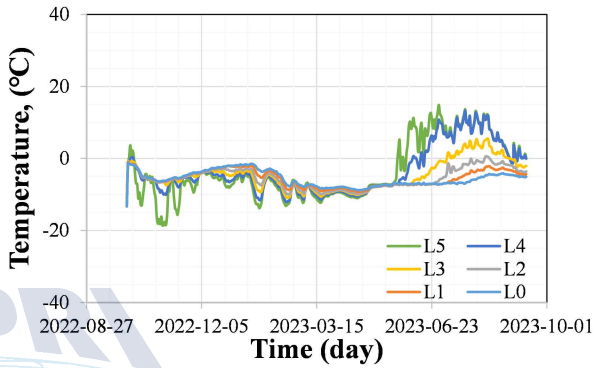


Fig. 83 Temperature measurements at the site 6.

KOPRI 극지연구소

– Fig. 84 ~ 87은 동토지역에서 발생하는 토양내 CO_2를 측정하여 1년 동안 연속 관측함. Fig. 84 ~ 87에 나타낸 바와 같이 2022년 9월부터의 토양 CO_2 관측 자료를 통해 카운실 관측거점에서 알래스카의 가을에는 활동층에서의 CO_2 농도가 900ppm 정도가 발생함을 알 수 있었음. 그러나 알래스카의 여름인 6월 경부터 급격히 CO_2의 발생량은 감소하나 눈이 내리는 9월 말부터는 토양의 상부가 얼어 활동층내의 CO_2의 배출이 상부로 적절하게 이루어지지 않고 있어 활동층 내의 CO_2의 농도가 급격히 증가하거나 감소하는 경향을 보이고 있음. 이는 상부의 적설과 대기온도의 영하권 온도로 인해 토양 표층의 동결은 CO_2 지층 내 이동을 제한한 것으로 판단하며 이러한 관측을 통해 계절적으로 활동층의 어는 지점을 추측할 수 있을 것으로 판단됨.

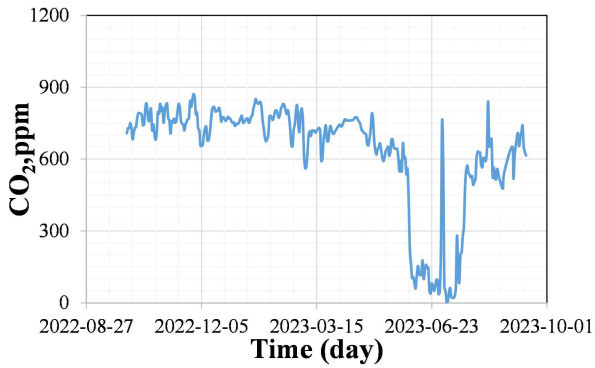


Fig. 84 CO_2 measurements at the site 4.

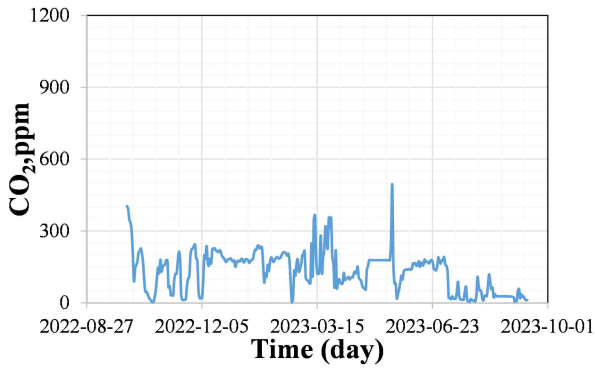


Fig. 85 CO_2 measurements at the site 1.

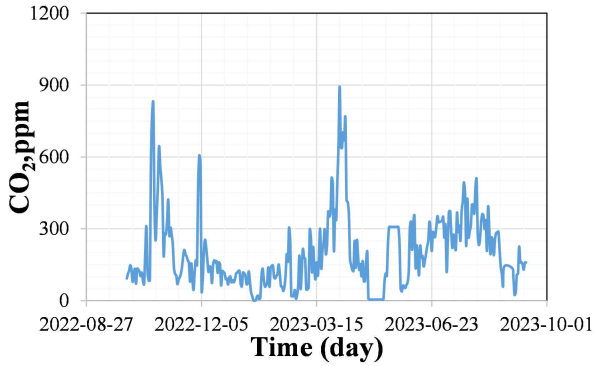


Fig. 86. CO_2 measurements at the site 3.

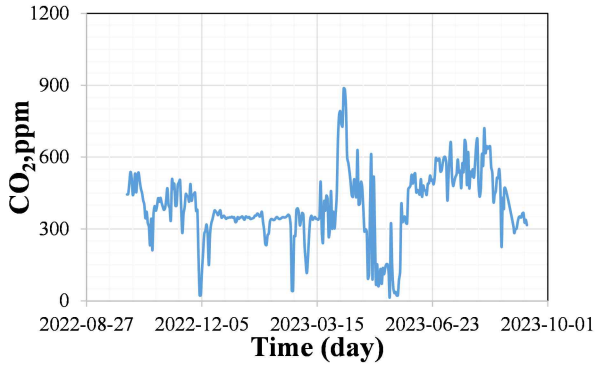


Fig. 87. CO_2 measurements at the site 5.

– Fig. 88과 89는 토양 CH_4 및 대기 CH_4를 측정한 데이터임. 토양 CH_4의 경우 겨울에는 일정한 CH_4를 토양내에서 유지하고 있으나 얼음이 녹기시작하는 봄과 여름에 토양내에서 CH_4의 감소량이 현저하게 나타나고 있음. 이것 역시 상부의 적설과 대기온도의 영하권 온도로 인해 토양 표층의 동결은 CH_4 지층 내 이동을 제한한 것이나 CH_4 발생이 상대적으로 적어 토양내 축적되어 있는 양이 측정된 것으로 판단됨. 따라서 장기간의 토양내 CH_4 모니터링이 필요한 것으로 판단됨. 이에 반해 대기 CH_4의 경우 고가 장비의 보호를 위해 1년 동안의 장기 모니터링은 수행하지 못하였으나 알래스카의 여름인 7월 말에서 8월 초까지 대기 CH_4를 측정함. 대기 CH_4의 경우 8월 1일에 가장 큰 4600ppb가 측정되었으며 이날을 제외하고 대부분 2000~3600ppb 정도 측정되었음. 가장 크게 측정된 대기 CH_4에서 토양의 온도가 가장 크게 측정된 날과 일치하는 경향을 보임. 이것은 토양에서 발생하는 CH_4와 비료를 통해 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단됨.

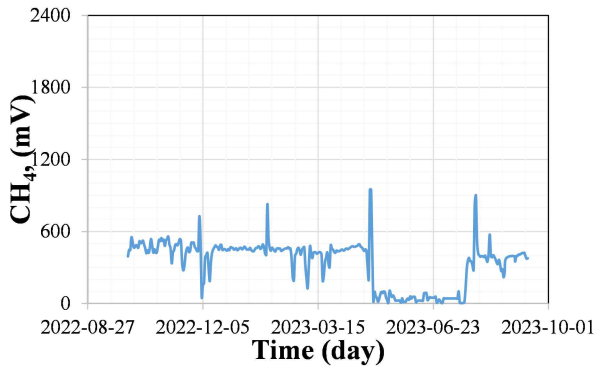


Fig. 88. CH_4 measurements at the site 1.

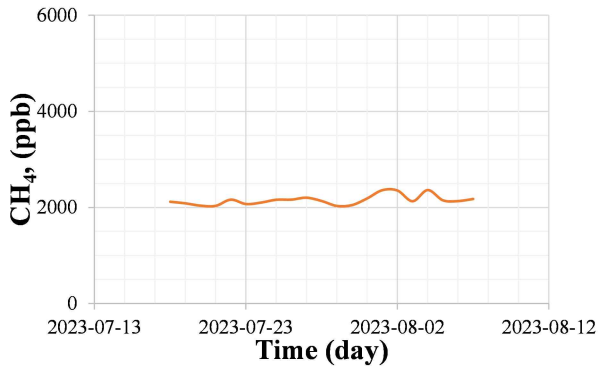


Fig. 89. CH_4 measurements at the site 3.

▪ **무선 네트워크 관리용 게이트웨이 개선**

※ 이리듐(Iridium) 모뎀을 통해서 미리 정의된 메일 계정으로 데이터 송신

– 북극 동토층 환경인자 수집을 안정적으로 수행하기 위한 CPS/IoT 기반 무인 관측 시스템의 개념도(Fig. 1)를 나타냄. 시스템은 관측현장에 설치 운영되는 센서를 포함하는 관측 장비와 관측데이터를 수집 · 저장 · 분석 · 제공하기 위한 플랫폼으로 구성됨.

① 센서노드는 근거리 무선 통신을 사용하여 IoT 게이트웨이에 접속

② IoT 게이트웨이는 센서 노드로부터 수신된 관측 데이터를 인공위성(Iridium-satellite)을 통해 극지연구소 메일 서버로 전송
③ 메일서버에 전송된 데이터는 SMTP, POP3, IMAP4 프로토콜 변환기를 통해 데이터 관리 서버로 전송
④ 전송된 데이터는 데이터베이스에 저장
⑤ 저장된 데이터는 시계열 방식으로 시각화되어 연구자에게 제공

- 극지환경 관측 시스템에 적용하기 위한 사이버-물리(Cyber-Physical) 시스템은 관측사이트에 설치된 모든 센서노드와 인터넷 공간의 컴퓨팅 자원이 네트워킹을 통해 유기적으로 융합되어 사물들과 서로 소통하며 자동적, 지능적으로 제어됨.
- 사이버-물리 시스템은 반응형 처리(Reactive computation)를 통해 입력과 출력을 통해 지속적으로 환경과 상호 작용함. 또한 여러개의 연산들이 병행적(Concurrency)으로 처리되고 이들 사이에 정보의 상호 교환이 일어나면서 보다 최적화된 정보를 제공하는데 효과적임.
- 피트백을 통한 물리 센서 노드 제어는 센서를 통해 환경 정보를 얻고 구동기(actuator)를 통해 환경에 영향을 미치는 방식으로 물리 공간과 상호작용도 가능함. 더 나아가 실시간 처리(Real-time computation)는 CPS의 매우 중요한 요소임.

※ 소비전류를 최소한 갖고 장시간 저전력 운용에 가능한 게이트웨이로 개발

- Fig. 90은 위성 게이트웨이에 적용하기 위한 위성통신 기술을 선정하기 위해 통신 가능 지역을 비교한 그림임. 이리듐의 경우 전 기간 지구 전역에서 24시간 서비스가 가능한 것을 알 수 있음. 따라서 이리듐 위성 통신 방식을 사용하여 설계하였음.

KOPRI 극지연구소

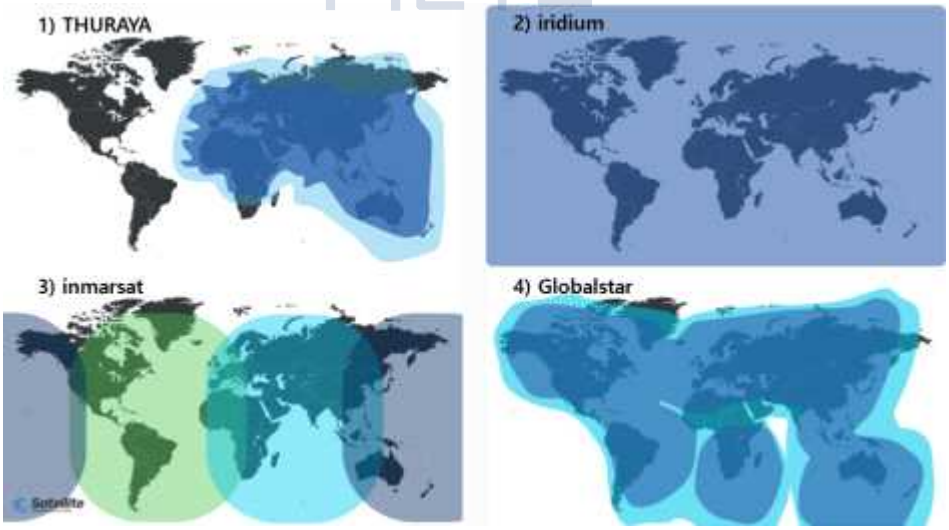


Fig. 90. Comparison of coverage according to satellite communication system.

- 극지방을 포함하여 서비스가 가능한 위성 통신 단말기는 이리듐 통신 방식임. Thuraya와 Globalstar는 서비스 지역이 한정되며 inmarsat의 경우 서비스 지역이 전 세계적이긴 하나 본 과업의 결과물을 설치할 지역인 극지방 서비스가 제한적임.
- Fig. 91과 같이 복합센서 모듈은 센서 값을 측정하여 랜덤 한 시간에 위성게이트웨이로 데이터를

전송하고 휴지 모드(저전력 모드)로 진입함. 일정시간(Fixed interval) 후에 활성 모드로 전환하여 수신 대기 상태로 상태 전환. 위성 게이트웨이가 복합 센서 동작을 제어하기 위한 메시지를 전송하게 되면 메시지 수신 후 대기 모드로 재 진입함. 위성 게이트웨이의 전송 메시지를 수신하기 위해서 2회(Rx1, Rx2) 수신 대기함(Received window).

- Fig. 92는 상세 타이밍을 나타낸 것으로, 2회의 수신 대기 중 메시지를 수신한 경우와 수신 메시지가 없는 경우 대기 모드로 진입하는 경우를 나타냄. 메시지를 수신하게 되면 메시지 수신 후 바로 대기 모드로 진입함.

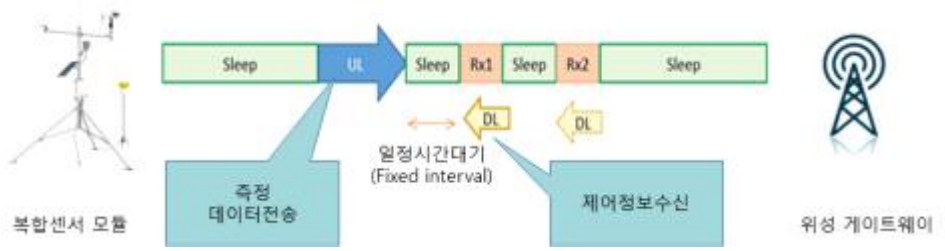


Fig. 91. Low power wireless communication algorithm 1.

- Fig. 93과 같이 복합센서 모듈과 위성통신 게이트웨이 소프트웨어는 유지보수 및 안정적 동작을 위해 계층 구조로 설계하여 적용. 복합센서 모듈은 LoRaWAN 스택을 포함하고, 최상위단의 복합센서 응용소프트웨어에서 앞서 기술한 복합센서의 값을 읽어 들이는 모듈로 구성됨. 복합센서 모듈은 측정 주기 외에 대기 상태에서는 배터리 절약을 위해 휴지모드로 동작함.

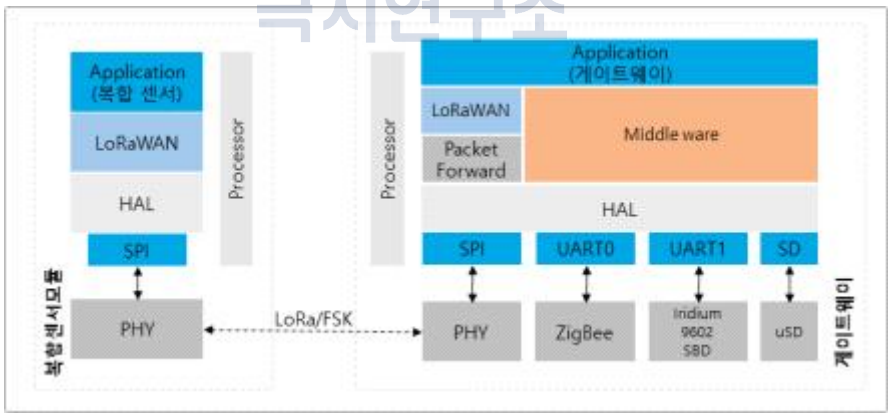


Fig. 93. Software structure.

- 소비전력분석 : 배터리 절약형 지능형 센싱 기술을 접목한 저전력 동작 기술을 활용하여 수년간 무보수 가능하도록 설계하였음. 저전력 동작 알고리즘(Active, Sleep, Deep sleep, Wake-up 방식 등)과 지능형 에너지 하베스팅 기술을 접목하여 1년 이상 장시간 유지보수 없이 운영하기 위해서는 배터리 용량이 늘리거나 대기 전력을 최소화하여야 함. 배터리 용량을 늘리는 것은 한계가 있으며 동계에 태양 발전이 어려운 극지 환경을 감안하여 최소 3개월간 태양광 없는 극야시기에 맞춰 대기전력과 동작전류를 고려하여 설계하였음. 아래와 같은 휴지/활성 방식을 사용하면 소비전력을 최소화할 수 있음. 휴지(Sleep)시 소비 전류는 RF와 MCU 합계가 수 uA이내이며 5분마다 센서 값을 측정하여 위성 게이트웨이에 전송하는 시나리오로 설계되었으며, 선정하는 센

서에 따라 달라질 수 있으나 여유분(Margin)을 포함하여 소비전류, 센서 활성 시간 등을 고려하여 설계함. Fig. 94는 센서에 전원을 단계적으로 공급하여 소비되는 전류의 소비 패턴을 나타낸 것임. 모든 센서에 전원이 인가된 경우 가장 큰 전류가 소비되며 단계적으로 응답시간이 짧은 센서부터 전원을 차단 또는 저전력 상태로 변경함으로써 전체 소비전류 합은 감소함. 가장 응답시간이 긴 CO_2 센서의 전원을 차단하고 게이트웨이로 전송한 후에 저전력 상태로 진입하면 최소 대기전력 상태가 됨.

Fig. 94. Power consumption analysis.

- 센서노드와 게이트웨이에 사용할 무선 통신 기술을 선정하기 위하여 제안요청서의 요구사항인 최소 5km 이상의 통신 도달거리 달성을 위해 저전력 중장거리 무선통신 기술인 LoRaWAN와 Sigfox 기술을 비교하였으며 통신 속도, 패킷 길이, 소비 전력, 통신거리를 중요한 성능으로 판단하여 통신거리는 비교적 불리하나 다른 성능이 우수하여 LoRaWAN을(Table 9) 사용하였음.
- 위성게이트웨이는 무선 통신을 위해 위성통신모뎀, ZigBee(LP-WPAN), LoRa(LP-WAN)을 선택적으로 사용할 수 있도록 그림과 같이 모듈형태로 설계하였음. 또한 센서 노드로 부터 수신된 센싱 데이터를 저장하기 위해 비휘발성 저장 장치인 uSD 카드를 포함하여 설계하였음.
- 위성게이트웨이는 모든 센서 노드로부터 데이터를 수신하여 저장하는 주 장치로 이상 발생시 물리공간과 사이버 공간의 통신 불능 상태가 되어 CPS 운영 관리 서버로 데이터를 송신하지 못하게 됨. 이를 방지하기 위한 목적으로 위성 게이트웨이 이중화를 제안하고 시스템은 전원 충전 시스템과 위성게이트웨이를 포함하여 하드웨어 장치를 완전 이중화하여 구성하였음. 주 시스템과 보조시스템의 배터리 충전 상태는 항상 공유하며 보조 시스템은 정상 동작 상태에서 슬립모드 동작으로 저전력으로 동작함. 주 시스템이 정상 동작 상태에서는 항상 주 시스템이 우선 동작하므로 보조 시스템은 배터리가 완충되어 대기(standby) 상태로 동작함.
- Fig. 95는 위성게이트웨이 구성도를 도식화하여 나타낸 것으로 하드웨어 구성은 태양광 패널(풍력발전기), 충전제어기, 위성통신모뎀, 저전력 근거리(중장거리) 통신 모듈, 제어기 등 주 시스템과 보조 시스템 모두 완전 동일함. 주 시스템의 WPAN 통신모듈은 코디네이터로 동작하며 앤드디바이스가 전송하는 측정값을 비휘발성 메모리(ROM, μSD, Flash memory)에 저장하고 주기적으로 위성 통신을 통해 인터넷 환경으로 데이터를 전송함. 보조 시스템의 지그비 통신모듈은 앤드디바이스로 동작하고 또한 위성통신 모뎀과 제어기는 휴지모드로 동작하여 배터리 소모를 최소로 하여 충전 배터리에 충전되는 용량을 최대로 유지하게 됨. 주 시스템과 보조 시스템은 무선통신을 통해 상태 정보를 공유하면서 시스템의 이상 유무를 판단함(Table 6, 7, 10, 11). 시제품과 설치내용은 Fig. 95와 96에 나타냄.

Table 9. Sigfox vs. LoRaWAN comparative analysis.

규격	Sigfox	LoRaWAN
Modulation	BPSK	CSS
Frequency	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)
Bandwidth	100 Hz	250 kHz and 125 kHz
Maximum data rate	100 bps	50 kbps
Bidirectional	Limited / Half-duplex	Yes / Half-duplex
Maximum messages/day	140 (UL), 4 (DL)	Unlimited
Maximum payload length	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes
Range	10 km (urban), 40 km (rural)	5 km (urban), 20 km (rural)
Interference immunity	Very high	Very high
Authentication &encryption	Not supported	Yes (AES 128b)
Adaptive data rate	No	Yes
Handover	End-devices do not join a single base station	End-devices do not join a single base station
Localization	Yes (RSSI)	Yes (TDOA)
Allow private network	No	Yes
Standardization	Sigfox company is collaborating with ETSI on the standardization of Sigfox-based network	LoRa-Alliance

KOPRI 극지연구소

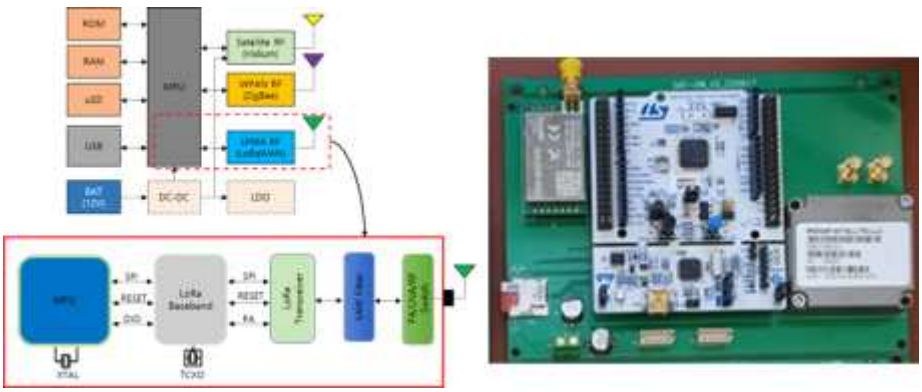


Fig. 95. LP-WAN satellite gateway configuration diagram and satellite gateway.

Fig. 96. Satellite Gateway Alaska Council Installation Photo (Duplicate).

Table 10. Satellite communication modem specifications.

구 분		규 격	비 고
Input Voltage[V]	Normal	+5 Vdc ± 10%	
Current consumption	Max.	+200 mA	
사용 온도		-40 ~ +85℃ 이내	
사용 습도		≤ 75% RH	
평균 소비 전력		≤1.0W	SBD Message Transfer
RF	사용주파수	1616 ~ 1626.5 MHz	
	Idle current	45mA	Max : 195mA
	TX Current(Max)	1.5A	Avg : 190mA
	RX Current(Max)	195mA	Avg : 45mA
	RX input impedance	50옴	
	Multiplexing	TDMA/FDMA	

KOPRI 극지연구소

Table 11. Proposal board specifications.

구 분		규 격	비 고
Input Voltage[V]	Normal	+6.0 ~ 15Vdc	
Current consumption	Typ.	+300 mA	
사용 온도		-40 ~ +125℃ 이내	
소모 전력		2 [W] (5V/400mA)	

– 기존 설치 운영중이 AWS 시스템과의 연동을 위해 Campbell Scientific 社의 CR1000 또는 CR3000 데이터로거와 ModBus 연동이 가능한 구조의 위성 게이트웨이를 개발하여 알래스카 카운실에 설치 운영(Fig. 97)하고 있으며 자가 발전형 복합센서 모듈을 적용하였음.

Fig. 97. Satellite Gateway for AWS (Alaska Council).

※ 게이트웨이 동작 온도 범위는 −30 ~ 80℃ 이상이 되도록 하여 극한 환경 온도에서도 사용 가능하도록 설계/제작

- 저온동작시험 : 극저온 챔버를 활용하여 -20℃, −40, −45℃ 이하에서 24시간 이상 동작시켜 안정적으로 데이터가 수집되는지 검증하였음. 이때 복합센서 모듈에서 온도 값을 포함하는 센서 데이터와 수신 감도(RSS:Received Signal Strength)를 저장하여 온도에 따른 RF 성능 검증. 2023.08.28~2023.08.29(약 27시간)까지 극지연구소 극저온 챔버에서 동작 시험 진행. Fig. 98 ~ 99는 -45℃에서 챔버 테스트한 장면과 그 결과를 나타낸 것임.
- 결과는 -20, −40, −45℃ 극저온 챔버에서 24시간 이상 동작시켜 안정적으로 데이터가 수집되는지 검증한 결과임. 서모커플러 K 타입 온도센서 2개와 RTD 타입온도센서 1개를 사용하였으며, 서모커플러 K 타입 온도센서는 복합센서 케이스 내부(Inside the box)와 외부(Outside the box)에 설치하여 케이스의 내외부 온도 변화 특성을 관찰하였음.

Fig. 98. Temperature −45℃ chamber test.

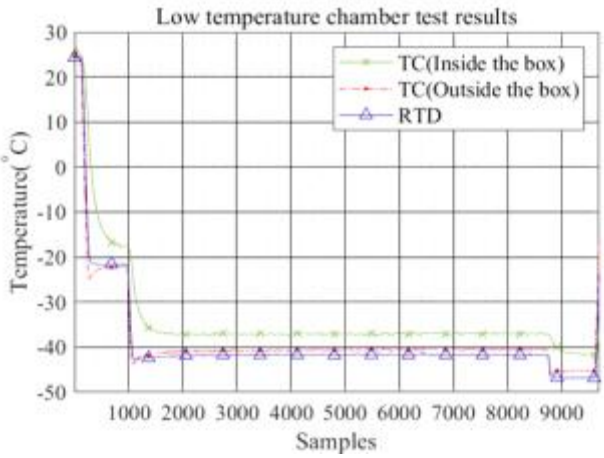


Fig. 99. Temperature −45℃ chamber test results.

※ 장치간 패킷 호환 확인

- 설계된 각각의 하드웨어 장치간의 유무선 통신의 패킷 호환을 검증하기 위해 위성게이트웨이와 복합센서인터페이스 간의 호환성 테스트는 앞서 기술한 단거리 및 장거리 테스트를 진행하여 검증하였음.
- 복합센서 인터페이스와 각 센서의 통신의 패킷 호환을 검증과 유지보수 확장성을 고려하여 Fig. 100과 같이 복합센서 인터페이스에 내장된 임베디드 소프트웨어는 계층형, 모듈형 구조로 설계하고 개발하였으며 각 모듈별로 패킷 호환을 검증하였음. Fig. 101은 구현된 소프트웨어 모듈임.
- SDI-12 코멘드 테스트 경우 복합센서 인터페이스에서 측정 코멘드 “0M!” 전송후 데이터 코멘드 “0D0!”전송. 센서에서 “0+1.60+24.1” 응답함. 여기서 “+1.60” 유전율, “+24.1” 온도 값을 나타냄

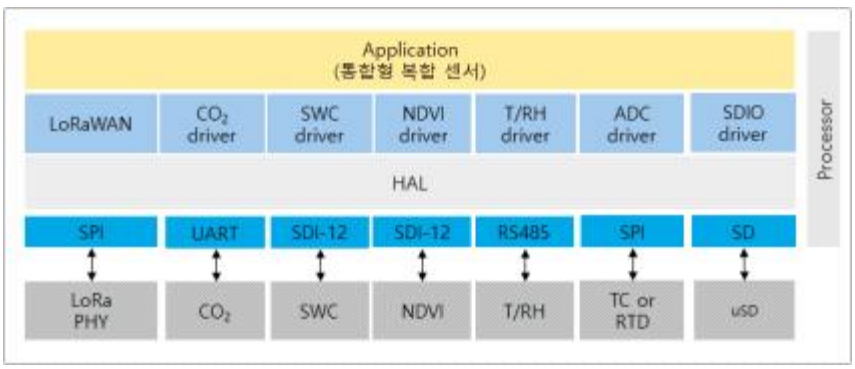


Fig. 100. Composite sensor interface software configuration.

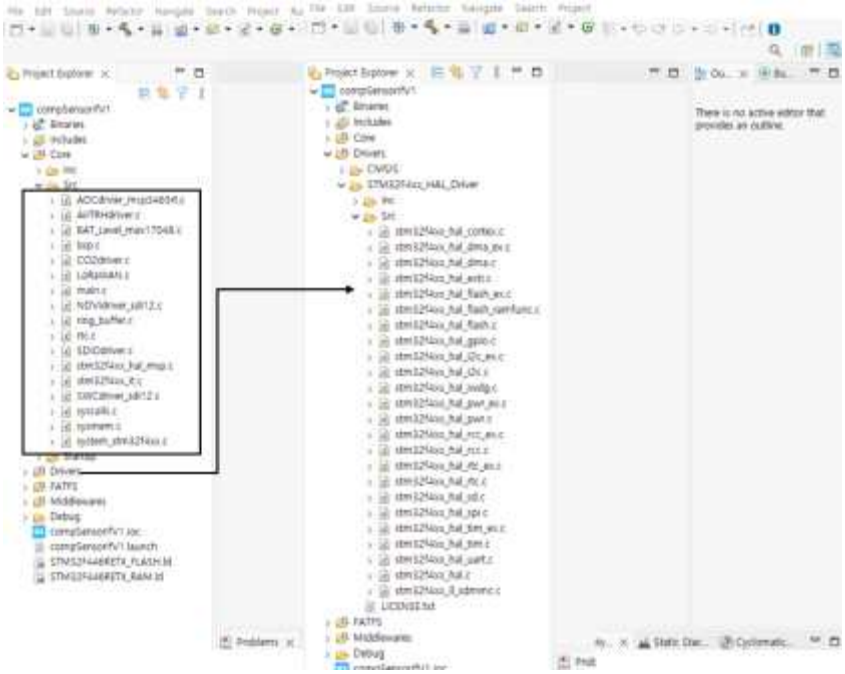


Fig. 101. Implementation of software with built-in complex sensor interface.

※ 개방형 표준 IoT 기반 통합 관측시스템용 서버 구축

- 환북극 환경인자 관측을 위해 사용된 IoT 기반 통합 통합관측 시스템은 관측거점에 설치하여 운영되는 센서 네트워크 즉 환경인자 센서, 인터페이스, 위성게이트웨이와 같은 하드웨어 장치와 센서 네트워크로부터 수집된 데이터를 수집저장시각화분석 등을 수행하기 위한 소프트웨어로 구성됨. 하드웨어 장치의 구성을 앞서 기술하였으며 소프트웨어 구성은 Fig. 101과 같이 구성됨. 소프트웨어는 크게, 위성 모뎀으로부터 전송된 환경인자 자료를 수집하기 위한 자료수집서버, 수집된 자료를 데이터베이스화하기 위한 데이터 관리 서버, 데이터베이스의 데이터를 시각화하는 서버로 구성됨. 데이터 관리 서버는 MQTT(Message Queuing Telemetry Transport), RESTful API을 사용하여 다른 플랫폼과 인터페이스 가능하도록 구성하였음. 시각화 서버는 사용자 설정기간 또는 실시간으로 수집된 데이터를 시각화하여 제공하거나 파일로 내려 받기가 가능함.

■ 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현 및 Smart Polar Platform 구축 (2단계 2차년도)

▪ 효율적인 통합관리 기능 구현

※ 동토 환경인자의 데이터 확보를 위한 통합 운영/관리 시스템 개발을 위한 개발 시스템의 기본 설계

- Smart Polar Platform(SPP)은 동토지역에서 최적화된 하드웨어와 소프트웨어로 장기간 고품질의 환경 데이터를 관측을 위해 개발되었음. SPP의 구조는 Fig. 102와 같고, 준 실시간으로 동토-대기 환경인자 데이터를 수집하고 분석하기 위한 프로그램으로 구성됨.
- 자립적인 운영체계로 전환하여 독립적인 운영하도록 개발하였음.
- 분석/제어서버는 관측 시스템을 제어/제공하며, 관리서버는 시스템의 상태를 확인하기 위한 서버로 사용자가 원하는 시간에 상태를 확인할 수 있으며 Fig. 102의 SPP 구조를 바탕으로 각각의 모

듈에 대한 상세 설계도를 제안/설계/제작 하였음.

- 연계서버는 타 시스템으로부터 준 실시간으로 데이터를 수집하기 위한 모듈이며 수집서버는 위성 게이트웨이로부터 수신되는 데이터를 DB로 전송하는 기능임.

Fig. 102. Smart Polar Platform and software module configuration.

- Fig. 103은 SPP의 소프트웨어 모듈의 구성과 데이터 흐름 상세하게 기술한 내용으로 다음과 같음.
  ① 수집 서버: 위성통신 시스템에 연결된 이메일 서버에 접속하여 데이터베이스 서버로 전달하는 동작 수행
  ② 연계 서버: 타 시스템으로부터 준 실시간으로 데이터를 수집하기 위한 모듈이며 데이터베이스 접속하여 SPP의 내장 데이터베이스로 데이터를 가져오거나 파일 데이터를 업로드 하는 동작 수행
  ③ 관리/제어 서버: 관측시스템 정보를 설정하기 위해 설치한 지역(알래스카, 캐나다, 아이슬란드, 스발바르)/위치(GPS 좌표)/환경인자/센서ID 등입력 기능 수행. 필요시 센서의 보정 등의 이력을 포함하여 입력 가능하도록 구현하였음. 관측시스템의 측정 주기 변경이 가능하고 관측시스템의 운영 상태를 확인 할 수 있는 기능 수행
  ④ DB 서버: 관측시스템으로부터 준 실시간으로 수진되는 데이터, 타 시스템의 데이터베이스 데이터, 파일로부터 업로드된 데이터, 가공된 데이터 관리 서버로부터 수신 되는 데이터 등의 정보를 저장하는 데이터베이스
  ⑤ 분석 서버: 환경인자 데이터의 기본적 분석을 제공하기 위한 서버
  ⑥ 제공 서버: 연구자가 환경인자 데이터를 확인 할 수 있는 유저인터페이스를 제공하기 위한 서버. 간단하게 웹으로 접속하여 지역/위치/환경인자/센서ID 과 시작일, 종료일을 입력하여 시계열 데이터 확인. 분석 서버에서 생성한 평균, 최소값, 최대값 등도 함께 제공 가능함. 데이터를 제공하기 위한 프로토콜은 웹 페이지 제공를 기본으로 하며 MQTT, SQL 등도 가능함.

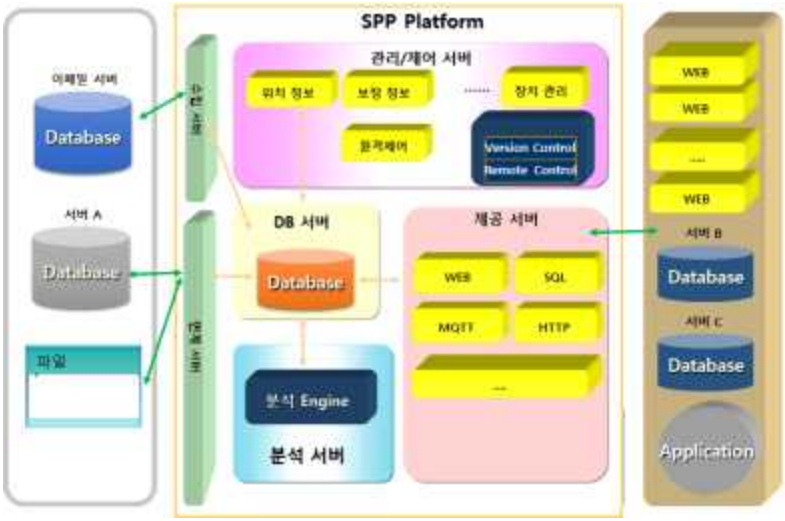


Fig. 103. SPP software configuration details.

- Fig. 104는 데이터베이스 설계된 테이블의 자료 구조를 나타내며 시계열 데이터베이스(TSDB, Time Series Database)인 InfluxDB을 적용하여 빠르고 정확하게 실시간으로 쌓이는 대규모 데이터들을 처리할 수 있도록 하였음.

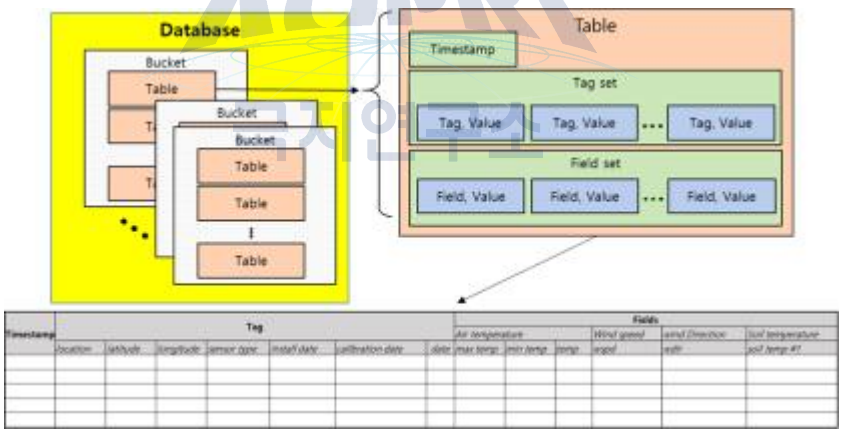


Fig. 104. Database structure.

※ 토양온도 증가/감소 위치, 토양함수비 증가/감소 위치, CO_2 및 CH_4 발생위치, 지질, 토양 물성자료 및 모니터링 관측자료의 연계를 통한 멀티자료 분석/구현과 DB 자료 및 시스템 구현 검토사항 확인 및 극지역 사이버-물리(Cyber-Physical) 통합 관측 시스템 운영

- Fig. 105는 연구자가 극지연구소 서버실에서 운영중인 서버에 SPP에 접속하여 환경인자 데이터를 확인하는 사용자인터페이스의 예로써 원하는 일시를 입력하고, 관측시스템이 설치된 지역/위치 선택, 확인하기 위한 환경인자(지중온도, 지중CO_2, 식생지수, 대기온습도 등) 선택, 여러 개의 센서가 존재하면 원하는 ID을 선택하여 시계열 데이터 확인. 확인한 데이터는 CSV 파일로 내려받기 가능함.
- 연구자가 위성게이트웨이가 설치된 관측 사이트를 선택하면 관측되고 있는 전체데이터가 시계열로

표시되고 각각의 환경 인자를 선택하여 원하는 날짜를 설정하면 상세하게 데이터를 확인할 수 있음.

- 준실시간 모니터링 기반 동토 환경인자 모니터링 시스템은 전지구적 기후변화 대응을 위한 동토 환경변화 통합 운영/관리 시스템 개발을 위해 현장 측정 모니터링 자료 분석 및 관리 기능 구현 하였음.
- 개방형 IoT 표준 플랫폼 기술을 적용한 4개 데이터 시각화
- 관리자가 모니터링을 통해 수집된 자료를 효율적이고 체계적으로 분석 관리할 수 있도록 시스템 설계/표출하였음.
- 시스템의 독립성을 확보하였음.

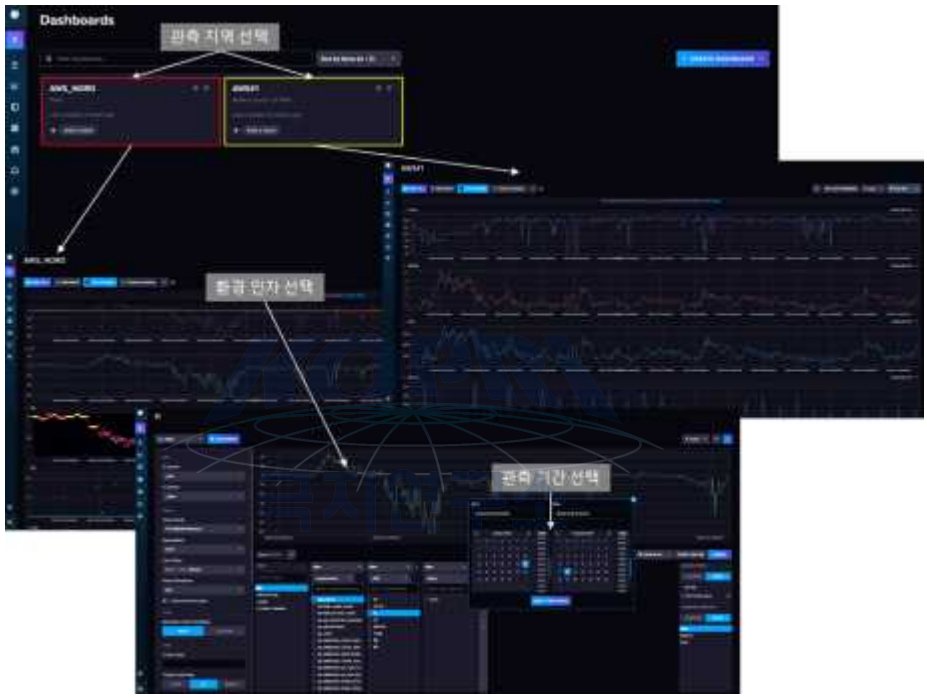


Fig. 105. Environmental factors by observation area (Alaska Council, Greenland Nord).

- 현재 위성게이트웨이가 알래스카 카운실과 그린란드 노르드 사이트에서 운영 중이므로 Fig. 106과 같이 두 지역만 표시 되지만 위성게이트웨이 설치 사이트을 추가하면 다른 사이트의 데이터도 준 실시간으로 표출 가능함. 현재 위성게이트웨이에서 30분 간격으로 데이터를 송출하고 있으므로 30분 단위로 업데이트됨. Fig. 106과 107은 극지연구소 서버실에서 운영중인 SPP(Smart Polar Platform) 서버에서 준실시간으로 보여지는 시계열 데이터의 표출 예시임.

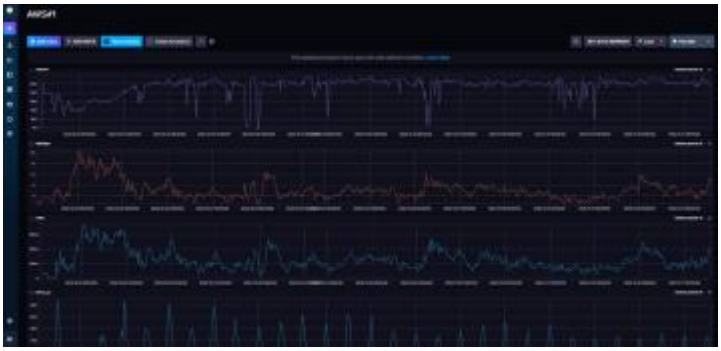


Fig. 106. Alaska Council site.

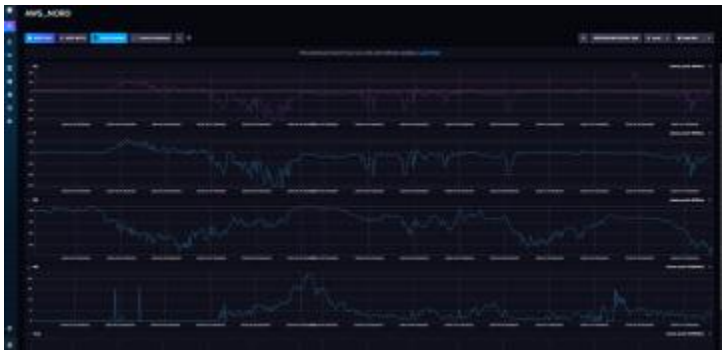


Fig. 107. Greenland Nord site.

KOPRI 극지연구소

– Fig. 108과 같이 관측 시작일과 종료일을 선택하면 좀더 상세하게 관측 데이트를 확인 할 수 있음.

Fig. 108. Greenland Nord site observation start and end setting function.

▪ Smart Polar Platform 구축

※ Smart Polar Platform 실증

– 통합 관측시스템의 하드웨어 구성은 태양광 충전방식의 자가발전 방식을 사용하여 구성하였으며 Fig. 109 및 110의 회로도와 PCB는 태양광 발전 회로도로 실내의 조명에서도 충전이 가능함. 극지의 극야(極夜) 시기, 즉 완전히 태양 빛이 없는 시기를 제외하면 연속 충전이 가능한 하드웨어 구조로 판단됨. 대기전력은 330nA 이하로 동작 가능하며, 광 에너지가 아주 작은 경우라도 회로도에 태양광 전지 입력단자에 인가되는 전압이 600mV 이상이면 충전이 개시됨. 배터리 충전량을 실시간으로 측정하기 위해 배터리 게이지도 추가하였음.

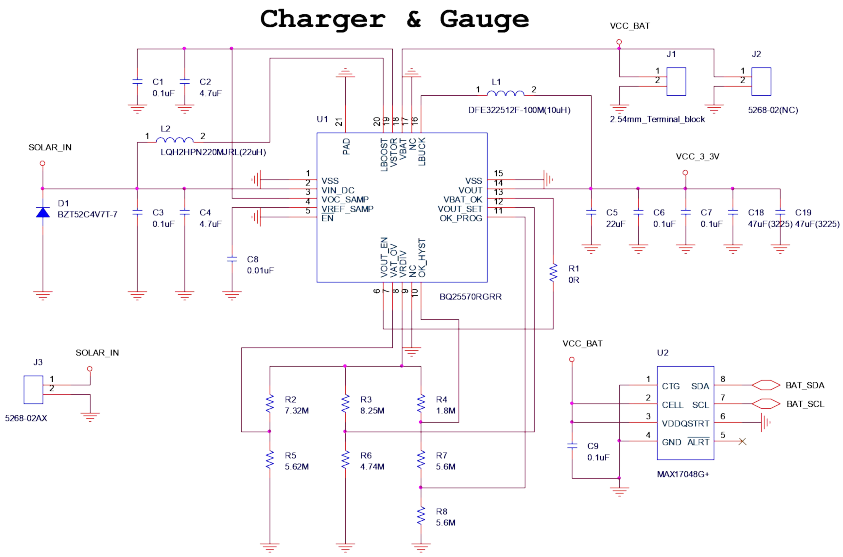


Fig. 109. Solar charging circuit diagram and battery charge monitoring circuit diagram.

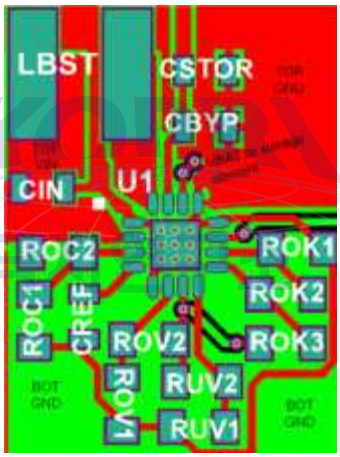


Fig. 110. Solar charging PCB Artwork.

- Fig. 111은 1년 동안의 태양광을 사용한 충전 상태를 날짜별로 표기한 것으로 대부분의 기간에 50% 충전 상태를 유지함.
- Fig. 112와 같은 회로도와 PCB 디자인 파일로 설계되었으며, 각 사양은 Table 6, 7, 11과 같음.

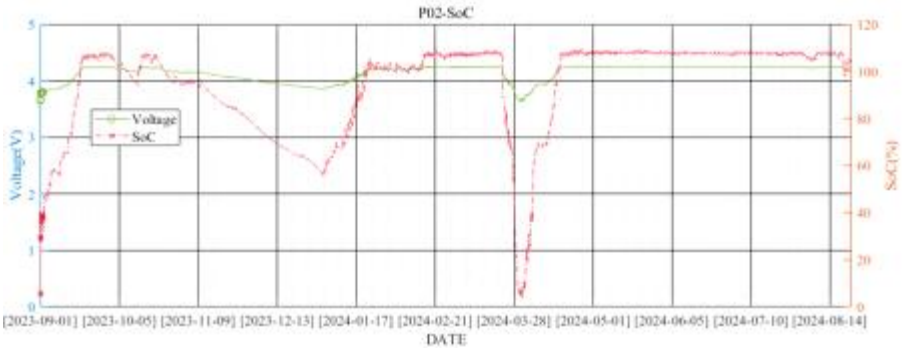


Fig. 111. Self-generated state.

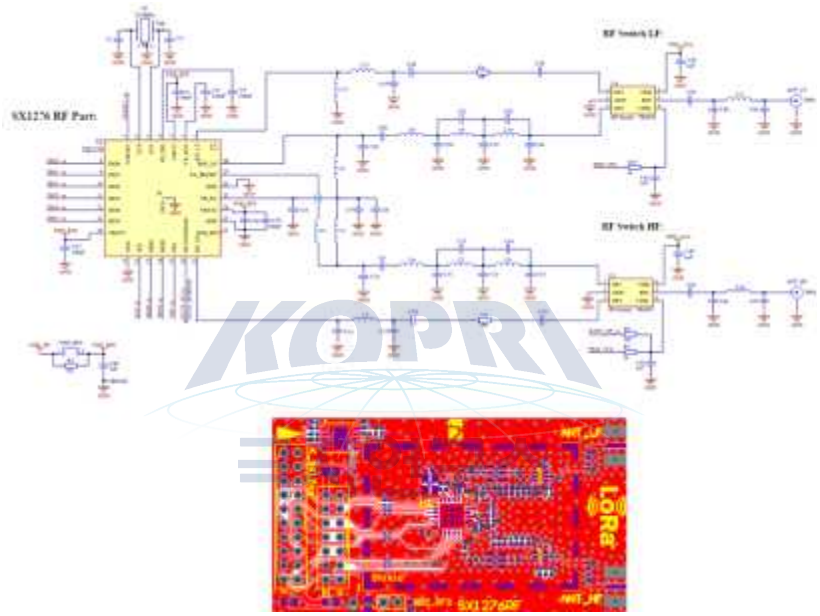


Fig. 112. LP-WAN circuit diagram (top) and PCB design file (bottom).

- 위성게이트웨이는 무선 통신을 위해 위성통신모뎀, ZigBee(LP-WPAN), LoRa(LP- WAN)을 선택적으로 사용할 수 있도록 Fig. 113과 같이 모듈형태로 설계하였으며, 복합센서 모듈로부터 수신된 환경인자 데이터를 저장하기 위해 uSD 카드를 포함하여 설계하였음. 복합센서 모듈에서 측정되는 주기는 최대 5분으로 128노드센서 이상의 복합센서 모듈에서 1년 이상 생성된 데이터를 저장할 수 있도록 최대 32GB까지 인식되도록 하드웨어와 펌웨어 드라이버를 개선하였음.

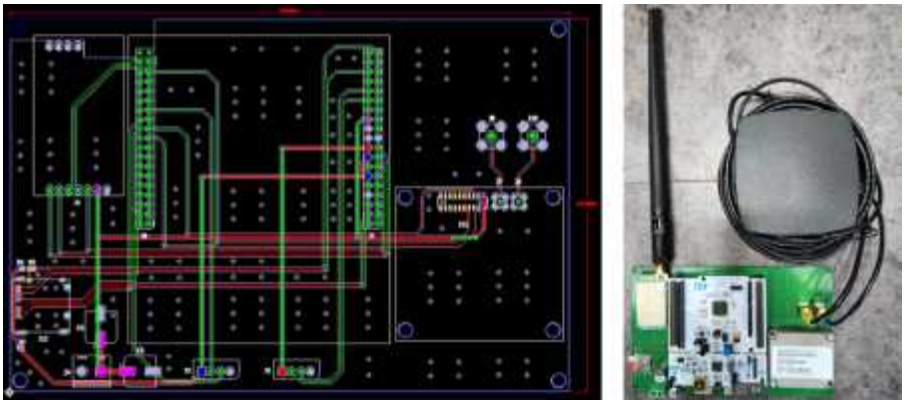


Fig. 113. Satellite gateway PCB design drawings and prototypes.

- 무선센서 네트워크는 LP-WAN과 ZigBee 을 사용함. 네트워크 소프트웨어 스펙은 Fig. 114와 같은 레이어 구조로 구성함. 다양한 극지 환경센서를 연결 가능하도록 하드웨어 및 펌웨어를 개발하여 적용하였음. 환경센서에서 많이 사용되는 SDI-12, UART, RS485, Analog 방식을 연결 가능하도록 기본적으로 개발하고, 연구소에서 선정하는 센서가 다른 방식을 사용할 경우 연계 가능하도록 추가로 하드웨어를 개발하였음. 또한, 주기는 최대 5분 주기로 관측할 경우, 향후 복합센서 모듈에서 1년 이상 데이터를 저장 할 수 있도록 uSD 카드를 사용하고 최대 32GB 까지 인식 되도록 하드웨어와 펌웨어 드라이버를 개발하여 적용할 계획임. 또한 관측 데이터는 년/월/일/시/분/초를 포함하여 날짜별로 CSV 파일로 저장하는 기능을 구현하였음.

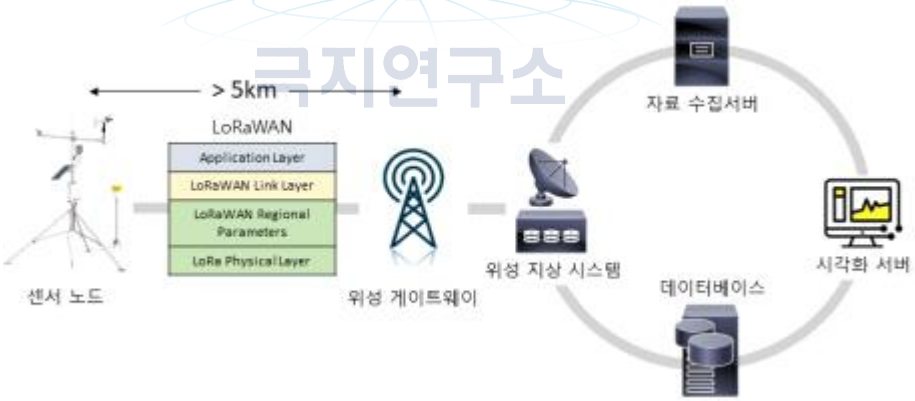


Fig. 114. Complex sensor, satellite gateway stack structure and distance.

- Fig. 114와 같이 알래스카 관측거점 환경에서 통합 관측 시스템의 복합센서 노드와 위성게이트웨이 간 통신 가능 도달 거리는 5km 이상을 목표로 RF 하드웨어 임피던스 매칭, 안테나, 펌웨어 개선 등을 통해 달성하였음.

※ 동토층 환경인자 특성 자료 통합 분석

[2024년(2단계 2차년도) 관측 결과]

- 본 과제에서 개발된 관측시스템의 위성게이트웨이는 이중화하여 관측 사이트 중앙에 2셋트를 설치하였으며, 5dB 이득 무지향성 다이폴 안테나도 같이 설치하였음. 복합센서 모듈은 앞서 기술한 내용과 같이 지중온도센서 8개, 지중 수분함량센서, CO_2 센서, 식생지수 센서, 대기온도 센서,

대기습도 센서를 동시에 연결할 수 있도록 설계 개발되었음.

- 데이터 취득의 핵심인 위성게이트웨이의 신뢰성을 높이기 위해서 태양광 충전 패널, 배터리, 충전 제어기를 포함한 전원과 위성게이트웨이의 무선 센서 네트워크를 완전 이중 구조로 설치하였음.
- 지중온도센서 8개, 지중 수분함량센서, CO_2 센서를 장착한 복합센서 모듈과 지중에서 발생되는 가스를 포집하기 위한 가스 포집기를 포함하고, 태양광 발전을 사용하여 자가 충전함.
- 위성게이트웨이와 복합센서 노드 간의 통신 도달 거리 5km 이상 검증을 위해 알래스카 카운실 사이트에서 도로기준 5km 지점과 직선거리 5km에 각각 복합센서 노드를 설치하여 검증하였음. 각각의 복합센서 노드의 설치위치는 GPS 좌표값으로 Fig. 115~118과 같이 표시하였음. Fig. 115 및 116은 지중온도센서 8개를 부착한 복합센서로 위성게이트웨이(위경도 위치: 64.844101, −163.710917)로부터 도로 기준 5km 지점(위경도 위치: 64.808345, −163.741009)에 설치내용과 안테나의 반경을 나타내었음. Fig. 117 및 118은 같은 지중온도센서 8개를 부착한 복합센서로 위성게이트웨이(위경도 위치: 64.844101, −163.710917)로부터 직선거리로 5km 지점(위경도 위치: 64.802236, −163.752845)에 설치 내용과 안테나의 반경을 나타내었음.

Fig. 115. Complex sensor, satellite gateway stack structure and reach (5km by road).

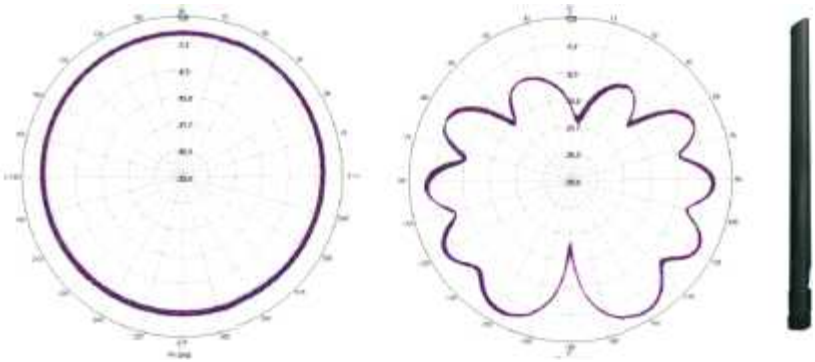


Fig. 116. Complex sensor 2.5dB omni-directional antenna performance installed at a road distance of 5km.

Fig. 117. Complex sensor, satellite gateway stack structure and reach (straight line distance 5km).

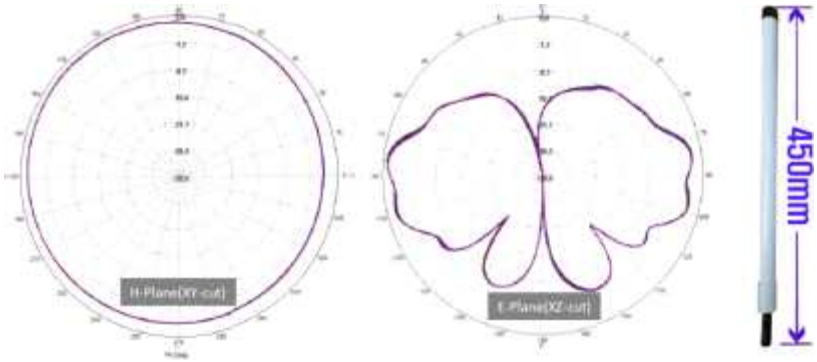


Fig. 118. 5km linear distance installation complex sensor 5dB omni-directional antenna performance.

– 통합 관측시스템의 경우 Fig. 119와 같이 설치 하였으며, 센서가 추가되는 경우 센서 인터페이스 회로 추가, 펌웨어 드리이버 추가하여 구현 가능함. 환경인자 4종 포함 143노드가 가능하도록 (Table 12 참조) 네트워크 지원 및 설치를 완료하였으며 설치된 각 노드별 센서의 종류는 Table 12와 같음.

Table 12. Installed sensor node.

관측 거점	환경인자	
미국 (카운실)	센싱항목	센서갯수
	지중온도	126개소
	대기온도	2개소
	대기습도	2개소
	CO_2	5개소
	CH_4	1개소
	NDVI	2개소
	토양함수비	5개소
합계		143개소

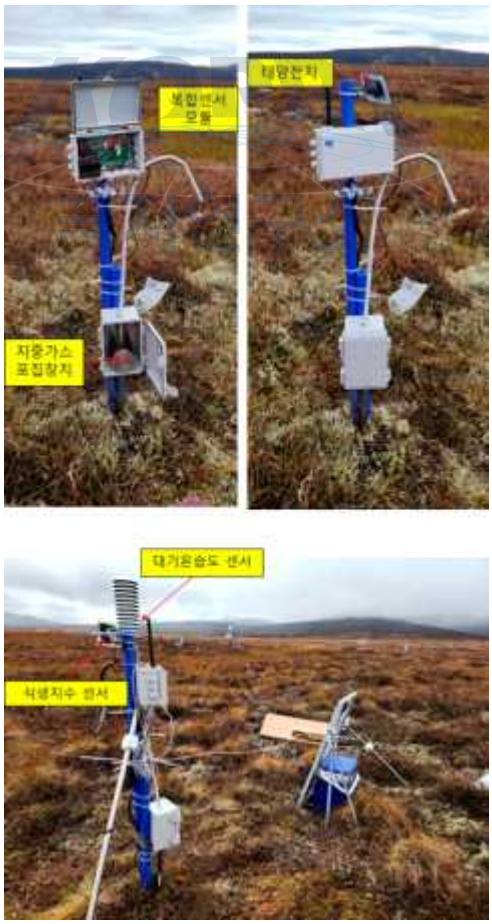


Fig. 119. Complex sensor module installation results.

※ 토양 조건에 따른 동토 환경인자 발생특성 분석 및 알래스카 카운실 환경인자 평가

- 환경인자 측정 결과 : 2023년 9월~2024년 9월까지 알래스카 카운실에서 발생하는 CO_2, 활동층의 토양온도, 토양 CH_4 및 대기 CH_4를 측정함. 토양온도는 약 160cm 의 토양층 깊이까지 10cm 간격으로 측정하였으며 각각 측정된 데이터의 위치는 Fig. 34와 같으며 Fig. 34의 2에서 측정한 대기온습도는 Fig. 120과 같음.

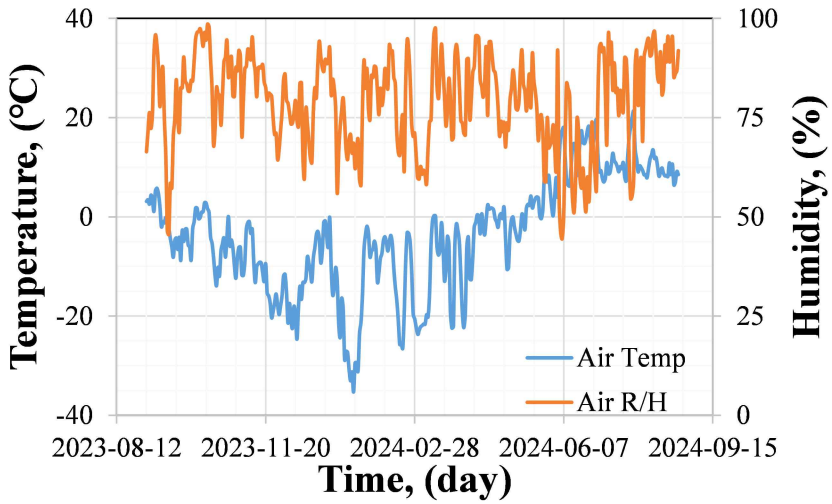


Fig. 120. Air temperature and humidity.

- 동토지역 토양에서 발생하는 토양온도는 Fig. 121~124에 나타낸 바와 같이 지표면에 가까울수록 토양의 온도의 진폭 변화는 심하게 나타남. 특히 여름이 지난 9월 경 이후에는 온도가 점차로 감소하여 영하로 떨어지지만 그후 상대적으로 짧은 시간에 온도가 상승하다가 감소하고 이후에는 점차 영하의 온도를 유지함. Fig. 120의 대기 온도의 경우 토양과는 다르게 영하의 온도 진폭의 변화가 심하게 나타남. 또한 토양 온도는 10월경에는 온도의 0℃와 영하의 기온으로 유지되다가 다시 5월 말경에는 온도가 서서히 증가하여 7월경에서 최고 온도를 나타내고 이후에는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내고 있음. 특히 깊이가 깊어짐에 따라 온도의 산란은 줄어들었음.
- 전년도의 측정과 비슷하게 토양온도가 영상에서 깊이가 깊어질수록 토양 온도의 최대값은 작았으며 토양 온도의 타임 렉은 발생하지 않았음.
- 1지역에서 측정된 온도가 상대적으로 가장 낮게 측정됨. 특히 영상의 경우 지표면에 가깝게 측정된 토양온도 일수록 진폭의 변화가 심하게 발생하였으며 영하의 경우 깊이가 깊어질수록 진폭의 변화 없이 일정해 짐을 알 수 있었음. 특히 이러한 온도 변화 발생이유는 토양의 흙 입자, 함수비, 밀도 및 토양의 물리적 성질에 의해서 그차이가 발생하는 것으로 판단됨. 따라서 약 100×100m의 차이를 보이는 토양의 상태가 변하면 최고 온도와 최저 온도가 각각 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있으며 이에 대해 앞으로 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단됨.
- Fig. 125는 현장에서 발생하는 토양내 CO_2를 측정하여 1년 동안 연속 관측한 자료임. 여기서 2023년 9월부터의 토양 CO_2 관측 자료를 통해 카운실 관측거점에서 알래스카의 가을에는 활동층에서의 CO_2 농도가 약 300~1100ppm 정도가 발생함을 알 수 있었음. 그러나 눈이 내리는 9월 말부터는 토양의 상부가 얼어 활동층내의 CO_2의 배출이 상부로 적절하게 이루어지지 않고 있어 활동층 내의 CO_2의 농도가 급격히 증가하거나 감소하는 경향을 보이고 있음. 또한 1월에서 3월까지의 경우도 비슷한 양상을 보임. 알래스카의 여름인 6월 경부터 급격히 CO_2의 발생량은 증가하고 있으나 site 5의 경우는 변동성이 크지 않았음.

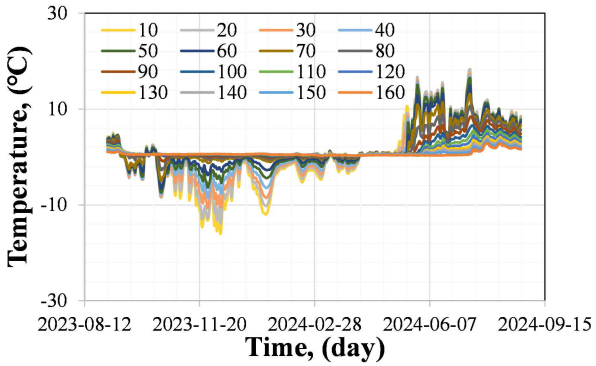


Fig. 121. Test results for soil temperature at site 1.

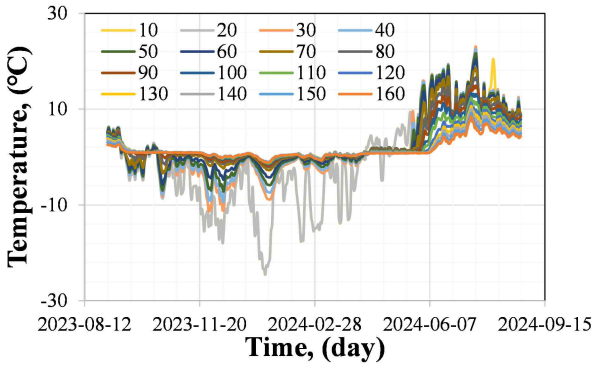


Fig. 122. Test results for soil temperature at site 2.

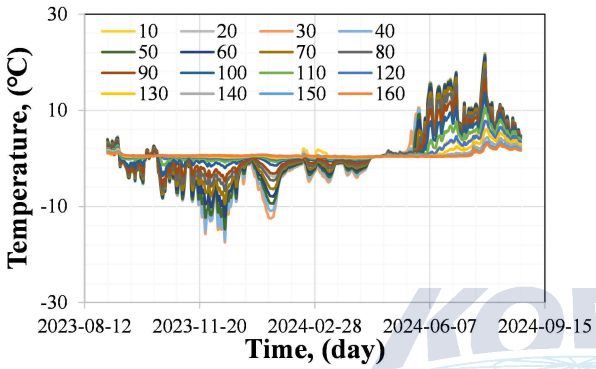


Fig. 123. Test results for soil temperature at site 3.

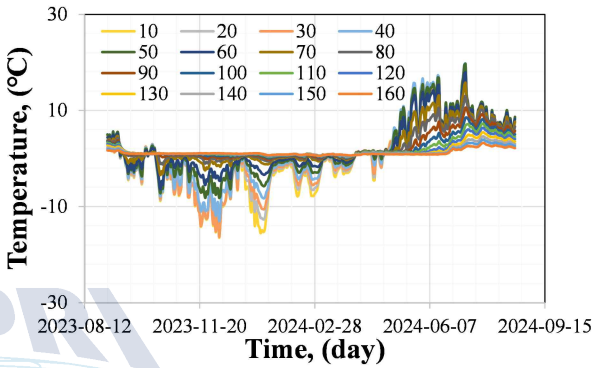


Fig. 124. Test results for soil temperature at site 5.

KOPRI 극지연구소

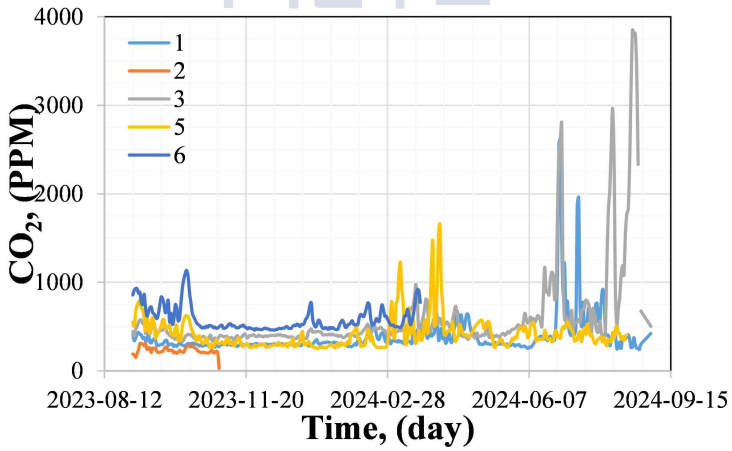


Fig. 125. Test results for CO_2.

- 함수비의 경우(Fig. 126 참조) 겨울동안 함수비의 변화가 거의 없다가 알래스카의 봄철에 함수비가 급격히 변화하는 경향을 나타내고 있음. 그러나 겨울동안의 함수비 측정 값에 대한 연구는 좀더 필요할 것으로 판단됨.

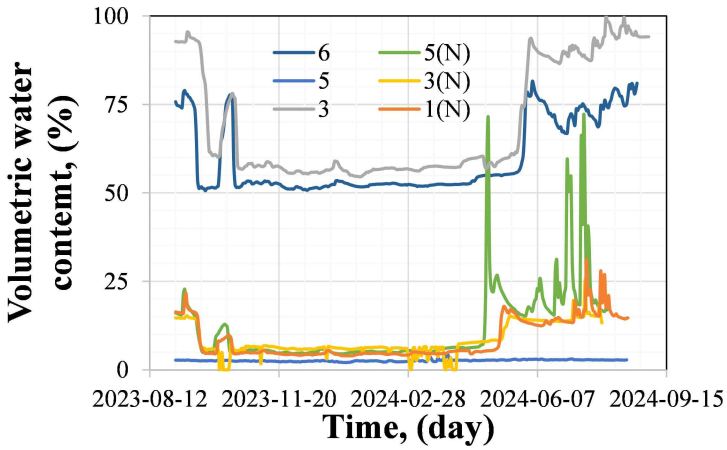


Fig. 126. Test results for volumetric water content.

- 이러한 100×100m 사이트에서 토양온도, CO_2 등의 발생 값이 달라지는 이유는 토양의 흙 입자, 함수비, 밀도 및 토양의 물리적 성질에 의해서 그 차이가 발생하는 것으로 판단됨. 기후 변화의 원인으로 대기의 온난화(global warming)보다는 토양의 온난화가 좀더 더 많은 영향을 미치고 있다고 보고되고 있으며 토양의 온난화는 겨울을 제외한 기간에 생기는 토양온도의 변화로 인한 활동층(active layer)의 변화와 깊은 관계가 있으므로 장기적인 토양온도 데이터 축적이 필요함.

■ Smart Polar Platform 구축 결과

- 북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술 개발은 북극권 환경변화에 대한 현장에서의 정밀 측정시스템을 이용하여 기초 데이터를 확보하였음. 이러한 환경변화를 예측하기 위해 여러 에너지원을 통합하여 효율적으로 환경변화량을 확보할 수 있어 향후 극한지역에서의 환경변화 데이터를 확보함. 이러한 데이터를 확보할 수 있도록 하는 정밀측정시스템의 안정적인 전력 시스템 구축은 무엇보다 중요하였으며 환경변화 대응 기술로 효율적인 에너지 관리시스템을 고도화하여(예를 들어 작은 전력에너지를 이용한 센싱 및 통신 기술 고도화, 개발된 시스템을 통해 연구성과인 '모니터링 시스템 원격 무선전송 및 에너지 하베스팅 기술 고도화' 및 '모니터링 시스템 자가발전 장시간 저전력 운용' 완료) 개발하였음. 특히 구동회로의 소모전류 억제 및 발열감쇄 효과 회로 개선으로 기존 환경 데이터 확보를 위해 사용되는 배터리 등을 최소화하고 태양열 발전 등을 이용하고 저전력 시스템을 개발하여 재생에너지를 이용한 안정적인 전력 시스템을 구축하였음(개발된 시스템을 통해 연구목표인 'CPS/IoT 네트워크 기반 환경인자 관측시스템 구축' 완료).
- 또한, 저전력 장거리 무선통신 장치의 성능 고도화를 위하여 장거리 전송에 더 좋은 성능을 가지는 LPWA기반의 인터페이스 모듈을 개발하였음.
- 북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명에서는 복합전원제어에 대한 정량적 평가를 위한 인터페이스개발, 자가발전 장시간 저전력 시스템 개발을 수행하였음. 이에 대한 핵심기술 개발성과를 바탕으로 실제 북극권 현장 pilot test를 수행하여 개발성과의 현장적용을 수행하였음.
- 개발된 Smart polar platform은 저전력 장거리 무선통신 장치의 성능 고도화를 위하여 장거리 전송에 더 좋은 성능을 가지는 LoRa기반의 인터페이스 모듈을 개발하였음. 개발된 LoRa 기반의 인터페이스 모듈은 센서노드와 게이트웨이에서 공통으로 사용될 수 있도록 설계하였음.
- 총 143 센서노드에서 받는 환경인자(환경인자 4건이상, Table 12 참조)를 획득할 수 있으며 장거리통신(5km, Fig. 115~118 참조)을 통한 환경인자 데이터 획득하여 성과목표를 충실히 달성하

였음.

- 기존의 센서네트워크 분야에서는 중앙의 서버에서 무선으로 구성되는 센서와의 링크를 이용하여 센싱된 정보를 수집하는 것을 목적으로 함. 그러나, 관찰하고자 하는 지역의 크기가 넓어짐으로 설치되는 센서의 개수가 증가하고, 센싱되는 데이터량이 증가하는 경우 수집된 정보를 그대로 수집하는 것은 낮은 데이터 전송속도를 가지는 센서네트워크에 큰 부담을 주게 됨. 따라서, 센싱된 데이터를 바로 분석하고, 그 분석된 결과에 따라 데이터 수집을 결정하거나, 센싱 주기를 변경하는 등 다양한 센싱 데이터 처리 기술을 위한 플랫폼을 개발하여 고도화하였음. 또한 센서 통합으로 북극권 환경변화 예측에 양질의 데이터를 확보하였음. 따라서 개발된 시스템을 통해 '현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현' 및 'Smart Polar Platform 구축' 을 완료하였음.

▣ 1세부과제 국외학술용역, 위탁과제별 추진내용 및 연구개발결과(요약)

1) 알래스카 화재 및 동토융해에 따른 온실효과기체의 정량적 평가(UAF 국외학술용역 주제)

가) 알래스카 육상생태계에 있어서 급변하는 온난화 및 그에 따른 자연발화 화재의 영향(알래스카 종단관측)

- 북극에서 기후 변화의 속도는 연평균 기온은 현재 1971~2000년 평균보다 1.5℃ 높으며, 가장 큰 증가는 가을과 겨울에 발생했다[3]. 북극의 온난화는 저위도 지역의 온난화에 비해 두 배 이상 빠르다[4]. 급변하는 북극 기후에서 육상 생태계에서 대기로의 가장 중요한 잠재적 피드백 중 하나는 최근까지 영구 동토층에서 동결되었던 토양 유기물 (SOM)의 분해로 인한 탄소 방출이다[5].
- 북극 툰드라 순 CO_2 수지에 대한 최근 데이터 합성 및 모델링 연구에 따르면 툰드라는 CO_2 흡수원와 배출원으로 균형을 이루고 있다고 제안했다[6]. 데이터 통합에서 Belshe et al. (2013)은 1990년대 이후 여름 총 1차 생산성이 증가했음에도 불구하고, 지난 40년 동안 툰드라가 CO_2의 방출원이었음을 증명했다. 지상 기반 C 플럭스 관측, 상향식 프로세스 기반 모델 및 하향식 대기 역모델의 종합에서 McGuire et al. (2012)은 툰드라가 최근 수십 년 동안 CO_2에 대한 중성으로 전환되고 있음을 보고했다.
- 북극 알래스카에서 시뮬레이션된 40개의 육상 생물권 모델 간의 대규모 교차 비교에서 Fisher *et al.* (2014)은 북극 알래스카 산림을 흡수원, 배출원, 또는 균형으로 보여주는 다른 모델과 유의한 차이를 나타내지 않았다. 이러한 연구는 북극 툰드라의 현재 탄소 균형을 이해하고, 특히 겨울과 겨울철에 생태계 모델을 매개 변수화하고 검증하기 위해 툰드라 생태계의 지속적인 CO_2 플럭스 데이터가 충분하지 않음을 강조했다. 겨울 CO_2 방출은 북극 생태계의 연간 탄소 예산의 핵심구성 요소라는 것이 오랫동안 인식되어 왔다. 왜냐하면, 미생물은 빙점에 가깝거나 심지어 영하의 온도에서도 적설아래에서 계속 호흡할 수 있기 때문이다[7]. 그러나 이 겨울 플럭스의 규모와 경년 변동성은 여전히

3) Jeffries et al., 2013
4) Overland et al., 2013
5) Schuur et al., 2015
6) McGuire et al., 2012; Belshe et al., 2013; Fisher et al., 2014
7) Coyne and Kelley 1971; Panikov et al., 2006

불확실하다[8]. 가혹하고 외딴 환경과 전력 공급이 없는 지역에서 측정값을 수집하는 것이 어렵기 때문에 수년 동안 전체 연간 주기에 걸친 북극 툰드라 CO_2 플럭스의 지속적인 측정은 드물게 이루어졌다[9]. 이번 연구결과는 2022년 8월 종단관측 겨울철 토양기원 CO_2 방출량과 환경인자의 연속관측에 집중하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- 알래스카 북쪽 툰드라 사이트(Imnavait Creek)에서 2019년 7월부터 2022년 8월까지, Tussock tundra에서 지온 (5와 10 센티)의 연평균값(범위)은 각각 -2.91 ± 0.22 ° C (-22.9 ~ 14.0° C) 및 -2.91 ± 0.22 ° C (-22.5 ~ 13.7° C)였으며, 두 수심간의 차이는 나지 않았다. 한편, Inter-tussock tundra에서 지온 (5와 10센티)의 연평균값 (범위)은 각각 -2.67 ± 0.19 ° C (-21.9 ~ 12.5° C) 및 -2.88 ± 0.16 ° C (-21.6 ~ 8.7° C)였다. 두 식생간 지온 5 및 10 센티에서의 차이는 0.24와 0.07 ° C로 지표면인 5센티에서 큰 차이를 보였으며, 10센티에서의 차이는 거의 없었다. 겨울철 지온의 변화는 2019/2020년 동안 지온이 가장 낮은 나타났으면 2021/2022년의 겨울철 지온이 가장 높게 나타났다.
- 알래스카 북쪽 툰드라 사이트 (Imnavait Creek)에서 2021년 9월부터 2022년 8월까지, Tussock tundra에서 수분함량 (10 및 20센티)의 연평균값(범위)은 각각 0.19 ± 0.01 m^3 m^{-3} (0.05~ 0.50 m^3 m^{-3}) 및 0.08 ± 0.01 m^3 m^{-3} (0.00~ 0.36 m^3 m^{-3})였으며, 두 수심 간의 차이는 뚜렷하게 나타났다. 한편, Inter-tussock tundra에서 수분 (10 및 20센티)의 연평균값(범위)은 각각 0.18 ± 0.01 m^3 m^{-3} (0.05~ 0.49 m^3 m^{-3}) 및 0.17 ± 0.01 m^3 m^{-3} (0.04~ 0.53 m^3 m^{-3})였다. 두 식생간 10 및 20센티에서 수분함량의 차이는 0.01 및 0.09 m^3 m^{-3}로, 지표면인 10 센티에서는 차이를 보이지 않았으나, 20 센티에서는 작은 차이를 보였다.
- 알래스카 북쪽 툰드라 사이트(Imnavait Creek)에서 2021년 7월부터 2022년 8월까지 지표식생-Tussock tundra and sphagnum moss (inter-tussock)에서 FD (forced diffusion) chamber에 의한 토양 이산화탄소의 연평균 방출량 측정은 동물(설치류)의 침범으로 챔버의 필터가 찢어져 관측이 불가능하였다. 그래서, 새로운 챔버를 설치하여 재측정을 하였다.
- 2022년 4월, 극지연구소 미생물팀이 알래스카 종단관측사이트에서 UAF permafrost lab에서 장기간 관측중인 툰드라 및 한대산림 사이트에서 토양시료를 채집하였다. Table 1에 상세한 사이트 정보를 기재하였다. 약 10일 동안 총 이동거리는 약 2800 킬로이었으며, 사이트별로 2개의 코어시료를 채집할 수 있었다. 이 연구의 목적은 토양 활동층 및 동토중의 미생물 군집특성과 조성, 및 실내에서 온도조절에 따른 온실효과기체의 생성 및 발생정도를 정량적으로 평가하는데 있다.

나) 중앙알래스카 흑가문비나무의 줄기호흡 (Fairbanks)

- 줄기호흡의 측정은 생태계의 탄소순환과 예산에 대한 이해를 높이는 데 중요하며, 이는 생태계의 탄소와 에너지 균형에 영향을 미치고 미래 기후 변화를 주도하는 피드백에 기여한다[10]. 지상 탄소수지에서 줄기 호흡은 50년 된 Scot pine[11]에서 9%에서 245년 된 Lodgepole 소나무의 스탠드에서 13%[12]로 기여한다. 최근의 연구에서 알래스카 흑가문비나무의 줄기호흡은 생태호흡에 비해, 5.0 ± 2.9 % 기여함을 보고하였다[13]. 더욱이, 산림 생태계는 탄소원과 탄소 흡수원 사이에서매우 미세하

8) Björkman et al.,2010; Webb et al., 2016
9) Euskirchen etal., 2012; Lüers et al.,2014, Oechel et al., 2014
10) Xu et al., 2000
11) Zha et al., 2004
12) Ryan and Waring, 1992

게 균형을 이루기 때문에[14], 산림 탄소 예산을 추정하는 데 사용되는 모델의 정확성을 개선하고 줄기호흡에 대한 지식을 개선하는 것이 중요하다. 또한, 줄기 호흡 과정을 측정하고 이를 조절하는 것이 무엇인지 이해하는 것은 지역 및 지구 탄소 수지을 이해하고 산림과 대기 사이의 CO_2 교환을 모델링하는 데 필수적인 단계이다. 내륙 아한대산림에 우세한 (39-44%) 검은 가문비나무 군집은 내륙 알래스카에 널리 분포되어 있으며, 불연속 동토층이 여기에 포함되어 있다[15]. 알래스카 검은 가문비나무 군집은 일반적으로 불연속 동토층위에 존재하고, 추운환경 및 배수가 잘 되지 않고, 영양이 부족한 지역에 서식한다. 따라서 생산성은 일반적으로 낮다[16]. 2022년 알래스카종단관측 사이트중 하나인 알래스카 주립대학 내에서 얻은 줄기호흡과 환경인자의 연속관측결과는 다음과 같다.

- UAF사이트 흑가문비(black spurce stands)의 줄기호흡량 및 온도 (기온 및 줄기 온도)를 2021년 10월부터 2022년 10월까지 관측하였다. 연평균 기온 (범위) 및 줄기온도(범위)는 각각 -2.06 ± 0.83° C (-40.1~23.3° C) 및 -2.71 ± 0.81° C (-39.5~21.7° C)이었다. 월동기간 (2021년10월 12일 ~ 2022년4월11일: 182일)은전년도에 비해 2일 짧았다. 연평균 토양수분함량은 0.11 ± 0.01 m^3 m^{-3} (0.00~ 0.53 m^3 m^{-3})이었다. 그 기간 동안 기온 및 줄기온도의 평균 (범위)은 각각 -15.9° C (-40.1~0.07° C) 및-16.2° C (-39.5 ~ 2.9° C)이다.
- 관측기간 동안 기온(AT)및 줄기호흡(ST)의 상관성은 ST = 1.02 × AT + 0.53 (R^2 = 0.99)로, 줄기온도가 기온에 비해 0.53° C 높음을 알 수 있다. 대기온도보다 줄기호흡 온도가 높은 것은 흑가문비 나무의 열용량이 더 높기 때문이다.
- 연간 줄기호흡 (SR: stem respiration)과 온도 (기온 (AT) 및 줄기온도(ST))와의 상관성은 각각 SR = 0.1482 × exp (0.0611 ×AT) (R^2 = 0.74; Q_{10} = 1.84) 및 SR = 0.1543 × exp (0.062 ×ST) (R^2 = 0.71; Q_{10} = 1.85)이다. Q_{10}값은 2020/2021년도에 비해 낮음을 알 수 있다. 이는 온도에 대한 민감도가 낮다는 것을 의미한다.
- 흑가문비나무의 연평균 줄기호흡량은 0.25 ± 0.01 (0.02 ~ 0.95) mol/m^2/s이며, 겨울 기간 (2021년 10월 12일부터 2022년 4월 11일: 182일) 줄기호흡량은 **0.04 ± 0.01 μmol/m^2/s** 이다. 이는 짧은 식생 성장기간 동안 줄기호흡량 **(0.47 ± 0.02 μmol/m^2/ss)**이 긴 겨울철에 비해 10배 이상이었음을 알 수 있었다.
- 흑가문비나무의 줄기호흡은 성장 줄기호흡 (growth stem respiration)과 유지 줄기호흡 (maintenance stem respiration)으로 구분된다. 특히, 겨울철에는 흑가문비가 성장하지 않으므로, 유지 줄기호흡만 관측되며, 식물성장기간은 성장 및 유지줄기호흡이 동시에 일어난다. 겨울철 유지 줄기호흡과 온도와의 관계로 연간 유지줄기호흡량을 계산할 수 있다. 반면 식물성장 기간중 성장줄기 호흡량을 연간 실측 줄기호흡량으로부터 유지줄기호흡량을 빼면 성장줄기 호흡량을 계산할 수 있다. 연간 평균 유지 줄기호흡량은 **0.13 (0.00 ~ 0.57) μmol/m^2/s**이며, 식물성장기간중의 성장 줄기호흡량은 **0.06 (0.01 ~ 0.09) μmol/m^2/s**이다.

다) 서부알래스카 툰드라 (Kougarok 및 Council)

- 2022년도 (1단계 2차년도)의 연구목표인 Kougarok 툰드라 화재지역 및 비화재지역에서의 환경인자 및 토양 이산화탄소의 방출량을 2019년 9월부터 개시하였다. 그러나, 코비드-19에 의해, 2019년도

13) Kim et al., 2021
14) Ryan et al., 1997
15) Barney and Stocks, 1983; Viereck et al., 1992
16) Viereck et al., 1992

가을부터 2020년도까지 관측을 실시할 수 없었다. 그럼에도 불구하고, 기온온도 로거의 밧데리가 약 2년 동안 지속되어 툰드라화재지역과 비화재지역에서의 기온자료를 계측할 수 있었다. 더욱이 긴 겨울동안 밧데리의 고갈 및 동물침입으로 토양 이산화탄소 방출량을 측정하는데 힘들었다.

- 2021년 6월부터 2022년 9월까지의 화재지역의 연평균 기온은 각각 -4.33 ± 0.70° C (-34.6~17.7 ° C)이었다. 또한, 화재지역에서의 토양온도 (5, 10, 20 및 50 센티)에서의 연평균값은 8.1 ± 0.3° C, 7.6 ± 0.3° C, 5.5 ± 0.2° C, 및 3.8 ± 0.2° C였다. 반면, 비화재지역에서의 토양온도 (5, 10, 20 및 50 센티)에서의 연평균값은 -3.3 ± 0.4° C, −2.3 ± 0.3° C, −2.8 ± 0.3° C, 및 -2.7 ± 0.2° C였다. 특이하게 화재지역의 연평균 지온값이 비화재지역에 비해 훨씬 높음을 알 수 있다. 이는 화재로 인한 지표면 알비도의 차이와 식생의 밀도차이라고 사료된다.
- 2021년 9월부터 2022년 9월까지 툰드라화재지역에서의 연평균 토양수분함량 (10 및 30센티)는 각각 0.15 ± 0.01 및 0.09 ± 0.01 m^3/m^3이었고, 비화재지역에서는 각각 0.13 ± 0.01 및 0.11 ± 0.01 m^3/m^3로 화재지역에 비해다소 낮았다. 이는 두지역 간의 수분함량의 차이는 없는 것으로 나타났다.
- 2022년 7월부터 9월까지 화재지역에서 토양 이산화탄소 방출량은 전원장치의 고장으로 화재지역 (3개월)에서의 tussock 및 sphagnum 에서 0.65 ± 0.04 및 0.94 ± 0.02 μmol/m^2/s였다.
- Kougarok에서의 이산화탄소 방출량을 연속측정을 위해서, 측정간격을 3시간으로, 밧데리를 추가적으로 설치했으며, 솔라팬널과 풍력을 추가하였다.
- 2021년 7월부터 2022년 9월까지의 Council 적설펜스 실험지에서 적설과대지역 (East)의 연평균 지온 (5, 10 및 50센티)은 각각 3.05 ± 0.39° C, 3.44 ± 0.31° C, 및 1.26 ± 0.11° C 이었고, 적설과소지역 (West)의 연평균 지온 (5, 10 및 50센티)은 각각 2.57 ± 0.28° C, 2.15 ± 0.24° C, 및 0.28 ± 0.04° C 이었다. 적설펜스에 의한 토양온도 차이는 5, 10 및 50센티에서 0.48, 1.29 및 0.92 ° C를 보였다. 이는 깊은 적설로 인한 보온효과로 인한 것으로 사료된다.
- 2022년 7월부터 9월까지의 Council 적설펜스 실험지 tussock tundra에서 적설과대지역 (East)과 적설과소지역 (West)의 이산화탄소 방출량은 각각 1.31 ± 0.61 및 0.51 ± 0.26 μmol/m^2/s이었다. 이는 적설펜스 실험에 의한 결과로 사료되지만, 적설융해시기 (봄철)에 과잉의 융해수에 의한 이산화탄소의 방출를 저해한 결과로도 생각할 수 있다. 이를 위해서 tussock tundra의 양쪽 위치 등을 고려해야 한다.

2) 1위탁과제(광주과기원 : 북극권 환경변화에 따른 나노사이즈 미세먼지 생성 및 특성 변화 연구) (세부내용 별도 제출 보고서 기재)

가) 북극권 나노입자 특성 장기 및 집중 관측자료 확보 (달성률 100%)

(1단계 1차년도)

- 나노입자 수농도 및 크기분포 실시간 관측 시스템 구축: 노르웨이 스발바르 니알슨 과학기지촌 제플린 관측소
- 3-60 nm 크기 범위의 나노입자 수농도 분포 연속 관측 수행 (2021년 11월 - 현재)
- 북극 다산 기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행

(1단계 2차년도)

- 북극 다산 기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행
- 북극권 에어로졸의 물리화학적 특성, 기상 및 가스자료 등을 국제공동연구진과 협력을 통해 추가 확보 (+ 인공위성 활용 바다 chlorophyll 농도, 바다 표면 온도, 해빙 면적 등 자료, 공기괴 역궤적 모델 (기상장 기반) 자료 추가 확보)

측정 항목	기관명	확보기간
에어로졸 크기별 수농도 분포 자료 (10-800 nm 크기 범위)	노르웨이 극지연구소	2016 - 2023
기상 자료 (온도, 습도, 압력, 바람 속도 및 방향)	노르웨이 극지연구소	2016 - 2023
지구 복사 자료 (solar radiation (SRAD))	노르웨이 극지연구소	2016 - 2023
에어로졸 화학적 구성성분 (PM_{10} 이온 성분 자료)	노르웨이 극지연구소	2016 - 2023
가스 농도 자료 (SO_2, NH_3, O_3)	노르웨이 극지연구소	2016 - 2023
구름응결핵 (cloud condensation nuclei (CCN))	대한민국 극지연구소	2018 - 2022
바다 chlorophyll 농도, 바다 표면 온도 (SST), 해빙 면적 (인공위성 자료 활용)	광주과학기술원	2017 - 2024.08
기상장 기반 공기괴 역궤적	광주과학기술원	2017 - 2024.08

(2단계 1차년도)

- 북극 다산 기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행
- 아라온 선박 관측을 통한 북극해 나노입자의 생성 특성자료 확보

(2단계 2차년도)

- 북극 다산 기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행

나) 북극권 환경변화에 따른 나노입자의 생성 원인 변화 규명 (달성률 100%)

(2단계 1차년도)

- 다양한 지역/계절/시간 변화에 따른 나노입자의 생성률, 성장률, 발생조건 비교
  - NPF 발생빈도는 농촌 (축사) (55%), 도심 (47%), 농촌 (경작지) (27%), 북극 (24%) 순서로 높았음
  - 지역에 따른 NPF 발생 시간은 농촌 (경작지) (07:00-08:00), 도심 (09:00-10:00), 농촌 (축사) (11:00-12:00), 북극 (13:00 - 14:00) (NPF 발생 빈도 예측을 위해 L_Γ 값 계산)
  - 북극에서 NPF 발생은 대부분 여름에 발생하였고, 이는 spring bloom 이후 높은 H_2SO_4 농도와 증가하는 태양복사 및 온도와 해빙의 감소에 영향을 받은 것으로 보임
  - 여름에 도심지역의 NPF 발생빈도가 낮은 이유는 활발한 광화학적 활동을 통한 많은 전구체 물질 생성에도 불구하고, 높은 온도로 인해 빠른 증발속도에서 기인한 것으로 보임
  - 농촌의 축사 지역이 가장 높은 NPF 발생빈도를 보였는데, 이는 NH_3가 풍부한 환경과 연관성이 있음
  - 북극의 연별 NPF 발생빈도는 약 24%로 확인되었으며, NPF 발생일의 대부분이 강한 생물학적 활동과 광산화가 일어나는 여름에 높았음
  - 지역별 NPF 발생에 대한 통제 요인은 차이가 있으나, L_Γ로 각 지역의 임계값에 따라 NPF 이벤트와 비-이벤트를 결정함
  - L_Γ 한계점이 다른 지역에 비해 북극 지역이 매우 낮은 것으로 나타남

(2단계 2차년도)

- 북극권 환경변화 요인(대기 온도, 습도, 바닷물 특성 (온도, 생물학적 특성 등))과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명
  - NPF 발생한 날에 지구 복사 데이터 (solar radiation (SRAD)), wind speed, RH가 비-발생일

대비 높으며, 대기 중 입자에 응축성 증기가 붙는 속도 (condensation sink (CS))가 낮은 것으로 나타남
- 북극 그린란드 해와 바렌츠 해 지역을 기준으로 표층해수면 온도와 해빙 면적의 경향성 확인
- 표층해수면 온도는 증가하는 경향을 보였으며, 3-25 nm 크기 범위 수농도와 표층해수면 온도와 연관성을 보았을 때 증가하는 경향을 보임
- 해빙 면적은 감소하는 경향을 보이며, 3-25 nm 크기 범위 수농도와 해빙의 면적과 연관성을 보았을 때는 감소하는 경향을 보임
- NPF 발생빈도와 표층해수면 온도 (r=0.57)는 유의미한 양의 상관관계가 나타났으며, NPF 발생빈도와 해빙의 면적 (r=0.61)은 유의미한 음의 상관관계가 나타남

– 북극권 나노입자 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악
- DMS production capacity (E_{chl}) at Greenland Sea (3 times higher) > Barents Sea 확인
- High biological activity contributed to the NPF in the Arctic: "Greenland Sea" 지역의 높은 엽록소 및 DMS 생산 능력에 관여하는 해양 생물학적 활동이 북극 NPF에서 중요한 역할을 함을 시사함 (Park *et al.*, 2018)
- 대부분의 NPF가 발생하는 4-8월에는 자연적 요인인 식물성플랑크톤과 광화학적 반응의 영향을 받은 것으로 보임
- 북극의 겨울에서 늦봄까지 Arctic haze의 영향으로 accumulation mode 입자의 수농도와 condensation sink가 증가함

– 다양한 지역 (도심, 농촌 지역 등)에서 확보된 나노입자의 생성 특성자료와 비교분석을 통해 북극 지역의 나노입자생성 특성의 차별성 및 유사성 도출
- 축사지역이 가장 높은 입자 성장률 (growth rate (GR))과 입자 생성률 (formation rate (J))이 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 도심지역이 다른 지역에 비해 더 높은 GR 과 J이 관찰됨
- J의 상대표준편차 (relative standard deviation (RSD))는 236%이며, GR의 상대표준편차는 34%로 지역에 따라 J이 더 민감한 것으로 확인됨
- GR과 J를 비교했을 시, 유의미한 양의 상관관계가 나타남. 따라서 높은 GR이 높은 J과 연관성이 있다는 것을 확인함
- 2023.09.02.– 2023.10.10 3-60 nm 크기 범위 측정 결과를 바탕으로 총 발생일 중 NPF 이벤트 발생 분류
- 북극해 지역 (동시베리아 해 및 척치 해)에서 NPF 이벤트 발생, 이동 항차인 (베링 해, 태평양, 동해)에서 NPF 발생하지 않음
- NPF type 1 발생 시 동시베리아 해와 러시아의 기단이 지배적임을 확인
- Chlorophyll-a 농도를 확인 때 보았을 때, 해안선 근처에서 chlorophyll-a 농도가 높게 나타나는 것을 확인

– 북극권 나노입자생성 분석 일환으로 북극다산과학기지에서 다년간 측정 및 확보된 자료를 바탕으로 NPF가 CCN에 미치는 영향 분석 (2018-2022 데이터 활용)
- 북극 구름응결핵 수농도는 봄에 가장 높고, 여름에 상대적으로 높은 수농도를 유지하는 것으로 보임
- CCN 이벤트 발생일에 3-25 nm 크기 범위 수농도, 나노입자-구름응결핵으로 활성화 비율 (activation ratio (AR)), CCN 향상 비율 (CCN enhancement ratio (EN_{ccn}))이 비-발생일 대비 높았으며, 대기 중의 입자가 구름응결핵으로 성장할 수 있는 크기인 임계직경 (critical diameter (D_c))은 낮은 것으로 나타남
- CCN 수농도를 기반으로 CCN event day와 Non event day를 분류
- 북극의 CCN event 발생빈도는 약 23% 정도로 나타났으며, CCN 수농도와 비슷한 경향을 보이는 것으로 확인됨
- 상대적으로 봄과 여름에 CCN event 발생빈도가 높았으며, 이는 Arctic haze와 해양에서 방출된 생물학적 요인에서 기인된 것으로 보여짐
- NPF type에 따른 CCN 발생빈도는 NPF type 1 (32%) 때 가장 높았으며, NPF type 2 (11%) 와 Non event day (16%)는 큰 차이를 보이지 않음

3) 2위탁과제(광주과기원 : 북극권 미세먼지 예측 개선을 위한 대기질 모델링 고도화) (세부내용 별도 제출 보고서 기재)

가) 북극권 대기질 모델링 시스템 고도화 및 재분석 에어로졸 자료 생산

▪ (1단계 1차년도)

○ 대기화학모델 입력자료: 배출량 분석

- 본 분석에 활용된 배출 인벤토리는 ECCARD (Emissions of atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data, https://eccad.aeris-data.fr/)와 그것과 연계된 웹 포털로부터 확보하여 분석
- 공간적 범위: 경도 85W - 55E, 위도 50N - 85N 범위이고, GL (Greenland), SV (Svalbard), GLS (Greenland Sea), ICL (Iceland), NE (Northern Europe) 등 5개 대상 지역 선정
- 북유럽과 해로를 따라 PM 배출량 분포가 뚜렷하게 높게 나타남. 인벤토리에 따라 다소 차이를 보이고 있고, PKU 인벤토리의 경우, 그린란드 내륙에 상대적으로 높은 PM의 배출량을 산정하여 제시하고 있음
- 지역별 배출량 총합 분석: 다양한 인벤토리에 대한 지역별 PM_{10}, $PM_{2.5}$, BC, OC, CO, NH_3, NO_x, SO_2, VOCs 배출량 총합 분석 완료($PM_{2.5}$와 NO_x 배출량 요약 정리)

○ 대기화학모델 입력자료: 기상자료 분석

- NCEP GDAS/FNL 0.25° 자료 수집 및 분석 (https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/)
- 다양한 기상변수 중 바람벡터가 대기질 모의에 가장 큰 영향을 주기 때문에 바람장의 시간에 따른 변화 특성을 분석. 2019년 1 - 12월 대상으로 예상 도메인을 대상으로 06시간 간격 및 월간 1000, 850, 700 hPa 바람장 분석.
- 700hPa에서 바람장은 대체적으로 북대서양으로부터 유입되는 강한 바람. 대기질 모델링에서 특히, 북대서양 지역에 대한 경계조건 입력자료를 더욱 정교하게 고려해야 될 필요성 있음.
- 대기질 모델링에서, 특히, 소멸시간이 긴 대기화학종에 대한 경계조건이 대기화학모델링 성능에 중요한 요소로 작용할 수 있음.

▪ (1단계 2차년도)

○ 대기화학모델링 최적조건 구동을 위한 배출량 민감도 테스트

- 미국 환경청의 Models-3/CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) v5.2.1 활용
- 수평격자 : 129 × 109개, 연직격자 17개층 구성 (지표 ~ 50hPa)
- 도메인 범위 : 스발바르, 그린란드, 아이슬란드, 스칸디나비아 반도 및 일부 유럽 등
- 경계조건 : NCAR에서 개발된 CAM-CHEM 전구모델모의 결과를 6시간 간격으로 물질별 정보 제공. 그 외 모델링 구동 조건 제시
- 다양한 사례를 선정하기 위하여, 지역별 배출량 자료를 비교분석 수행. 각 지역별 최대 및 최소값을 고려하여 사례별 배출인벤토리 선정
- 각 사례별 민감도 테스트 결과를 AOD, NO_2 층적분 농도, 지표 O_3, NO_2, SO_2 농도 관점에서 비교

▪ (2단계 1차년도)

○ 대기화학모델링 수행 및 성능 평가

- WRFv4.0 및 CMAQv5.2.1 기반 모델링 수행 (2019년 1월 - 12월).
- 적용 배출량: CAMSv4.2 인벤토리 (인위적인 기체상 오염물질, 인위적 BC 및 OC, 식생 기체상 물질, 항공 및 토양 NO_x); EDGARv5.0 인벤토리 (인위적인 입자상 오염물질 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$); FINN 인벤토리 (산불발생 배출량).
- 지상관측 EMEP 네트워크 (총 53개 지점) 기체 및 입자상 물질 자료 (O_3, NO_2, SO_2, PM_{10}, $PM_{2.5}$) 자료 활용한 비교 수행 완료
- 위성관측 기체상 NO_2 층적분 농도 자료를 활용한 성능평가 수행. 모델 모의된 NO_2 층적분 농도는 OMI 관측값을 과소 모의하는 경향이 있으나 (즉, MB는 -3.52×10^{14} ~ -1.73×10^{14} 범위), 두 자료간 상관성 R은 0.67~0.83 범위이고, 일치도 IOA는 0.70~0.84로 좋은 성능을 나타냄. 전체 도메인을 대상으로 모델은 관측된 NO_2 층적분 농도의 공간적 특성을 대체로 잘 재현함

○ 재분석 에어로졸 자료 생산을 위한 자료동화 입력자료 (free parameter;) 생성-I

- 본 연구에 적용되는 자료동화 기법은 Kalman Matrix (K)를 이용한 최적 내삽법 (Optimal Interpolation)이고, 식 1 및 식2로 표현됨.

$$\tau_m' = \tau_m + K(\tau_o - H \times \tau_m) \quad (1)$$

$$K = BH^T(HBH^T + O)^{-1} \quad (2)$$

$$O = (f_o\tau_o + \epsilon_o)^2 I \quad (3)$$

$$B = (f_m\tau_m + \epsilon_m)^2 \exp\left(-\frac{dx^2 + dy^2}{2l_{xy}^2}\right) \quad (4)$$

τ_m': 자료동화 AOD; τ_o: MODIS 관측 AOD; τ_m: 모델모의 AOD
B: 모델링 공분산; O: 관측 공분산
fm: AOD 관측값의 fractional error; fo: AOD 관측값의 root mean square error
εm: 모델 AOD의 fractional error; εo: 모델 AOD의 root mean square error

- 매뉴얼에 따른 민감도 조사 (MA) 방법 적용: χ^2 통계변수 (식5)를 최소함으로써 free-parameter (f_m, f_o, ε_o, ε_m) 최적값을 결정.

$$\chi^2 = \frac{1}{N}\sum_i^N \left[\frac{\left(\tau_{i,AERONET} - \tau_{i,m}'\right)^2}{\tau_{i,m}'}\right] \quad (5)$$

N: AERONET의 관측지점 수; τ'_m: 자료동화된 AOD

- 최적의 free parameter 조합 제시

▪ **(2단계 2차년도)**

○ 재분석 에어로졸 자료 생산을 위한 자료동화 입력자료 (free parameter) 산출-II

- Bayesian optimization algorithm (BOA) 방법 적용
- BOA는 surrogate function (SF)과 acquisition function (AF)으로 구성됨. 다차원 변수들을 가진 black box function에 대해 최적의 해를 도출하기 위한 효율적인 알고리즘 적용
- SF는 가우시안 형태의 확률모델로서 free parameter 조합에 따른 비용함수를 추정하며, AF는 SF의 추정을 기반으로 구조변수 조합을 추천. 본 연구에서 free parameter 추정의 비용함수로 식 5에 정의된 χ^2를 적용

○ 재분석 에어로졸 자료 (AOD) 생산 및 관측자료와 비교 분석

- 모델모의 AOD (τ_{CMAQ}), 매뉴얼에 따른 방법 (MA)이 적용된 자료동화 AOD, BOA 방법이 적용된 자료동화 AOD (τ_{MA}' 및 τ_{BOA}')를 산출하여 비교. free-parameter 산출에 MA와 BOA 기법이 적용된 자료동화된 AOD는 모델모의 AOD의 공간특성을 대체로 유지하고 있으나, 계절에 따라 해양과 유럽 내륙의 AOD의 공간분포가 변화를 보이기도 함
- 이들 AOD 산출물의 성능을 파악하기 위하여 위성(MODIS)에서 관측된 AOD (τ_{MODIS})와 비교. τ_{BOA}'가 τ_{MA}'보다 τ_{MODIS}와 일치하는 결과를 나타냄. 또한 두 자료간 산포도 및 통계분석 결과를 제시. 모델모의 AOD보다 자료동화된 AOD가 우수하고, τ_{MA}' 보다 τ_{BOA}'의 자료 정확도가 높은 것으로 판단됨. τ_{MODIS}와 τ_{BOA}'간 상관성은 0.75-0.97이고, 일치도는 0.79-0.98로 우수함

○ 재분석 에어로졸 자료 (AOD, τ_{BOA}') 성능 평가 I (AERONET 및 MODIS AODs 자료 활용)

- 자료동화된 AOD (τ_{BOA}')가 모델모의 AOD (τ_{CMAQ}) 보다 우수함을 재 확인하기 위하여, AERONET 지점에서 관측된 AOD ($\tau_{AERONET}$)와 MODIS AOD (τ_{MODIS}) 자료와 시간적으로 비교. MODIS 자료는 AERONET 관측지점 기준으로 반경 12km 이내의 자료가 활용됨

○ 재분석 에어로졸 자료 (AOD, τ_{BOA}') 성능 평가 II (MERRA2 재분석 자료 활용)

- 자료동화에 활용되징 않은 독립적인 자료와 비교하여 재분석 AOD 자룡의 성능을 평가함. 자료간 일치도는 0.60 - 0.89 범위 (median: 0.77). 자료간 상관성은 0.56 - 0.82 범위 (median: 0.71)임.

나) 위성기반 MODIS 센서 관측 에어로졸의 광학적 특성 분석

▪ (1단계 1차년도)

○ MODIS 관측 에어로졸 광학특성 자료 처리 및 분석 (2016-2018년 대상)

- 북극권 에어로졸의 장기적 트랜드 변화와 대기질모델링에 통합 활용하기 위하여 북극권을 대상으로 에어로졸의 광학적 두께 (AOD) 자료 수집 가능
- AOD 자료는 MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) 센서에서 관측된 자료임 (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order)
- MODIS 관측자료는 전처리 (구름 및 지표반사도에 따른 영향 제거)과정을 거친 후, 육지(Dark Target) 및 해양 (Deep Blue)에 대해 각각 다른 알고리즘이 적용되어 광학자료가 산출됨
- DT는 가시광 영역에서 산출된 식생 및 어두운 토양을 대상으로 적용되는 알고리즘(Kaufman et al. 1997[17]; Levy et al., 2013[18]). DB는 가시광 영역에서 밝은 표면에 적용되는 알고리즘 (Levy *et al.*, 2013[2]; Tanr *et al.*, 1997[19]). 해당 자료의 불확실성은 육지에서 ±(0.05±15%), 해양에 대해 -0.02±10%에서 0.04±10% 범위로 보고(levy et al., 2013[2])
- 본 연구에서는 AOD_550_Dark_Target_Deep_Blue_Combined 항목의 level2 자료 (10km x 10km 해상도)를 활보하여 가공처리하고 분석을 수행함. 자료 QA flag에 따른 최상의 자료 추출
- 공간범위: 모델링 도메인의 공간적 범위로, 그린란드, 스발바르, 아이슬란드와 북유럽 등을 포함
- 시간적 범위: 2016년 - 2018년 (3년 자료)
- 북극권 AOD의 월별 및 공간적 분석 : 전반적으로 AOD는 0.3 범위 이내에서 북유럽과 여름철 선박의 해로를 따라 비교적 높은 값을 나타냄

▪ (1단계 2차년도)

○ MODIS 관측 에어로졸 광학특성 자료 처리 및 분석 (2019-2021년 대상)

- 시간적 범위: 2019년 - 2021년 (3년 자료)
- 공간범위: 모델링 도메인의 공간적 범위로, 그린란드, 스발바르, 아이슬란드와 북유럽 등을 포함
- MODIS 관측 북극권 AOD의 월별 및 공간적 분석
- AOD의 월변화 분석. 대체로 여름철 AOD가 높게 나타남. 또한, 해빙 및 snow cover 등 지표 반사로도 인하여 북극해와 그린란드 지역에 자료 손실이 높음. 특히, 1월, 2월, 11월, 12월에 자료의 높은 손실율 보임

▪ (2단계 1차년도)

○ MODIS 관측 에어로졸 광학특성 자료 처리 및 분석 (2008-2015년 및 2022년 대상)

- 시간적 범위: 2022년 및 2008년 - 2015년 (시간범위 확장)
- 공간범위: 모델링 도메인의 공간적 범위로, 그린란드, 스발바르, 아이슬란드와 북유럽 등을 포함
- MODIS 관측 북극권 AOD 자료 처리 가공 및 월별 & 공간적 분석

▪ (2단계 2차년도)

○ MODIS 관측 에어로졸 광학특성 자료 종합 분석 (2000년 - 2023년 대상)

- 시간 범위 확장: AOD 변화 경향을 보다 정교하게 파악하기 위하여 시간범위를 기존 2016년-2023년에서 2000년 - 2023년으로 확장하여 분석 수행 완료
- 공간범위: 모델링 도메인의 공간적 범위로, 그린란드, 스발바르, 아이슬란드와 북유럽 등을 포함
- 본 연구에 적용된 MODIS 관측 AOD를 AERONET 관측 AOD 비교를 통한 품질 평가 (AERONET AOD 관측은 지표 반사도에 의한 방해가 없어 참값으로 간주됨)
- 33개 전체 관측지점의 대상으로 두 자료간 상관성은 0.90 그리고 일치도는 0.95로 MODIS 관측

17) Kaufman, Y.J.; Wald, A.E.; Remer, L.A.; Gao, B.C.; Li, R.R.; Flynn, L. The MODIS 2.1 channel-Correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997, *35*, 1286-1298, doi:10.1109/36.628795.

18) Levy, R.C.; Mattoo, S.; Munchak, L.A.; Remer, L.A.; Sayer, A.M.; Patadia, F.; Hsu, N.C. The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmos. Meas. Tech.* 2013, *6*, 2989-3034, doi:10.5194/amt-6-2989-2013.

19) Tanr, D.; Kaufman, Y.J.; Herman, M.; Mattoo, S. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. *J. Geophys. Res.* 1997, *102,* 16971-16988, doi:10.1029/96JD03437.

AOD의 품질이 우수한 것으로 판단됨. 다만, 해안 경계를 따라 MODIS 관측 AOD의 과대 산출이 일부 확인됨 (그린란드 해안을 따라 위치하고 있는 AERONET 지점에서 $\tau_{MODIS}/\tau_{AERONET}$ 비율이 1.5이상 높게 나타남. 이는 MODIS 관측 AOD 산출에서 해양과 내륙을 포함하는 pixel에서 산출의 불확실성과 관련된 것으로 추정됨).

- AOD의 변화 추세 분석: 9개 구분 지역에 대해 AOD의 변화 추세를 분석. 북극권인 GL(Greenland), IC(Iceland), SV(Svalbard), GLS(Greenland Sea)와 북대서양 NAO(Northern Atlantic Ocean)에서는 AOD가 증가하는 추세임. 이에 반해, EU(Europe), NE(Northern Europe), RS(Russia), BS(Baltic Sea)에서는 점차 감소하는 추세임

4) 3위탁과제(경인여자대학교 : 북극지역 대기 에어로졸의 조성 및 흡습성에 따른 광학특성 파악) (세부내용 별도 제출 보고서 기재)

가) 북극지역 에어로졸의 조성이 CCN 등 흡습특성에 미치는 영향 파악

▪ (1단계 1차년도)

- 북극지역 미세먼지 생성 전구물질 측정자료 확보

▪ (1단계 2차년도)

○ 북극 지역 미세먼지 조성에 따른 흡습특성 파악

- 북극지역 에어로졸의 조성에 따른 CCN 생성 관계 파악
- 북극지역 대기 미세먼지의 흡수관련 관련 측정 변화 Trends파악: : 북극지역 흡수계수의 시간적 변화경향 파악

○ 북극지역 미세먼지 흡습성장에 영향 요소 파악

- 북극지역 에어로졸의 크기분포 특성과 흡습성장 모수화: 북극지역 에어로졸의 크기분포 특성이 흡습성장에 미치는 영향 모수화
- 북극지역 에어로졸의 크기분포에 따른 산란 및 흡수계수 변화 산출 및 측정 결과 검증: 크기분포와 조성에 기반하여 모사된 산란 흡수계수 산출결과의 측정결과 비교를 통한 흡습영향 검증

▪ (2단계 1차년도)

○ 수분에 의한 에어로졸 생성 메커니즘 이해

- CCN/IN등 흡습 성장에 의한 에어로졸 생성 모사

▪ (2단계 2차년도)

○ 북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성 연구 및 영향요소 파악

- 북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성 기여도 산출: 북극지역 액상 반응 및 에어로졸의 수분 함량에 의한 황산염 생성 과정 규명 및 생성 기여도 산출

가) 북극지역 에어로졸의 흡습특성이 광학특성에 미치는 영향 파악

▪ (1단계 1차년도)

○ 북극지역 미세먼지 조성자료 확보

- 북극지역 미세먼지 조성과 광학적 특성 파악에 필요한 최신 자료 확보

▪ (1단계 2차년도)

○ 북극 미세먼지의 유기 성분 조성의 흡습성장이 미세먼지 광학특성에 미치는 영향 파악

- 유기에어로졸의 kappa값에 따라 흡습성과 광학 특성 관계 파악

▪ (2단계 1차년도)

○ 조성에 따른 광학적 흡수 특성 규명

- 크기분포와 조성에 기반하여 모사된 산란 흡수계수 산출결과의 측정결과 비교를 통한 흡습영향 검증
- CCN측정값으로부터 도출된 kappa값으로부터 조성과 크기 분포에 기반한 ksca값 모수화

▪ (2단계 2차년도)

○ 북극지역 광흡수 에어로졸의 특성 분석

- Zeppelin에서 측정한 BC와 CO분석을 통하여, 북극 광흡수 에어로졸의 특성 분석

5) 4위탁과제(고려대학교 : 북극권 환경 변화와 기후변화감시물질 변동성 상호연계성 연구) (세부내용 별도 제출 보고서 기재)

가) 북극권 육상/대기 환경에 에어로졸이 미치는 영향 파악

- **(1단계 1차년도)**
  - 북극권 육상/대기 환경에 에어로졸이 미치는 영향을 파악하기 위해 장기간 위성 및 재분석 에어로졸을 수집 및 공간변동성 파악
  - 북극해에 주로 수송되는 에어로졸 중 산불기원 에어로졸(black carbon; 이하 BC)과 인간활동기원 에어로졸(nitrogen; 이하 N)을 중점적으로 수집 및 분석
- **(1단계 2차년도)**
  - 북극해로 수송되는 에어로졸의 침적이 집중되는 해역을 선정
  - 에어로졸 외부양분공급의 변화를 모색하기 위해 북극해의 영양염 결핍도를 파악하여 양분공급의 잠재적 영향력이 비교적 높은 해역을 선정
  - 에어로졸내 영양물질(Fe, N)의 침적이 식물성플랑크톤에 의해 소진된다는 가정하에 잠재탄소고정량 추정을 통해 산불기인 에어로졸의 탄소 재흡수 효과를 제시
- **(2단계 1차년도)**
  - 산불기인 에어로졸의 잠재적 탄소고정 효과에 대한 가설검증을 위해 인공위성 자료를 기반으로 북극해 산불 에어로졸 침적이 집중되는 해역에서 해양 식물성플랑크톤 생장(chlorophyll-a, net primary production)에 변동성을 파악
  - 산불의 불연소과정에서 발생하는 BC 에어로졸의 침적이 해빙융해속도 가속화 영향을 추정
- **(2단계 2차년도)**
  - 영문 논문출판 (북극권 육상/대기 환경에 에어로졸이 미치는 영향 파악)
    2024년 4월 Marine Pollution Bulletin 학술지에 “Possible enhancement in ocean productivity associated withwildfire-derived nutrient and black carbon deposition in the Arctic Oceanin 2019-2021” 라는 논문을 게재함. 본 연구는 산불기원 에어로졸의 북극해 침적의 해양생산력 증대효과와 해빙융해 가속화를 분석하여 영향력을 간접적으로 제시하였음.

나) 북극권 및 지역규모에서 기후/환경/해양인자와 대기조성물질 간의 시공간적 변화 추세 비교분석

- **(1단계 1차년도)**
  - 북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 장기간 관측, 재분석 자료 조사 및 수집(목표 12건, 최종 19건)
  - 수집된 자료 가공
- **(1단계 2차년도)**
  - 수집된 기후/환경인자 및 기후변화감시요소 중 대기조성물질 자료 변화 경향 파악 및 기초분석
  - 북극권 환경변화에 따른 지역별 기후, 환경, 해양, 그리고 대기 조성물질과의 관계를 알아보기 위해 연구지역 선정
  - 장기 연평균 경향성 결과로부터 대부분 지역에서 지표 온도 증가
  - 북극 지역(그린란드, 러시아 북부 지역)에서는 다른 지역에 비해 상대적으로 증가추세가 강함
  - 장기 경향성은 남극 부근과 그린란드 일부 지역에서 약하게 감소하는 경향을 보이는 것 외 모든 지역에서 증가하는 경향성 나타남
- **(2단계 1차년도)**
  - 북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 자료 시공간 변동성 분석
  - 공간분포는 봄과 가을에서 비슷하게 나타났으며 이 두 계절의 $PM_{2.5}$ 고/저농도일때 기상학적 특징을 이해하기 위해 기상인자 composite 분석을 수행한 결과 강수의 경우 $PM_{2.5}$ 고농도가 나타난 해에는 강수량이 평년에 비해 적었고 하향 연직속도가 지배적인 것으로 나타났으며,

저농도 일때는 고농도와 반대로 강수량이 상대적으로 많았으며, 상향 연직속도가 $PM_{2.5}$ 배출 지역에서 지배적인것으로 나타남

- 봄 가을에는 강수가 없고 연직 하향속도가 강하면 $PM_{2.5}$ 가 배출이 되어도 대기중에 잔존하게 되므로 그 농도가 높아지는 것으로 해석할 수 있고 반대로 저농도가 발생하는 요인은 강수가 많으면서 연직 상향 속도가 지배적인 것으로 볼 수 있음

▪ **(2단계 2차년도)**

- 겨울철 북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 자료 시공간 변동성 분석 및 이해
- 봄, 가을철과 같이 겨울철 지배적 $PM_{2.5}$ 경향을 확인하고자 EOF 분석을 한 결과 공간 상관계수가 EOF 첫 번째 모드에서 가장 높게 나타남
- 공간분포는 중국 동부 지역에서 $PM_{2.5}$ 농도가 가장 높게 나타났으며, 기상인자 composite 분석을 수행한 결과 $PM_{2.5}$ 고농도가 나타난 해에는 중위도 지역에서 중국 동부로 동풍이 불고 수직 온도가 지표면은 높고 상층 부분은 낮게 나타나 안정적인 대기 상태를 나타남. 또한, 지표 온도는 온도 분포는 Warm Arctic Cold Eurasia(WACE)-like 패턴을 보이고 태평양 지역의 표층 수온은 Pacific Decadal Oscillation(PDO)-like 패턴과 비슷하게 나타남. 반면에 저농도가 나타난 해에는 반대의 패턴이 나타남.

6) 5위탁과제(고려대학교 : 북극권 환경변화에 따른 식생별 탄소 flux의 거동 연구) (세부내용 별도 제출 보고서 기재)

가) 북극 툰드라의 주요 식생에 따른 온실기체 플럭스 거동 분석

▪ **(1단계 1차년도)**

- 환북극 툰드라 지역의 다양한 식생 분포에서 식생종류 및 기후환경 변화에 따른 온실기체 플럭스 범위를 파악하고자 미기상학적 방법을 이용한 이산화탄소 플럭스의 범위고찰
- Virkkala et al.(2021)[20]에서는 1990년부터 2015년 동안 에디공분산 방법과 챔버 방법을 이용하여 148개 관측지에서 연간과 성장기 동안에 관측된 GPP, ER, NEE 자료를 이용하여 이산화탄소 플럭스의 공간적인 분포 확인(공저자로 활동)

▪ **(1단계 2차년도)** 북극 해빙시기 식생별 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 분석 및 광합성량 추정

- 북극 캐나다 캠브리지베이에서 관측된 초본(CH1_grass), 나지(CH2_bare soil), 그리고 초본과 이끼와 지의류가 혼합된 식생(CH3_grass+moss+lichen, CH4_grass+moss+lichen)에서 관측된 순 이산화탄소 플럭스와 호흡량 분석
- 북극 툰드라 식생별 메탄 플럭스 조사 : 북극 캐나다 캠브리지베이에서 습한 초본(CH1_grass)에서는 투명한 챔버, 나지(CH2_bare soil)에서는 불투명한 챔버, 그리고 초본과 이끼와 지의류가 혼합된 식생 (CH3_grass+moss+lichen, CH4_grass+moss+lichen)에서는 각각 투명과 불투명한 챔버를 이용하여 한 쌍으로 관측된 메탄 플럭스 결과 분석

▪ **(2단계 1차년도)** 북극 해빙기 동안 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석

- 북극 해빙기 동안 툰드라의 다양한 식생에 대한 이산화탄소 및 메탄 플럭스를 정량화하기 위하여, 토양 수분이 습한 조건(wet condition)과 건조한 조건(dry condition)을 구분하고 습한 조건에서 식생이 거의 없는 토양과 식생(Carex)이 있는 조건, 그리고 건조한 조건에서 초본 식생(Carex)이 많은 조건과 초본, 이끼, 지의류 등 다양한 조건에서 자동 챔버 시스템을 이용하여 온실기체 플럭스 관측

▪ **(2단계 2차년도)** 식생별 이산화탄소 플럭스의 발원(흡원) 분석

- 북극 해빙기 동안 툰드라의 주요 식생에 대한 이산화탄소 플럭스를 정량화하기 위하여, 토양 수분량이 충분한 초본 식생(Carex)지점과 이끼와 지의류 등 다양한 식생으로 이루어진 건조한 지점에서 자동 챔버 시스템을 이용하여 온실기체 플럭스 관측 및 분석

나) 북극 동토의 환경변화에 대한 탄소 순환에서 식생의 역할 규명

▪ **(1단계 1차년도)** 북극 해빙시기 식생별 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 분석 및 광합성량

20) Virkkala, A.-M, Alto J, et al. (2021) Statistical upscaling of ecosystem CO2 fluxes across the terrestrial tundra and boreal domain: Regional patterns and uncertainties: 27(17):4040-4059.

추정

- 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량을 정량화하고, 이를 이용하여 광합성량(GPP)을 추정하기 위하여 7월부터 9월 초까지 해빙시기 전 시간에 대하여 알래스카 챔버에서 측정된 NEE 자료와 ER 자료를 이용하여 GPP 추정

▪ **(1단계 2차년도)** 북극 해빙시기 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스 및 환경인자 모니터링

- 북극 캐나다 캠브리지베이를 방문하여, 6월 말부터 8월 말 해빙기간 동안 자동 챔버 시스템을 운영하여 온실기체 플럭스 관측 및 분석

▪ **(2단계 1차년도)** 다양한 환경에 대한 탄소 플럭스 변화 감시

- snow fence에 의하여 눈이 쌓이는 정도에 따라 high, moderate 그리고 영향을 받지 않는 control과 snow fence와 무관한 reference 각 네 지점에 투명 챔버와 불투명 챔버를 설치하여 여름 동안 광합성과 호흡량 그리고 메탄 플럭스의 흡수 및 방출에 대한 변화 고찰

▪ **(2단계 2차년도)** 이산화탄소 플럭스와 조절 환경인자 분석

- 이산화탄소 플럭스의 흡수 및 방출과 매우 높은 상관관계를 보이는 토양온도와 토양 수분에 대하여 모니터링하였고, 플럭스 측정 기간에 대한 관계 분석

7) 6위탁과제(서울대학교 : 위성 영상 기반 북극 동토지역 이산화탄소 플럭스 모니터링) (세부내용 별도 제출 보고서 기재)

가) 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발

▪ **(1단계 1차년도)** 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발용 입력자료 다운로드 및 전처리를 통한 자료 구축

- 모델 입력자료 구축 (위성 자료 다운로드 및 그리드화 된 자료들 구축)
- 데이터 전처리 (공간해상도를 0.05도로 바꾸고, WGS-84 위경도로 재투영)

▪ **(1단계 2차년도)** 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발하며 생태계호흡량 및 순 생태계교환량 모듈 개발

- 시공간적으로 일관된 자료 구축 (AVHRR과 MODIS 자료가 겹치는 기간 동안 교차 보정
- BESS-Polar의 호흡 및 순 생태계교환량 모듈 개발 (프로그래밍으로 알고리즘 구현 및 스크립트 작성하여 제시)

나) 1982~2022년 기간 동안 극지 툰드라 지역의 순 생태계교환량을 포함한 탄소플럭스 지도 제작 및 시공간 분석

▪ **(2단계 1차년도)** 1982~2022년 기간의 BESS-Polar 탄소 플럭스 지도 제작 및 BESS-Polar 탄소 플럭스 지도를 다른 머신러닝 모델의 플럭스 지도 및 FLUXNET 현장 자료와 비교평가

- 1982~2022년 기간의 BESS-Polar 탄소 플럭스 지도 제작
- BESS-Polar 탄소 플럭스를 현장 단위에서 평가 (FLUXNET과 한국극지데이터센터(KPDC) 등재 환경인자 DB (플럭스타워)를 활용하여 현장검증)
- BESS-Polar 탄소 플럭스를 지역 단위로 평가 (머신러닝기반의 국외 모델의 탄소 플럭스와 비교검증)

▪ **(2단계 2차년도)** 극지방의 순 생태교환량을 시공간 패턴을 분석 (1982~2022)

- 극지방 탄소 플럭스의 연간변동성 분석

KOPRI 극지연구소

[참고] 환경인자 종류 및 운영확보계획 대비 실적

1) 관측거점별 환경인자 종류

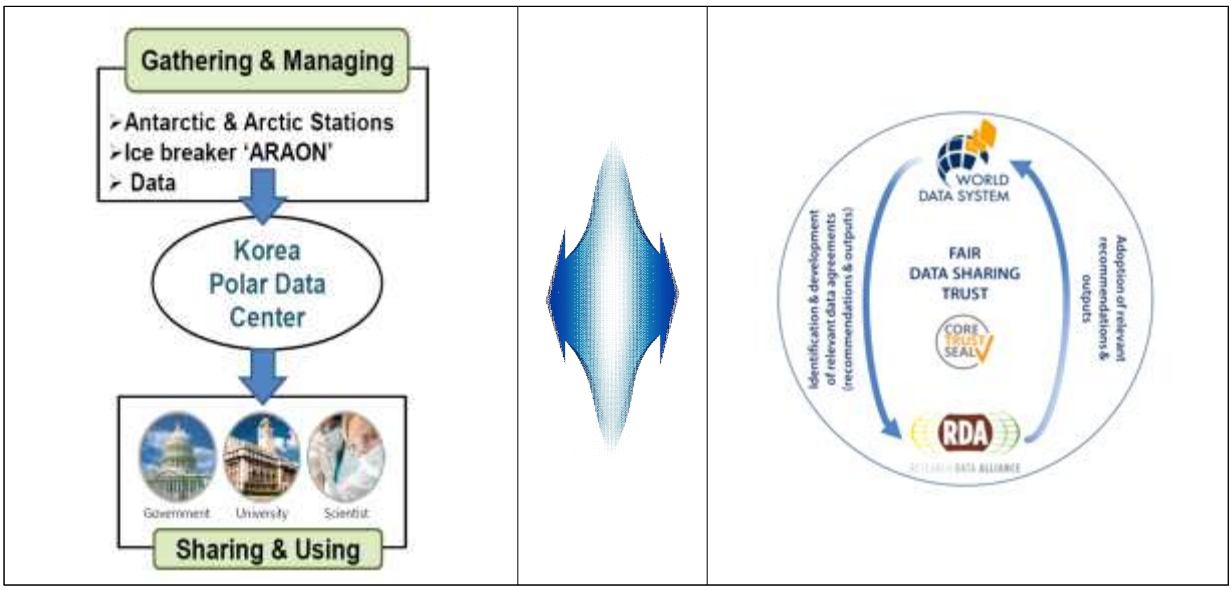
관측거점	측정시스템 및 환경인자(연구데이터) 종류					
	동토	기상기후	온실기체	에어로졸	식물	토양
미국* (알래스카 카운실)	토양 온도, 토양 수분, 토양 CO_2, 토양 CH_4, 토양 유기물, 무기태 질소, 미생물 군집(스노우펜스)	풍향/풍속, 기온, 습도, 기압, 복사에너지	CO_2, H_2O, CH_4, N_2O, 식물/광합성(NDVI, fPAR추가)	–	피도, 생물량, NDVI	탄소, 질소, 무기태 질소, 용존 유기물, FT-ICR MS 등
캐나다 (캠브리지베이)	토양 온도, 토양 수분, 토양열 플럭스	풍향/풍속, 기온, 습도, 기압, 복사에너지	CO_2, H_2O, CH_4, 식물/광합성(NDVI, fPAR추가)	블랙카본	피도, 뿌리 이미지, NDVI, (토양/식물 시료)	탄소, 질소, 무기태 질소, 용존 유기물, FT-ICR MS 등
노르웨이** (스발바르)	토양 온도, 토양 수분, 토양 미생물, 토양 유기물(스노우펜스)	풍향/풍속, 기온, 습도, 기압	CO_2, H_2O, CH_4, DMS(기후냉각 물질), 식물/광합성(NDVI, fPAR추가)	구름응결핵(수농도), 나노입자(크기분포, 입자 샘플링), HVS		
그린란드*** (노르드)	토양 온도, 토양 수분, 토양 미생물	풍향/풍속, 기온, 습도, 기압, 복사에너지	CO_2, H_2O, CH_4(추가)	–		
아이슬란드 (스토르호퍼이)	–	–	DMS (기후냉각물질)	–		
러시아 (바라노바) (잠정중단; '21.07~)	~~토양 온도, 토양 수분, 토양열플럭스~~	~~풍향/풍속, 기온, 습도, 기압, 복사에너지~~	~~CO_2, H_2O~~	~~미세먼지(화학성분)~~		

* 카운실 거점에서는 2차년도부터 CH_4 플럭스 관측 시작

** 스발바르 거점에서는 이태리 공동 연구기관 CNR-ISP에서 CH_4 플럭스 관측 수행 중이어서 본 과제에서 측정하지 않음

*** 그린란드 노르드 거점에서는 2차년도 시스템 재구축함

※ 모든 환경인자는 KPDC(Korea Polar Data Center, 한국극지데이터센터 : 극지연구소에서 운영하는 데이터 관리시스템에 등록됨. 본 센터에서는 World Data System(WDS) 등과 연계하여 자료의 활용성 제고함



2) 환경인자 확보계획 대비 실적(종합)(기간 : 2021.04.27 ~ 2025.03.31)(Table 1)

Table 1. List of environmental factors obtained from each observation node.

동토인자 확보 구분 (A)	연도	계획(B)	실적(C)	달성률(%) (C/B*100)	비 고
※ 2021~2024년 환경인자 확보 목표치 리스트(당초 KPI 기준 설정치, (메타데이터 등록 23건) 21-1. 동토 대기 기상인자 DB 5건, 에어로졸 DB 1건, 멀티 센싱 인자 DB 4건 22-1. 동토 대기 온실기체 DB 5건, 에어로졸 DB 1건 23-1. 동토 대기 온실기체 DB 3건, 에어로졸 DB 2건 24-1. 동토 온실기체/식생 DB 5건, 에어로졸 DB 1건 (메타데이터 : 환경인자(토양, CO_2, CH_4, 토양코어, 기상, 에어로졸 등) 대량정보에 대해 부여되는 데이터로서, 그 세부에는 시간별, 일별, 종류별 내용을 포함하고 있으며, 논문화되기 전 자료의 비밀을 유지하기 위해 콘텐츠 정보만 부여한다). ※ 각 연도별 증빙자료 : 극지연구소 KPDC 메타데이터 등록 자료	2021 (1단계 1차년도)	6건	신규 12건 (A항 리스트 21-1번)	100	- 5개 거점 기상인자 5건 (알래스카/캐나다/스발바르/러시아/그린랜드 거점) - 에어로졸 인자 1건 (스발바르 거점) - 멀티 센싱 인자 6건 (알래스카 거점/코가록/토양온도, 토양 수분, 토양CO_2, 토양CH_4) ※ 당초 계획 6건 대비 12건 확보로 실질 달성률은 약 200%임.
	2022 (1단계 2차년도)	6건	신규 29건 (누적 41건) (A항 리스트 22-1번)	100	- 4개 거점 기상인자 4건 (알래스카/캐나다/스발바르 /그린랜드) - 에어로졸 인자 1건 (스발바르) - 나노입자 1건(스발바르) - 복사자료 4건 (알래스카/캐나다/그린랜드/ - 온실기체, 멀티 센싱 인자 포함 12건 (알래스카/코가록/캐나다/그린랜드 거점/토양온도, 토양 수분, 토양CO_2, 토양CH_4) ※ 당초 계획 6건 대비 29건 확보로 실질 달성률은 약 367%임.
	2023 (2단계 1차년도)	5건	신규 25건 (누적 66건) (A항 리스트 23-1번)	100	- 3개 거점 기상인자 14건 (알래스카/캐나다/스발바르) - 에어로졸 인자 2건 (스발바르) - 온실기체, 멀티 센싱 인자 포함 4건 (알래스카 거점/토양온도, 토양 수분, 토양 CO_2, 토양 CH_4) ※ 당초 계획 5건 대비 20건 확보로 실질 달성률은 약 400%임.
	2024 (2단계 2차년도)	6건	신규 21건 (누적 87건) (A항 리스트 24-1번)	100	- 4개 거점 기상인자, 복사에너지, 메탄, 온실기체, 토양온도, 토양 수분, 토양 CO_2, 토양 CH_4등
	계	**23건**			**연구기간 전체 누적 목표 23건 대비 87건 확보로 목표 달성함**

KOPRI 극지연구소

(참고) 환북극 관측거점에서 획득한 환경인자 등재 목록 (2025.01월 현재)

※ 1세부과제(NRF-2021M1A5A1065425 / 극지연구소(KPDC) 과제분류번호-PN21011, 22011, PN23011, PN24011)('21.04.27~ '25.03.31)의 한국극지데이터센터(KPDC; Korea Polar Data Center)에 환경인자 등재 목록(1단계, 2단계 종합)

(예시) 북극 캐나다 캠브리지베이 복사 데이터 KPDC 등록 완료 (KOPRI-KPDC-00002729)

Radiation data of Cambridge Bay, Canada site in 2024

This is the 30-minute interval radiational energy data of the Cambridge Bay site, Canada in 2024.
The data is obtained from net-radiometer (CNR4, K&Z) with upward/downward shortwave and longwave radiometer.

Register favorites + Add
Disclosure Request + Add
12

Entry ID	KOPRI-KPDC-00002729
DOI	https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002729
Copyright	
Science Keyword	EARTH SCIENCE > ATMOSPHERE > ATMOSPHERIC RADIATION > INCOMING SOLAR RADIATION EARTH SCIENCE > ATMOSPHERE > ATMOSPHERIC RADIATION > LONGWAVE RADIATION EARTH SCIENCE > ATMOSPHERE > ATMOSPHERIC RADIATION > NET RADIATION
ISO Topic	CLIMATOLOGY/METEOROLOGY/ATMOSPHERE
Platforms	In Situ Land-based Platforms > GROUND-BASED OBSERVATIONS
Instruments	NOT APPLICABLE
Personnel	Bang Yong Lee (bylee@kopri.re.kr) Tae Jin Choi (ctjin@kopri.re.kr)
Project	**PN24011**, Interrelationship Investigation and Comprehensive Monitoring based on Permafrost-Atmospheric Environment, **PI.**이방용
Research period	2024-01-01 ~ 2024-10-08
Create/Update Date	2025-01-06 / 2025-01-06
Location	CONTINENT > NORTH AMERICA > CANADA > NUNAVUT > Cambridge Bay

연번	KOPRI-PN21011	등록일
1	[KOPRI_KPDC_00001869] Molecular characteristics of Arctic aerosols at Gruvebadet observatory, Svalbard in 2017	2021-11-02
2	[KOPRI-KPDC-00001885] Soil temperature data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2021	2021-11-30
3	[KOPRI-KPDC-00001884] CH_4 data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2021	2021-11-30
4	[KOPRI-KPDC-00001883] Volumetric water content data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2021	2021-11-30
5	[KOPRI-KPDC-00001882] CO_2 data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2021	2021-11-30
6	[KOPRI-KPDC-00001872] Meteorological data of Council, Alaska site in 2021	2021-11-30
7	[KOPRI-KPDC-00001886] Soil Temperature of Manual Chamber site of the Council, Alaska for 2019 and 2020	2021-11-30
8	[KOPRI-KPDC-00001887] Soil Temperature of Manual at Kougarok site, Alaska in 2019, 2020, 2021	2021-11-30
9	[KOPRI-KPDC-00001880] Meteorological data of Nord site in 2021	2021-11-30
10	[KOPRI-KPDC-00001889] Meteorological data of Baranova, Russia site in 2021	2021-11-30
11	[KOPRI-KPDC-00001881] Meteorological data of DASAN station in 2021	2021-11-29
12	[KOPRI-KPDC-00001888] Meteorological data of Cambridge Bay site in Canada in 2021	2021-11-30
연번	KOPRI-PN22011	등록일
1	[KOPRI-KPDC-00002115] PM2.5 Major Ions at Gruvebadet 2019	2022-10-31
2	[KOPRI-KPDC-00002117] NanoSMPS particle number concentration in 2022	2022-10-31
3	[KOPRI-KPDC-00002118] Soil Temperature and Moisture at Kougarok site, Alaska in 2022	2022-11-01
4	[KOPRI-KPDC-00002119] Soil Temperature of Manual Chamber site of the Council, Alaska for 2022	2022-11-01
5	[KOPRI-KPDC-00002120] AWS data of Council, Alaska site in 2022	2022-11-01
6	[KOPRI-KPDC-00002121] Radiation data of Council, Alaska site in 2022	2022-11-01
7	[KOPRI-KPDC-00002128] Meteorological data of Cambridge Bay , Canada site in 2021	2022-11-03
8	[KOPRI-KPDC-00002129] Radiation data of Cambridge Bay, Canada site in 2021	2022-11-03
9	[KOPRI-KPDC-00002131] Soil temperature data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2022	2022-11-03
10	[KOPRI-KPDC-00002132] CH4 data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2022	2022-11-03

KOPRI 극지연구소

11	[KOPRI-KPDC-00002133] CO2 data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2022	2022-11-03
12	[KOPRI-KPDC-00002134] Volumetric water content data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2022	2022-11-03
13	[KOPRI-KPDC-00002136] Meteorological data of Cambridge Bay , Canada site in 2022	2022-11-03
14	[KOPRI-KPDC-00002137] Radiation data of Cambridge Bay, Canada site in 2022	2022-11-03
15	[KOPRI-KPDC-00002135] Soil physical of Cambridge Bay, Canada site in 2021	2022-11-03
16	[KOPRI-KPDC-00002138] Soil physical of Cambridge Bay, Canada site in 2022	2022-11-03
17	[KOPRI-KPDC-00002153] Meteorological data of Dasan station in 2022	2022-11-04
18	[KOPRI-KPDC-00002150] Meteorological data of Nord site, Greenland in 2022	2022-11-04
19	[KOPRI-KPDC-00002151] Radiation data of Nord site, Greenland in 2022	2022-11-04
20	[KOPRI-KPDC-00002152] Soil physical of Nord site, Greenland in 2022	2022-11-04
21	[KOPRI-KPDC-00002149] Soil physical of Nord site, Greenland in 2021	2022-11-04
22	[KOPRI-KPDC-00002148] Radiation data of Nord site, Greenland in 2021	2022-11-04
23	[KOPRI-KPDC-00002558] Atmospheric dimethyl sulfide (DMS) mixing ratio observed at Zeppelin Observatory 2022	2024-09-23
24	[KOPRI-KPDC-00002702] PAR measured at the Council site of Alaska in 2022	2024-12-26
25	[KOPRI-KPDC-00002703] NDVI measured at the Council eddy-covariance site of Alaska in 2022	2024-12-26
26	[KOPRI-KPDC-00002704] Eddy covariance data of the Council site, Alaska in 2022	2024-12-26
27	[KOPRI-KPDC-00002716] Eddy covariance data at DASAN Station in 2022	2025-01-03
28	[KOPRI-KPDC-00002719] Eddy covariance data of Greenland permafrost site in 2022	2025-01-03
29	[KOPRI-KPDC-00002731] Eddy covariance data at Cambridge Bay site, Canada in 2022	2025-01-06
연번	**KOPRI-PN23011**	**등록일**
1	[KOPRI-KPDC-00002420] Eddy covariance data at DASAN Station in 2023	2023-11-06
2	[KOPRI-KPDC-00002422] Meteorological data of DASAN station in 2023	2023-11-06
3	[KOPRI-KPDC-00002428] Eddy covariance data at Cambridge Bay site, Canada in 2023	2023-11-27
4	[KOPRI-KPDC-00002427] Meteorological data of Cambridge Bay site in Canada in 2023	2023-11-27
5	[KOPRI-KPDC-00002426] NDVI measured at the Cambridge Bay of Canada in 2023	2023-11-27

KOPRI 극지연구소

6	[KOPRI-KPDC-00002425] Radiation data of Cambridge Bay, Canada site in 2023	2023-11-27
7	[KOPRI-KPDC-00002424] Soil physical of Cambridge Bay, Canada site in 2023	2023-11-06
8	[KOPRI-KPDC-00002423] PAR measured at the Cambridge Bay, Canada site in 2023	2023-11-06
9	[KOPRI-KPDC-00002409] PAR measured at the Council site of Alaska in 2023	2023-11-27
10	[KOPRI-KPDC-00002408] NDVI measured at the Council site of Alaska in 2023	2023-11-27
11	[KOPRI-KPDC-00002407] Radiation data of Council, Alaska site in 2023	2023-11-27
12	[KOPRI-KPDC-00002406] Eddy covariance data of Alaska permafrost site in 2023	2023-11-27
13	[KOPRI-KPDC-00002405] AWS data of Council, Alaska site in 2023	2023-11-27
14	[KOPRI-KPDC-00002414] Soil Temperature of Manual Chamber site of the Council, Alaska for 2023	2023-11-06
15	[KOPRI-KPDC-00002726] Soil physical of Nord site, Greenland in 2023	2025-01-03
16	[KOPRI-KPDC-00002725] Radiation data of Nord site, Greenland in 2023	2025-01-03
17	[KOPRI-KPDC-00002722] Meteorological data of Nord site, Greenland in 2023	2025-01-03
18	[KOPRI-KPDC-00002720] Eddy covariance data of Greenland permafrost site in 2023	2025-01-03
19	[KOPRI-KPDC-00002370] CCN(Cloud Condensation Nuclei) data at Zeppelin station in 2023	2023-11-06
20	[KOPRI-KPDC-00002366] Molecular characteristics of Arctic aerosols collected at Svalbard	2023-11-06
21	[KOPRI-KPDC-00002413] CH_4 data of Council, Alaska permafrost site in 2023	2023-11-27
22	[KOPRI-KPDC-00002412] CH_4 data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2023	2023-11-27
23	[KOPRI-KPDC-00002410] Soil temperature data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2023	2023-11-27
24	[KOPRI-KPDC-00002411] CO_2 data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2023	2023-11-27
25	[KOPRI-KPDC-00002559] Atmospheric dimethyl sulfide (DMS) mixing ratio observed at Zeppelin Observatory 2023	2024-09-23
연번	**KOPRI-PN24011**	**등록일**
1	[KOPRI-KPDC-00002694] Ship-borne Molecular Complex of Organic Aerosol Particles Collected Data on Araon Sailing Course in Arctic Regions 2022	2024-12-24
2	[KOPRI-KPDC-00002710]	2024-12-27

KOPRI 극지연구소

	Atmospheric CH4 concentration of the Council, Alaska pemafrost site in 2024	
3	[KOPRI-KPDC-00002701] PAR measured at the Council site of Alaska in 2024	2024-12-26
4	[KOPRI-KPDC-00002700] Radiation data of Council, Alaska site in 2024	2024-12-26
5	[KOPRI-KPDC-00002699] Eddy covariance data of Alaska permafrost site in 2024	2024-12-26
6	[KOPRI-KPDC-00002698] AWS data of Council, Alaska site in 2024	2024-12-26
7	[KOPRI-KPDC-00002697] Soil Temperature of Manual Chamber site of the Council and Kougarok, Alaska for 2024	2024-12-26
8	[KOPRI-KPDC-00002705] Air temperature data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2024	2024-12-26
9	[KOPRI-KPDC-00002706] Air humidity from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2024	2024-12-26
10	[KOPRI-KPDC-00002707] Soil temperature data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2024	2024-12-26
11	[KOPRI-KPDC-00002708] Volumetric water content data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2024	2024-12-26
12	[KOPRI-KPDC-00002709] NDVI data from active layer of Council, Alaska permafrost site in 2024	2024-12-26
13	[KOPRI-KPDC-00002728] Soil physical of Cambridge Bay, Canada site in 2024	2025-01-03
12	[KOPRI-KPDC-00002717] Eddy covariance data at DASAN Station in 2024	2025-01-03
14	[KOPRI-KPDC-00002714] Meteorological data of DASAN station in 2024	2025-01-03
15	[KOPRI-KPDC-00002727] Soil physical of Nord site, Greenland in 2024	2025-01-03
16	[KOPRI-KPDC-00002724] Meteorological data of Nord site, Greenland in 2024	2025-01-03
17	[KOPRI-KPDC-00002723] Radiation data of Nord site, Greenland in 2024	2025-01-03
18	[KOPRI-KPDC-00002721] Eddy covariance data of Greenland permafrost site in 2024	2025-01-03
19	[KOPRI-KPDC-00002729] Radiation data of Cambridge Bay, Canada site in 2024	2025-01-06
20	[KOPRI-KPDC-00002730] Meteorological data of Cambridge Bay site in Canada in 2024	2025-01-06
21	[KOPRI-KPDC-00002732] Eddy covariance data at Cambridge Bay site, Canada in 2024	2025-01-06

KOPRI 극지연구소

2. 목표 달성 수준 및 추진일정 실적

가. 대표적 연구성과

1) 진도관리, 자체평가 결과 등을 반영하여 성과가 우수한 대표 성과를 선정

- **(성과 1; 북극 동토거점 관측 시스템 및 활용 시스템 고도화 및 활용)(1세부과제)** : 환북극 동토거점에서 온실기체 흡수/방출의 기후 피드백 영향 평가를 위해 실시간 관측 모니터링 시스템 구축을 포함한 관측 시스템 고도화, 획득 자료를 활용하여 거점별 환경에 대한 온실기체 교환 메카니즘 이해, 국제 공동 연구에 기여

- **(성과 2; 북극 미세조류에 의한 자연적 기후냉각 물질 발생 과정 규명)(1세부과제)** : 북극 미세조류가 DMS 성분 발생을 통해 급변하는 기후변화를 늦추는 자정작용을 할 수 있음에 대한 관측적 증거 세계 최초 규명

- **(성과 3; 해양생물 특성 변화와 대기 DMS 성분과의 상관성 규명)(1세부과제)** ppt 수준의 저농도 기후냉각가스인 DMS를 실시간으로 극지에서 원격 분석함. 해당 기술은 상용화되지 않은 분석법으로 아이슬란드, 스발바르 지역에서 장기간 관측을 통해 해당 연구분야에서의 독자적 연구 우수성 확보

- **(성과 4; 계절별 대기 순환 과정이 북극권 주요 생체분자들의 발생 특성 및 에어로졸 물리적 특성에 미치는 영향 규명)(1세부과제)** 초고분해능 질량분석기를 활용하여 봄철 및 여름철 기간 동안 북극 미세입자들의 유기 조성을 분자 단위 수준에서 분석하여, 계절별 대기 순환 과정이 북극권 주요 생체분자들의 발생 특성과 에어로졸 물리적 특성에 미치는 영향 최초 제시

- **(성과 5; 극지 환경인자 Smart Polar Platform 시스템 개발 및 구축)(1세부과제)** : 극지 기후변화 등에 영향을 주는 환경인자에 대한 측정 자료를, 전력과 통신 기반이 전무한 극지역 무인 환경에서 실시간으로 데이터의 손실 없이 장기간 인터넷 환경으로 전송하기 위한 시스템개발(구조와 방법 포함 및 저온에서 동작가능한 시스템으로 구성)

- **(성과 6; 북극권 나노입자의 생성 및 성장 원인 규명)(1위탁과제)** : 북극의 대기 환경에서의 나노입자 생성 특성과 도시, 농촌 (축산 및 경작지) 등 다양한 대기 환경에서 생성 특성 비교, 대기 중 나노입자생성의 다양성과 원인 규명(북극권 나노입자 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악)

- **(성과 7; 북극권 및 북유럽 지역 에어로졸 광학적 두께 장기 경향과 에어로졸 타입 분류)(2위탁과제)** : 북극권 및 북유럽 지역 위성관측 기반 MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) 센서에서 관측된 에어로졸 광학적 두께의 변화 추세 분석

- **(성과 8; 북극지역 에어로졸의 조성이 CCN 등 흡습특성에 미치는 영향 파악)(3위탁과제)** : 수분에 의한 에어로졸 생성 메커니즘 이해 및 북극 에어로졸의 흡습 특성과 조성 영향 규명

- **(성과 9; 산불기원 에어로졸의 북극해 침적의 해양생산력 증대효과와 해빙융해 가속화 영향력 제시)(4위탁과제)** : 14개년 시계열 산불기인 에어로졸 배출과 침적 현황을 분석하여 기후변화로 인한 북극해 인근 시베리아 지역에서의 산불 증가현상을 파악하고 위성자료를 활용한 상호비교를 통해 식물성플랑크톤 생장량과 탄소고정에 매커니즘 확인

– **(성과 10; 북극 툰드라의 주요 식생에 따른 온실기체 플럭스 거동 분석)(5위탁과제)** 핵심 개발 내용: 북극 툰드라 생태계의 탄소순환에서 식생에 의한 탄소순환을 파악하고, 흡원 및 발원 평가

– **(성과 11; 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발)(6위탁과제)** BESS-Polar의 호흡 및 순생태계 교환량 모듈 개발하여 극지방에 특화된 위성 자료를 활용한 생물리기작 모델 개발(프로그래밍으로 알고리즘 구현 및 스크립트 작성하여 제시)

☞ **(기후변화예측 연구를 위한 환북극 동토 관측거점 확보 및 환경인자 빅데이터 DB 구축)** 세계 최초로 북극이사회 국가(미국, 캐나다, 노르웨이, 덴마크(그린란드), 러시아, 아이슬란드 등)와의 양자, 다자협력 체결을 통한 6개 관측거점* 확보 및 정밀측정시스템 개발, 운영과 환경인자** 확보와 빅데이터 DB 구축

* 1개 국가가 북극권 국가 내에 다각적인 환경변화 관측거점을 확보하고 국제공동연구를 수행하는 국가는 우리나라 이외에 전무함

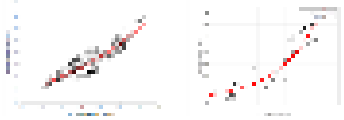
** 환경인자(Environmental Factor)란, 북극권에서의 급속한 환경변화에 따른 대기-생태-동토의 상태 측정을 위한 필수 요소

KOPRI 극지연구소

2) 성과별 내용

성과 1	북극 동토거점 관측시스템 및 활용 시스템 고도화 및 활용(1세부과제)

① 성과개요

연구자	극지연구소 최태진/ 박상종 등	
과제명	북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명	
성과개요	• 핵심 개발 내용: 1) 동토-대기환경 감시 관측시스템 고도화 완료 2) 온실기체 플럭스 알고리즘 2건 개발 3) 동토 대기-식생 DB 확보 4) 온실기체 플럭스 거동 변화 관련 논문(상위 10% 이내) 출판	 온실기체 플럭스 알고리즘 상위 10% 논문

② 성과내용

- 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
북극 동토거점 관측시스템 및 활용 시스템 고도화	- 메탄 플럭스 관측을 통한 온실기체 감시 요소 확대 및 위성/인터넷 통신 활용 실시간 감시 체계 구축을 통환 환경인자 확대 강화 - 동토-대기 온실기체 교환 이해 향상

- 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)
  - 다양한 환북극 동토 환경에서 온실기체 교환 및 환경인자 실측 및 감시
  - 고도화된 관측시스템 기반 실시간 현장 평가
  - 다년간 다양한 자료 확보를 통한 빅데이터 활용 기반 마련
- 우수성
  - 국내 유일의 환북극 동토-대기 온실기체 교환 연속 관측 수행
  - 인공위성 및 모델링 검증을 위한 다양한 환경-다년간 기준 자료 생산
- 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	환북극 동토층 관측거점 운영 고도화와 육상(동토)-대기 기후환경변화 종합 감시 및 피드백 프로세스 규명	다양한 환북극 동토환경에서 육상(동토)-대기 경년 환경 변화 규명
분야별 목표	동토거점 기상/온실기체/토양/식생 관측시스템 운영 지속 및 관측항목.기간 확대 및 표준화	- 거점 관측소별 온실기체 거동 변화 규명 - 위성/모델 검증을 위한 다년간 다양한 환경에서 자료 확보

KOPRI 극지연구소

③ **연구성과의 활용 현황 및 계획**

– 산업화/산업현장 적용

- 모델 검증을 위한 실측 자료 제공
- 북극 동토 기반 국제 협력 연구 참여

④ **파급효과/기대효과**

– (학술적/기술적/인프라 측면)

: 위탁과제 6의 “약 40년(1982~2022) 동안의 북극 탄소 플럭스 지도” 검증 활용
환북극 기반 국제 공동 연구 지속 참여를 통한 연구 성과 제고

– (산업경제적 측면)

: 동토의 물리환경 감시를 통한 동토 안정성 평가에 기여 및 지역 사회 정보 제공

– (기후변화 대응 측면)

: 다년간의 실측 자료 활용 기후변화(북극 온난화)에 대한 동토의 기후 피드백 역할 이해
생태계 규모의 실측 플럭스 및 환경인자를 인공 지능 및 위성 결합을 통한 지역 규모 동토 반응 이해

⑤ **성과근거자료**

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간		3								

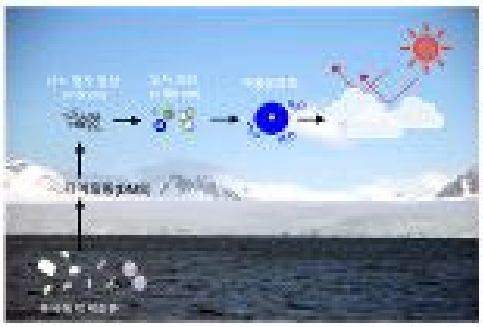
	논문명	학술지명	IF	게재년월
논문	Decadal increases in carbon uptake offset by respiratory losses across northern permafrost ecosystems	Nature Climate Change	30.7	2024. 07.26
	Carbon response of tundra ecosystems to advancing greenup and snowmelt in Alaska	Nature Communications	12.1	2021. 11.25
	The ABCflux database: Arctic-boreal CO2 flux observations and ancillary information aggregated to monthly time steps across terrestrial ecosystems	Earth System Science Data	11.3	2022. 01.21

KOPRI 극지연구소

성과 2	북극 미세조류에 의한 자연적 기후냉각 물질 발생 과정 규명(1세부과제)

① **성과개요**

연구자	극지연구소 박기태/윤영준								
과제명	북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명								
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	• 북극 스발바르 제플린 지구배경대기관측소에서 DMS를 포함하는 기후냉작 작용 기여 성분 실시간 현장 관측 연구를 수행 • 북극 미세조류가 DMS 성분 발생을 통해 급변하는 기후변화를 늦추는 자정작용을 할 수 있음에 대한 과학적 증거 규명								



[북극 미세조류 기원 DMS-미세입자-구름응결핵 형성 모식도]

② **성과내용**

- 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
• 독자 개발 기술을 통한 북극 대기 저농도 DMS 성분 현장 관측 • 북극 미세조류에 의한 자연적 기후 냉각화 기여 과정 규명	- 북극 공기 중 ppt (1조분의 1) 수준의 DMS를 관측할 수 있는 현장관측 장비를 개발하여 북극 제플린 관측소에서 북극 대기 DMS 농도 변화 감시 - 다년간의 북극 현장조사와 북극 니알슨 과학기지촌 기반 국제협력연구를 통해, 북극 미세조류가 DMS 성분 발생을 통해 북극 대기 에어로졸 발생 증가 및 구름응결핵 증가에 기여함을 증명

- 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)
  - 공기 중 ppt 수준으로 존재하는 DMS 성분이 기후적으로 음의 피드백 (즉, 지구 온난화 억제) 역할을 할 것이라는 가설이 1987년에 제기 되었으나, 이를 뒷받침하는 과학적 관측 근거가 희박함
  - 본 연구를 통해 ppt 수준의 DMS를 분석할 수 있는 장비를 개발 및 운영하고, 기후감시 슈퍼사이트인 제플린 관측소에서 장기간 현장 관측 연구를 통해 DMS 성분에 의한 구름응결핵 증가 현상을 최초로 규명함
- 기술적 우수성
  - 세계 최장기 DMS 실시간 관측자료 확보 및 DB 구축을 통한 과학적 활용성 제고
  - 세계 최고 수준의 북극 미세입자-구름-기후 연구 국제네트워크(한국-스웨덴-이탈리아-노르웨이)를 통한 인적-물적-자원 교류 및 연구 우수성 확보
- 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

KOPRI 극지연구소

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	• 환북극 동토층 관측거점 운영 최적화와 육상(동토)-대기 기후환경변화 종합 모니터링, 상호작용 연구 및 특성 분석	• 스발바르 제플린 관측소 기반 DMS 및 기후냉각 물질(미세입자, 구름응결핵 등) 장기 모니터링을 성공적으로 수행
분야별 목표	• 북극 동토거점 환경관측 고도화 및 환경 DB 활용시스템 구축 • 북극 동토 에어로졸과 구름 등 형성과정의 상관성 규명	• 북극 대기 장기관측 자료를 활용하여 DMS 기원 미세입자 형성 과정 및 구름응결핵 기여도 평가

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

- 산업화/산업현장 적용
  - 해당 사항 없음

④ 파급효과/기대효과

- (학술적/기술적/인프라 측면)
  - 북극 니알슨과학기지촌 및 제플린 지구배경대기감시소 기반 기후변화 연구활동 활성화
  - 북극권 온난화가 자연유래 기후냉각물질 발생에 미치는 영향 규명
  - 국제공동연구 활성화를 통한 북극 거점 기반 현장 관측 연구의 우수성 및 수월성 확보
- (산업경제적 측면)
- (사회적 측면)
  - '북극이사회 옵서버 국가로서 전 지구적 공동이슈인 기후변화 연구에 대한 우리나라의 역할과 국제사회에서의 공공의 문제해결을 위한 책임 있는 지위와 역할에 기여
  - '극지활동진흥법('21.04 제정 및 '21.10 시행)', '2050 북극활동 전략('21.11 국무회의 보고) '에 대한 연계 연구 및 의무적 과학연구 활동 수행
  - 관련 연구성과가 다수의 언론 매체(jtbc, YTN, 중앙일보, 한겨레 등, 보도 제목 '지구온난화로 늘어난 북극미세조류가 온난화 늦춘다' 등)를 통해 소개되어 기후변화 연구에 대한 대중 관심 고취

⑤ 성과근거자료

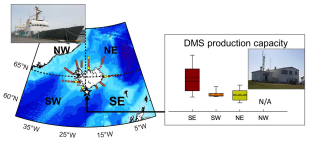
구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간		○								

논문	논문명	학술지명	IF	게재년월
	Dimethyl sulfide-induced increase in cloud condensation nuclei in the Arctic atmosphere	Global Biogeochemical Cycles	6.5 (상위 10% 이내)	2021년 7월

성과 3	해양생물 특성 변화와 대기 DMS 성분과의 상관성 규명(1세부과제)

① 성과개요

연구자	극지연구소 박기태								
과제명	북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명								
기술성숙도	기본원리	기본개념	기능 및	연구실환경	유사 환경	파일럿 현장	상용모델	실제 환경	상용 운영

(TRL)	파악	정립	개념검증	테스트	테스트	테스트	개발	최종테스트	
		O	O						
성과개요	• 아이슬란드 스토르호피이 관측거점 기반 DMS 현장 관측 및 국제협력 (아이슬란드 대학 및 아이슬란드 Marine and Freshwater Research Institute)을 통해 해양생물 특성 변화와 대기 DMS 성분과의 상관성을 규명함								

② 성과내용

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
극지 기후냉각가스 (DMS) 발생 현상 규명	– 아이슬란드 대기 DMS 농도 변화 실시간 현장 관측 – 국제 협력 기반 아이슬란드 인근 해양일차생산자 특성 변화 자료 확보 – '대기관측–해양조사–위성자료'를 복합적으로 분석하여 해양생물 유래 기후냉각가스 발생현상을 규명함

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

• ppt 수준의 저농도 기후냉각가스인 DMS를 실시간으로 극지에서 원격 분석함. 해당 기술은 상용화되지 않은 분석법으로 아이슬란드, 스발바르 지역에서 장기간 관측을 통해 해당 연구 분야에서의 독자적 연구 우수성을 확보함

– 우수성

• 본 연구를 통해 해양일차생산자의 종특성 변화가 기후냉각가스 발생에 영향을 미칠 수 있음을 증명함

– 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	글로벌 기후환경변화에 가장 민감 지역인 북극권 육상–대기 통합 연구개발을 통한 글로벌 이슈 대응 및 활용기술 개발	북극해 자연유래 기후냉각가스와 해양생물간의 상관성 규명
분야별 목표	북극 동토 기반 현장 관측을 통한 에어로졸의 기후적 역할 규명	– 북극 관측거점 기반 국제공동 현장 집중 캠페인 네트워크 구축에 기여 – 동토 기반 대기 DMS 현장 관측자료 축적을 통해 해양환경 변화가 DMS 발생에 미칠 수 있는 영향을 파악함

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

– 산업화/산업현장 적용 (해당 사항 없음)

④ 파급효과/기대효과

– (학술적/기술적/인프라 측면)

• 아이슬란드 스토르호피이 기반 현장 연구 활동 활성화

• 온난화로 인한 북극해 환경 변화가 기후냉각가스 발생에 미치는 영향 평가

– (산업경제적 측면)

– (사회적 측면)

• 아이슬란드 연구기관(아이슬란드 대학, 아이슬란드 Marine and Freshwater Research Institute)과의 긴밀한 연구협력 관계 구축

• 기후변화 연구에 대한 우리나라의 역할과 국제사회에서의 공공의 문제해결을 위한 과학적 연구 활동 수행

KOPRI 극지연구소

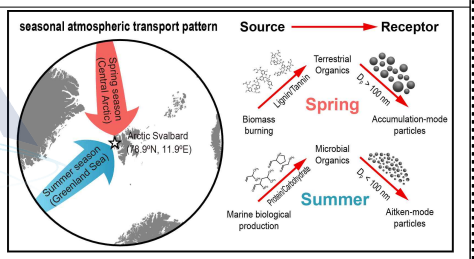
⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업기간		○								

논문	논문명	학술지명	IF	게재년월
	Observational evidence linking ocean sulfur compounds to atmospheric dimethyl sulfide during Icelandic Sea phytoplankton blooms	Science of the Total Environment	9.8 (상위 10% 이내)	2023년 6월

성과 4	계절별 대기 순환 과정이 북극권 주요 생체분자들의 발생 특성 및 에어로졸 물리적 특성에 미치는 영향 규명(1세부과제)

① 성과개요

연구자	극지연구소 장은호/윤영준/이방용	
과제명	극지기초원천기술개발	
성과개요	• 북극 스발바르 제도에 위치한 그루바뎃 관측소에서 포집된 초미세입자의 유기조성을 분자 단위로 정밀 분석함 • 계절별 대기 순환 과정이 북극권 초미세입자를 구성하는 주요 생체분자들의 조성/농도에 미치는 영향에 대한 과학적 증거 제시 • 해양 생물 및 육상 식생 유래 생체분자들이 북극권 초미세입자의 크기별 분배에 미치는 영향을 최초로 규명	 [계절별 대기 수송 패턴 변화에 따른 생체분자 유래 초미세입자의 발생 특성 요약도]

② 성과내용

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
초고분해능 질량분석기(15T FT-ICR MS)를 활용하여 북극 초미세입자의 화학적 특성을 분자수준에서 분석	세계 최고 수준의 선도연구장비 중 하나인 15 Tesla Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry (15T FT-ICR MS)를 활용하여, 북극권 초미세입자의 화학적 특성에 대한 분자 수준의 정밀 데이터베이스 구축
북극권 주요 생체분자와 에어로졸 물리적 특성 사이의 연관성 규명	계절별 대기 수송 패턴에 따른 해양 생물 및 육상 식생 유래 생체분자들의 발생 특성의 변화가 북극 에어로졸의 크기별 분배에 영향을 미친다는 사실을 규명

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

• 기존 에어로졸 화학적 특성 연구에 활용된 분석 장비 및 방법은 구성 유기물의 약 20% 미만을 파악하는데 그쳤지만, 한국기초과학연구원과의 공동연구를 통해 초고분해능 질량분석

기인 15T FT-ICR MS를 활용한 분석기술 및 방법론을 정립하고 북극 에어로졸의 분자적 특성을 보다 정밀하게 분석함.
  - 계절적 대기 수송 패턴 변화가 북극권 해양 생물 및 육상 식생 유래 생체분자들의 발생 특성에 미치는 영향을 제시하고, 각각의 주요 생체분자들이 특정 크기의 에어로졸 입자 수농도에 직접적으로 기여한다는 사실을 최초로 규명함.

- 우수성
  - 북극 에어로졸의 초정밀 화학적 특성 자료 확보 및 DB 구축을 통한 과학적 활용성 증대
  - 국내외 북극 에어로졸 연구 네트워크(극지연구소-극지기초과학연구원-이탈리아 국립 연구위원회) 구축을 통한 북극 유기 에어로졸에 대한 선도 연구 수행
- 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	• 환북극 동토층 관측거점 운영 최적화와 육상(동토)-대기 기후 환경변화 종합 모니터링, 상호작용 연구 및 특성 분석	• 스발바르 제플린 관측소 기반 DMS 및 기후냉각 물질(미세입자, 구름응결핵 등) 장기 모니터링을 성공적으로 수행
분야별 목표	• 북극 동토거점 환경관측 고도화 및 환경 DB 활용시스템 구축 • 북극 동토 에어로졸과 구름 등 형성과정의 상관성 규명	• 북극 대기 장기관측 자료를 활용하여 DMS 기원 미세입자 형성 과정 및 구름응결핵 기여도 평가

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

- 산업화/산업현장 적용 : 해당 사항 없음

④ 파급효과/기대효과

- (학술적/기술적/인프라 측면)
  - 북극 스발바르 제도 니알슨 과학기지촌 인근의 그루바뎃 관측소와 제플린 지구배경대기감시소를 기반으로 한 기후변화 연구 활동 활성화
  - 북극권 생물 유래 유기물들이 에어로졸 물리적 특성에 미치는 영향 규명
  - 국내외 공동연구 활성화를 통한 북극권 관측거점에서의 선도 에어로졸 연구 기반 마련
- (산업경제적 측면)
- (기후변화 대응 측면)
  - 북극권 생물 유래 유기물과 에어로졸 간의 연관성을 규명하여 기후변화에 따른 북극 동토 및 해양 생태계의 변화가 에어로졸의 기후적 기능에 미치는 영향에 관한 기초자료 제공
  - 북극 에어로졸에 대한 기후적 불확실성을 완화하여 기후변화 예측 모델의 정밀도 향상 및 기후공학관련 산업적 활용성 제시

⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간		○								

논문	논문명	학술지명	IF	게재년월
	Seasonal dynamics of airborne biomolecules influence the size distribution of Arctic aerosols	Environmental Science and Ecotechnology	14.1	2024년 11월

성과 5	극지 환경인자 Smart Polar Platform 시스템 개발 및 구축(1세부과제)

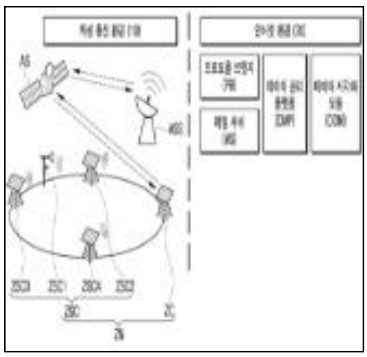
① 성과개요

연구자	극지연구소 박근보/이방용, 이커넥트 양희권								
과제명	극지기초원천기술개발								
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: 환북극 6개국에 관측 거점 확보하고 동토지역*의 대기-토양-생태계 등 환경변화 규명을 위한 환경인자 확보 - 환경인자** 데이터를 수집하여, 환경 변화의 진단과 특성을 분석하고 피드백을 통한 환경변화 원인을 도출하고 미래 예측 연구에 활용 * 동토지역은 최근 지구온난화에 따른 전지구적 환경 변화가 1차적으로 시작되는 과학적으로 매우 중요한 관심 대상임 ** 환경인자(Environmental Factor)란, 북극권에서의 급속한 환경변화에 따른 대기-육상(동토,생태) 등의 상태 측정을 위한 필수 요소								

② 성과내용

[성과내용-1]

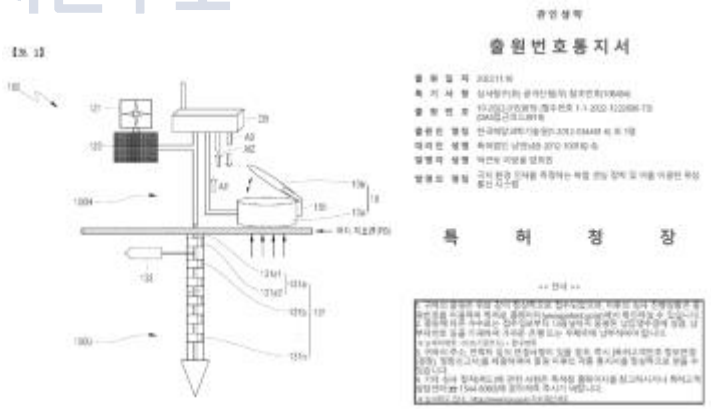
- 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
저온 환경에서 구현 가능한 저전력 이중화 데이터 수집 장치 개발,	 저온 환경에서 구현 가능한 무인관측 저전력 이중화 데이터 수집 장치 개념도와 출원번호 통지서

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)
  • 극지 기후변화 등에 영향을 주는 환경인자에 대한 측정 자료를, 전력과 통신 기반이 전무
    극지역 무인 환경에서 실시간으로 데이터의 손실 없이 장기간 인터넷 환경으로 전송하기 위
    시스템개발(구조와 방법 포함 및 저온에서 동작가능한 시스템으로 구성)
  • 시스템의 신뢰성 확보를 위해 통신 및 데이터 수집 장치 이중화
– 기술적 우수성
  • 전송주기, 평균값 계산 주기, 센서의 측정 주기는 위성 통신을 통해 설정 가능하며 365일
    정적으로 데이터가 수집될 수 있는 위성 통신 기술*
    * 저전력 고성능 센서 노드, 고급형 유무선데이터 로거, 위성통신 접속기술 개발
  • 전저온에서 사용가능한 부품으로 사용하고 개발된 PCB를 코팅하여 영하 40℃에서도 사용
    능한 저전력 데이터 수집 장치
– 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 개발	동토층 환경인자(토양온도, 토양함수비, CO_2, CH_4 통합형 멀티 모니터링 센서 시스템 개발 (특허출원)
분야별 목표	극지 환경인자 무인관측 저전력 이중화 모니터링 시스템 개발 및 구축	• 원거리에서 접속하여 모니터링할 수 있도록 원거리 데이터 통신 방식을 이용한 원격 모니터링 서비스 제공(시스템 이상 발생 시 장애가 해결되면 서버에 전송하여 모든 데이터 획득) • 개발된 시스템은 방수 방진은 IP67 이상으로 제작

[성과내용-2]
– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
극지 환경인자를 측정하는 복합 센싱 장치 및 이를 이용한 위성 통신 시스템	 극지환경인자 관측용 복합센서 장치와 출원번호 통지서

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)
  • 전력 공급이 까다로운 극지 환경에서 실시간으로 관측 데이터를 장기간 관측하기 위해서는
    전력으로 다양한 환경 인자를 통합 관측하기 위한 장치 필요
  • 시스템의 신뢰성 확보를 위해 센서, 통신 및 데이터 수집 장치 통합하고 이동 및 설치가 편
    하도록 제안, 현 생태계 및 환경을 교란시키지 않고 유지보수가 편리한 구조로 제안
– 기술적 우수성
  • 극지 생태계 및 환경 교란을 최소화 한 장치

KOPRI 극지연구소

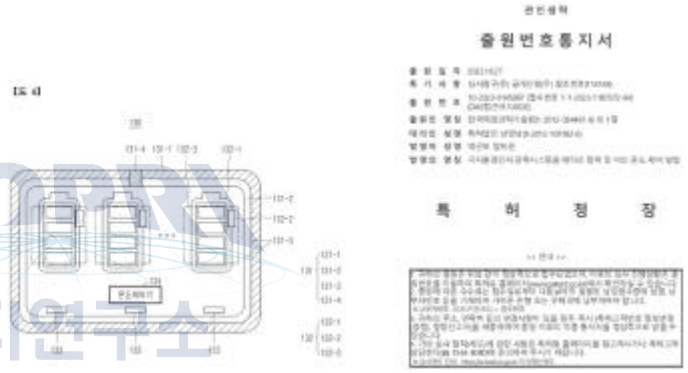
• 저전력 고성능 유무선데이터 로거, 위성통신 접속기술 개발
• 극저온에서 사용가능한 부품으로 사용하고 개발된 통신 장비는 영하 40℃에서도 사용가능
저전력 통한 관측시스템

– 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 개발	동토층 환경인자(토양온도, 토양함수비, CO_2, CH_4 통합형 멀티 모니터링 센서 시스템 (특허출원 중)
분야별 목표	Smart Polar Platform 개발 및 구축	• 설치와 이동 및 유지 보수 등이 편리한 구조 • 극지의 동토 관련 환경 인자를 관측하기 위한 차별화된 장치

[성과내용-3]

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
극지 환경인자 관측시스템용 배터리 장치 및 이의 온도 제어 방법	 극지환경인자 관측시스템용 배터리 장치의 실시예와 출원번호 통지서

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)
• 전력 공급이 까다로운 극지 환경에서 극지와 같은 저온 환경에서 환경인자 관측장치에 전력 제공하는 충전 배터리 성능을 최적화할 온도 제어 방법 필요
• 데이터 획득의 신뢰성 확보를 위해 극지환경인자 관측시스템용 배터리 장치는 극지와 같은 저온 환경에서도 최적의 성능을 발휘할 수 있는 배터리 장치 및 배터리 장치의 온도 제어 법을 제공

– 기술적 우수성
• 극저온 환경에서 운영되는 환경인자 관측시스템의 배터리 함체 온도를 제어하여 배터리 성 을 최적화하는 방법
• 저온환경에서 운영되는 배터리의 성능과 수명을 높이기 위해 배터리의 온도를 제어하는 기 개발
• 극저온에서 배터리 출력용량과 수명을 극적으로 높이고 배터리가 가지고 있는 출력용량 만 배터리 사용이 가능함

– 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

KOPRI 극지연구소

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 개발	동토층 환경인자(토양온도, 토양함수비, CO_2, CH_4 통합형 멀티 모니터링 센서 시스템 (특허출원 중)
분야별 목표	Smart Polar Platform 개발 및 구축	• 설치와 이동 및 유지 보수 등이 편리한 구조 • 극지의 동토 관련 환경 인자를 관측하기 위한 차별화된 장치

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

– 산업화/산업현장 적용

• 연구자와 관련기술 활용 및 보유 가능한 산업체와의 공동 개발, 공동 활용

구분	기업명	제품/기술명	매출액	상태	주요내용
기술 협동	이커넥트	극지 환경 인자를 관측하는 위성 통신 시스템			
	이커넥트	극지 환경 인자를 측정하는 복합 센싱 장치 및 이를 이용한 위성 통신 시스템			
	이커넥트	극지 환경 인자 관측시스템용 배터리 장치 및 이의 온도 제어 방법			

④ 파급효과/기대효과

– (학술적/기술적/인프라 측면)

• 장시간 관측사이트에 인위적인 접근이 비번하게 이루어지게 되면 환경 교란 등에 따라 인위 환경 변화를 최소화하여 자연적 환경변화 관측 적합성 효과 기대

• 극지와 같은 가혹한 환경에서의 연구자 등의 투입 없이 시스템을 정상적으로 복귀 가능하 관측 데이터 손실을 최소화할 수 있어 여러 분야 극지연구에 활용 가능

• 설치와 이동 및 유지 보수 등이 편리한 구조로 극지의 동토 관련 환경 인자를 관측하기 위 차별화로 다양한 현장 모니터링에 사용 가능

– (산업경제적 측면)

– (사회적 측면)

⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간				○						

	출원/등록	특허명	출원/등록번호	출원국
특허	등록			대한민국
	출원	극지 환경 인자를 관측하는 위성 통신 시스템	10-2021-0161328 (접수번호 1-1-2021-1343887-12) (DAS접근코드2B84)	PCT
	출원	극지 환경 인자를 측정하는 복합 센싱 장치 및 이를 이용한 위성 통신 시스템	10-2022-0153879 (접수번호 1-1-2022-1222696-73) (DAS접근코드3919)	PCT
	출원	극지 환경 인자 관측시스템용 배터리 장치 및 이의 온도 제어 방법	10-2023-0145967 (접수번호 1-1-2023-1187372-64) (DAS접근코드663E)	PCT

성과 6	**북극권 나노입자의 생성 및 성장 원인 규명(1위탁과제)**

① 성과개요

연구자	광주과기원/박기홍 등
과제명	북극권 환경변화에 따른 나노사이즈 미세먼지 생성 및 특성 변화 연구
성과개요	• 핵심 개발 내용: 북극의 대기 환경에서의 나노입자 생성 특성과 도시, 농촌(축산 및 경작지) 등 다양한 대기 환경에서 생성 특성 비교, 대기 중 나노입자생성의 다양성과 원인 규명

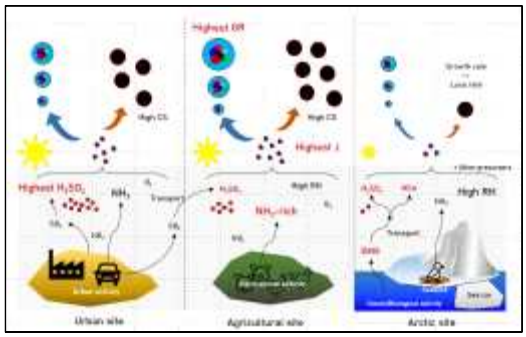
② 성과내용

- 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내용
북극권 환경변화에 따른 나노입자의 생성 원인 변화 규명	- 북극권 환경변화 요인 (대기 온도, 습도, 바닷물 특성(온도, 생물학적 특성 등), 해빙의 면적)과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명 - 북극권 나노입자 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악
다양한 지역에서 확보된 나노입자생성 특성 자료 비교 분석	- 다양한 지역/계절/시간 변화에 따른 나노입자의 생성률, 성장률, 발생조건 비교 - 다양한 지역 (도심, 농촌 지역 등)에서 확보된 나노입자의 생성 특성자료와 비교분석을 통해 북극 지역의 나노입자생성 특성의 차별성 및 유사성 도출

- 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)
  북극권 환경변화 요인 (기상자료, 입자생성 전구물질 농도 (NH_3, H_2SO_4), 바닷물 특성 등)에 따른 나노입자의 생성, 성장, 발생원, 인위적/자연적 요인 파악을 통해 나노입자생성 주요인 파악
- 우수성
  • 다양한 환경에서의 나노입자생성 특성자료 비교 분석을 활용하여 나노입자생성 원인 규명
- 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

KOPRI 극지연구소

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	북극권 나노입자 특성 상시 및 집중 관측자료 확보를 통해 나노입자의 생성 및 성장 원인 규명	북극권 나노입자의 생성 및 성장 원인 규명
분야별 목표	– 다양한 지역/계절/시간 변화에 따른 나노입자의 생성률, 성장률, 발생 조건 비교 – 북극권 나노입자 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악 – 다양한 지역 (도심, 농촌 지역 등)에서 확보된 나노입자의 생성 특성자료와 비교분석을 통해 북극 지역의 나노입자생성 특성의 차별성 및 유사성 도출	

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

– 산업화/산업현장 적용 : 기술 이전 및 창업 관련 해당사항 없음

④ 파급효과/기대효과

– (학술적/기술적/인프라 측면)
- 북극 지역 나노입자 생성의 종합적 특성 진단 결과 확보
- 북극환경에서 다양하게 존재하는 에어로졸 입자로 인한 환경적 영향 결과 정보 제공
- 북극 지역 나노입자생성 메커니즘 규명에 기여

– (산업경제 및 기후변화 대응 측면)
- 나노입자의 자연계 내 거동 및 환경영향 파악에 활용
- 나노입자 현상 규명 관련 기초과학 영역 확대

KOPRI 극지연구소

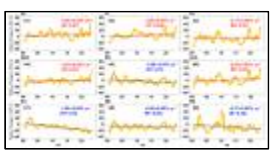
⑤ 성과근거자료

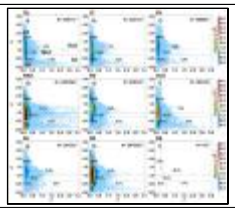
구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–

	논문명	학술지명	IF	게재년월
논문	Comparison of new particle formation events in urban, agricultural, and arctic environments	Atmospheric Environment	77.06	2024.09

성과 7	**북극권 및 북유럽 지역 에어로졸 광학적 두께 장기 경향과 에어로졸 타입 분류(2위탁과제)**

① 성과개요

연구자	광주과기원/한경만	
과제명	북극권 미세먼지 예측을 위한 대기질 모델링 고도화	
성과개요	– 북극권 및 북유럽 지역 위성관측 기반 MODIS (Moderate resolution Imaging Spectroradiometer) 센서에서 관측된 에어로졸 광학적 두께의 변화 추세 분석 – 그린란드, 아이슬란드, 스발바르, 그린란드해 및	

	북대서양은 감소하는 추세; 유럽, 북유럽, 발틱해, 러시아는 증가하는 추세 – 에어로졸 광학 특성 변수 (AOD 및 Angstrom exponent)를 활용한 에어로졸 타입 분류	 에어로졸 추세 및 타입 분류

② **성과내용**

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
자료의 시공간적 범위	– 북극권 및 북유럽 (70° W–55° E; 50° N–85° N) 9개 지역 (그린란드, 그린란드해, 스발바르, 아이슬란드, 북대서양 해양, 북유럽, 발틱해, 유럽, 러시아) 지역 대상으로 분석 – 2000년–2023년 총 24년을 대상으로 에어로졸의 변화 추세 및 에어로졸 5가지 타입으로 분류* (CA, MA, BUA, DA, MXA) 분류 * CA (Continental Aerosol); MA (Marine Aerosol); BUA (Biomass burning & Urban aerosol); DA (Dust Aerosol); MXA (Mixed Aerosol)

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

- MODIS 위성센서로부터 자료가 생산되어 배포된 2000년 이후 모든 자료를 활용하여 장기적 분석의 의의가 있음.
- 타 연구결과와 비교를 통하여, 본 장기 에어로졸 장기 추세 분석방법론의 신뢰도 확보.

– 우수성

- MODIS AOD 자료 (MOD04_L2) 자료의 엄격한 자료 전처리를 통하여 우수한 품질 자료만 추출. 참값으로 간주되는 AERONET AOD와 상관성 0.90 및 일치도 0.95.
- AOD 장기 추세에 대해 가설검증을 통해 신뢰도 확보 (T–test 수행)

– 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	대기화학모델–위성자료 통합한 재분석 에어로졸 자료 생산	북극권 지역의 배출량 자료에 대한 이해도 증진을 통한 대기화학 모델의 성능 개선
분야별 목표		

③ **연구성과의 활용 현황 및 계획**

– 산업화/산업현장 적용 : 기술 이전 및 창업 관련 해당사항 없음

④ **파급효과/기대효과**

– (학술적/기술적/인프라 측면)

- 24개년 다년간 자료에 대한 극지 대기환경 장기 경향 파악 및 에어로졸 타입 분류
- 광학변수 자료 활용 에어로졸 타입 분류 고도화를 위한 초석 마련.

– (산업경제 및 기후변화 대응 측면)

- 에어로졸 타입 분류를 통하여, 에어로졸에 의한 복사 강제력 산출에 있어 불확실성 개선에 기여

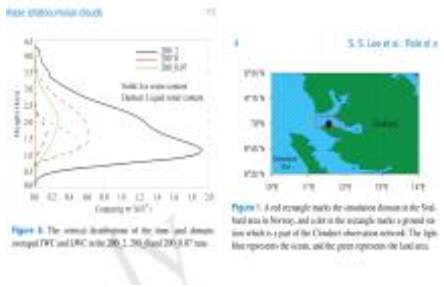
⑤ **성과근거자료**

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간	–	1	1	–	–	–	–	–	–	–

	논문명	학술지명	IF	게재년월
논문	Trends and classification of aerosol observed from MODIS sensor over Northern Europe and the Arctic	Atmospheric Pollution Research	3.9	2024.10 (online 게재)

성과 8	북극지역 에어로졸의 조성이 CCN 등 흡습특성에 미치는 영향 파악(3위탁과제)

① **성과개요**

연구자	경인여대/정창훈	
과제명	북극지역 대기 에어로졸의 조성 및 흡습성에 따른 광학특성 파악	
성과개요	북극 지역의 미세먼지 생성과 성장 메커니즘을 파악하는 것을 목표로 함 – 미세먼지 생성 전구물질 측정과 흡습성장 특성 분석을 통해 CCN 생성 관계를 연구 – 수분에 의한 에어로졸 생성 메커니즘 이해 및 북극 에어로졸의 흡습 특성과 조성 영향 규명	

② **성과내용**

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
북극 지역 에어로졸의 흡습 특성과 영향을 규명	에어로졸 흡습, 조성 및 물리적 성장 특성 분석을 통해 CCN/IN 생성 및 습식제거 과정 파악

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

- 북극 지역의 미세먼지 흡습 특성 파악

– 우수성

- 북극지역 에어로졸의 수분에 의한 생성 메커니즘 이해

– 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	북극 미세먼지의 조성 및 흡습성장 특성에 따른 광학 특성 및 영향 파악	흡습성장 특성 파악
분야별 목표	1. 북극지역 미세먼지의 조성 특성 파악(성과1) 2. 북극지역 미세먼지의 조성 및 크기분포에 따른 광학 특성 파악(성과2) 3. 북극지역 미세먼지의 흡습성장 및 수분에 따른 광학 특성 및 영향 파악(성과2)	미세먼지 조성에 따른 특성 파악

③ **연구성과의 활용 현황 및 계획**

– 산업화/산업현장 적용 : 기술 이전 및 창업 관련 해당사항 없음

④ **파급효과/기대효과**

KOPRI 극지연구소

– (학술적/기술적/인프라 측면)

극지 에어로졸의 과학적 특성 파악 연구에 기여

– (산업 경제적 및 기후변화 대응 측면)

극지의 기후변화가 미치는 영향 파악에 기여

⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업기간	–	2	–	–	–	–	–	–	–	–

	논문명	학술지명	IF	게재년월
논문	Parameterization of below-cloud scavenging for polydisperse fine mode aerosols as a function of rain intensity	Journal of Environmental Sciences	5.9	2023. 10
	Role of key microphysical factor in mixed phase stratocumulus clouds and their interactions with aerosols	Atmospheric Chemistry and Physics (ACP)	5.2	in press

성과 8	산불기원 에어로졸의 북극해 침적의 해양생산력 증대효과와 해빙융해 가속화 영향력제시 (4위탁과제)

① 성과개요

연구자	고려대학교/석민우, 고영호, 박기태, 김태욱	
과제명	북극권 환경 변화와 기후변화감시물질 변동성 상호연계성 연구	
성과개요	2024년 4월 Marine Pollution Bulletin 학술지에 “Possible enhancement in ocean productivity associated withwildfire-derived nutrient and black carbon deposition in the Arctic Oceanin 2019-2021” 라는 논문을 게재함. 본 연구는 산불기원 에어로졸의 북극해 침적의 해양생산력 증대효과와 해빙융해 가속화를 분석하여 영향력을 간접적으로 제시하였음.	 성과논문 증빙

② 성과내용

– 주요 기능 및 사양 : 해당사항없

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

■ 산불기인 에어로졸의 해상침적이 북극해 식물성 플랑크톤의 생장촉진을 위성자료를 기반한 연구를 통해 확인하였음.

■ 기존에 없던 산불기인 에어로졸(black carbon)이 해빙의 융해속도 변화에 관한 연구를 처음

으로 수행하여 향후 산불이 북극해에 작용하는 영향에 정량적인 지표로 활용될 수 있음

- 우수성

■ 14개년 시계열 산불기인 에어로졸 배출과 침적 현황을 분석하여 기후변화로 인한 북극해 인근 시베리아 지역에서의 산불 증가현상을 파악하고 위성자료를 활용한 상호비교를 통해 식물성 플랑크톤 생장량과 탄소고정에 매커니즘을 확인

■ 산불활동과 해빙의 융해속도의 상관성과 주요원인을 파악하는 연구를 수행하여 증가하는 산불이 북극해 환경변화에 미치는 영향력을 제시함

- 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	영문 논문 1편, 국문 논문 1편	영문 논문 출판
분야별 목표		

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

- 산업화/산업현장 적용 : 기술 이전 및 창업 관련 해당사항 없음

④ 파급효과/기대효과

- (학술적/기술적/인프라 측면)

■ 북극 해양환경에서 에어로졸의 연구가 많이 진행되지 않아, 에어로졸의 영향력에 불확실성이 높았지만 불확실성을 줄일 수 있는 근거자료로 활용가능함

- (산업 경제적 및 기후변화 대응 측면)

■ 산불기인 에어로졸의 탄소흡수 증가와 해빙융해속도 가속화 결과는 기후변화로 인해 전지구적으로 증가하는 산불이 해양환경에 미치는 영향에 대한 새로운 양상으로 작용할 것으로 사료됨

⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-

	논문명	학술지명	IF	게재년월
논문	Possible enhancement in ocean productivity associated with wildfire-derived nutrient and black carbon deposition in the Arctic Ocean in 2019-2021	Marine Pollution Bulletin	5.3	2024.04

성과 10	북극 툰드라의 주요 식생에 따른 온실기체 플럭스 거동 분석(5위탁과제)

① 성과개요

연구자	고려대학교/채남이
과제명	북극권 환경변화에 따른 식생별 탄소 flux의 거동 연구
성과개요	• 핵심 개발 내용: 북극 툰드라 생태계의 탄소순환에서 식생에 의한 탄소순환을

	파악하고, 흡원 및 발원을 평가

② **성과내용**

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
툰드라 생태계의 탄소 순환	북극 툰드라 생태계의 탄소순환에서 식생에 의한 탄소순환을 파악하기 위하여 탄소 플럭스(이산화탄소, 메탄)의 정량적인 분석을 통해 흡원 및 발원을 평가

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

• 온난화에 따른 식생 밀도 및 분포의 변화와 동토층 탄소량의 거동과 예측을 위해서 극지 태계를 구성하는 토양과 식생에서 대기로 방출되거나 흡수되는 이산화탄소량을 정량화하 매우 중요하고 필수적이며, 이러한 결과는 동토 탄소 순환을 이해하고 예측하는 모델 개 에 기여

– 우수성

• 극지방에서의 환경 변화에 따른 육상 생태계의 반응을 이해하고 기후변화 감시에 있어서 우 중요한 역할

– 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	북극 툰드라 생태계의 탄소순환에서 극지 식생의 역할을 규명하고 환경변화에 따른 탄소순환을 이해	환북극 지역 툰드라 식생의 특징과 종류 및 환경을 파악하고 툰드라 생태계에서의 이산화탄소 플럭스의 발생과 흡수 관련 조건을 파악하고 분석한 결과를 세 편의 논문으로 출판
분야별 목표	– 북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정 – 북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정 (RFP 충족) (관련 SCI급 논문 1편)	– 7월부터 9월 초까지 알래스카 식생 성장기 전반에 대하여 알래스카 관목과 이끼류에 대하여 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 자료를 확보하고 이를 이용해 광합성량을 계산하여 탄소순환을 구성하는 각 성분별 탄소플럭스 자료를 확보하였고 관련 자료를 이용한 논문 출판 – 관목, 초본, 이끼류, 지의류 등 다양한 식생에서 순이산화탄소 교환량과 호흡량을 이용하여 광합성량을 추정하였고, 일부 관련 자료를 이용한 논문 출판

③ **연구성과의 활용 현황 및 계획**

– 산업화/산업현장 적용 : 기술 이전 및 창업 관련 해당사항 없음

④ **파급효과/기대효과**

– (학술적/기술적/인프라 측면)

• 극권 전체의 탄소 순환 네트워크에 제공하여 북극권을 대표하는 DB 구축에 참여하고, 논문 하여 전반적인 북극권 탄소순환의 이해와 예측에 활용

• 주요 온실기체 플럭스(이산화탄소, 메탄) 정량화를 통한 자료 구축은 모델링을 통한 검증 및 측에 유용한 정보로써 사용

• 툰드라 주요 식생에 대한 탄소 순환의 발원 및 흡원에 대한 평가는 기후변화에 민감하게 반응 는 북극권 식생의 분포(천이)에 따른 탄소 순환 예측에 기여

– (산업 경제적 및 기후변화 대응 측면)

• 전지구 기후 모형에 활용될 지역급 모형을 보다 현실적으로 모사할 수 있도록 기후변화에 대 극 지역의 영향을 설명하는 자료로서 제공

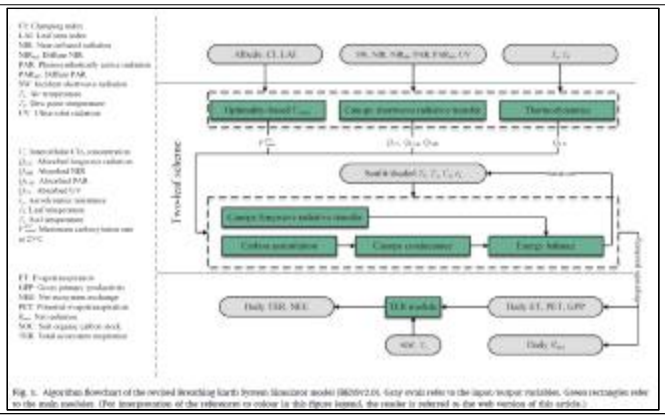
⑤ **성과근거자료**

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업기간	–	3	–	–	–	–	–	–	–	–

논문	논문명	학술지명	IF	게재년월
	Statistical upscaling of ecosystem CO_2 fluxes across the terrestrial tundra and boreal domain: Regional patterns and uncertainties	Global Change Biology	10.8	2021.09
	The ABCflux database: Arctic-boreal CO2 flux observations and ancillary information aggregated to monthly time steps across terrestrial ecosystems	Earth System Science Data	11.2	2022.01
	Decadal increases in carbon uptake offset by respiratory losses across northern permafrost ecosystems	Nature Climate Change	30.3	2024.07

성과 11	생물리기작 모델 BESS-Polar 개발(6위탁과제)

① **성과개요**

연구자	서울대학교/류영렬 (前) 서울대학교, (現)산림과학원 연구원 이정희
과제명	위성 영상 기반 북극 동토지역 이산화탄소 플럭스 모니터링
성과개요	• 핵심 개발 내용: 1) 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발용 입력자료 다운로드 및 전처리를 통한 자료 구축 – 모델 입력자료 구축 (위성 자료 다운로드 및 그리드화 된 자료들 구축) – 데이터 전처리 (공간해상도를 0.05도로 바꾸고, WGS-84 위경도로 재투영) 2) 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발하며 생태계호흡량 및 순 생태계교환량 모듈 개발 – 시공간적으로 일관된 자료 구축 (AVHRR과 MODIS 자료가 겹치는 기간 동안 교차 보정 – BESS-Polar의 호흡 및 순 생태계교환량 모듈 개발 (프로그래밍으로 알고리즘 구현 및 스크립트 작성하여 제시)
	

KOPRI 극지연구소

② **성과내용**

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
BESS-Polar 개발	BESS-Polar의 호흡 및 순 생태계교환량 모듈 개발하여 극지방에 특화된 위성 자료를 활용한 생물리기작 모델 개발. 본 모델을 통해 1982~2022년 장기간의 극지방 탄소플럭스 정보 제공 가능

– 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

• Bess-Polar는 위성 자료를 활용한 생물리기작 중심 모델로서, 기존의 지면모델에 비해 고해상도의 탄소 플럭스 정보를 제공할 수 있음

– 우수성

• Bess-Polar는 데이터를 바탕으로 구축된 머신러닝기반 모델과 달리 환경인자에 변화를 주어 그에 따른 영향을 분석할 수 있음

– 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	급변하는 북극의 기후환경 현상을 파악하기 위해 위성영상 기반 생물리기작 모형을 기반으로 북극 동토층 순생태계 모형을 개발하며, 1982~2022년 기간 동안 지구 온난화에 의해 변화하는 극지 툰드라 지역의 순 생태계교환량의 지도 제작 및 시공간 분석	사업의 최종목표 중 “급변하는 북극의 기후환경 현상을 파악하기 위해 위성영상 기반 생물리기작 모형을 기반으로 북극 동토층 순생태계 모형을 개발” 부분 달성
분야별 목표	(1단계 목표) 생물리기작 모델 BESS 기반의 북극 동토층 생태계호흡량 및 순 생태계교환량 모형 개발(BESS-Polar)	– BESS-Polar 모델 개발용 입력 데이터 다운로드 및 전처리 – BESS-Polar 생태계호흡량 및 순 생태계교환량 모듈 개발

③ **연구성과의 활용 현황 및 계획**

– 산업화/산업현장 적용 : 기술 이전 및 창업 관련 해당사항 없음

④ **파급효과/기대효과**

– (학술적/기술적/인프라 측면)

: 약 40년(1982~2022)동안의 북극 탄소 플럭스 지도를 기초자료로써 제공할 수 있음

– (산업 경제적 및 기후변화 대응 측면)

: 극지방의 순 생태계교환량 시 · 공간패턴 분석을 통해 탄소 배출권 사업을 진단하고 예측하는데 기여할 수 있음

⑤ **성과근거자료**

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간	–	1	1	–	–	–	–	–	–	–

	논문명	학술지명	IF	게재년월
논문	BESSv2.0: A satellite-based and coupled-process model for quantifying long-term global land-atmosphere fluxes	Remote Sensing of Environment	11.1 (상위 5% 이내)	2023년 9월

나. 추진일정 실적

□ 1세부과제 (북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명)

1차년도 (1단계 1차년도)														
개발 내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
기존 관측시스템 진단													최태진 박상종 (극지연)	COVID-19의 지속 확대로 인한 현장 거점 파견 일정 지연
관측시스템 고도화 방안 수립													최태진 박상종 (극지연)	완료
에어로졸관측 플랫폼 고도화 (설계 및 타당성 검토)													윤영준 박기태 박지연 (극지연))	완료
에어로졸 관측장비 구축 및 시험운영													윤영준 박기태 박지연 (극지연)	완료
동토층 환경인자(토양온도, 토양함수비, CO_2, CH_4) 통합 멀티 모니터링 센서 시스템 개발													이방용 박근보 (극지연)	COVID-19의 지속 확대로 인한 현장 거점 파견 일정 지연 * 관련 기술 특허 출원완료
환경인자 데이터 신뢰성 향상 및 멀티센서 시스템 성능시험													이방용 박근보 (극지연)	완료
센싱 데이터 원격 전송기술 및 복합전원제어 모듈 기술 성능 평가													이방용 박근보 (극지연)	완료

2차년도 (1단계 2차년도)														
추진내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
온실기체 관측시스템 고도화													최태진, 박상종 (극지연)	완료
환경DB 활용시스템 설계													최태진, 박상종 (극지연)	완료
에어로졸관측 플랫폼 고도화 (구성 완료 및 운영 후보지 답사)													윤영준, 박기태, 박지연 (극지연)	완료
에어로졸 생성 모사실험 수행													윤영준, 박기태, 박지연 (극지연)	완료
모니터링 시스템 원격 무선전송 고도화													이방용, 박근보 (극지연)	* 관련 기술 특허 출원완료

KOPRI 극지연구소

개발된 시스템 자가발전 장시간 저전력 운용 평가													이방용, 박근보 (극지연)	완료
개발된 인터페이스 코팅													이방용, 박근보 (극지연)	완료

3차년도 (2단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	**비고 (변경사유 등)**
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 고도화													최태진, 박상종 (극지연)	완료
에어로졸 관측 플랫폼 현장 운영 시작													윤영준, 박기태, 박지연 (극지연)	완료
VOC 실시관 관측 질량분석기 구매 및 시험운영													윤영준, 박기태, 박지연 (극지연)	완료
CPS/무선센서 네트워크 기반 환경인자 관측시스템 구축													박근보, 이방용 (극지연)	* 관련 기술 특허 출원완료

4차년도 (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		
관측거점 현장 운영지속 및 환경인자 확보																이방용 (극지연)	연구기간 3개월 연장
환북극 동토 환경변화 평가																최태진, 박상종, 안서희 (극지연)	
에어로졸 플랫폼 국내 시험가동 및 연속관측 수행																윤영준, 박기태, 박지연, 장은호 (극지연)	
북극권-중위도간 에어로졸 시공간적 분포 특성 비교 분석																윤영준, 박기태, 박지연, 장은호 (극지연)	
효율적인 통합관리 기능 구현																박근보, 이방용 (극지연)	
Smart Polar Platform 구축																박근보, 이방용 (극지연)	

당초계획 실 적

□ 1위탁과제(광주과기원 : 북극권 환경변화에 따른 나노사이즈 미세먼지 생성 및 특성 변화 연구)

1차년도 (1단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기관측 수행을 위한 장비 준비 및 점검													박기홍 (광주과학기술원)	COVID-19의 재확산으로 현장 관측 일정이 늦어졌으나, 2021년 11월부로 현장관측을 성공적으로 수행함.
대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기관측 수행 (북극 다산과학기지)														

2차년도 (1단계 2차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자 크기 분포 및 수농도 상시 장기 관측 수행													박기홍 (광주과학기술원)	
북극권 에어로졸의 물리화학적 특성, 기상 및 가스자료 등을 국제공동연구진과 협력을 통해 추가 확보														
인공지능 기법을 활용한 북극권 나노입자생성 예측 모델 개발에 활용														

3차년도 (2단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자 크기 분포 및 수농도 상시 장기관측 수행 (1단계에 이어서)													박기홍 (광주과학기술원)	
북극 항해를 통한 나노입자의 크기 분포 및 수농도 집중관측 수행														기상상태 및 현지거점 사정으로 아이슬란드 기지 관측 수행이 어려워 북극 항해로 대체하여 수행함
인공지능 기법을 활용한 북극권 나노입자생성 예측 모델 개발에 활용														

KOPRI 극지연구소

4차년도 (2단계 2차년도)																	
개발내용	추진 일정															책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
북극권 환경변화 요인 (대기 온도, 습도, 바닷물 특성 (온도, 생물학적 특성 등), 해빙면적 등)과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명																박기홍 (광주과학 기술원)	연구기간 3개월 연장
북극권 나노입자 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악																	
다양한 지역 (도심, 농촌 지역 등)에서 확보된 나노입자의 생성 특성자료와 비교분석을 통해 북극 지역의 나노입자 생성 특성의 차별성 및 유사성 도출																	

당초계획 실 적

□ 2위탁과제(광주과기원 : 북극권 미세먼지 예측 개선을 위한 대기질 모델링 고도화)

1차년도 (1단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
입력자료 분석 (배출량)													한경만 (광주과학 기술원)	
입력자료 분석 (기상장)													한경만 (광주과학 기술원)	
위성관측 광학특성자료 처리 분석 (2016-2018년)													한경만 (광주과학 기술원)	

2차년도 (1단계 2차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
기상모델 및 대기화학 모델 구동 및 민감도 테스트 수행													한경만 (광주과학 기술원)	
위성관측 광학특성자료 처리 분석 (2019-2021년)													한경만 (광주과학 기술원)	

3차년도 (2단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
최적화 조건 대기화학 모델링 수행 (Optimized Run)													한경만 (광주과학 기술원)	
위성관측 광학특성자료 처리 분석 (2022년)													한경만 (광주과학 기술원)	

4차년도 (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		
자료동화 수행 및 재분석자료 생성																한경만 (광주과학 기술원)	연구기간 3개월 연장
위성관측 광학특성 종합분석 (2016년 - 2023년)																한경만 (광주과학 기술원)	
보고서 작성 (1단계 및 2단계 전체 내용)																한경만 (광주과학 기술원)	

당초계획 실 적

☐ 3위탁과제(경인여대 : 북극지역 대기 에어로졸의 조성 및 흡습성에 따른 광학특성 파악)

1차년도 (1단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
북극지역 대기 중 미세먼지 조성 관련 자료 확보													이지이 (이화 여대)	
북극지역 내 미세먼지 조성 특성 파악													정창훈 (경인 여대)	

2차년도 (1단계 2차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
북극 지역 미세먼지 조성에 따른 흡습특성 파악													정창훈 (경인 여대)	
북극 미세먼지의 유기조성 흡습성장 및 액상반응이 미세먼지 광학특성에 미치는 영향 파악													정창훈 (경인 여대)	

3차년도 (2단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
북극지역 미세먼지의 액상반응이 미세먼지 생성에 미치는 영향 파악													정창훈 (경인여대)	
수분에 의한 에어로졸 생성 메커니즘 이해													정창훈 (경인여대)	

4차년도 (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		
북극 미세먼지의 크기분포 및 흡습성장 특성에 따른 광학특성 모수화																정창훈 (경인여대)	
북극지역 광흡수 에어로졸의 특성 분석																정창훈 (경인여대)	
북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성 연구 및 영향요소 파악																정창훈 (경인여대)	연구기간 3개월 연장

당초계획 실 적

□ 4위탁과제(고려대 : 북극권 환경 변화와 기후변화감시물질 변동성 상호연계성 연구)

1차년도 (1단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
기후/환경/해양 관측자료 조사 및 수집													김태욱 (고려대학교)	
기후/환경/해양 재분석자료 조사 및 수집													김태욱 (고려대학교)	
대기 조성물질 관측자료 조사 및 수집													김태욱 (고려대학교)	
대기 조성물질 재분석자료 조사 및 수집													김태욱 (고려대학교)	

2차년도 (1단계 2차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
기후/환경/해양/대기 관측 및 재분석 자료수집													김태욱 (고려대학교)	
기후/환경/해양/대기 관측 및 재분석 시 공간 특징 분석													김태욱 (고려대학교)	
산불기원 에어로졸 자료조사 수집													김태욱 (고려대학교)	
산불기원 에어로졸의 해양생산력에 미치는 영향에 대한 분석													김태욱 (고려대학교)	
산불기원 에어로졸의 해빙 융해속도 가속화에 미치는 영향에 대한 분석													김태욱 (고려대학교)	

3차년도 (2단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
한반도를 포함한 유라시아 (유럽, 동아시아) 지역의 대기 조성물질(PM2.5) 연 계절 분포 확인 및 Empirical Orthogonal Function (EOF) 분석													김태욱 (고려대학교)	
동아시아와 유럽 등 도시화 산업화가 많이 이루어진 곳 중심으로 기후인자와 대기 조성물질(PM2.5) 고/저농도 경우 상관성 평가													김태욱 (고려대학교)	
북극 환경변화 중 해빙 자료 지역별 증감추세 인덱스화													김태욱 (고려대학교)	
위성/재분석자료를 활용한 해양, 대기 자료수집 및 데이터 전처리 작업													김태욱 (고려대학교)	
확보된 자료를 기반으로 산불에어로졸의 해양변화 메커니즘 연구													김태욱 (고려대학교)	

4차년도 (2단계 2차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
해빙 지역별 변동 인덱스와 기후/환경/해양/대기 조성물질(PM2.5) 상호연계성 파악													김태욱 (고려대학교)	
해빙 변동성과 기후/환경 및 대기 조성물질 상관성 이해													김태욱 (고려대학교)	

당초계획 실 적

KOPRI 극지연구소

□ 5위탁과제(고려대 : 북극권 환경변화에 따른 식생별 탄소 flux의 거동 연구)

1차년도 (1단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
계획수립 및 자료조사													채남이 (고려대학교)	5월부터 과제가 시작됨
환북극 툰드라 지역의 식생분포에 따른 온실기체 자료 수집 및 분석													채남이 (고려대학교)	
북극 해빙시기 식생별 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 분석 및 광합성량 추정													채남이 (고려대학교)	
2차년도 (1단계 2차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
북극 툰드라 식생별 메탄 플럭스 조사													채남이 (고려대학교)	
북극 해빙기 동안 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석													채남이 (고려대학교)	
동토 환경인자 모니터링													채남이 (고려대학교)	

3차년도(2단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	**비고 (변경사유 등)**
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
북극 해빙기 동안 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석													채남이 (고려대학교)	
다양한 환경에 대한 탄소 플럭스 변화 감시													채남이 (고려대학교)	
동토 환경인자 모니터링													채남이 (고려대학교)	
다양한 식생별 및 환경조건에 따른 탄소 플럭스 자료 구축													채남이 (고려대)	

KOPRI 극지연구소

4차년도 (2단계 2차년도)																
개발내용	추진 일정															책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		
북극 툰드라 생태계 탄소순환의 특징 분석																채남이 (고려대)	
툰드라 생태계 탄소순환 조절 관련 동토 환경인자 분석																채남이 (고려대)	
식생 관련 탄소순환의 변화 및 기후변화에 따른 동토 시스템의 탄소순환 분석																채남이 (고려대)	연구비 축소로 인한 중단

당초계획 실 적

□ 6위탁과제(서울대 : 위성 영상 기반 북극 동토지역 이산화탄소 플럭스 모니터링)

1차년도 (1단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
모델 입력자료 구축 (위성영상자료 다운로드 및 그리드화 된 자료들 표현)													류영렬 (서울대학교)	
데이터 전처리 (원자료를 공간적으로 resampling 및 0.05도 해상도로하고 WGS-84 위경도로 재투영)													류영렬 (서울대학교)	

2차년도 (1단계 2차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
시공간적으로 일관된 자료 구축 (AVHRR과 MODIS 자료가 겹치는 기간 동안 교차보정)													류영렬 (서울대학교)	
BESS-Polar의 호흡 및 순 생태계교환량 모듈 개발 (프로그래밍으로 알고리즘 구현 및 스트립트 작성하여 제시)													류영렬 (서울대학교)	

KOPRI 극지연구소

3차년도 (2단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
BESS-Polar 탄소 플럭스를 현장 단위에서 평가(FLUXNET과 한국극지데이터센터(KPDC) 등재 환경인자 DB(플럭스타워)를 활용하여 현장검증)													류영렬 (서울대학교)	
BESS-Polar 탄소 플럭스를 지연 단위로 평가 (머신러닝기반의 국외 모델의 탄소 플럭스와 비교검증)													류영렬 (서울대학교)	
온실기체 미래 배출 전망 제시를 위한 BESS-Polar 기반의 과거 자료 1세부과제에 제공													류영렬 (서울대학교)	

4차년도 (2단계 2차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
극지방 탄소 플럭스의 연간 변동성 분석													류영렬 (서울대학교)	연구협약 변경으로 목표 조기 달성
~~극지방 탄소 플럭스의 장기 추세 분석 (해당 내용 삭제)~~													류영렬 (서울대학교)	연구협약변경 (연구비 감액)으로 해당 내용 삭제

당초계획 실 적

KOPRI 극지연구소

■ 1세부과제 예산집행 실적 ('25.03.31일 기준)

(단위: 천원)

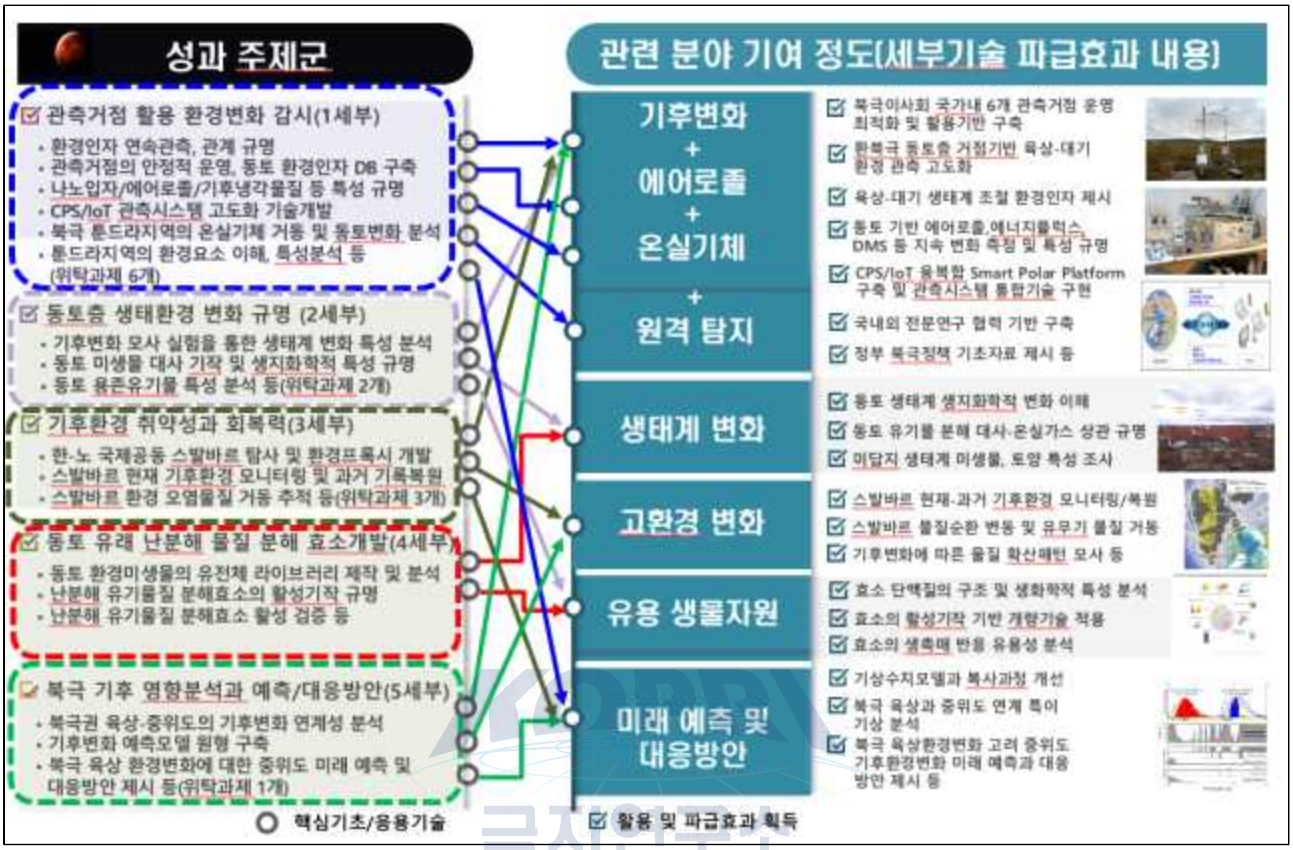
비목	세목			예산	집행액	집행률(%)	비고 (잔액활용 계획)
직접비	인건비	내부인건비	미지급	61,084.200			
			지급(A) 현금	354,967.360	354,967.360	100.0	
			지급(A) 현물				
		외부인건비	미지급	7,200.000			
			지급(B) 현금	138,888.000	138,888.000	100.0	
			지급(B) 현물				
		연구지원인력인건비(C)					
	학생 인건비(D)			121,761.000	121,761.000	100.0	
	인건비 소계(E=A+B+C+D)			615,616.360	615,616.36	100.0	
	연구시설·장비비(F)	현금	일반	19,039.000	19,039.000	100.0	
			통합관리				
		현물					
	연구활동비(G)	현금		438,294.772	438,294.772	100.0	
		현물					
	연구재료비(H)	현금		70,246.231	70,246.231	100.0	
		현물					
	연구수당(I)			92,612.725	92,612.725	100.0	
	위탁연구개발비(J)			238,000.000	238,000.000	100	
	국제공동연구개발비(K)						
	직접비 소계(L=E+F+G+H+I+J+K)			1,473,809.088	1,473,809.088	100.0	
간접비(M)				159,406.500	159,406.500	100	
(간접비 중 연구실 안전관리비)				(6,596.000)	(6,596.000)	100	
연구개발비 총액(N=M+L)				1,633,215.588	1,633,215.588	100.0	

연구개발비 총액 구조 : 2024년 예산(1,539,000천원) + 2023년 잔액 이월금(94,215.588천원)

제3장
연구개발 결과의 활용 방안
(1세부과제-위탁과제 포함)

KOPRI
극지연구소

1. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여정도



<세부과제별 핵심주제의 성과별 관련 분야에서 기여 정도>

가. 북극권 온실기체/에어로졸/SPP 등 분야 향상 및 활용성 기여

- 자연발생 화재로 인한 동토의 융해, 식생변화, 적설량 및 온도 모사실험의 결과로 알래스카 툰드라 토양의 온난화 예측 중요한 파라메타로 활용 기여
- 알래스카 툰드라 토양에서 발생하는 온실효과기체 방출량의 증가를 정량적으로 평가에 기여
- 에디공분산타워에 의한 생태호흡량의 기여도 분석과 지표면 생태모형 및 인공위성의 탄소수지의 기초자료로 활용
- 북극권 온난화의 영향으로 한반도를 포함한 아시아 전역에 걸쳐 기상 및 기후변화의 예측하는데 기여
- 북극권 지역에 대한 배출량 자료에 대한 이해도 증진을 통한 대기화학 모델의 성능을 점차 개선시켰음. 예를 들어, MODIS 위성관측 AOD와 모델 비교에서, 선행연구의 모델링 결과는 일치도 0.29 ~0.36 (중간값 0.315), Mean Bias는 -0.16 ~ 0.32 범위이고 (Han et al., 2021 [21]), 현 모델링 결과는 일치도 0.31 ~ 0.59 (중간값 0.43), Mean Bias는 -0.14 ~ 0.06 범위로 개선함
- 대기-토양-식생 생태계 간의 온실 기체의 정량화와 다양한 환경 조건에 대한 온실기체의 반응은, 동토 생태계에서 탄소 순환의 이해와 급격한 북극 환경 변화에 따른 메커니즘을 파악하는데 활용
- 툰드라 주요 식생에 대한 탄소 순환의 발원 및 흡원에 대한 평가는 기후변화에 민감하게 반응하는 북극권 식생의 분포(천이)에 따른 탄소 순환 예측에 기여
- 위성 관측 자료에 기반한 생물리기작 중심 모델인 BESS-Polar는 복사 전달, 탄소 동화, 기공 전도도, 에너지 평형, 생태계 호흡량 등의 모듈이 유기적으로 연결되어 있어, 환경변화에 따른 상호 유기적인 영향을 분석에 기여

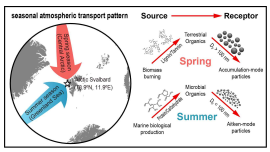
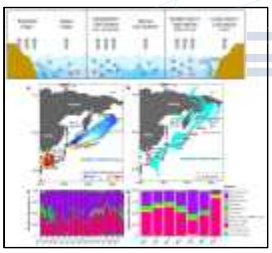
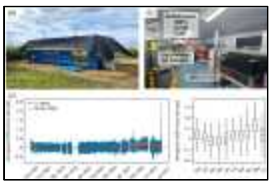
- 북극권 주요 에어로졸 전구물질(예: DMS 및 유기화합물)과 에어로졸 물리화학 및 구름 미세물리 특성의 장기 현장관측 데이터베이스 구축
- 북극권 에어로졸 생성-성장 및 구름응결핵 활성화 과정에 대한 단계 수준의 이해를 제공함으로서 에어로졸의 기후적 기능 및 역할 평가에 기여
- 에어로졸 이동식 관측 플랫폼 구축 및 시험운영을 통한 북극권 에어로졸 특성 심화 관측 프로그램 개발 기반 마련
- 전력과 인터넷 접속이 원활하지 않은 극지역에서 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)를 구성하여 기후 변화에 영향을 주는 환경 인자를 데이터 손실 없이 장기간 무인 관측하고 전송하는 시스템 및 생태계 교란을 최소화한 장치 개발로 극지역의 환경변화 데이터 취득이 효율적으로 가능함.
- 대기 중 나노입자생성은 비록 질량 농도는 크지 않지만 대기 에어로졸 수농도의 큰 부분을 차지하며, 특히 구름응결핵(cloud condensation nuclei (CCN))으로의 잠재적인 역할을 하는 등의 지구 복사의 직/간접적인 영향을 주기 때문에 기후 변화와 유기적으로 연결되어 있어, 대기 및 환경변화에 따른 상호 유기적인 영향을 분석하기에 유용
- 북극지역 대기화학모델링 구동 노하우가 축척되고 있음. 대기화학 모델의 성능 점차 개선에 기여
- 에어로졸의 복사 강제 및 광학적 특성 파악 이외에 물리적 측정 자료뿐 아니라 물리적 과정을 포함한 직접적(direct) 형태의 광학적 특성 모사를 통하여 복사강제 특성을 좀더 근본적으로 파악하는데 기여
- 복사 및 기후변화 모델의 정확도 향상 등 기존 에어로졸을 포함한 기후변화 예측모델의 광학적 특성 모사 알고리즘의 개선에 활용
- 전력과 인터넷 접속이 원활하지 않은 극지역에서 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)를 구성하여 기후 변화에 영향을 주는 환경 인자를 데이터 손실 없이 장기간 무인 관측하고 전송하는 시스템 및 생태계 교란을 최소화한 장치 개발로 극지역의 환경변화 데이터 취득이 효율적으로 가능함(Smart Polar Platform)

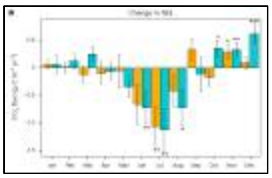
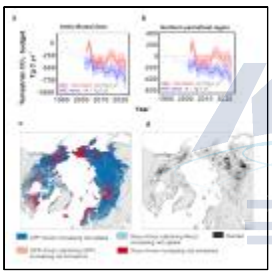
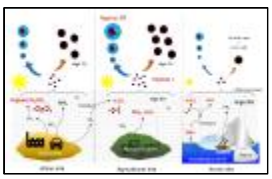
나. 국제 북극관련 기구 참여-국가 대표성 확보에 기여

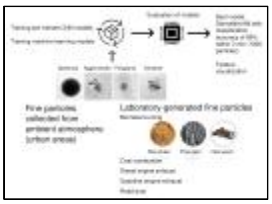
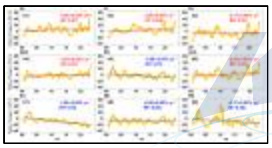
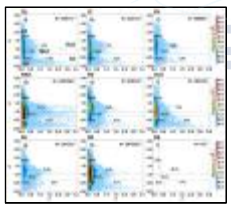
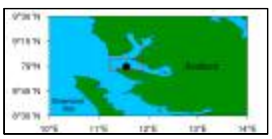
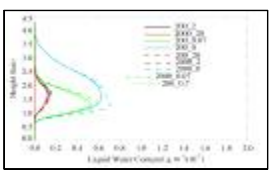
기타목적활용 성과정보			
과제번호	활용기간	활용구분	활용내용
2021M1A5A1065425	2021~2022	북극국제기구 대표활동	국제북극과학위원회(IASC) 대기 워킹그룹 한국대표 활동(박상종, 박기태)
2021M1A5A1065425	2021~2022	북극국제기구 대표활동	니알슨과학운영자 위원회 (NySMAC) 한국대표 활동 (박기태) - 스발바르 니알슨과학기지촌 운영자 회의 참석 ('21년 11월) - 니알슨 기반 북극 연구 현황 공유 및 중요 과학 안건 논의
2021M1A5A1065425	2021~2022	북극국제기구 대표활동	니알슨과학운영자 위원회 (NySMAC) 한국대표 활동 (박기태) - 스발바르 니알슨과학기지촌 운영자 회의 참석 ('22년 3월, '22년 10월) - 니알슨 기반 북극 연구 현황 공유 및 중요 과학 안건 논의

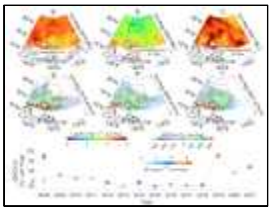
21) Han, K.M.; Jung, C.H.; Park, R.-S.; Park, S.-Y.; Lee, S.; Kulmala, M.; Petj, T.; Karasiński, G.; Sobolewski, P.; Yoon, Y.J.; Lee, B.Y.; Kim, K.; Kim, H.S. Data Assimilation of AOD and Estimation of Surface Particulate Matters over the Arctic. Appl. Sci. 2021, 11, 1959. https://doi.org/10.3390/app11041959.

[참고] 우수 논문 발간과 의의 등(2024년(2단계 2차년도) 기준)

대표성과	연구성과	
북극 유기에어로졸의 물리화학적 특성 연구 (상위 10% 이내 우수 논문게재)		ㅇ **성과 창출 과제명 : 북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명(1세부과제/이방용)** ㅇ **(의의) 북극 스발바르 제도 인근 계절별 대기 수송 패턴 변화에 따른 생체분자들의 발생 특성이 에어로졸 물리적 특성에 미치는 영향 규명(이태리와 공동)** – 초고분배능 질량분석기 활용, 2017년 4월부터 9월까지 확보한 북극 PM2.5 입자들의 유기 조성 분석 수행 – 공기괴 역궤적 분석 모델을 활용하여 계절별 대기 수송 패턴이 북극 에어로졸의 유기 조성에 미치는 영향 규명 – 해양 생물 및 육상 식생 유래 유기물들이 북극 에어로졸 입자들의 크기별 분배에 미치는 영향 제시 ㅇ **[논문성과: 국제공동] 장은호, 박기태, Mauro Mazzola 등,** Seasonal dynamics of airborne biomolecules influence the size distribution of Arctic aerosols. *Environmental Science and Ecotechnology*, 22, 100458 (2024.11) (mrnIF 97.6)
북태평양 항해 중 해양-대기 미생물 종 상호작용 연구 (상위 10% 이내 우수 논문게재)		ㅇ **성과 창출 과제명 : 북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명(1세부과제/이방용)** ㅇ **(의의) 북태평양 항해 중 해양과 대기 중 미생물 종을 동시에 분석함으로써 동토 특성 변화에 따른 미생물이 대기로 이동되는 특성 규명, 위도 변화에 따른 대기 중 바이오에어로졸의 이동 특성 규명** – 쇄빙연구선 아라온 (인천에서 베링해로 이동거리 7,724 km) 항해 중 해양과 대기 중 미생물의 종 최초 분석 – 향후 북극 대기 중 바이오 에어로졸의 종 특성을 추가적으로 모니터링함으로써 전지구적 규모에서 미생물 거동 특성이 북극 대기에 미치는 영향 파악 수행 ㅇ **[논문성과] 장지이, 박지연 등,** Selective transmission of airborne bacterial communities from the ocean to the atmosphere over the Northern Pacific Ocean. *Science of The Total Environment*, 957, 177462 (2024.11) (mrnIF 91.6)
극지 에어로졸 및 미량기체 이동식관측소 구축과 시범운영 (우수 인프라 활용 기반 구축)		ㅇ **성과 창출 과제명 : 북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명(1세부과제/이방용)** ㅇ **(의의) 극지 에어로졸, 미량기체 이동식관측소의 구축 및 현장 설치와 시범운영을 통해, 그 실효성과 활용 가능성 검증, 우리나라 동해 대기 중 구름응결핵 수농도와 DMS 동시관측 연구 국내 최초 수행** – 2023년 9월부터 현재까지 대기 디메틸황(DMS), 에어로졸 물리화학적 특성, 그리고 구름응결핵 수농도 등에 대한 정밀 종합관측 수행 – 대기 PM2.5 입자 샘플링을 수행하였으며, 향후 북극권 미생물 및 이온 성분 분석 등에 활용 예정

대표성과	연구성과	
온난화로 인한 북극권에서의 산불과 발원지 지역의 이산화탄소 흡수원 상쇄효과 연구 (상위 10% 이내 우수 논문게재)		ㅇ **성과 창출 과제명 : 북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명(1세부과제/이방용, 1세부과제 5위탁과제/채남이)** ㅇ **(의의) 북반구 방대한 자료(20년)를 분석해 북극-보리얼 존(ABZ)이 증가하는 육상 이산화탄소 흡수원이었지만 지역의 30% 이상이 순 이산화탄소 공급원이었음을 밝힘(미국, 독일, 프랑스, 덴마크, 캐나다, 영국, 스웨덴, 네덜란드 등과 공동)** - 화재 배출량을 고려한 결과, ABZ 흡수원의 증가는 더 이상 통계적으로 유의미하지 않았으며, 이는 이 지역에서 화재의 중요성을 강조함 ㅇ **[논문성과: 국제공동] Anna-Maria Virkkala, 채남이, 박상종 등,** An increasing Arctic-boreal CO_2 sink offset by wildfires and source regions, *Nature Climate Change*, (2024.09. Accept)(mrnIF 99.44)
영구동토층 및 비영구 동토층 생태계에 대한 이산화탄소 다중 10년 시계열 분석 (상위 10% 이내 우수 논문게재)		ㅇ **성과 창출 과제명 : 북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명(1세부과제/이방용, 1세부과제 5위탁과제/채남이)** ㅇ **(의의) 세계 최초로 70개의 영구동토층 및 비영구 동토층 생태계에 대한 연간 이산화탄소 유량 추정치 302개와 672개를 포함하는 다중 10년 시계열 분석(미국, 핀란드, 네덜란드, 독일, 스웨덴, 캐나다, 일본, 영국, 러시아 등과 공동)** - 여름 이산화탄소 흡수량이 비슷한 증가에도 불구하고 영구동토층이 아닌 생태계에서 연간 이산화탄소 흡수량이 증가하는 것을 발견, 온난화에 대한 생태계의 이산화탄소 사이클 반응 예측에 매우 중요한 지표로 활용 예상 ㅇ **[논문성과: 국제공동] Craig R. See, 채남이, 박상종 등,** Decadal increases in carbon uptake offset by respiratory losses across northern permafrost ecosystems, *Nature Climate Change*, 14, 853-862 (2024.08)(mrnIF 99.44)
극지 대기환경에서 나노입자생성 특성과 다른 다양한 환경에서의 생성 특성 비교, 원인 규명 (상위 30% 이내 우수 논문게재)		ㅇ **성과 창출 과제명 : 북극권 환경변화에 따른 나노사이즈 미세먼지 생성 및 특성 변화 연구(1세부과제 1위탁과제/박기홍)** ㅇ **(의의) 북극 대기환경에서의 나노입자 생성 특성과 도시, 농촌 (축산 및 경작지) 등 다양한 대기 환경에서 생성 특성 비교, 대기 중 나노입자생성의 다양성과 원인 규명** - 입경별 수농도 분포 (나노입자) 측정기를 활용하여 다양한 대기 환경에서 장기 및 집중 관측 수행 - 다양한 대기 환경에서 나노입자 생성 특성과 원인을 규명하였고 환경별 주요 영향 인자 파악 ㅇ **[논문성과] 이해범, 박기홍 등,** Comparison of new particle formation events in urban, agricultural, and arctic environments. *Atmospheric Environment*, 333, 120634 (2024.09)(mrnIF 77.06)

대표성과	연구성과	
인공지능기법을 활용하여 다양한 대기 환경에서의 나노입자 및 미세입자 모양 분류 (딥러닝 우수 모델 개발 중요) (상위 20% 이내 우수 논문게재)		ㅇ **성과 창출 과제명 : 북극권 환경변화에 따른 나노사이즈 미세먼지 생성 및 특성 변화 연구(1세부과제 1위탁과제/박기홍)** ㅇ **(의의) 다양한 대기 환경(극지환경 포함)과 오염원 종류(디젤/가솔린 엔진 배출, 바이오매스 연소, 석탄 연소, 도로먼지)별로 포집된 입자 형태별 분류, 딥러닝 모델과 기계학습 방법 적용하여 분류 예측 모델 개발** – 다양한 입자의 모양을 4개의 주요 클래스로 분류 (구형, 응집형, 다각형, 가지형) – 사전 훈련된 CNN 모델 활용, TEM 이미지 분류 속도와 정확도 개선 : 제안된 CNN 모델 방법이 다양한 소스로부터 수집된 입자의 형태를 신속하고 정확하게 분류하는데 강력한 도구임을 입증 ㅇ **[논문성과] Jasmita Khadgi, 박기홍 등,** Morphological classification of fine particles in transmission electron microscopy images by using pre–trained convolution neural networks. *Aerosol Science and Technology*, 58(6) (2024.03)(mrnIF 86.67)
북극권 및 북유럽 지역 에어로졸 광학두께 장기 경향과 에어로졸 타입 분류 (최장기 최초 분석 중요) (논문 승인)	 	ㅇ **성과 창출 과제명 : 북극권 미세먼지 예측 개선을 위한 대기질 모델링 고도화(1세부과제 2위탁과제/한경만)** ㅇ **(의의) 위성관측자료 활용 에어로졸의 장기 변화 경향과 에어로졸 타입 분류(최장기 최초 분석 의미 매우 큼)** – 북극권 및 북유럽 지역 대상 2000~2023년 기간 장기적인 위성 관측자료를 기반으로 AOD의 변화 추세와 에어로졸의 타입 분석 – 에어로졸 광학특성 변수를 활용한 에어로졸 타입 분류 ㅇ **[논문성과] 한경만 등,** Trends and classification of aerosol observed from MODIS sensor over Northern Europe and the Arctic. *Atmospheric Pollution Research*, 102329 (2024.10 online 게재)(mmIF 66.67)
북극권 혼합상태 층운에서의 에어로졸–구름 상호작용 및 복사 과정에 미치는 영향 모사 (상위 20% 이내 우수 논문게재)	 	ㅇ **성과 창출 과제명 : 북극지역 대기 에어로졸의 조성 및 흡습성에 따른 광학특성파악(1세부과제 3위탁과제/정창훈)** ㅇ **(의의) 북극권 혼합상태 층운에서 에어로졸 간접효과에 중요한 영향을 미치는 에어로졸–구름 상호작용 영향 모사** – 혼합상태 층운에서 얼음 수 농도(ICNC)와 구름 수 농도(CDNC)의 비율(ICNC/CDNC)이 에어로졸–구름 상호작용에 미치는 영향 모사 – ICNC/CDNC 비율이 잠열 및 복사 과정에 영향을 미치는 영향 파악 ㅇ **[논문성과] 이승수, 정창훈 등,** Role of a key microphysical factor in mixed–phase stratocumulus clouds and their interactions with aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, EGUSPHERE–2023–862 (2024.10, in press) (mrnIF 85.32)

대표성과	연구성과	
산불/들불로 인한 북극해 생산력 변동 분석 (상위 10% 이내 우수 논문게재)		ㅇ **성과 창출 과제명 : 북극권 환경 변화와 기후변화감시물질 변동성 상호연계성 연구(1세부과제 4위탁과제/김태욱)** ㅇ **(의의) 북극 주변 지역의 산불/들불로 인한 질소 침적과 블랙 카본이 해양식물플랑크톤의 성장과 해빙 감소에 기여할 수 있다는 가능성 제시** – 2019~2021년 동시베리아해의 엽록소-a 농도가 이전 10년 평균에 비해 약 213% 증가 확인, 산불/들불로부터 발생한 질소가 해양에 침적한 결과인 것으로 예상 – 블랙 카본이 해빙 융해를 가속화하면서, 해빙 농도가 25% 감소하는 데 소요되는 기간이 약 10일 단축되었고, 이는 식물성 플랑크톤의 생장 기간을 늘리는 효과가 있는 것으로 추정 ㅇ **[논문성과] 석민우, 김태욱 등,** Possible enhancement in ocean productivity associated with wildfire-derived nutrient and black carbon deposition in the Arctic Ocean in 2019-2021, *Marine Pollution Bulletin*, 201, 116149 (2024.04)(mrnIF 96.61)

KOPRI 극지연구소

라. 참여연구원 간 정보교류 등을 통한 연구분야 정보력 향상에 기여

[참고] 본 사업 관련 착수 교류회 및 워크샵 개최 등

1) 2021년(1단계 1차년도) 착수 교류회 개최(2021.06.10.)

「극지의 한국, 미래의 도전」

KOPRI 극지연구소

극 지 연 구 소

수신자 내부결재
(경유)

제목 2021년도 극지연구소 극지기초원천기술개발사업 착수 교류회 개최 보고

1. 관련 근거 : 대기연구본부-353('21.06.01), (지침0601)워크샵 운영 지침

2. 상호 근거 및 관련 지침에 따라, 대기연구본부에서 개최한 착수 교류회에 대한 결과를 아래와 같이 보고합니다.

- 아 래 -

가. 교류회 개최 일시 및 장소
- 일시 : 2021.06.10. 09:30~18:00
- 장소 : 국제회의실(연구지원동 2층)

나. 참석자 : 총 69명(대면 15명, 비대면 온라인 54명)
- 소내 참여자 : 대기연구본부, 생명과학연구본부, 빙하환경연구본부, 저온신소재연구단 등 세부과제 책임자와 참여자 및 기타 관계자 등
- 외부 참여자 : 강릉원주대학교(세부), UAF, 광주과학기술원, 경인여대, 고려대, 서울대, 한국기초과학지원연구원, 포항공대, 충남대, 인하대 등 위탁과제 책임자와 참여자 및 기타 관계자 등(세부사항은 붙임 참석자 명단 참조)

다. 도출 내용
- 2021년부터 신규 과제로 진행되는 극지기초원천기술개발사업의 착수 교류회 개최를 통하여, 참여자 간 상견례 및 수행 내용 교류 기회 제공
- 극지기초원천기술개발사업 참여 세부/위탁과제에 대한 전체 기간('21.04.27~'24.12.31)에 대한 수행 내용 및 로드맵 확인과 주제간 학보자료와 정보에 대한 교류를 통하여 상보적인 업무 진흥 기반 마련
- 2021년도 북극 하계 현장조사 내용 및 일정 공유와 방안 논의
(COVID-19 대응 백신 접종과 현장 조사 참여 방안 및 6개 거점 국가 협력기관과의 인력 교류 등)
(세부사항은 붙임 결과보고서 참조)

붙임 1. 극지기초원천기술개발사업 워크샵(착수 교류회) 결과보고서-210611
2. 2021년도 극지기초원천기술개발사업 신규과제 착수 교류회 참석자 명단-210610-취합v10-최종마감2
3. 2021년도 극지연구소 극지기초원천기술개발사업 착수 교류회 개최-내부결재 완료-210601. 끝.

2) 2021년(1단계 1차년도) 중간점검 워크샵 개최(2021.08.15.)

「극지의 한국, 미래의 도전」

KOPRI 극지연구소

극지연구소

수신자 내부결재
(경유)

제목 극지기초원천기술개발사업 2021년(1차년도) 중간점검 워크샵 결과 보고

1. 관련근거 : 내부결재 대기연구본부-600('21.10.01), 워크샵 운영 지침(지침0601)

2. 상호에 근거하여, 대기연구본부(주관)에서 개최한 극지기초원천기술개발사업 중간점검 워크샵의 결과를 아래와 같이 보고합니다.

- 아 래 -

가. 목적 : 2021년(1차년도) 극지기초원천기술개발사업(총괄과제)에 대한 각 주제별 연구 내용 및 정보 공유와 2021/'22년도 연차보고서(연차실적계획서) 작성 논의 등

나. 일시 및 장소 : 2021.10.15(금) 10:30~18:00 / 극지연구소 세종국제회의실(연구지원동 201호)

다. 참석자 : 11개 기관 53명 (세부내역 붙임 참조)
- 소내 참여자 : 대기연구본부, 생명과학연구본부, 빙하환경연구본부, 저온신소재연구단 등 세부과제 책임자와 참여자 및 기타 관계자
- 외부 참여자 : 강릉원주대학교(세부), UAF, 광주과학기술원, 경인여대, 고려대, 서울대, 한국기초과학지원연구원, 인하대, 충남대, 포항공대, 국가생존기술연구회 등 세부/위탁과제 책임자와 참여자 및 기타 관계자 등(참석자 명단 별첨 참조)

라. 내용
○ 2021년(1차년도) 연구 업무 및 북극 관측거점 하계 조사 활동 등의 정보공유, 2021/'22년도 연차보고서 작성 방안 등 안내와 논의
○ 극지기초원천기술개발사업 참여 세부/위탁과제(총 15개 과제)에 대한 당해년도('21.04.27~'21.12.31)에 대한 수행 내용 중간점검 및 북극 거점 현장 조사 활동 등 발표와 토의

마. 소요 경비 및 처리계정 :
1) 당일 연구소 출근/방문 대면 및 온라인 참여자 중식과 식음료 제공 비용
2) 처리계정 : "북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명" 과제(PN21011-연구활동비 및 연구실운영비 등)

붙임 1. 워크샵(중간점검) 결과보고서-극지기초원천기술개발사업-211018
2. 2021년도 극지기초원천기술개발사업 중간점검 워크샵 참석자 명단-211015-최종v1.

끝.

3) 2021년(1단계 1차년도) 워크샵(2차) 개최(2021.11.25.~11.26.)

『극지의 한국, 미래의 도전』

KOPRI 극지연구소

극지연구소

수신자 내부결재
(경유)

제목 극지기초원천기술개발사업 2021년(1차년도) 워크샵(2차) 결과 보고

1. 관련근거 : 내부결재 대기연구본부-713('21.11.11), 워크샵 운영 지침(지침0601)

2. 상호에 근거하여, 극지연구소 대기연구본부(주최)와 강릉원주대학교(주관)에서 개최한 극지기초원천기술개발사업 워크샵(2차)의 결과를 아래와 같이 보고합니다.

- 아 래 -

가. 목적 :
  1) 2021년 과기부(연구재단) 수행 과제에 대한 연차보고서(연차실적계획서) 점검 및 정보 공유
  2) 환북극 관측거점 현황 파악 및 운영 경과, 향후 계획 수립 등 논의
나. 일시 및 장소 : 2021년 11월 25일(목)~26일(금) / 강릉원주대학교 해양과학교육원
다. 참석자 : 8개 기관 35명 (세부내역 붙임 참조)
  1) 소내 참여자 : 대기연구본부, 생명과학연구본부, 빙하환경연구본부, 저온신소재연구단, 전략기획부, 연구기획실, 정책개발실, 국제협력실 등 세부과제 책임자와 참여자 및 관계자
  2) 외부 참여자 : 강릉원주대학교(세부), 경인여대, 고려대, 한국외대, 이커넥트, 르씨지엠, 우일 등 세부/위탁과제 책임자와 참여자 및 기타 관계자 등
라. 내용 :
  1) 극지기초원천기술개발사업의 각 세부/위탁과제 등 2021년도 수행 내용 및 2022년도 계획 등 발표 및 토의(연차보고서(연차실적계획서) 작성에 기재할 내용 검토 및 보고서 체재 점검, 계획 등에 관한 논의)
  2) 현재 운영 중인 북극이사회 6개 국가 동토지역 내 관측거점의 현황 발표 및 각 거점별 수행하는 내용과 향후 계획 등에 관한 논의
  3) 기타 본 사업 수행에 대한 문제점 및 개선, 발전 방안 등에 관한 논의
마. 소요 경비 및 처리계정 :
  1) 참여자 석식 등 및 식음료 제공 등 비용
  2) 처리계정 : 극지연구소 세부과제-1~4(PN21011, 21012, 21013, 21014), 강릉원주대학교 세부과제-5의 연구활동비 및 연구실운영비 등)

붙임 1. 워크샵(2차) 결과보고서-극지기초원천기술개발사업-21129
2. 극지기초원천기술개발사업-워크샵(2차)-참여자 명단-211126. 끝.

4) 2022년(1단계 2차년도) 착수교류회 개최(2022.04.)

『극지의 한국, 미래의 도전』

KOPRI 극지연구소

극지연구소

수신자 내부결재
(경유)

제목 2022년(2차년도) 극지기초원천기술개발사업 착수 교류회 결과 보고

1. 관련근거 : 내부결재 대기연구본부-170('22.03.17), 워크샵 운영 지침(지침0601)

2. 상호에 근거하여, 극지연구소 대기연구본부에서 주관하여 개최한 '2022년 극지기초원천기술개발사업 착수 교류회' 결과를 아래와 같이 보고합니다.

- 아 래 -

가. 목적 : 2022년 극지기초원천기술개발사업(CA-MAP; Circum Arctic-Monitoring & Assessment & Projection)에 대한 착수 교류(각 주제별 연구 내용 및 정보 교류), 북극 하계 현장 조사 활동 및 연구 수행 효율성 제고에 대한 논의 등

나. 일시 및 장소 : 2022.04.01(금) 09:30~18:00 / 극지연구소 세종국제회의실(연구지원동 201호)

다. 참석자 : 16개 기관 63명 참여(대면 21명, 온라인 42명)(세부내역 붙임 참조)
1) 소내 참여자 : 대기연구본부, 생명과학연구본부, 빙하환경연구본부, 저온신소재연구단 등 세부과제 책임자와 참여자 및 기타 관계자 등
2) 외부 참여자 : 강릉원주대학교(세부), UAF(국외학술용역), 광주과학기술원, 경인여대, 고려대, 서울대, 숙명여대, 포항공대, 충남대, 인하대, 한국기초과학지원연구원 등 위탁과제, 이커넥트(국내용역) 책임자와 국가생존기술연구회 전문가 등 참여자 및 기타 관계자 등
※ 대면 참석자는 모두 백신접종 완료자이며, 정부방역수칙 준수하여 참여함

라. 내용 :
- 극지기초원천기술개발사업의 2차년도 과제에 대한 각 세부 및 위탁(용역) 과제 등 연구 내용 및 정보 교류(발표)
- 2022년도 북극 하계 현장조사 활동 수행 내용 파악 및 협연 논의
- 기타 현안 및 제언사항 등 종합 논의

마. 소요 경비 및 처리계정 :
1) 참여자 중식 및 식음료 제공 등 비용(이지바로 연구비 카드 결제, 회의록 등 작성 처리)
2) 처리계정 : 극지연구소 세부과제-1(PN22011-회의비)

붙임 1. 극지기초원천기술개발사업 워크샵(2022 착수 교류회) 결과보고서-220405
2. 2022년도 극지기초원천기술개발사업 착수교류회 참여자 명단-220401-최종
3. 총괄-CA-MAP-2차년도-착수교류회-총괄-발표용-220401v-최종. 끝.

5) 2022년(1단계 2차년도) 워크샵 개최(2022.10.27.~10.28.)

『극지의 한국, 미래의 도전』

KOPRI 극지연구소

극지연구소

수신자 내부결재
(경유)

제목 2022년도 극지기초원천기술개발사업 하반기 워크샵 개최 결과 보고

1. 관련 : 대기연구본부-596('22.10.06)

2. 상호에 근거하여, 우리연구소 대기연구본부 주관하에 개최한 2022년도 극지기초원천기술개발사업의 워크샵 개최 결과를 아래와 같이 보고합니다.

- 아 래 -

가. 목적 및 내용 :
1) 2022년 극지기초원천기술개발사업(CA-MAP; Circum Arctic-Monitoring & Assessment & Projection)에 대한 단계보고서(단계실적계획서) 작성관련 세부 점검 및 정보 공유
2) 환북극 관측거점 현황 파악 및 운영경과, 향후 계획 수립 등 논의
3) 내용:
- 극지기초원천기술개발사업의 2차년도 과제에 대한 각 세부 및 위탁(용역) 과제 등 연구 내용과 정보 교류(발표 및 토의)
- 2022년도 북극 하계 현장조사 활동 수행 내용 파악 및 협연 논의
- 단계보고서 작성 점검, 기타 현안 및 제언사항 등 종합 논의
- 단계평가('22.11.25 예정) 관련한 사전 준비(연구재단 통합지원시스템 및 KPDC에 자료 등재 등) 및 발표 자료 등에 대한 안내와 방안 논의 등

나. 일시 및 장소 : 2022년 10월 27일(목)~28일(금) / 강릉원주대학교 교육지원센터동(C9동) 119호

다. 참석자 : 15개 기관 58명 참여, 대면(34명) 또는 온라인 화상(24명)으로 참석; hybrid 방식 진행 (세부 명단 붙임 참조)
1) 회의장 대면 참석 : 5개 세부과제(극지연구소 4개, 강릉원주대학교 1개) 및 13개 위탁(용역) 과제 책임자, 참여자와 기타 관계자 등
2) 온라인 화상 참석 : 1)항 이외의 각 과제별 책임자 및 참여자와 기타 관계자 등

라. 일정(세부내용 붙임 참조)
1) 1일차
- 13:00~13:15: 참여자 등록 및 개회
- 13:15~13:40: 총괄과제 기조발표 및 안내
- 13:40~18:00: 세부과제-1(위탁과제/국내 학술용역 등 7개 포함), 세부과제-2(위탁과제 1개 포함), 세부과제-5 수행내용 등 발표 및 논의(각 주제별 20분씩, 중간 휴식 포함)
- 18:00~21:00: 1일차 정리 및 만찬 연계 종합 논의
2) 2일차
- 09:00~12:00: 세부과제-1(국외 학술용역), 세부과제-3(위탁과제 3개 포함), 세부과제-4(위탁과제 2개 포함)(각 주제별 20분씩, 중간 휴식 포함)
- 12:00~14:00: 워크샵 총평 및 중식, 이후 폐회

6) 2023년(전문가 초청) 워크샵 개최(2023.03.23.)

『극지의 한국, 미래의 도전』

KOPRI 극지연구소

극지연구소

수신자 내부결재
(경유)

제목 2023년도 극지기초원천기술개발사업 세부과제 전문가 초청 워크샵 (1차) 개최 결과 보고

1. 관련 근거: 내부결재 대기연구본부-183('23.03.17), 워크숍 운영 지침(지침0601)

2. 상호에 근거하여, 대기연구본부(주관)에서 개최한 2023년도 극지기초원천기술개발사업 세부과제 전문가 초청 워크숍(1차)의 결과를 아래와 같이 보고합니다.

- 아 래 -

가. 목적 및 내용: 환북극 동토 관측거점 육상-대기 환경 관측 고도화 점검/보완
- 2단계 사업 성과목표 달성을 위한 관측시스템 고도화 현황 점검 및 달성 계획 논의
- "관측시스템 등 고도화"달성을 위한 3차년도(2단계 1차년도) 하계 활동 계획 검토 및 보완

나. 일시 및 장소 : 2023년 3월 23일(목)/극지연구소 북극공세미나실(본관동 1301호)

다. 참석자 : 9개 기관 약 25명 내외, 대면 또는 온라인 참석
1) 소내 참여자 :대기연구본부, 생명과학연구본부, 빙하환경연구본부, 저온신소재연구단, 미래기술개발부의 과제 책임자와 참여자, 관계자 등
2) 외부 참여자 :고려대학교/서울대학교(세부-1 위탁), 국가농림기상센터(NCAM), 울산과학기술원(UNIST), 알래스카-페어뱅스 대학교, 이커넥트, 비앤피인스트루먼트(bandp), ㈜ 쏠단

라. 내용
- 10건의 소내외 전문가 발표
- 2단계 사업 성과목표 달성을 위한 주요 쟁점 토의
- 2023년 하계 활동 계획 검토 및 보완

7) 2023년(2단계 1차년도) 워크샵 개최(2023.04.06.~04.07.)

『극지의 한국, 미래의 도전』

KOPRI 극지연구소

극지연구소

수신자 내부결재
(경유)

제목 2023년도 극지기초원천기술개발사업 CA-MAP 과제 2단계 착수교류회 개최 결과 보고

1. 관련 : 대기연구본부-216('23.03.29)

2. 상호에 근거하여, 우리연구소 주관하에 개최한 2023년도 극지기초원천기술개발사업 CA-MAP 과제의 착수교류회 결과를 아래와 같이 보고합니다.

- 아 래 -

가. 목적 및 내용 :

1) 2023년 극지기초원천기술개발사업 과제(CA-MAP; Circum Arctic-Monitoring & Assessment & Projection)에 대한 협약완료 단계보고서(단계실적계획서) 내용에 의거한 전반적인 연구업무 점검
2) 환북극 관측거점 운영, 성과창출 및 향후 계획 수립 등
3) 내용:
- 극지기초원천기술개발사업의 종합적인 개요 리뷰, 1단계 종료에 따른 성과 공유 및 2단계 착수에 대한 전체 계획 교류(발표 및 토의)
- 2023년도 각 세부과제의 핵심주제별 발표 및 내용 공유, 성과 창출을 위한 계획 논의
- 정부 R&D 과제 수행을 위한 핵심 사항 안내와 절차 공유 등
- 2단계 과제의 2024년 최종 종료 대비 각 주제별 업무와 성과 창출 등 정리 필요성 논의 등

나. 일시 및 장소 : 2023.04.06(목) ~ 04.07(금) / 경기도 화성시 라비돌

다. 참석자 : 14개 기관 57명(대면 40명, 온라인 17명)

1) 참여 기관 : 5개 세부과제(극지연구소 4개(대기/생명과학/빙하환경연구본부/저온신소재연구단), 강릉원주대학교 1개) 및 14개 위탁과제(광주과기원 2개, 경인여대, 고려대 2개, 서울대 2개, KBSI, 연세대, 포항공대, 충남대, 인하대, 경북대, 차세대융합기술연구원 등), 1개 용역과제(이커넥트) 책임자, 참여자와 기타 관계자 등
2) 온라인 화상 참석 : 1)항 소속에서 대면 불참자는 온라인 참석

라. 일정(세부내용 붙임 참조)

1일차	11:30~13:00(90')	대면 참석자 단체 중식, 등록 및 개회
	13:00~13:30(30')	총괄과제 기조발표 및 과제 전반 설명(이방용)
	13:30~14:45(75')	세부과제-1 핵심 수행내용 및 계획 발표 (계획서상 추진체계의 3개 주제별 책임자(최태진(시스템고도화)/윤영준(에어로졸 역할)/박근보(SPP 구축)) 각 25' 발표(6개 위탁과제 포함)
	14:45~15:10(25')	휴식
	15:10~16:00(50')	세부과제-2 핵심 수행내용 및 계획 발표 (계획서상 추진체계의 2개 주제별 책임자(정지영(적설모사, 미답지)/김민절(동토 유기물)) 각 25' 발표)(2개 위탁과제 포함)
	16:00~16:50(50')	세부과제-5 핵심 수행내용 및 계획 발표 (계획서상 추진체계의 2개 주제별 책임자(지준범(미래 예측)/김관철(영향분석) 각 25' 발표)(1개 위탁과제 포함)
	16:50~17:10(20')	휴식
	17:10~21:00	1일차 내용 총평(이후 만찬 포함)

8) 2023년(극지 에어로졸 분야) 워크샵 개최(2023.08.31.)

<별표 제2호> 워크샵 결과보고서

워크샵 결과보고서

작성일 : 2023.09.04

부 서 명	대기연구본부	일 시	2023년 8월 31일
참가 인원	25명	장 소	극지연구소 세종국제회의실
토의 주제	극지 에어로졸/기후가스 연구 현황 발표 및 공동 연구 강화		

워크샵을 통한 도출 결과

- 극지 인프라를 활용한 극지 에어로졸/기후가스 연구 진행 현황 공유
- 현재 진행 중인 연구 사업의 핵심 성과 공유 (발표기관: 극지연구소, 경인여자대학교, 광주과학기술원, 고려대학교, 이화여자대학교, 충남대학교)
- 극지 에어로졸/기후가스 관측 자료 공유 활성화를 위한 방안 논의
- 고가 현장 관측 장비 공동 활용 및 관측 자료 공유를 위한 후속 논의를 지속할 예정
- 에어로졸/기후가스 현장 관측 수월성 제고를 위하여 극지 현장 인프라 및 극지 시료 공동 활용 지속

<2023년 8월 31일 극지 에어로졸/기후가스 워크샵>

건의 사항 등

- 체계적이고 효과적인 연구 사업 개발을 위해 장기적 연구 주제 도출 필요
- 각 연구기관 간의 협업을 강화하기 위해 세부 연구 사업들에 대한 유기적 연계성 강화
- 극지연-한국과학기술원 간 연구 협력 강화 필요
- 차세대 쇄빙선 및 장보고 과학기지 인프라를 활용한 미래 연구를 위하여 주요 연구 주제들에 대한 구체적인 연구 아이템 고민이 필요함

9) 2023년(중장기 6개년 후속과제 발굴) 워크샵 개최(2023.12.19.)

<별표 제2호>

워크샵(교류회) 결과보고서

작성일 : 2023.12.20

부 서 명	대기연구본부(주관)	일 시	2023.12.19.(화)
참가 인원	총 31명	장 소	연구소 북극곰세미나실
토의 주제	○ 목적: 현재 수행 중인 과제가 2024년 12월부로 종료됨에 따라, 2025년부터의 중장기(5~6년) 후속과제 발굴이 필수적이므로, 관련 연구목표, 내용 및 예산 방향 수립을 위한 교류회 개최 ○ 내용: 1) 극지기초원천기술개발사업 후속과제 발굴 관련 전반적인 연구업무 점검(기발간 기획연구 보고서 기준) 2) 후속과제의 연구목표, 내용 및 예산 등에 대한 항목별 방향 수립 등		
워크샵을 통한 도출 결과	○ 극지기초원천기술개발사업 기획연구 참여자 및 관계자 등(7개 기관 31명 참석) - 참석대상자 : 현재 5개 세부과제(극지연구소 4개 연구본부*, 강릉원주대학교 1개) 책임자, 참여자 및 건국대학교, 경인여자대학교, 고려대학교, 연세대, 이커넥트 참여자와 기타 소내외 관계자 등 * 대기연구본부, 빙하환경연구본부, 생명과학연구본부, 저온신소재연구단 ○ 중장기 사업 추진에 반영할 목표, 내용, 예산 등 자료 검토와 토의 - 기획연구보고서를 근거로 한 '25~'30년(6개년) 기준 - 정부 R&D 사업으로서의 역할 이행과 세계적 성과 창출 내용 반영 - 정부 투자 규모에 따른 내용별 우선 순위 조정과 확대, 축소 계획 논의 - 글로벌 이슈 해결 동참을 통한 국제사회에서의 '책임완수형 신뢰 가능한 파트너'로서의 역할 이행 필수 항목 반영 - 국제 극지과학 거버넌스 내 영향력 확보 및 국가 위상강화에 필요한 강조 방안 등 논의 - 기타 연구소 차원에서의 필요 인력 확보 계획 지원 및 사업에 대한 홍보 효과 극대화 방안 등 논의		
건의 사항 등	해당사항 없음		

10) 2024년(2단계 2차년도 착수교류회) 워크샵 개최(2024.04.17.)

<별표 제2호>

워크샵(착수교류회) 결과보고서

작성일 : 2024.04.18

부 서 명	해양대기연구본부(주관)	일 시	2024.04.17.(수)
참가 인원	총 59명 (대면 36명, 온라인 23명)	장 소	극지연구소 세종국제회의실
토의 주제	○ 목적: 극지기초원천기술개발사업 2단계 2차년도(종료) 착수교류회(제반 업무의 효율적 진행을 위한 정보공유, 연구실적 및 계획 등 발표와 토의) ○ 내용: - 극지기초원천기술개발사업 과제(CA-MAP; Circum Arctic-Monitoring & Assessment & Projection) 2단계 1차년도에 대한 실적 및 2차년도 계획 등에 대한 업무 공유와 논의 - 환북극 관측거점 운영, 성과창출 및 향후 계획 논의 등		
워크샵을 통한 도출 결과	○ 극지기초원천기술개발사업 참여연구원, 관계자 등(15개 기관 59명, 대면 및 온라인 참여 hybrid 방식 진행) ※ 5개 세부과제(극지연구소 4개(해양대기/빙하지각/생명과학연구본부), 강릉원주대학교 1개) 및 12개 위탁과제(광주과기원 2개, 경인여대, 고려대 2개, 서울대 1개, KBSI, 연세대, 포항공대, 충남대, 인하대, 차세대융합기술연구원), 1개 국외용역과제(UAF), 1개 국내용역과제(이커넥트), 한국외대 등 책임자, 참여자와 기타 관계자 등 ○ 각 주제별 실적 및 계획 사항 공유(시너지 효과 확보) - 1세부과제 (추진체계의 3개 주제 및 6개 위탁과제 포함) : 연구 실적 및 계획 등에 대해 발표와 정보공유 - 2세부과제 (추진체계의 3개 주제 및 2개 위탁과제 포함) : 연구 실적 및 계획 등에 대해 발표와 정보공유 - 3세부과제 (추진체계의 3개 주제 및 3개 위탁과제 포함) : 연구 실적 및 계획 등에 대해 발표와 정보공유 - 4세부과제 (추진체계의 3개 주제) : 연구 실적 및 계획 등에 대해 발표와 정보공유 - 5세부과제 (추진체계의 3개 주제 및 1개 위탁과제 포함) : 연구 실적 및 계획 등에 대해 발표와 정보공유		
건의 사항 등	해당사항 없음		

11) 2024년(과제수행 점검 및 후속과제 추진 정보공유) 워크샵 개최(2024.09.05.~06.)

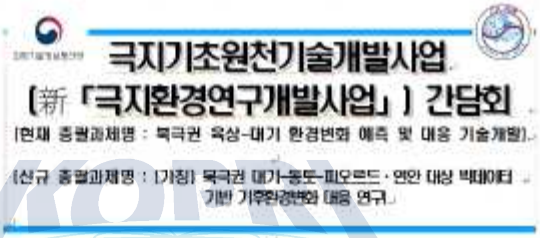
<별표 제2호> 워크샵 결과보고서

워크샵(간담회) 결과보고서

작성일 : 2024.09.09

부 서 명	해양대기연구본부 주관	일 시	2024년 9월 5일~6일
참가 인원	12명	장 소	충남대 해양환경과학과 등
토의 주제	과기부 R&D 사업(극지환경연구개발사업)의 수행 과제 진행사항 점검 및 후속과제 추진 정보공유(경과 및 방향 등)와 토의 등 간담회		

워크샵을 통한 도출 결과	- 현재 수행 중인 과제의 진행사항 및 연구기간 연장 등 내용 소개와 논의 - 2025년부터 수행할 극지환경연구개발사업 후속과제의 추진 방향 및 내용 정보공유(제안요구서 문구 조율, 일정 등) - 수행 과제의 수월성 재고를 위하여 관측거점 기반 현장 모니터링 지속 및 극지 시료 공동 활용 등에 관한 논의



〈극지환경연구개발사업 간담회〉

건의 사항 등	

12) 2024년(북극 관측거점 현장조사 결과 및 자료 공유) 워크샵 개최(2024.10.10.)

<별표 제2호>

워크샵(정보 교류회) 결과보고서

작성일 : 2024.10.11

부 서 명	해양대기연구본부(주관)	일 시	2024.10.10.(목)
참가 인원	총 22명	장 소	극지연구소 북극곰세미나실
토의 주제	□ 개최 목적 - 과기부 CA-MAP 과제 2024년도 북극 관측거점 현장조사 결과와 자료 활용 및 정보 공유 등 논의 □ 정보 교류회 논의 내용 1. 현재 수행 중인 과제의 북극 관측거점 현장조사에 대한 진행 및 결과, 자료 확보와 활용 등 정보 공유 2. 관측거점 운영에 대한 애로사항 및 개선사항 등에 대한 논의 3. 2025년부터 수행할 과제에서의 반영해야할 사항 등 논의 ※ 참석자 : 5개 세부과제(극지연구소 4개, 강릉원주대학교 1개), 위탁과제(고려대), 용역과제(이커넥트, UAF), 한국외대 등 책임자와 참여자 22명		

워크샵을 통한 도출 결과

○ 환북극 5개 관측거점 대상 2024년도 하계 현장조사 내용 및 기후환경 변화 측정시스템 점검과 관리, 향후 계획 등에 대해 발표하고 논의함

시간	내 용	소개 및 토론자
09:30~10:10(40')	등록 및 개회	이방용(총괄 안내)
10:10~11:20(70')	미국 알래스카 카운실 거점 활동-1(대기, SPP 등) 활동	박상종/박근보/양희권
11:20~11:50(30')	미국 알래스카 카운실 거점 활동-2, 패어뱅크스(생태) 활동	김진현/남성진
오찬, 휴식, 개별업무 (11:50 ~ 13:30)		
13:30~13:50(20')	아이슬란드 스토르호피이 거점 활동(대기)	박기태/박지연
13:50~14:10(20')	캐나다 캠브리지베이 거점 활동-1(생태)	남성진
14:10~14:40(30')	캐나다 캠브리지베이 거점 활동-2(대기)	황혜원
	캐나다 캠브리지베이 거점 활동-3(대기)	채남이
중간 휴식(14:40 ~ 15:00)		
15:00~15:20(20')	노르웨이 북극다산과학기지 활동(대기)	김연태/장은호
15:20~15:40(20')	그린란드 노르드 거점 활동(대기)	박상종
15:40~16:10(30')	기타 활동, 전체 토의 및 폐회	

※ 각 관측거점별 정밀측정시스템 및 설치 구조물에 대한 안정성 지속 확보, 현장조사시 참여자의 안전 유의, 현지의 물가(숙식비, 렌터카 등) 상승에 대한 비용 상승 해결 방안, 노후 시스템의 교체 시기 등 논의

건의 사항 등	○ 환북극 관측거점의 효율적 운영과 지속성 확보를 위한 현장조사시 숙박비의 과도한 상승으로 인한 비용 처리 애로사항 해소 방안 강구와 적용 필요

(참고) 1세부과제에서의 위탁과제별 수행 필요성 및 내용, 최종목표* 달성 기여

* 1) 북극권 육상지역의 급격한 기후환경 변화**(관측)**가 초래하는 중위도 지역 영향 평가**(피드백)**
  2) 북극권 육상-대기 상호작용 연구**(관측/분석)**를 통한 미래 기후환경변화 예측**(예측)** 및 대응 제시**(대응)**

- RFP에 제시된 최종목표를 항목별로 나눠볼 때, "관측, 분석, 예측, 대응" 으로 구분할 수 있음

※ 각 위탁연구과제는, 북극권 육상-대기-고환경 분야 연구 및 미래 예측과 대응방안 연구에 대한 효율성 증대를 비롯한 시너지 효과 확보와 극지연구 저변 확대를 위해, 국내 학연 소속의 해당분야 전문가 그룹과 협연할 목적으로 수행하고자 함

구 분	과 제 명	발주 기관	수행자	수행 기관	위탁 또는 용역 필요성	위탁 또는 용역 핵심 목표 및 내용	최종목표 달성 기여 내용	기여도 (%)
1세부 과제 (6개 위탁 연구)	북극권 환경변화에 따른 나노사이즈 미세먼지 생성 및 특성 변화 연구	극지 연구소	박기홍	광주 과기원	대기 중 나노입자의 물리적 특성 집중 및 상시 관측 자료 확보 필요	-북극권 나노입자 생성 원인 등 규명 -나노입자생성 특성자료 분석	북극권 환경변화 요인 (기상자료, 입자생성 전구물질 농도 (NH_3, H_2SO_4), 바닷물 특성 등)에 따른 나노입자의 생성, 성장, 발생원, 인위적/자연적 요인 파악 등 나노입자생성 주요 원인 제공	**관측/분석 80%, 예측/대응 20 %**
	북극권 미세먼지 예측 개선을 위한 대기질 모델링 고도화	극지 연구소	한경만	광주 과기원	북극 지역 대기오염 상황을 정교하게 모의하기 위한 극지 대기질 모델링 시스템 고도화 필요	-대기질 모델링 시스템 고도화 -지상/위성 기반 에어로솔 관측자료 분석 -에어로솔 재분석 자료 생성	신뢰도 높은 극지 대기 정보 생산 및 모의/ 관측된 재분석 대기 에어로솔 정보를 통한 극지 기후 강제력 산출 자료 제공	**분석 (60%), 예측 (40%)**
	북극지역 대기 에어로졸의 조성 및 흡습성에 따른 광학특성 파악	극지 연구소	정창훈	경인 여자 대학교	북극 미세먼지의 조성과 크기분포, 흡습성 등의 물리화학적 연구가 기후변화에 미치는 영향을 파악하기 위한 광학적 연구 필요	-북극지역 미세먼지의 조성 특성 파악 -북극지역 미세먼지의 광학 특성 파악 -북극지역 미세먼지의 흡습성장에 및 수분에 따른 광학 특성 및 기후변화 영향 파악	북극지역의 미세먼지의 조성 관련한 물리, 화학적 특성분석을 통한 광학적 특성을 파악하고 이에 대한 기후적 영향 평가 등 자료 제공	**관측/분석 (북극지역 대기 에어로졸 관측 자료 확보 및 특성 분석 기여): 60 %, 예측/영향 평가 (분석된 대기 에어로졸의 기후적 영향 파악에 기여): 40 %**
	북극권 환경 변화와 기후변화감시물질 변동성 상호연계성 연구	극지 연구소	김태욱	고려 대학교	기후변화감시물질과 기후/환경/해양 학적 요소 간의 연계성 파악을 통해, 북극 대기조성에 영향을 미치는 인자 파악 필요	-북극권 기후/환경/해양 인자 관측/재분석/모형 자료 수집 및 데이터베이스화 -관측자료 활용한 모형자료 검증 및	북극의 기후/환경/해양 변화가 중위도권에 미치는 영향을 위한 연구자료 제공 및 에어로졸-기후 상호작용 이해의 기초	**분석 70%, 예측/대응 30 %**

						기후/환경/해양 인자의 경향성 파악 -북극의 기후변화감시물질에 영향을 미치는 요인 파악 등	자료 제공	
	북극권 환경변화에 따른 식생별 탄소 flux의 거동 연구	극지연구소	채남이	고려대학교	빙권의 탄소순환에서 식생의 역할을 규명하고 환경변화에 따른 변화 이해 필요	-북극권의 식생별 탄소 flux 거동 분석 -북극권의 환경 변화에 대한 탄소 거동에서 식생의 역할 규명 등	북극권의 탄소 거동 예측을 위한 자료 제공 및 전지구 기후 모형에 활용될 지역급 모형을 보다 현실적으로 모사할 수 있 자료 제공 등	**관측/분석 70%, 예측/대응 30 %**
	위성 영상 기반 북극 동토지역 이산화탄소 플럭스 모니터링	극지연구소	류영렬	서울대학교	북극의 기후환경현상을 파악하기 위해서, 위성영상 기반 생물리기작 모형을 기반으로 북극동토층 순생태계 모형 개발 필요	-위성영상 기반 생물리기작 모형 Breathing Earth System Simulator (BESS) 기반의 북극동토층 순생태계 모형 개발 (BESS-Polar) 등	-북극권에서의 급속한 환경변화에 따른 대기-생태-동토의 상태 측정을 위한 필수 요소의 광역적 관측 자료 제공 등 -지면모형 이산화탄소 플럭스 산출물의 평가자료로 활용	**관측: 50% 분석: 50%**
	6개 국내대학 위탁							

KOPRI 극지연구소

2. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

가. 연구개발성과의 관리 계획

1) 본 과제 개요
- ㅇ (사업목적) 북극권에서 진행되고 있는 급속한 글로벌 이슈(기후환경변화 관련)의 파악 및 원인 진단, 이를 통한 미래 대응책 마련 및 북극권 연구 활동 강화와 국제적 위상 제고
- ㅇ (사업내용) 지속적인 환북극 동토층 육상(동토.생태)-대기 연구를 통한 기후환경변화 특성과 피드백 프로세스 규명 및 기후예측모델 도출 · 영향 평가 수행과 미래자원 활용 기술 개발

2) 확보데이터 형태

가. 데이터의 종류 및 형태 : 북극권 대기-동토 관련 유.무형 데이터(토양, 기상, 온실기체, 에어로졸, 식생에 관한 아스키, 바이너리, 이미지 등 형태

나. 기존 확보 저장된 유, 무형의 데이터 활용
- 자료크기: 관측자료 종류에 따라 KB/일 또는 MB/일 단위
- 자료저장: 관측장비 내장 메모리에 1차 저장되며 원격 접속이 불가능한 경우 현장에서 컴퓨터 연결해 자료확보, 원격 접속이 가능한 경우 원격 프로그램을 이용한 자료확보
- 관측장비에 기록된 장비 상태(status)에 근거하여 자료 검증 수행
- 자료는 과학자료 처리에 적합한 컴퓨터 언어 또는 프로그램 이용

다. 데이터 신뢰성 검증 및 확보 등 : 해당연구자가 데이터 품질 검사 수행 후 극지연구소에서 운영하는 '한국극지데이터센터(Korea Polar Data Center; KPDC)에 저장 및 신청서 심사 후 배포

3) 데이터 및 성과의 활용도 제고 가. 연구데이터 공유방법 및 공개에 필요한 자원(소프트웨어 또는 장비) : KPDC를 통해 데이터 공유 가능, 수요자(수혜자)의 사전 신청 및 심사에 의거 메타데이터 또는 원시데이터 공개 가능 나. 연구데이터 공개 시기 : 자료회수 및 품질검사 완료 후 KPDC에 등재한 이후 수시로 수요자 신청에 의거하여 공개 다. 정책, 지적 재산권 등에 의한 공개유예(엠바고) 기간 필요 유무(기간 명시) : 연구데이터 생산자(연구자)가 논문이나 특허 등을 생산중인 기간에는 공개유예할 수 있음. 이후에는 수요자의 신청과 적합성 검증을 통해 공개 가능 라. 지적 재산권 확보 주체 및 공유.활용 가능성 : 주체인 극지연구소에서 지적 재산권 확보, 관련 연구자의 논문, 특허 등 진행 중인 데이터는 메타데이터 만 공유 가능, 이외의 데이터는 공유와 활용 가능
4) 연구데이터 재사용 및 배포 계획 가. 연구데이터에 관심을 가지고 활용할 가능성이 있는 대상 : 북극권에 대한 기후환경변화 연구에 관심을 가지는 산학연 소속 연구자 또는 정부 관계자 나. 연구데이터 재사용 및 재활용방법 : 메타데이터는 데이터의 개략적인 특성만으로 재사용 및 활용 가능하며, 추가로 원시데이터는 기관 및 데이터 생산자(연구자)의 승인을 받고 재활용 가능함 다. 연구데이터 접근 제한 대상이 있을 경우 : 사전에 데이터 사용 승인을 받지 않은 모든 접근자는 제안 대상이 될 수 있음
5) 연구데이터 보관 및 관리 계획 가. 연구데이터 관리, 가공 및 보관을 위한 장기적 계획 : 본 사업 관련한 연구데이터는 모두 KPDC에 메타데이터 형태로 등록하여 보관되고, 관리되며 배포함. 앞으로도 계속 진행될 계획임 나. 연구데이터를 저장할 저장소 또는 데이터베이스 : KPDC에 저장(메타데이터, 원시데이터) (https://kpdc.kopri.re.kr 을 이용하여 접근 가능하며 DOI 발급) 다. 연구 과제 종료 후 연구 데이터를 보관할 가치 : 본 사업에서 추구하는 북극권 기후환경변화 관련 데이터는 영구적으로 보관하여 변화를 지속적으로 감시하고 추세 분석에 활용예정 라. 연구데이터를 보관하고 공유하기 위해 가공(변환) 필요 유무 : 데이터의 신뢰성을 확보하기 위한 QC 작업 필수, 이에 대한 적합성 여부 검증하여 보관되고 공유 예정 마. 연구데이터를 재사용하기 위해 제출 가능한 메타데이터 및 문서종류 : 본 과제의 직접적인 참여 연구원 이외의 수요자를 위한 데이터 재사용은 KPDC에서 마련된 데이터 사용계획서를 문서로 제출하고, 기관 및 데이터 생산자(연구자)의 승인을 받아야 함(관측 자료는 일반 컴퓨터에서 열람이 가능한 텍스트 형태로 공개됨, 일부 자료는 엑셀, CSV 또는 별도의 파일형태로 공개될 수 있음)

나. 연구개발성과의 활용 계획

① 과학기술적 활용

- 주요 온실기체(이산화탄소, 메탄) 플럭스의 정량화를 통한 자료 구축은 모델링을 통한 검증 및 예측에 유용한 정보로써 사용
- 북극 관측거점에서의 기상/온실기체/식생/동토 등 환경인자 장기 데이터를 국내외 동토 기반 수치모델링 결과 평가에 활용하고 온실기체 및 환경인자의 관계 분석 결과를 이용해 수치모델 온실기체 교환 모의 알고리즘 개발에 활용하여 최종적으로 동토 변화에 따른 북극권 환경변화 예측성 개선에 활용
- 확보된 관측자료는 동토지역 장기간 온실기체 및 환경인자 자료로서 온실기체 순환에 있어 장단기 변동성 분석 및 기상/식생/토양 환경인자와의 정량적 관계식 분석에 활용
- 동토 환경인자 데이터를 수집하고 가시화하는 시스템을 구축하고 추가적인 분석기능을 탑재하여 제공함으로써 대내외 활용도 제고 계획. 또한 국제관측자료 DB와 연계하여 데이터 가시성과 연구활용성 제고
- 에어로졸 이동식 관측 플랫폼을 활용한 북극권 에어로졸 특성 심화 관측을 기반으로 에어로졸의 기후적 역할 규명을 위한 단초를 제공

- 기후변화에 따른 에어로졸의 발생 특성 변화에 대한 선도연구 수행을 통해 한반도 및 주변 지역에서의 에어로졸 발생 특성 변화 예측 정확도를 향상
- 구축한 6개 관측거점을 우리나라의 본격 북극 진출의 교두보 및 북극 환경변화 연구의 근거지로 활용
- 본 과제의 결과는 각 위탁과제와의 협연을 통해 DB 고도화 달성과 2와 3세부과제 및 5세부과제 등과의 관측거점 현장 자료 공유와 구체적인 입력 및 검증 자료로 제공되어 활용. 아울러 결과들은 북극권 전체의 탄소 순환 네트워크에 제공하여 북극권을 대표하는 DB 구축에 참여하고, 논문화하여 전반적인 북극권 탄소순환의 이해와 예측에 활용
- 극한지 빅데이터를 활용한 신산업 및 서비스 개발을 비롯한 자연 환경과 IoT 융합 기술의 확보로 다양한 연구 분야 개척에 활용
- ICT 기술과 지능형 CPS 플랫폼 기술 전반을 접목한 무인 동토층 환경인자 관측 시스템 구축을 통해 신뢰성 있는 자료 확보와 효율적 분석이 가능
- 국내 WMN 인프라 구축에 의한 네트워크 프로토콜 고도화 및 성능 평가용 데트스 베드로 활용(가혹한 극지 환경에서 통신 기술개발 가능, 극지 관련 우주, 해양, 통신 기술을 포함한 미래 원천/응용 기술 확보)
- 영구동토지역의 탄소와 질소 동태에 관한 장기모니터링 결과를 국내 · 외 연구팀들과 데이터 공유, 기후변화가 장기간 툰드라 생태계에 미치는 영향 평가에 대한 일반 활용
- 극지 동토 생태계에 영향을 미치는 환경인자를 생태계 모델링에 접목하여, 좀더 정확한 기후변화 시나리오 예측 모델 구현에 활용

② 경제 · 사회 · 외교적 활용

- 북극의 미답지 생태계 조사를 통해 미발견 새로운 생물 종들과 극한 대사물질 및 효소 후보군을 발굴함으로써 의약학, 정밀화학, 에너지 산업 등에 폭넓게 활용
- 극지연구소 북극 관측거점 지형변동성 추적 관측망 구축 및 운영을 통해 관측거점의 활용성 극대화에 적용
- 동토변화가 전지구 기후에 미치는 역할 파악을 통한 글로벌 이슈 대응 및 동토변화가 유라시아 극한기상에 미치는 영향파악을 통한 사회 경제적 피해 저감 정책 마련에 기초자료로 활용
- 북극 모니터링 관련 빅데이터 생산, QC, 관리서버 등록(KPDC 등) 및 기후평가보고서 등재 등을 통해 자료 활용성 제고와 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 의무활동 수행 근거로 외교적 성과에 활용
- 북극 에어로졸의 생성-성장과 기후적 역할 측면에서 에어로졸 핵심 관측지(북극 제플린 관측소)를 기반으로 한 현장 연속 관측 프로그램 강화
  ※ 독자적 개발 장비(생물기원 가스 및 유기물 분석 장치) 및 선도연구장비(ACSM, SP-2, 및 PTR-TOF MS)의 현장 활용을 통한 독창적이며 선도적인 연구 수행
  ※ 세계 최고 수준의 북극 에어로졸 연구 네트워크(한국-이탈리아-스웨덴-아일랜드)를 통한 인적-물적 자료 교류 및 이를 통한 연구 효율성 제고
  ※ 한국 주도 에어로졸 관측 자료를 세계기상기구 Global Atmospheric Watch station에 제공함으로써, 극지연구에 관한 국가 위상 증대
  ※ 북극권 에어로졸의 기후적 역할 이해를 통한 기후변화 대응 및 완화를 위한 사회적 정책 수립에 기여
- 접근성이 열악한 북극권 지역에서 안정적인 대기 에어로졸 연속 관측 업무를 수행하기 위한 이동형 관측 플랫폼 구축
  ※ 대기 중 에어로졸은 다양한 기원 특성을 보이기 때문에, 핵심 관측지 이외에 이동이 용이한 관측 플랫폼이 필요하며, 핵심 관측지 운영의 노하우를 통해 신규 이동식 관측 플랫폼 제작 및 운영 가능
  ※ 환경변화가 급격히 일어나는 동토 및 연안 지역에 이동식 플랫폼을 설치, 운영함으로써 국제 공동 연구를 강화 및 극지 연구 범위 확장
- 극지역에서 검증된 센서 네트워크 기술은 공장, 병원, 공공 자원 관리, 교통, 물류 등의 무인 관측 실시간 정보 수집을 위한 응용에 적용하여 사업화가 가능함

③ 북극이사회 옵서버 국가로서의 역할 이행 활용

- 전 지구적인 공동이슈에 대한 정식옵서버 국가로서의 지위 지속 및 우리나라의 역할과 책임 이행의 명확화에 기여
- 북극권에서의 과학적 활동의 근거자료로 제시
- 기후환경변화 등 글로벌 이슈 대응 연구를 통한 국가위상 제고

④ 국가연구개발사업으로서의 가치 부여 활용

- 북극 미세먼지 현장 관측에 관한 독자적 관측 자료 확보를 통한 북극권 협의체의 주도적 역할 기대
- 기후변화에 따른 북극권 환경변화와 이를 통한 에어로졸 생성 특성 파악을 통해 북극권 대기오염물질 모니터링 국제협력 네트워크 확대
- 북극 동토 관측거점을 활용한 에어로졸의 기후영향평가 국제 프로그램 개발 및 한국의 극지연구 리더쉽 제고
- 국가 간 공동연구 지속 및 현장 연구에 필요한 선진 환경 모니터링 기술 공동 개발 및 적용 범위를 확대할 수 있는 발판으로 활용
- 동아시아, 유럽, 유라시아로부터 장거리 수송에 의해 북극권으로 유입되는 에어로졸 실시간 파악을 통해 국제 환경협약 및 대책 수립에 공헌

KOPRI
극지연구소

〈 연구개발성과 활용계획표 〉

구분(정량 및 정성적 성과 항목)			연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE		매년 상위 20% 이내 논문 약 2편 게재
	비SCIE		계상하지 않음
	계		10편
국내논문	SCIE		계상하지 않음
	비SCIE		계상하지 않음
	계		계상하지 않음
특허출원	국내		3
	국외		–
	계		3
특허등록	국내		2
	국외		–
	계		2
인력양성	학사		N/A
	석사		N/A
	박사		3
	계		3
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			• 북극이사회 정식옵서버 국가 과학활동 제공(북극이사회 워킹그룹(WG)의 한국대표로 활동, 정식옵서버 국가 지위 유지의 근거자료 제시) • 환북극 환경인자 관측분석 Smart Polar Platform 구축 지역 확대(예, 캐나다, 그린란드, 알래스카 종단 추가 등) 운영, 양질의 데이터를 실시간으로 제공하는 플랫폼 완료 • 대국민 홍보(정부 R&D 사업으로서의 역할이나 활동 등에 대해 국민에게 알권리를 제공하기 위한 메스컴을 통한 홍보) • 과학기술 대중화 및 outreach 활동을 통한 대국민 인식 제고

〈 별첨 자료 〉 (해당사항 없음)

3. 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항

○ COVID-19로 인한 현장 거점 활동의 부분적 미수행에 대한 대응책으로, 확보된 자료 기반 분석 등을 통해 다수의 논문 발간 및 학술발표 등(세부과제/위탁과제(국외학술용역 포함) 종합): 당해연도의 연구수행기간이 약 9개월이므로, 당초 1세부과제(위탁과제 등 포함)에서는 논문 창출 계획을 수립하지 않았으나, COVID-19 팬데믹 상황의 지속으로 누적된 환경인자 DB를 활용하여 논문 발간 등 학술활동에 매진하였음.

○ 한편, 북극권 나노입자 장기관측 자료가 확보되면서 기계학습 또는 인공지능 기반 예측 모델의 데이터로서의 활용도가 높아짐. 특히 아직 나노입자생성 예측 분야에 있어서 전세계적으로 기초단계라 할 수 있으며, 나노입자생성 예측뿐만 아니라 다른 측정 매개변수와 유기적인 관계와 분석을 통해 기존 방식으로 볼 수 없었던 새로운 관계를 도출하거나 새로운 관점을 제시할 수 있음

KOPRI
극지연구소

제4장
당초 연구계획 대비 주요 변경사항(총괄)

KOPRI
극지연구소

※ 2024년도 전체 연구비 감액으로 인한 목표 하향 조정 및 내용 축소, 일부분의 목표만 달성토록 조정

구분	변경 전 (당초 계획)	변경 후 (수정 계획)	변경 사유 및 조치사항	협약변경 승인일
연구목표 및 주요내용 (1세부 과제)	• 북극권 육상-대기 관측망 국제네트워크 가입 • 실측/위성/재분석 자료 활용 북극권 육상 탄소 순환 분석 • 북극권 온실기체 미래 배출 전망 육상 탄소순환 평가 • 에어로졸 정밀측정 플랫폼 정상 가동 및 북극 현장 집중 캠페인 실시 • 동토 식생DB 5건(누적 18건) • 동토 온실기체 거동변화 관련 논문 2편(상위 20% 1편 포함) • 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현 • Smart Polar Platform 구축(통신거리 ≥5 km) • 동토층 환경인자 특성 자료 통합 분석 (128 노드) • 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 추가 (누적 5건) - 고분해능 에어로졸 화학조성 • 북극 동토 기반 에어로졸의 기후적 역할 규명 논문 2편 (NSC/자매지 1편 포함)	<해당내용 변경없이 수행> • 실측/위성/재분석 자료 활용 북극권 육상 탄소 순환 분석 • 동토 식생DB 5건(누적 18건) • 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 추가 (누적 5건) - 고분해능 에어로졸 화학조성 **<해당내용 축소/변경/중단>** **• 회의, 워크숍 참석 등 국제 교류 제한으로 북극권 육상-대기 관측망 국제 네트워크 가입 불가(중단)** **• 북극권 온실기체 미래 배출 전망 육상 탄소순환 평가는 극지방 탄소플럭스의 장기 추세 분석 미수행(중단)(위탁과제 연구비 감액과 연계하여 협연 불가)** **• 에어로졸 플랫폼 국내로 변경(조정)하여 배경대기 관측 수행** **• 동토 온실기체 거동변화 관련 논문 1편(상위 20% 1편 포함)(지표 축소)** **• 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 축소 구현** **• Smart Polar Platform 구축(모니터링 현장 통신거리 ≥3 km로 목표 하향 조정; 동토 모니터링 현장 지역 토지소유자인 알래스카 원주민에 추가 토지사용료 납입/협의 어려움)** **• 북극 동토 기반 에어로졸의 기후적 역할 규명 논문 1편 (*NSC/자매지 또는 상위 10% 1편* 포함)(축소)**	(전반적인 변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한 일부 목표 축소/변경/중단으로 조정 등임) • 온실기체 미래배출 전망에 대해서 위탁과제-5와의 긴밀한 연계로 수행되었지만, 예산 감액으로 미수행 결정, 달성 불가 • 연구비 감액으로 에어로졸 플랫폼 북극동토 연구 거점 집중 캠페인 미실시 --> 국내 적지에 설치하여 테스트와 병행으로 배경대기 관측으로 대체 • 연구비 감액으로 인한 목표 하향 조정 등 • 현장연구 축소에 따른 연속적인 자료 확보 제약이 예상되는 바, "*NSC/자매지 또는 상위 10% 1편* 포함"으로 지표 변경	협약용 연차보고서 승인일 (2024.03. 22)
연구목표 및	▪ 온실효과기체의 방출량 및 환경제어인자를 이	<해당내용 변경없이 수행> • 지표면 생태모형의 개	(변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한	협약용 연차보고서

주요내용 (국제학술용역(UAF))	용한 지표면 생태모형 개발 ▪ 탄소순환 및 수지의 정량적 평가를 위한 관측자료-지표면 생태모형-인공위성의 유기적 연구 ▪ 알래스카 육상생태계에 적합한 지표면 생태모형 개발을 위한 온실효과기체 및 환경제어인자의 입력 자료로서의 가치 평가 ▪ 자연재해로 인한 육상생태계의 반응의 결과로 온실효과기체 및 환경인자의 특성을 활용한 인공위성 및 지표면 생태모형의 재현 기술 개발 ▪ 적설면적 및 적설량의 변화로 인한 토양 및 줄기기원온실효과기체의 정량적 방출량 산정 ▪ 지표면 생태모형 및 인공위성 자료와 상호검증 및 활용도평가	발에 집중 **<해당내용 축소/변경/중단>** **• 필수관측(종단관측과 카운실/쿠가룩)의 중단** **• 카운실 및 알래스카 종단 관측을 위한 현장조사 중단으로 페어뱅크스 주변 육상생태계에서 집중관측으로 영역 변경**	일부 목표 축소/변경/중단으로 조정 등임)	승인일 (2024.03.22)
연구목표 및 주요내용 (1세부 1위탁과제(GIST))	▪ 북극권 환경변화 요인(대기 온도, 습도, 바닷물 특성(온도, 생물학적 특성 등), 해빙 면적 등)과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명 ▪ 북극권 나노입자 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악 ▪ 아이슬란드 거점에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 집중관측 수행 ▪ 다양한 지역(도심, 농촌지역 등)에서 확보된 나노입자의 생성 특성 자료와 비교분석을 통해 북극 지역의 나노입자 생성 특성의 차별성 및 유사성 도출(+인공지능기법 활용)	<해당내용 변경없이 수행> • 북극권 환경변화 요인(대기 온도, 습도, 바닷물 특성 (온도, 생물학적 특성 등), 해빙 면적 등)과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명 • 다양한 지역 나노입자의 생성 특성자료와 비교분석 • 아이슬란드 거점 인프라 구축이 늦어짐에 따라 북극해 선박(아라온) 관측으로 대체함 **<해당내용 축소/변경/중단>** **• 북극권 에어로졸 나노입자 아이슬란드 측정 미실시(중단): 기존 측정자료 분석으로 대체** **• 인공지능기법 활용 나노입자 생성 예측 모델 개발 미수행(중단)**	(변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한 일부 목표 축소/변경/중단으로 조정 등임)	협약용 연차보고서 승인일 (2024.03.22)
연구목표 및 주요내용	• 2016~2023년 MODIS 관측 종합 분석 • Optimal Interpolation 기법 자료동화 수행	<해당내용 변경없이 수행>	해당사항 없음 (당초 목표 이행, 완료 예정)	당초 목표 이행, 완료 예정

(1세부 2위탁과제 (GIST))	• Optimized Run 모의 자료 및 MODIS/ AERONET 광학 관측 자료 통합 활용 • (RFP 충족) SCI급 논문 1편(상위 20% 이내, 과제목표와 관련성 있는 논문 게재)			
연구목표 및 주요내용 (1세부 3위탁과제 (경인여대))	• 북극 미세먼지의 크기 분포 및 흡습성장 특성에 따른 기후변화 영향 파악 • 북극지역 에어로졸의 크기분포에 따른 산란 및 흡수계수 변화 산출 및 광학계수 모수화 (크기분포에 따른 광학계수 모수화 자료산출 1건, SCI논문 1편) • 북극지역 에어로졸의 크기분포 특성과 흡습성장 모수화 • 북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성 기여도 산출(북극지역 반응별 황산염 기여도 자료 산출 1건, SCI논문 1편) • 최근 3년간 북극지역 미세먼지 특성에 영향을 줄 수 있는 기상 정보 파악 • 최근 3년간 북극지역 미세먼지 특성에 영향 미치는 기상 정보 파악 (기상자료 산출 1건)	〈해당내용 변경없이 수행〉 • 북극 미세먼지의 크기 분포 및 흡습성장 특성에 따른 광학특성 모수화 • 북극지역 황산염 미세먼지 특성에 영향 요소 분석 **〈해당내용 축소/변경〉** • **북극지역 에어로졸의 광흡수특성 분석(변경) (BC/CO 분석 자료 1건)** • **북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성 기여도 산출(북극지역 반응별 황산염 기여도 자료 산출 1건)(변경)**	- SCI 논문 기 발표로 인한 연차별 정량적 목표 조정 (변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한 일부 목표 축소/변경으로 조정 등임)	협약용 연차보고서 승인일 (2024.03.22)
연구목표 및 주요내용 (1세부 4위탁과제 (고려대))	• 기후/환경인자 및 대기 조성물질 자료 시공간 변동성 분석 및 이해 (SCIE급 논문 1건, mrnIF 70 이상)	〈해당내용 변경없이 수행〉	해당사항 없음 (당초 목표 이행, 완료 예정)	당초 목표 이행, 완료 예정
연구목표 및 주요내용 (1세부 5위탁과제 (고려대))	• 북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명 • 식생 및 토양에서의 툰드라 생태계 탄소순환 특징 분석 • 탄소순환에서 동토 환경인자와 상관관계 파악 및 식생의 종류에 따른 영향 분석 • 식생의 성장과 식생분포에 따른 탄소순환의	〈해당내용 변경없이 수행〉 • 북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명 • 식생 및 토양에서의 툰드라 생태계 탄소순환 특징 분석 • 탄소순환에서 동토 환경인자와 상관관계 파악 및 식생의 종류에 따른 영향 분석	(변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한 일부 목표 중단으로 조정 등임)	협약용 연차보고서 승인일 (2024.03.22)

	변화 파악, 기후변화에 따른 동토 시스템의 탄소순환 설명	**〈해당내용 중단〉** • **식생의 성장과 식생 분포에 따른 탄소순환 변화 파악, 기후변화에 따른 동토 시스템의 탄소순환 (중단)**		
연구목표 및 주요내용 (1세부 6위탁과제 (서울대))	• 극지방의 순생태교환량을 시공간 패턴 분석 (1982~2022) • 극지방 탄소플럭스의 연간변동성 분석 • 극지방 탄소플럭스의 장기 추세 분석 • 개발한 호흡모듈 혹은 순생산량 활용하여 mrnIF 80 이상의 논문 1편 출판 • 탄소플럭스의 시공간 패턴 분석을 이용한 mrnIF 80 이상의 논문 1편 출판	〈해당내용 변경없이 수행〉 • 극지방의 순생태교환량을 시공간 패턴 분석 (1982~2022) • 극지방 탄소플럭스의 연간변동성 분석 • 개발한 호흡모듈 혹은 순생산량 활용하여 mrnIF 80 이상의 논문 1편 출판 **〈해당내용 중단〉** • **극지방 탄소플럭스의 장기 추세 분석 미수행 (중단)**	(변경 사유는 대부분 연구비 감액으로 인한 일부 목표 중단으로 조정 등임)	협약용 연차보고서 승인일 (2024.03.22)
연구비	3,050,000천원	1,539,000천원	정부 연구비 감액으로 인한 축소 (약 49.5% 감액) (각 위탁과제별 연구비 조정 배분)	(2024.03.22)
연구기간	‘21.04.27~ ‘24.12.31 (45개월)	‘21.04.27~ ‘25.03.31 (48개월)	COVID-19 팬데믹의 여파 잔존으로 인한 북극권 현장활동의 제한적 접근성 부분 해소와 현재 수행 중인 과제에 참여하는 기관(극지연구소 및 외부 참여기관)에서의 북극권 현장조사와 환경인자 확보, 자료분석 등 연구활동을 위한 마무리 기간 필요(3개월 연장)	한국연구재단 (2024.11.14)

KOPRI 극지연구소

주요 변경 사항 [해당 사항 ○, × 중 선택]	당초 계획(2024년)	협약 변경 내용(2024년)	관련 페이지
연구비 (과제 구성 포함) [○]	■ 연구비 : 3,050,000 천원 • 주관연구: 2,645,00 천원 • 공동연구: 0 천원 • 위탁연구: 405,000 천원	■ 연구비 : 1,539,000 천원 • 주관연구: 1,301,000 천원 • 공동연구: 천원 • 위탁연구: 238,000 천원	1세부 과제의 2단계 1차년도 (3차년도) 연차 보고서 pp.213 (총괄표)
연구목표 [○]	■ 환북극 5개 관측거점 정상 가동 및 환경인자 확보(지속) ※ 대외환경으로 인해 러시아 바라노바 거점 활동은 잠정적 중단 ■ 북극 동토 에어로졸 생성 및 이동이 한반도를 포함하는 중위도에 미치는 광학적 특성 평가 및 예측(북극 현장 집중 캠페인 실시) ■ 환북극 동토 환경변화 평가 및 국제관측망 가입 ■ Smart Polar Platform 구축 ■ 알래스카 종단관측, 화재 및 동토 융해에 따른 온실효과기체의 정량적 평가(국외학술용역과제) ■ 북극권 환경변화 요인과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명/북극 지역의 나노입자생성 특성의 차별성 및 유사성 도출(+인공지능 기법 활용)등(1위탁과제) ■ 최적 조건 모의자료 활용 자료동화 수행 및 재분석 자료 생성 등(2위탁과제) ■ 북극 미세먼지의 크기분포에 따른 흡습성장 및 수분 특성에 따른 기후변화 영향 및 기여도 산출(3위탁과제) ■ 북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기 조성물질 자료 시공간 변동성 분석 및 이해(4위탁과제) ■ 북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명(5위탁과제) ■ 극지방의 순생태교환량의 시공간 패턴 분석(1982~2022)(6위탁과제)	■ 환북극 5개 관측거점 정상 가동 및 환경인자 확보(지속) ■ ~~에어로졸 북극 현장 집중 캠페인 실시~~**(미수행)**-국내로 **변경(조정)** 하여 배경대기 관측 수행 ■ 환북극 동토 환경변화 평가 ~~및 국제관측망 가입~~**(미수행/중단)** ■ Smart Polar Platform 구축**(축소)** ■ ~~알래스카 종단관측~~**(미수행/중단)** ■ 북극권 에어로졸 나노입자 아이슬란드 측정 미실시 (중단):기존 측정자료 분석으로 대체~~(+인공지능 기법 활용)~~**(미수행/중단)** (1위탁과제) ■ (2위탁과제 변경없이 좌동) ■ 북극 미세먼지의 크기분포에 따른 흡습성장 및 수분 특성에 따른 에어로졸 영향 파악**(변경)**(3위탁과제) ■ (4위탁과제 변경없이 좌동) ■ ~~식생 및 토양에서의 툰드라 생태계 탄소순환 특징 분석~~**(미수행/중단)**(5위탁과제) ■ 극지방의 순생태교환량의 시공간 패턴 분석(1982~2022), ~~극지방 탄소플럭스의 장기 추세 분석~~**(미수행/중단)**(6위탁과제)	1세부 과제의 2단계 1차년도 (3차년도) 연차 보고서 pp. 189~191, 229, 232~235 (각 위탁과제의 세부사항은 해당 위탁과제 연차보고서 참조)
연구내용 [○]	■ 북극권 온실기체 미래배출 전망 육상 탄소순환 평가	■ ~~북극권 온실기체 미래배출 전망~~ 육상 탄소순환 평가는 극지방 탄소플럭스의 장기 추세 분석**(미수행/중단)**(위탁과제 연구비 감액과 연계하여 협연 불가)	1세부 과제의 2단계 1차년도 (3차년도)

주요 변경 사항 [해당 사항 ○, × 중 선택]	당초 계획(2024년)	협약 변경 내용(2024년)	관련 페이지
	■ 환북극 동토 환경변화 평가 및 국제관측망 가입 ■ 에어로졸 정밀측정 플랫폼 정상 가동 및 북극 현장 집중 캠페인 실시 ■ Smart Polar Platform 구축(통신거리 ≥5 km) ■ 북극권 환경변화 요인과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명/북극 지역의 나노입자생성 특성의 차별성 및 유사성 도출 (+인공지능 기법 활용)등(1위탁과제) ■ 최적 조건 모의자료 활용 자료동화 수행 및 재분석 자료 생성 등(2위탁과제) ■ 북극 미세먼지의 크기분포에 따른 흡습성장 및 수분 특성에 따른 기후변화 영향 및 기여도 산출(3위탁과제) ■ 북극권, 유라시아 지역(한반도 포함) 기후/환경/해양 인자 및 대기 조성물질 자료 시공간 변동성 분석 및 이해(4위탁과제) ■ 북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명, 식생 및 토양에서의 툰드라 생태계 탄소순환 특징 분석(5위탁과제) ■ 극지방의 순생태교환량의 시공간 패턴 분석(1982~2022), 극지방 탄소플럭스의 장기 추세 분석(6위탁과제)	■ 환북극 동토 환경변화 평가 ~~및 국제관측망 가입~~(연구비 감액으로 **~~중단~~**) ■ 에어로졸 플랫폼 국내로 **변경(조정)**하여 배경대기 관측 수행 ■ Smart Polar Platform 구축(통신거리 ≥3 km)**(축소)** ■ ~~북극권 에어로졸 나노입자 아이슬란드 측정 미실시~~ (**~~중단~~**): 기존 측정자료 분석으로 대체 ~~(+인공지능 기법 활용)~~**(미수행/중단)** (1위탁과제) ■ (2위탁과제 좌동) ■ 북극지역 에어로졸의 광흡수특성 분석**(변경)** (BC/CO 분석 자료 1건) (3위탁과제) ■ (4위탁과제 좌동) ■ 북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명, ~~식생 및 토양에서의 툰드라 생태계 탄소순환 특징 분석~~**(미수행/중단)**(5위탁과제) ■ 극지방의 순생태교환량의 시공간 패턴 분석(1982~2022), ~~극지방 탄소플럭스의 장기 추세 분석~~**(미수행/중단)**(6위탁과제)	연차 보고서 v, 166~177, 180~191, 195~197, 207~210 (각 위탁과제의 세부사항은 해당 위탁과제 연차보고서 참조)
연구기간 [X] (추후 변경 예정으로 제안사항임)	■ 당해연도 연구기간(12개월) (‘24.01.01~’ 24.12.31)	■ 연구기간 3개월 연장(15개월) (‘24.01.01~’ 25.03.31) * 사유 : 연구기간의 3개월 연장을 통하여, 본 과제의 효율적 마무리(북극 현장조사와 분석의 효율적 마무리 및 외부인건비 등 연장 확보)와 향후 수행 예정으로 연구활동과의 지속성 및 효율성 확보 등을 위해 변경 시행	해당 페이지 없음 (제안 사항임)

[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] 참여기업 의견서	N
첨부7	평가의견에 대한 수정·보완 대비표	Y

KOPRI 극지연구소

첨부1 연구개발 목표의 달성도 증빙

□ 1세부과제 (북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정성) 북극 동토거점 관측 시스템 및 활용 시스템 고도화	25	1, 2	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 동토거점 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 관측시스템 고도화 계획 수립 ▪ 위성게이트웨이 이중화 개발 및 현장 설치	▪ 거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 관측 시스템 고도화 계획 작성(100%) ▪ 알래스카 카운실 관측거점 설치 (100%)	
			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 북극 동토거점 관측시스템 1차 고도화 ▪ 동토 환경 DB 시스템 설계 ▪ 위성게이트웨이 이중화 및 WPAN/LP-WAN 통합 시스템 현장설치	▪ 1차년도 고도화 계획에 따른 고도화 완료(100%) ▪ DB 시스템 설계 완료(100%) ▪ 알래스카 카운실 관측거점 설치 (100%)	정성-1. 동토환경 DB시스템 설계
			3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 북극 동토거점 관측시스템 2차 고도화 ▪ 북극 동토거점 환경인자 수집분석 시스템 구축 ▪ 중장거리 무인 데이터 수집 시스템 개발	▪ 고도화(100%) · 니알슨 NDVI/PAR 센서 설치 · 동토거점 (러시아 바라노바 제외) 온실기체 플럭스 자료 준실시간 송신시스템 설치: 카운실, 캠브리지베이, 니알슨 실시간 자료 전송 · 카운실 거점 관측기간 11월까지 확대 ▪ 수집분석 시스템(100%) · 북극 동토거점 동토-대기 환경인자 자료 준실시간 수집 및 중장거리 무인 데이터 관측 시스템 현장설치, DB 구축(100%) · 웹기반 가시화시스템 구축 (100%)	정성-2. 니알슨 센서 설치 정성-3. 가시화 시스템 구축
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 실측/위성/재분석 자료 활용 북극권 육상 탄소순환 분석	▪ 실측자료 기반 거점별 GPP (총일차생산량), RE(생태계 호흡량), NEE (순생태계 교환량) 경년 변동 평가 (100%) ▪ 실측과 모델간 GPP, RE, NEE 비교 평가(100%) ▪ 위성/재분석/모델 활용 탄소순환 분석(100%)	정성-4. 거점별 실측 이산화 탄소 교환량 경년 변동 자료 정성-5. 모델과 실측자료 비교 정성-6. 환북극 탄소 플럭스 지도
				▪ 동토 Smart Polar Platform 구축을 위한 센서 관측 기술 개발	▪ LoRaWAN 통합 시스템 현장(카운실 관측거점) 설치 (100%)	
(정성) 북극 동토기원 에어로졸	30	3	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 에어로졸 정밀측정 플랫폼 설계 및 관측프로그램 수립	▪ 신규 에어로졸 관측 플랫폼 설계 및 필수 관측 장비 구성 완료(100%)	정성-7. 신규 플랫폼 구성

KOPRI 극지연구소

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
등의 기후적 역할 규명을 위한 관측 플랫폼 확장 및 현장 집중 캠페인 실시			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 에어로졸 생성 과정 모사 연구 수행	▪ 에어로졸 생성 과정 모사 챔버 실험 수행 완료 (100%)	
			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 에어로졸 정밀측정 플랫폼 시험 운영 ○ 북극 관측거점 기반 국제공동 현장집중 캠페인 네트워크 구축	▪ 신규 에어로졸 관측 플랫폼 이동 및 관측 장비 설치 완료(100%) ▪ 북극 아이슬란드 거점 기반 공동연구 네트워크 구축 및 국제공동 논문 발간(100%)	정성-8. 에어로졸 관측 플랫폼 이동 및 관측 장비 설치 완료 정성-9. 북극 아이슬란드 거점 기반 기후냉각가스와 해양 생물간의 상관성 분석 논문 발간
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 에어로졸 정밀측정 플랫폼 시험 가동 ▪ 다양한 북극 동토 관측거점 기반 에어로졸 특성 자료 통합 분석	▪ 에어로졸 정밀측정 플랫폼 활용 에어로졸 및 미량기체 분석 완료(100%) ▪ 다양한 북극 동토 관측거점 기반 에어로졸 특성 자료 통합 분석(100%)	정성-10. 에어로졸 정밀측정 플랫폼 활용 현장관측 결과
(정량) 환경 DB 고도화 및 온실기체 거동 연구 결과 발표	25	1, 2	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 동토 대기 기상인자 DB 5건 ▪ 메탄 플럭스 측정 거점 1개소 추가 ▪ 광합성 측정 거점 1개소 추가 ▪ 환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 개발(환경인자 4건) ▪ 위성통신시스템 개발 특허 출원	▪ 거점별 2021년 기상인자 DB 5건(KPDC 등재) (100%) ▪ 알래스카 거점 메탄장비/PAR 센서 확보(80%) ▪ 태양광 자가발전 시스템 및 저전력 통신모듈 동토층 환경인자(토양온도, 토양함수비, CO_2, CH_4) 통합형 멀티 모니터링 센서 시스템 개발(100%) ▪ 환경인자 획득 센서 취득부, 위성통신 모듈, 게이트웨이 이중화(데이터 손실 최소화 가능)(특허출원 완료) (100%) ▪ 동토 멀티 센싱 관련 인자 DB 4건(KPDC 등재)(100%)	정량-1. 카운실 메탄 측정 등 정량-2. 특허 출원서
			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 동토 대기 온실기체 DB 5건(누적 10건) ▪ 메탄 플럭스 측정 거점 1개 추가 ▪ 광합성 측정 거점 2개소 추가 ▪ 온실기체 플럭스 알고리즘 2건 개발 ▪ 모니터링 시스템 원격 무선전송 및 에너지 하베스팅 기술 고도화 (64노드) ▪ 모니터링 시스템 자가발전 장시간 저전력 운용	▪ 동토 대기 온실기체 DB 17건 (누적 22건)(100%) ▪ 그린란드 노르드 메탄 플럭스 측정(100%) ▪ 캠브리지베이/그린란드 광합성 유효 복사(PAR) 측정 (100%) ▪ 온실기체 플럭스 알고리즘 2건 개발(100%) ▪ 환경인자 멀티 센서 통합형 관측 시스템 고도화(84노드 데이터 취득, 특허출원) (100%) ▪ 동토 멀티 센싱 관련 인자 DB 4건(KPDC 등재) (100%)	정량-3. 노르드 메탄 측정자료 정량-4. 캠브리지베이/그린란드 PAR 측정자료 정량-5. 알고리즘 수식과 그림

KOPRI 극지연구소

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
			3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 동토 대기 온실기체 DB 3건 (누적 13건) ▪ 광합성 측정 거점 1개소 추가 (※ 러시아 거점 1개소는 잠정 중단) ▪ 동토 환경변화 분석 및 관련 논문 1편 (SCI급) ▪ CPS/IoT 네트워크 기반 환경인자 관측시스템 구축 (128 노드) ▪ 극지환경인자 제어 방법 등 개발	▪ 동토 대기 온실기체 DB 18건 등록 (누적 40건) (100%) ▪ 캠브리지베이 거점 NDVI/PAR 측정 추가완료(100%) ▪ 동토 환경변화 분석 및 관련 논문 1편(SCI급) (100%) ▪ 극지환경인자 관측시스템용 배터리 장치 및 이의 온도 제어 방법(특허출원 1건) (100%)	정량-6. 온도제어 특허 출원서
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 동토 식생 DB 5건 (누적 18건) ▪ 동토 온실기체 거동변화 관련 논문 1편 (축소) (상위 20% 1편 포함) ▪ 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현 및 실증	▪ 동토 대기 온실기체 DB 16건 등록 (누적 56건) ▪ 동토 온실기체 거동변화 논문 1편(상위 10%) 출판 ▪ 현장상황 관제를 위한 효율적인 통합관리 기능 구현(100%) ▪ Smart Polar Platform 실증(통신거리 ≥5 km) (100%) ▪ 동토층 환경인자 특성 자료 통합 분석(128 노드) (100%)	정량-7. 북극 동토 탄소순환 분석논문
(정량) 북극 동토기원 에어로졸 등의 기후적 역할 규명을 위한 DB 의 고도화 및 관련 연구 결과 발표	20	3	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 – 북극 에어로졸 분자 특성 시계열 자료 ▪ 북극 동토 기반 에어로졸 특성 분석	▪ 북극 에어로졸 분자 특성 시계열 자료 및 에어로졸 인자 DB 1건(KPDC 등재) (100%) ▪ 북극 에어로졸 생성 및 성장 관련 논문 1편 발간 완료 (100%)	정량-8. 북극 에어로졸 생성 관련 논문 등
			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 추가 (누적 2건) – 북극 대기 중 에어로졸의 화학 특성 관측 자료 분석관련(SCI급 논문 1편 (상위 20%))		
			3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 북극 거점 기반 에어로졸 DB 2건 추가 (누적 4건) – 북극 대기 중 구름 응결핵 시계열자료/북극 대기 중 에어로졸 물리-화학적 특성 ▪ 북극 동토 기반 에어로졸의 특성 분석 및 관련 SCI급 논문 1편	▪ 북극 에어로졸 구름응결핵 시계열 자료 및 북극 대기 중 에어로졸 화학 특성 KPDC 등록 2건 완료(100%) ▪ 북극 에어로졸 생성 특성 관련 논문 1편 발간 완료(100%)	정량-9. 중위도 -고위도 유기물 해양-대기 상호작용 논문 발간
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 추가 (누적 5건) – 고분해능 에어로졸 화학조성 ▪ 국제공동연구를 통한 북극 동토 기반	▪ 초고분해능 질량분석기를 활용한 에어로졸 유기특성 KPDC 등록 1건 완료(100%) ▪ 북극 유기 에어로졸 계절적 발생 특성 관련 논문 1편 발간 완료 (100%) ▪ 북극 관측거점 기반 에어로졸	정량-10. 북극 생체분자-에어로졸 물리특성 간의

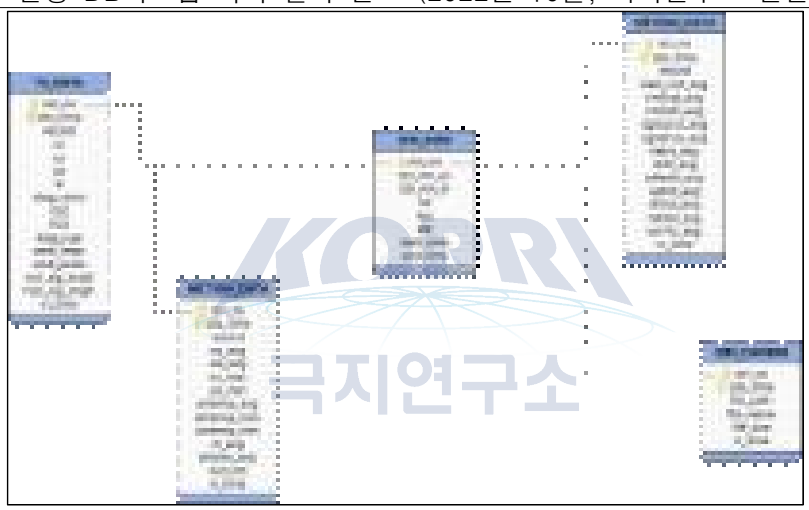
KOPRI 극지연구소

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
				에어로졸의 기후적 역할 규명 논문 1편 (NSC/자매지 1편 또는 상위 10% 이내 1편) ▪ 북극 거점 기반 에어로졸 물리-화학 성질 DB 누적 총 5건 ▪ 북극 에어로졸의 기후적 특성 SCI급 논문 총 3편(상위 20% 이내 논문 3편 또는 NSC/자매지 1편 포함)	특성 관련 KPDC 등록 5건 완료(100%) ▪ 북극 에어로졸의 기후적 특성 관련 SCI급 논문 5편 발간 (100%)	상관성 규명 논문 발간
합계	100					

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
정성-1	동토환경 DB시스템 설계(정성-2차년도)

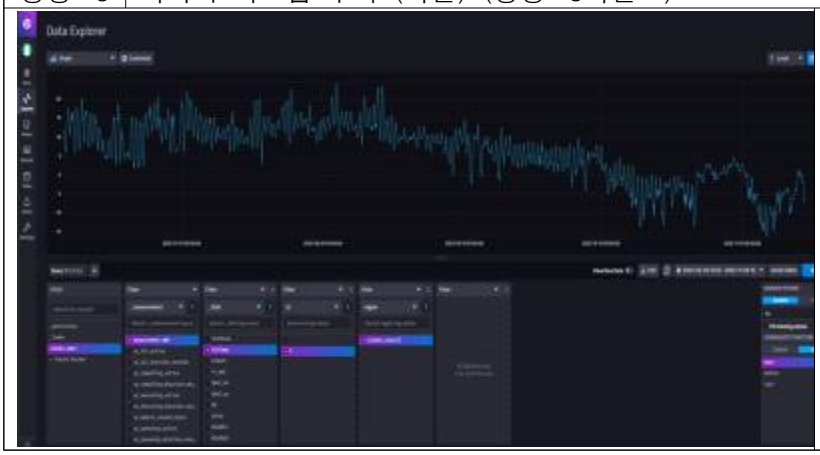
동토환경 DB시스템 서버 설치 완료 (2022년 10월, 극지연구소 전산실)



동토거점 환경인자 데이터 DB설계 중 관측자료 정의 (카운실 거점)

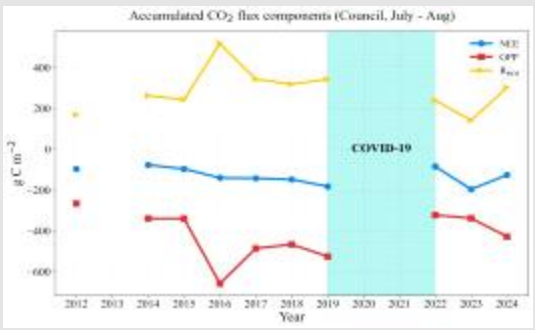
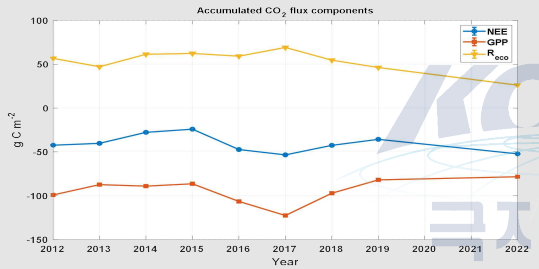
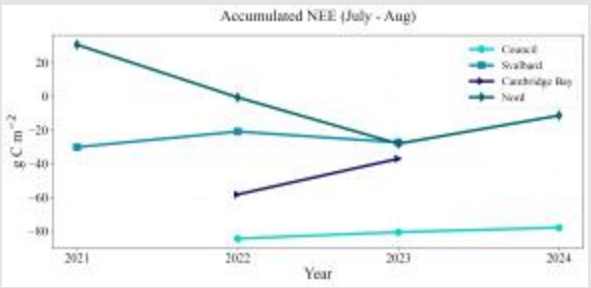
번호	관련증빙 명
정성-2	니알슨 센서 설치(사진) (정성-3차년도)

북극 니알슨 다산과학기지 뒤편 타워에 설치된 식생지수 센서(좌측) 및 광합성유효복사 센서(우측) (2023년 4월)

번호	관련증빙 명
정성-3	가시화 시스템 구축 (사진) (정성-3차년도)
	소내 전산실에 위치한 서버(172.16.201.XXX)에 동토거점 환경인자 수집 및 DB 시스템을 설치하였으며 2단계 1차년도에는 시범적으로 알래스카 카운실 관측거점의 1시간 간격 자료를 이리듐 위성 전송받아 DB화 및 가시화 기능을 구현하였음

KOPRI
극지연구소

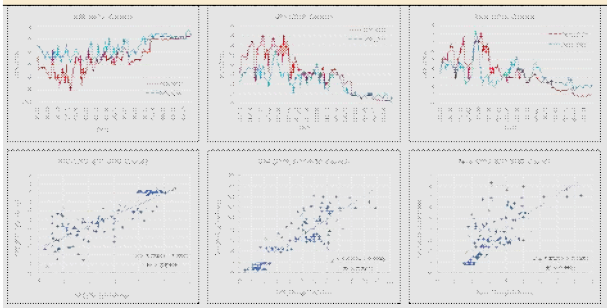
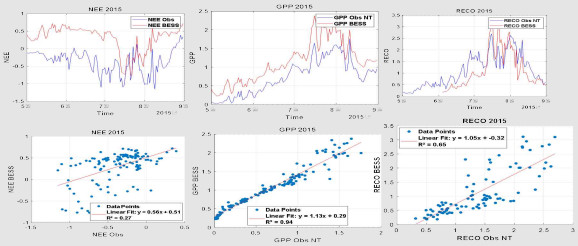
번호	관련증빙 명
정성-4	거점별 실측 이산화탄소 교환량 경년 변동 자료(정성-4차년도)

 Accumulated CO2 fluxes (gCm^{-2}) of the Council site for summer-time (June to August) from 2016 to 2024.	카운실 거점 2016-2024년 하계 탄소플럭스 누적값 경년 변동 분석
 DOY 189(190;2012,2016)- Accumulated CO2 fluxes (gCm^{-2}) of the Cambridge Bay site for summer-time (June to August) from 2012 to 2024.	캠브리지 베이 거점 2012-2022년 하계 탄소플럭스 누적값 경년 변동 분석
 Accumulated NEE(gCm^{-2}) of the site for summer-time (July to August) from 2021 to 2024.	거점별 하계기간 순생태계교환량 누적값 비교

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
정성-5	실측 및 모델 비교 자료 (정성-4차년도)

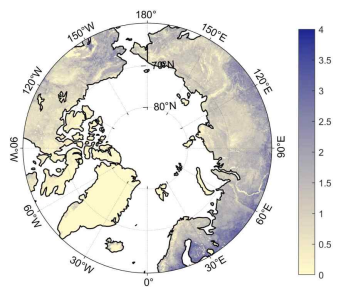
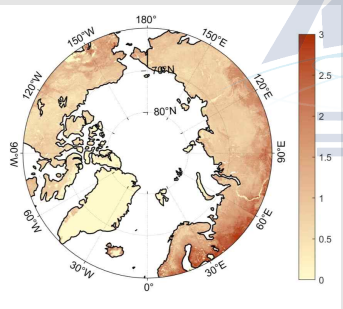
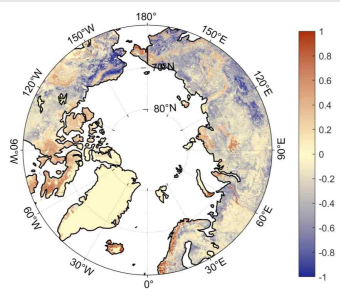
관측거점 실측과 BESS-Polar 산출 자료간 비교
단, 스발바르 및 노르드 거점 지역 BESS-Polar 산출값은 "0" 이어서 제외함.

 Comparison of daily CO2 fluxes (NEE, GPP, Reco) of the BESS_Polar model and observation for the period of June 11 to September 30, 2019.	카운실 거점 2019년 하계
 Comparison of daily CO2 fluxes (NEE, GPP, Reco) of the BESS_Polar model and observation at the Cambridge Bay site for the summer, 2015.	캠브리지 베이 거점 2016년 하계

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
정성-6	환북극 탄소 플럭스 지도(정성-4차년도)

BESS -Polar의 정량화된 탄소 플럭스 지도(위탁과제-6)

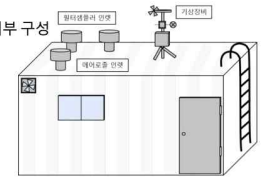
	2020년 환북극 연평균 총일차생산량
	2020년 환북극 연평균 생태호흡량
	2020년 환북극 연평균 순생태교환량

KOPRI 극지연구소

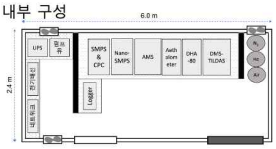
번호	관련증빙 명
정성-7	신규 에어로졸 관측 플랫폼 구성(2022년 구축완료)(정성-1차년도)

신규 에어로졸 관측 플랫폼 구성

✓ 외부 구성



✓ 내부 구성



✓ 핵심 연구 장비

장비 명칭	목적	크기[mm] /무게[kg]	관리 사항
High volume air sampler (DIGITEL/DHA-80)	에어로졸 입자 필터 포집	600x310x1360 /65	상시 가동 (정기적 단순 필터 교체 필요)
DMS-TILDAS (Aerodyne)	실시간 DMS 분석	530x660x710 /72	상시가동 (온라인 연결)
Aethalometer (MAGEE/AE33)	블랙카본 실시간 측정	280x430x330 /20	상시 가동
Scanning Mobility Particle Sizer (TSI/3938 Series SMPS)	입자 크기별 실시간 측정	480x440x670 /30	집중 관측 기간 가동
nano-SMPS (TSI 3938E57 1nm SMPS)	1nm부터 크기별 입자 실시간 측정	580x440x653 /40	집중 관측 기간 가동
Condensation Particle Counter (TSI/CPC3756, CPC3750)	2.5, 7.0nm 이상 입자수농도 측정	301x281x354 /9.1	집중 관측 기간 가동
Aerosol Mass Spectrometer (Aerodyne)	에어로졸 화학특성 실시간 측정	1050x600x1340 /170	집중 관측 기간 가동

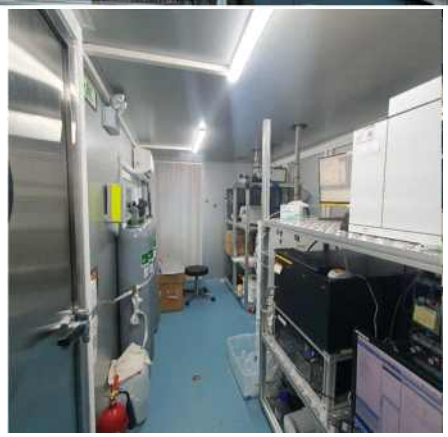
<신규 관측 플랫폼 외관(위 왼쪽) / 관측 플랫폼 지붕 타공 (추후 에어로졸 인렛으로 활용)(위 가운데) / 외부 전원 및 통신 공급함(위 오른쪽) / 가스수압공간 및 거치대(아래 오른쪽) / 내부 환기구 및 전원통신 단자(아래 가운데) / 실내 천정-벽면-전기선 마감(아래 왼쪽)>
(좌상단 사진부터 시계방향 순서임)

번호	관련증빙 명
정성-8	에어로졸 관측 플랫폼 이동 및 관측 장비 설치 완료(정성-3차년도)

1) 울진 해양과학기술원 동해연구소에 설치된 이동식 에어로졸 관측 플랫폼 외관

2) 이동식 에어로졸 관측 플랫폼 내부 분석 장비 설치 현황

DMS-TILDAS(Aerodyne), GC-PFPD(Agilent Technologies), High volume air sampler(DIGITEL/DHA-80), Condensation Particle Counter(TSI/CPC3776), Aethalometer(MAGEE/AE22), Wind sector controller



번호	관련증빙 명
정성-9	북극 아이슬란드 관측거점 기반 기후냉각가스와 해양생물간의 상관성 분석 논문 발간(3차년도)

Science of the Total Environment 879 (2023) 163020

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Observational evidence linking ocean sulfur compounds to atmospheric dimethyl sulfide during Icelandic Sea phytoplankton blooms

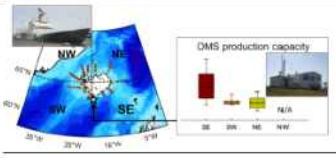
Kitack Lee[a,b], Jun-Seok Kim[a], Ki-Tae Park[c,d,*], Min-Ji Park[a], Eunho Jang[c,d], Kristinn Gudmundsson[e], Solveig R. Olafsdottir[e], Jon Olafsson[f], Young Jun Yoon[c], Bang-Yong Lee[a], Sae Yun Kwon[a], Jonghun Kam[a]

[a] Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 37673, Republic of Korea
[b] Institute for Convergence Research and Education in Advanced Technology, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea
[c] Division of Atmospheric Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea
[d] Department of Polar Sciences, University of Science and Technology, Incheon 21990, Republic of Korea
[e] Marine and Freshwater Research Institute, Hafnarfjörður, Iceland
[f] Institute of Earth Sciences, University of Iceland, Reykjavik, Iceland

HIGHLIGHTS

- Seawater DMSP, DLA, chlorophyll-a, and air-DMS increase during spring blooms.
- DMSP and DLA show associations with chlorophyll-a in water masses around Iceland.
- DMS production capacity and in situ S compound data are directly associated.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Editor: Hai Guo

Keywords:
Dimethyl sulfide (DMS)
Dimethylsulfoniopropionate (DMSP)
DMSP lyase activity (DLA)
Icelandic waters

ABSTRACT

In two Icelandic Sea spring blooms (May 2018 and 2019) in the North Atlantic Ocean (62.9–66.0°N, 9.0–28.0°W), chlorophyll-a and dimethylsulfoniopropionate (DMSP) concentrations and DMSP lyase activity (the DMSP-to-dimethyl sulfide (DMS) conversion efficiency) were measured at 67 stations, and the hourly atmospheric DMS mixing ratios were also currently measured only in May 2019 at Storhöfði on Heimaey Island, located south of Iceland (63.4°N, 20.3°W). The ocean parameters for biology (i.e., chlorophyll-a, DMSP, and DMSP lyase activity) were broadly associated in distribution; however, the statistical significance of the association differed among four ocean domains and also between 2018 and 2019. Specifically, the widespread dominance of *Phaeocystis*, coccolithophores, and dinoflagellates (all rich in DMSP and high in DMSP lyase activity) across the study area is a compelling indication that variations in DMSP-rich phytoplankton were likely a main cause of the variations in statistical significance. For all the ocean domains defined here, we found that the DMS production capacity (calculated using the exposure of air masses to ocean biology prior to their arrivals at Heimaey and the atmospheric DMS mixing ratios of those air masses at Heimaey) was surprisingly consistent with in situ mean S-data (i.e., DMSP and DMSP lyase activity). Our study shows that the proposed computational approach enabled the detection of changes in DMS production and emission in association with changes in ocean primary producers.

* Corresponding author at: Division of Atmospheric Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea.
E-mail address: ktpark@kopri.re.kr (K.-T. Park).

1. Introduction

During photosynthesis, marine phytoplankton assimilate carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur broadly at a ratio of 106:16:1:1.3 (Fleming

http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163020
Received 18 January 2023; Received in revised form 28 February 2023; Accepted 19 March 2023
Available online 24 March 2023
0048-9697/© 2023 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

CRediT authorship contribution statement

Kitack Lee: Conceptualization, Writing – original draft, Writing – review & editing, Supervision. **Jun-Seok Kim:** Investigation. **Ki-Tae Park:** Conceptualization, Writing – original draft, Writing – review & editing, Formal analysis. **Min-Ji Park:** Investigation, Visualization. **Eunho Jang:** Formal analysis, Visualization. **Kristinn Gudmundsson:** Writing – review & editing. **Solveig R. Olafsdottir:** Writing – review & editing. **Jon Olafsson:** Writing – review & editing. **Young Jun Yoon:** Conceptualization. **Bang-Yong Lee:** Conceptualization. **Sae Yun Kwon:** Writing – review & editing. **Jonghun Kam:** Writing – review & editing.

Data availability

Data will be made available on request.

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.

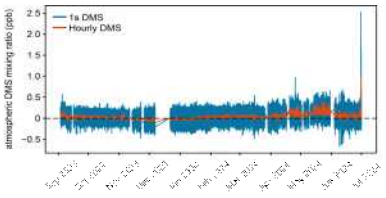
Acknowledgments

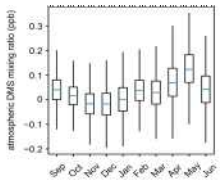
This work was supported by the National Research Foundation (NRF) of Korea (NRF-2020R1A4A1018818 for the Basic Research Program; NRF-2021R1A2C3008748; NRF-2021M1A5A1065425 (KOPRI-PN23011)).

KOPRI 극지연구소

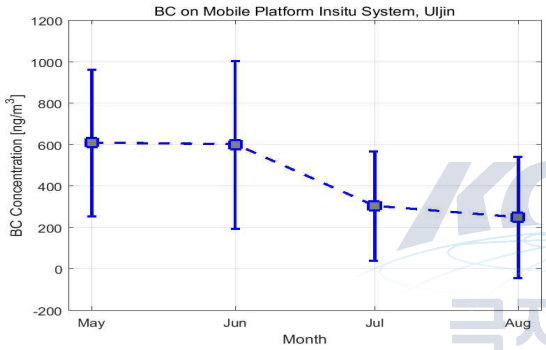
번호	관련증빙 명
정성-10	에어로졸 정밀측정 플랫폼 활용 현장관측결과(정성-4차년도)

1) 울진 해양과학기술원 동해연구소에서 관측된 대기 DMS 및 BC 농도의 계절 변화 양상

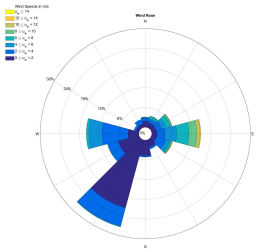


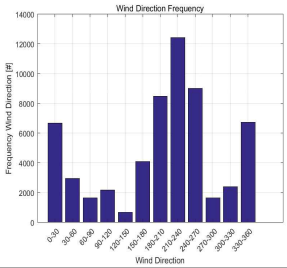


	Autumn			Winter			Spring			Sum
Month	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
DMS (ppte)	40.3	15.6	17.1	10.1	1.3	36.0	28.6	25.7	134.9	47.7

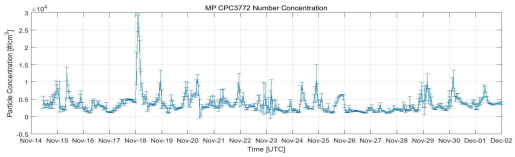


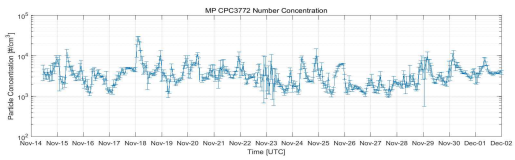
2) 울진 해양과학기술원 동해연구소 주풍향 비율 분석 결과

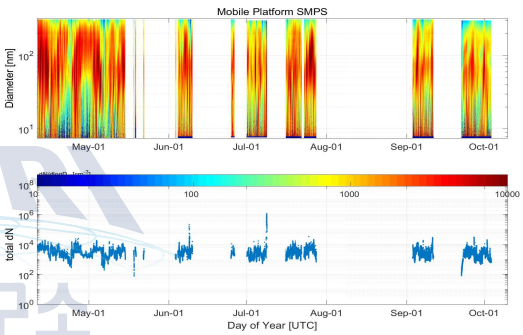


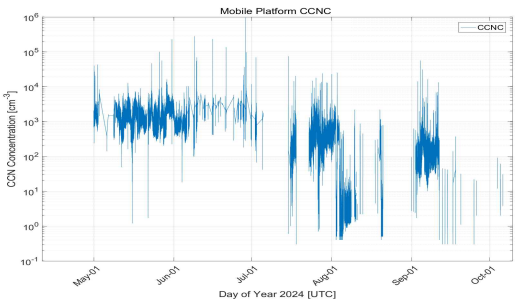


3) 울진 해양과학기술원 동해연구소에서 관측된 에어로졸 및 구름응결핵 수농도 자료의 시계열



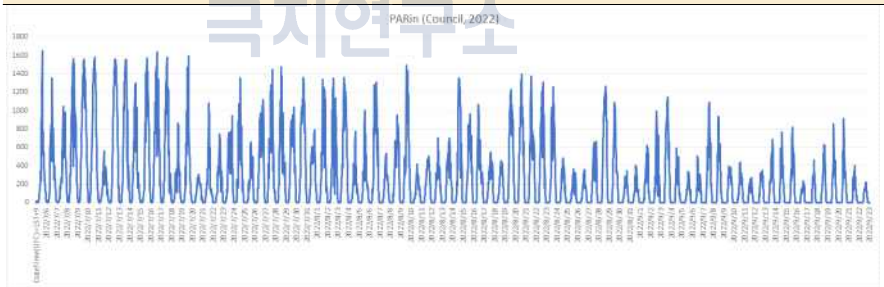




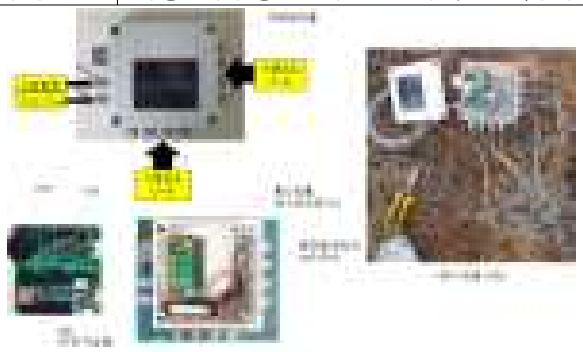


KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙
정량-1	카운실 메탄 측정 및 PAR 측정(정량-1차년도)

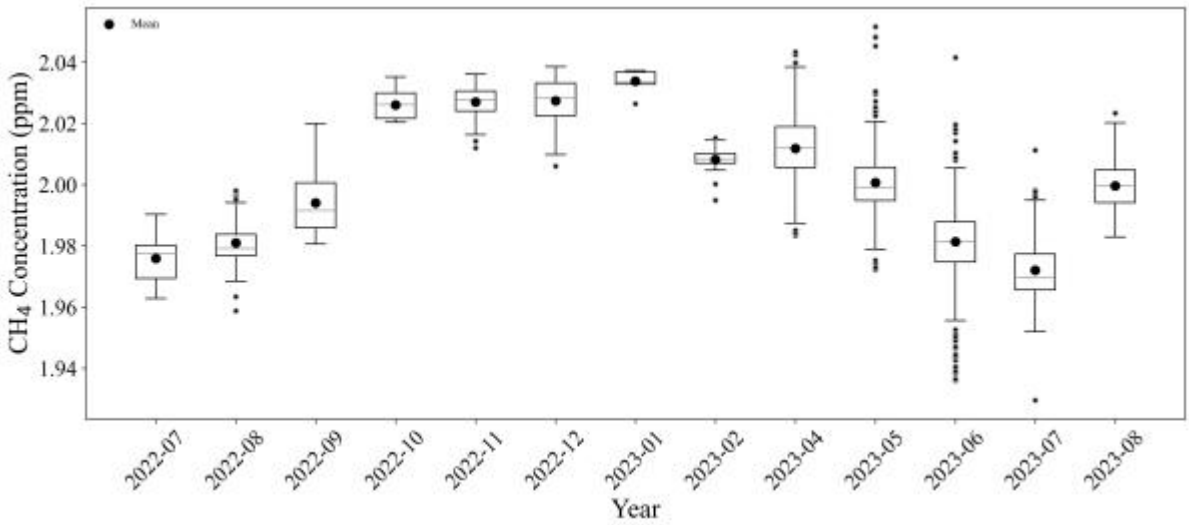
관측 거점	관측 자료
미국 (알래스카 카운실)	 <카운실거점 메탄플럭스 측정, 2022년 7월> **PAR 관측 자료**  미국 카운실 거점에서 2022년에 측정된 광합성유효복사(PAR) 2022년 7월 및 9월 알래스카 카운실거점에서 메탄 및 PAR 측정 * COVID-19으로 인해 1차년도 미달성되었으나 2차년도에 달성

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
정량-2	이중 위성통신 시스템 특허출원(정량-1차년도)
	- 동토층 환경인자(토양온도, 토양함수비, CO_2, CH_4) 통합형 멀티 모니터링 센서 통신 시스템 개발 - 배터리를 포함한 전원구성과 센서 취득부, 위성통신, 게이트웨이 부분에 이중화 이중화 구조 - 동토층 환경인자 통합형 멀티 센서 시스템 개발
출원번호통지서 특 허 청 장	- 극지 환경 인자를 관측하는 위성 통신 시스템 - 본 발명은 인터넷 접속이 원활하지 않은 지역에서 극한 지역 등에서 무선 센서 네트워크(Wireless Sensor Network)를 구성하여 기후 변화에 영향을 주는 환경 인자를 데이터 손실 없이 장기간 무인 관측하고 전송하기 위한 위성 통신 시스템임,

KOPRI 극지연구소

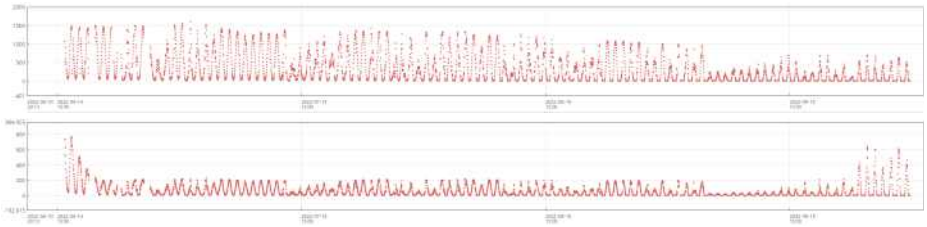
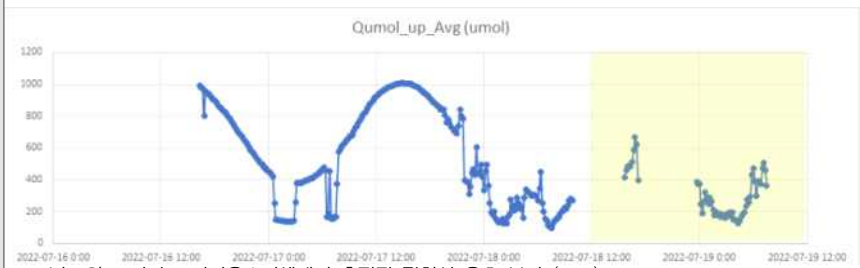
번호	관련증빙 명
정량-3	노르드 거점 메탄 측정자료(정량-2차년도)



그린란드 노르드 거점에서 2022년 7월 이후 측정된 메탄농도의 월별평균값

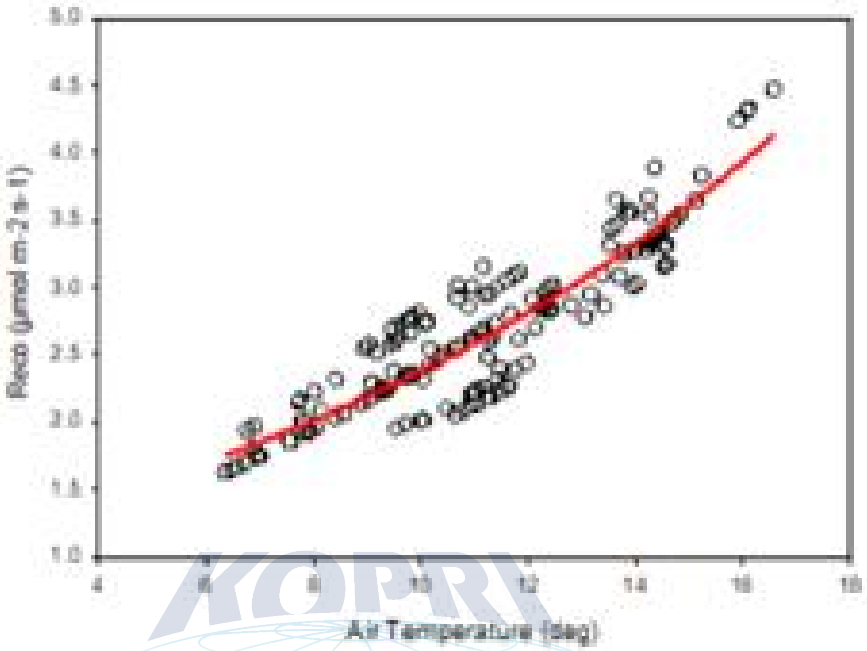
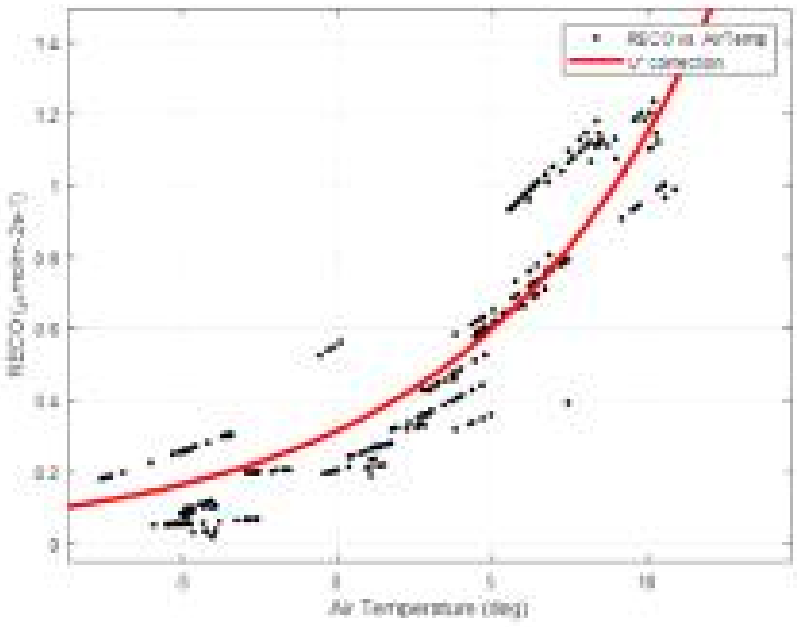
KOPRI
극지연구소

번호	관련증빙 명
정량-4	캠브리지베이/그린란드 PAR 측정자료(정량-2차년도)

관측 거점	PAR 시계열 자료
캐나다 (캠브리지베이)	 2022년 6월-9월 캠브리지 베이에서 측정된 하향(위)과 상향(아래) 광합성 유효 복사
그린란드 (시리우스 파셋)	 2022년 7월 그린란드 시리우스파셋에서 측정된 광합성 유효 복사 (PAR)

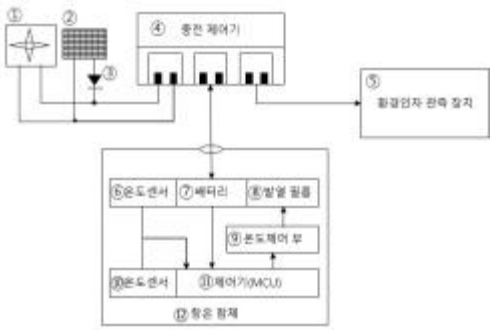
KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
정량-5	온실기체 플럭스 알고리즘 수식과 그림(정량-2차년도)

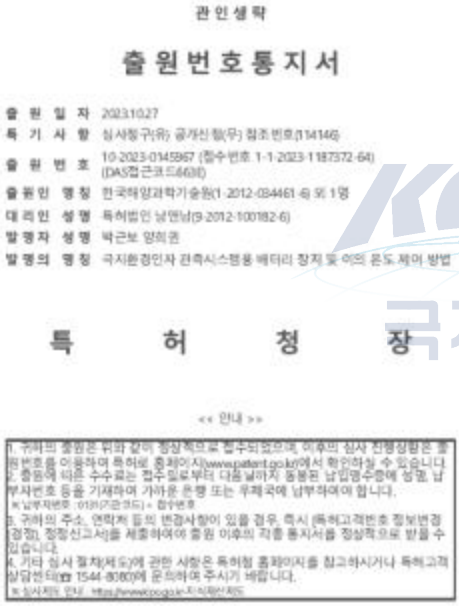
관측 거점	기온 변화에 따른 식생 호흡 변화
미국 (알래스카 카운실)	 RECO = 1.03exp(0.084T), r2 = 0.82 (2019년 6월 자료 사례)
캐나다 (캠브리지베이)	 RECO = 0.32exp(0.13xT), r2 = 0.86 (2022년 6~9월 자료 사례)

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
정량-6	온도제어 방안 특허출원(정량-3차년도)



- 저온환경에서 운영되는 배터리의 성능과 수명을 높이기 위해 배터리의 온도를 제어하는 기술
- 극저온 환경에서 운영되는 환경인자 관측시스템의 배터리 함체 온도를 제어하여 배터리 성능을 최적화하는 방법과 장치



관인생략

출원번호통지서

출 원 일 자 2023.10.27
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(114146)
출 원 번 호 10-2023-0145967 (접수번호 1-1-2023-1187372-64)
(DAS접근코드:6438)
출원인 명칭 한국해양과학기술원(1-2012-084461-6) 외 1명
대리인 성명 특허법인 남앤남(9-2012-100182-6)
발명자 성명 박근보 양희준
발명의 명칭 극지환경인자 관측시스템용 배터리 장치 및 이의 온도 제어 방법

특 허 청 장

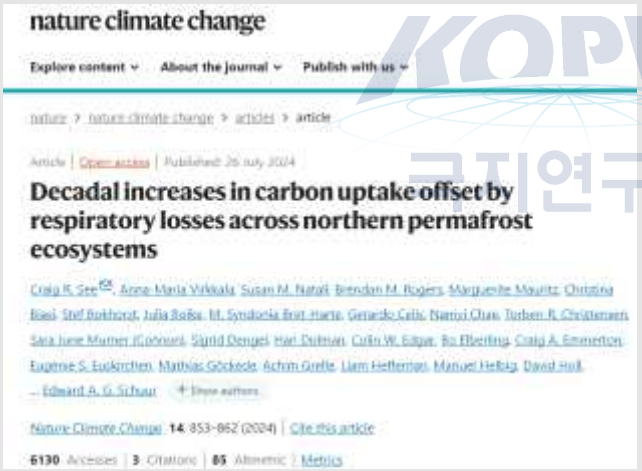
<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 이용하여 특허로 홈페이지(www.patent.go.kr)에서 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음 날까지 등록된 납입명수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 은행 또는 우체국에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 이하(구분코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(정정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
4. 기타 심사 절차(제도)에 관한 사항은 특허청 홈페이지를 참고하시거나 특허고객상담센터(☎ 1544-8080)에 문의하여 주시기 바랍니다.
※ 심사처리 안내 : https://www.kipo.go.kr/심사처리안내

- 전력 공급이 까다로운 극지 환경에서 극지와 같은 저온 환경에서 환경인자 관측장치에 전력을 제공하는 충전 배터리 성능을 최적화할 온도 제어 방법 필요
- 데이터 획득의 신뢰성 확보를 위해 극지 환경인자 관측시스템용 배터리 장치는 극지와 같은 극저온 환경에서도 최적의 성능을 발휘할 수 있는 배터리 장치 및 배터리 장치의 온도 제어 방법을 제공

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
정량-7	북극 동토 탄소순환 분석논문(정량-4차년도)



nature climate change

Explore content ~ About the journal ~ Publish with us ~

nature > nature climate change > articles > article

Article | Open access | Published: 26 July 2024

Decadal increases in carbon uptake offset by respiratory losses across northern permafrost ecosystems

Craig R. See, Anna-Maria Virkkala, Susan M. Natali, Brendan M. Rogers, Marguerite Mauritz, Christina Biasi, Stef Bokhorst, Julia Boike, M. Syndonia Bret-Harte, Gerardo Celis, Namrol Chae, Torben R. Christensen, Sara June Marie Cooper, Sigrid Dengel, Han Dolman, Colin W. Edgar, Bo Elberling, Craig A. Emmerton, Eugenie S. Euskirchen, Mathias Göckede, Achim Grelle, Liam Heffernan, Manuel Helbig, David Holl, ... Edward A. G. Schuur + Show authors

Nature Climate Change 14, 853–862 (2024) | Cite this article

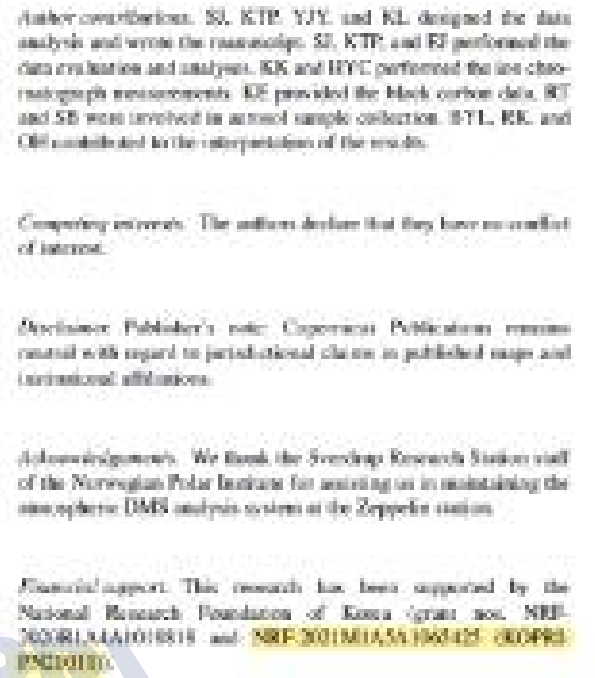
6130 Accesses | 3 Citations | 85 Altmetric | Metrics

- 알래스카 카운실 동토거점 자료활용
- 툰드라-북방림 탄소 교환 특성 규명 참여
- 북극 및 북방림 탄소 순환 이해를 위해서는 툰드라 지역 이산화탄소 교환 자료의 중요성 강조됨

※2023년도 투고하여 2024년 출판됨

번호	관련증빙 명
정량-8	북극 에어로졸 생성 및 성장 관련, DMS 논문 등 발간(정량-2차년도)

Large seasonal and interannual variations of biogenic sulfur compounds in the Arctic atmosphere (Svalbard; 78.9° N, 11.9° E)



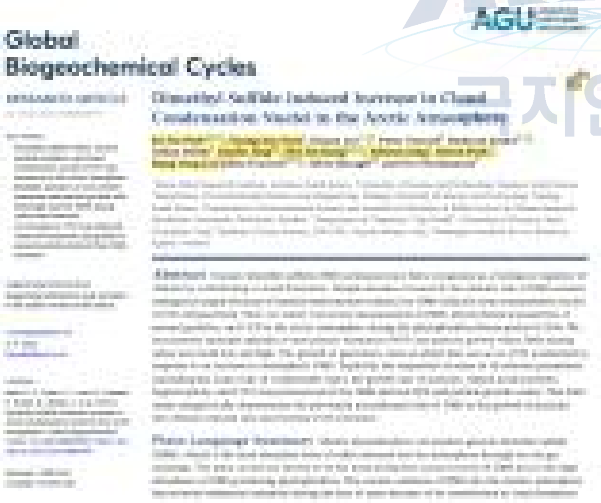
Author contributions. SL, KTP, YJY, and KL designed the data analysis and wrote the manuscript. SL, KTP, and BJ performed the data evaluation and analyses. KK and HYC performed the ion chromatograph measurements. KE provided the black carbon data. BT and SB were involved in aerosol sample collection. BYL, BK, and OH contributed to the interpretations of the results.

Competing interests. The authors declare that they have no conflict of interest.

Disclaimer. Publisher's note: Copernicus Publications remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Acknowledgements. We thank the Svalbard Research Station staff of the Norwegian Polar Institute for assisting us in maintaining the atmospheric DMS analysis systems at the Zeppelin station.

Financial support. This research has been supported by the National Research Foundation of Korea (grant nos. NRF-2020R1A4A1018818 and NRF-2021M1A5A1065425 (KOPRI PN21011).



Global Biogeochemical Cycles

Dimethyl Sulfide Induced Isotropic to Cloud Condensation Nuclei in the Arctic Atmosphere

KOPRI 극지연구소

번호	관련증빙 명
정량-9	중위도-저위도 해양 속 유기물 특성 분석 논문 발간(정량-3차년도)

Ji-Hyun Kim: Writing – review & editing. **Jong Hyun Kim**: Writing – review & editing. **Yang Bi Lee**: Writing – review & editing. **Sang Yong Lee**: Project administration, 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.

Acknowledgment

We are grateful to the captain and crew of the R/V Araon for their assistance during the study. This research was supported by KOPRI projects (PE22030) and partly supported by grants from the Korean Government (MEST) (NRF-2022M1A5A1068425, KOPRI-PN22011).

KOPRI
극지연구소

번호	관련증빙 명
정량-10	북극 유기 에어로졸 계절적 발생 특성 관련 논문 발간(정량-4차년도)

Environmental Science and Ecotechnology

Original Research

Seasonal dynamics of airborne biomolecules influence the size distribution of Arctic aerosols

Eunho Jang, Ki-Tae Park, Young Jun Yoon, Kyoung-Soon Jang, Min Sung Kim, Kitae Kim, Hyun Young Chung, Mauro Mazzola, David Cappelletti, Bang Yong Lee

ARTICLE INFO

ABSTRACT

1. Introduction

CRediT authorship contribution statement

Eunho Jang: Writing - Review & Editing, Writing - Original Draft, Visualization, Formal analysis. **Ki-Tae Park:** Writing - Review & Editing, Writing - Original Draft, Supervision, Conceptualization. **Young Jun Yoon:** Writing - Review & Editing, Conceptualization. **Kyoung-Soon Jang:** Writing - Review & Editing, Conceptualization. **Min Sung Kim:** Writing - Review & Editing, Investigation. **Kitae Kim:** Writing - Review & Editing, Conceptualization. **Hyun Young Chung:** Writing - Review & Editing, Investigation. **Mauro Mazzola:** Writing - Review & Editing, Investigation. **David Cappelletti:** Writing - Review & Editing. **Bang Yong Lee:** Writing - Review & Editing, Resources.

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.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation (NRF) of Korea NRF-2021M1A5A1065425 (KOPRI-PN24011). The FT-ICR MS analysis was supported by the Korea Basic Science Institute under the R&D program (Project No. C330430) supervised by the Ministry of Science and ICT. We would like to extend our gratitude to our Italian colleagues at the Italian National Council of Research (CNR) for hosting our aerosol sampler at the Gruvebadet Observatory.

극지연구소

□ 1위탁과제(광주과기원 : 북극권 환경변화에 따른 나노사이즈 미세먼지 생성 및 특성 변화 연구)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정량) 북극권 나노입자 특성 장기 및 집중 관측자료 확보	50	1	1차년도 (1단계 1차년도)	▪ 북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행	– COVID19 재확산으로 인해 현장 관측 일정이 늦어졌으나, 21년 11월부로 현장관측을 성공적으로 수행하였음 (100%)	위탁과제보고서 1. 국내 학술회의 발표 5건 2. 국제 학술회의 발표 5건 3. 국제 논문 게재 3건 4. 수상 실적 1건 5. 인력양성 실적 4건 (박사 2명, 석사 2명) 6. 해외파견 1건 ("북극항해를 통한 나노입자의 크기 분포 및 수농도 집중 관측") 7. 나입입자 크기분포 및 수농도 장기 관측 데이터 확보 및 KPDC 데이터 등재
			2차년도 (1단계 2차년도)	▪ 북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기 관측 수행 ▪ 북극권 에어로졸의 물리화학적 특성, 기상 및 가스 자료 등을 국제공동연구진과 협력을 통해 추가 확보	– 북극권 환경변화 요인을 파악하기 위해 에어로졸 이온성분, 가스 자료, 기상 자료 등을 국제공동연구진과 협력을 통해 확보 (+ 인공위성 활용 바다 chlorophyll 농도, 바다 표면 온도, 해빙 면적 등 자료, 공기괴 역궤적 모델 (기상장 기반) 자료 추가 확보) (100%) – 3~60 nm 크기 범위의 나노입자 수농도 분포 연속 관측 수행 및 자료 확보 및 등재 (100%)	
			3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기 분포 및 수농도 상시 장기 관측 수행 ▪ 북극 항해를 통한 나노입자의 크기분포 및 수농도 관측 수행	– 3~60 nm 크기 범위의 나노입자 수농도 분포 연속 관측 수행 및 자료 확보 (장기 및 집중 관측) (100%) – 아이슬란드 기지 인프라 구축이 늦어짐에 따라 북극해 선박 관측으로 대체 (100%)	
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 북극 다산과학기지에서 대기 중 나노입자의 크기 분포 및 수농도 상시 장기 관측 수행	– 3~60 nm 크기 범위의 나노입자 수농도 분포 연속 관측 수행 및 자료 확보 (장기 및 집중 관측) (100%)	
(정성) 북극권 환경변화에 따른 나노입자의 생성 원인 변화 규명	50	2,3	3차년도 (2단계 1차년도)	▪ 다양한 지역/계절/시간 변화에 따른 나노입자의 생성률, 성장률, 발생조건 비교	– 확보된 데이터를 이용하여 분석에 활용 (100%) – 인공지능 기법을 활용하여 나노입자의 특성 비교 수행 (100%)	
			4차년도 (2단계 2차년도)	▪ 북극권 환경변화 요인(대기 온도, 습도, 바닷물 특성 (온도, 생물학적 특성 등))과 나노입자의 생성 및 성장 관련성 규명 ▪ 북극권 나노입자 발생 및 생성에 기여하는 인위적/자연적 요인 파악 ▪ 다양한 지역 (도심, 농촌 지역 등)에서 확보된 나노입자 특성의 차별성 및 유사성 도출	– 북극권 환경변화 요인을 파악하기 위해 대기온도, 습도, 바닷물 특성, 해빙의 면적, chlorophyll 농도 등과 나노입자의 생성 및 성장 관련성을 규명하기 위한 분석 수행 (100%) – 확보된 데이터와 hysplit model를 활용하여 나노입자 생성에 기여하는 요인 파악 (100%) – 다양한 지역에서 확보된 데이터를 이용하여 지역적 나노입자 생성 특성 분석 수행 (100%)	
합계	100					

KOPRI 극지연구소

□ 2위탁과제(광주과기원 : 북극권 미세먼지 예측 개선을 위한 대기질 모델링 고도화)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
북극권 대기질 모델링 시스템 고도화	60	1	1차년도 (1단계 1차년도)	– 대기화학모델 입력 자료 (배출량 및 기상자료)를 북극권 지역에 대해 분석	– 북극권 배출량 자료 확보 및 다양한 인벤토리의 물질별 시공간 분석(100%) – 기상자료 확보 및 월별 시간별 바람장 분석 (100%)	**위탁과제보고서** 보고서 본문 (Tables 1–3 및 Fig. 2) 및 증빙 1
			2차년도 (1단계 2차년도)	– 기상 모델 구동 및 대기화학 모델 민감도 테스트 수행 – 민감도 테스트를 통한 최적 조건 확보 (2019년 2개월 대상)	– 모델 및 지상/위성관측 자료 비교를 통한 모델 성능 평가(100%) – 각종 입력자료를 기초로 모델링 10개 사례 선정 및 결과 분석(100%)	**위탁과제보고서** 보고서 본문 (Tables 5–6 및 Fig. 3) 및 증빙2
			3차년도 (2단계 1차년도)	– 최적화 조건 대기화학 모델링 수행 (Optimized Run 모의 자료 생성) – 2019년 대상	– 최적화 조건 대기화학 모델링 구동 (2019년 대상)(100%) – 모델모의 성능 평가 (지상 관측 자료 활용) – 모델모의 성능평가 (위성관측 자료 활용) (100%)	**위탁과제보고서** 보고서 본문 (Fig. 4–7 및 Table 7) 및 증빙3
			4차년도 (2단계 2차년도)	– Optimal Interpolation 기법 자료동화 수행 – Optimized Run 모의 자료 및 MODIS/AERONET 광학 관측 자료 통합 활용	– 자료동화 수행 완료(100%) – 위성 및 지상원결관측 자료와 비교하여 재분석 자료 성능 평가 완료 (100%)	**위탁과제보고서** 보고서 본문 (Fig. 9–12) 및 증빙4
위성관측자료 장기 트랜드 분석	40	2	1차년도 (1단계 1차년도)	– 2016년 – 2018년 MODIS 관측 광학특성 자료 분석	– MODIS 센서 관측 에어로졸 광학적 두께 시공간 분포 분석 (100%)	**위탁과제보고서** 보고서 본문 (Fig. 13) 및 증빙5
			2차년도 (1단계 2차년도)	– 2019 – 2021년 MODIS 관측 광학특성 자료 분석	– MODIS 센서 관측 에어로졸 광학적 두께 시공간 분포 분석 (100%)	**위탁과제보고서** 보고서 본문 (Fig. 14–15) 및 증빙5
			3차년도 (2단계 1차년도)	– 2022년 MODIS 관측 광학특성 자료 분석 – Optimized Run 모의 성능 평가용 지상/위성 관측망 자료 분석	– MODIS 관측 에어로졸 광학적 깊이 시공간 분포 분석(100%) – 모의성능 평가용 자료 처리(100%)	**위탁과제보고서** 보고서 본문 (Fig. 16) 및 증빙5
			4차년도 (2단계 2차년도)	– 2016년 – 2023년 MODIS 관측 종합 분석 – (RFP 충족) SCI급 논문 1편	– MODIS 관측 에어로졸의 광학특성 자료종합 분석 (에어로졸 장기 경향, 시공간적 특성 및 에어로졸 분류 등) (100%)	**위탁과제보고서** 보고서 본문 (Fig. 18–20), 증빙 6 및 논문 (증빙7)
합계	100					

□ 3위탁과제(경인여대 : 북극지역 대기 에어로졸의 조성 및 흡습성에 따른 광학특성 파악)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정성) 북극지역 대기 미세먼지 의 유 · 무기 조성에 따른 광학특성 파악	30	1,2,3	1차년도 (1단계 1차년도)	○ 북극지역 대기 미세먼지 물리화학적 특성 연구	북극지역 CCN농도와 에어로졸 물리화학적 조성 관련 연구 (100%)	**위탁과제보고서** 1-1 게재논문
			2차년도 (1단계 2차년도)	○ 북극지역 대기 미세먼지 흡습 특성과 광학적 특성 관계 규명	북극지역 대기 미세먼지 흡습 특성과 광학적 특성 관계파악 (100%)	**위탁과제보고서** 2-1 광학특성 모수화 process diagram 및 산출물
			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 북극지역 대기 미세먼지 조성 특성과 광학적 특성 관계 규명	흡습성과 광학특성을 연계할 수 있는 범용적 κ-κsca 관계식 도출 연구 (100%)	**위탁과제보고서** 3-1. 게재논문
			4차년도 (2단계 2차년도)	○ 북극 미세먼지의 크기분포 및 흡습성장 특성에 따른 파악	북극지역 에어로졸 크기분포 및 흡습성장 계수 관련 자료 (100%)	**위탁과제보고서** 4-1. 에어로졸 크기 및 흡습성장변수 분석
(정량) 북극지역 에어로졸의 조성에 따른 광학계수 산출	25	1,2,3	1차년도 (1단계 1차년도)	○ 북극지역 에어로졸의 조성 농도 확보 (조성농도자료 산출 1건)	북극지역(제플린 측정소) 무기이온 에어로졸 조성 농도측정 결과 산출 (100%)	**위탁과제보고서** 1-2.에어로졸 조성 농도자료 산출
			2차년도 (1단계 2차년도)	○ 북극지역 유 · 무기 에어로졸의 조성에 따른 산란계수 모수화 (산란계수 모수화 자료산출 1건, SCI논문 1편)	북극지역 에어로졸의 조성에 따른 산란계수자료 (100%)	**위탁과제보고서** 2-2.산란계수 자료
			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 북극지역 유 · 무기 에어로졸의 조성에 따른 산란 및 흡수계수 변화 특성 파악 (유,무기 에어로졸 흡수계수 자료산출 1건, SCI논문 1편)	- 북극지역 유무기 에어로졸 농도에 따른 에어로졸 흡습성 파악 (100%) - 유무기 에어로졸을 포함한 다양한 조성의 흡습성과 광학특성 모수화 (100%)	**위탁과제보고서** 3-2. 유무기 에어로졸 농도의 흡습성 비교 분석 결과
			4차년도 (2단계 2차년도)	○ 북극 미세먼지의 크기분포 및 흡습성장 특성에 따른 광학특성 모수화	다분산 크기분포를 가진 에어로졸의 크기에 따른 광학특성 모수화 (100%)	**위탁과제보고서** 4-2. 모수화 과정 알고리즘 개략도
(정량) 북극지역 에어로졸의 흡습성장 및 수분에 따른 에어로졸 화학 및 기후영향 모수화	25	1,2,3	1차년도 (1단계 1차년도)	○ 북극지역 미세먼지 생성 전구물질 측정자료 확보 (전구물질 측정자료 산출 1건)	북극지역(제플린 측정소) O3, SO2, NO2 등 가스상 전구물질 농도측정 결과 확보 (100%)	**위탁과제보고서** 1-3.전구물질(가스상 물질) 측정자료 경향 분석
			2차년도 (1단계 2차년도)	○ 북극지역 유 · 무기 에어로졸의 조성에 따른 흡습성 모수화 (유무기 에어로졸의 흡습성 모수화 자료 산출 1건)	북극지역 에어로졸의 조성에 따른 흡습성 모수화 (100%)	**위탁과제보고서** 2-3. 흡습성 산출 자료 및 측정값 비교

			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성과정 모사 (수분에 의한 황산염 모수화 농도자료 산출 1건, SCI논문 1편)	북극지역 미세먼지의 액상반응(생성 및 제거)이 미세먼지 생성에 미치는 영향 파악 (100%)	**위탁과제보고서** 3-3. 북극지역 액상반응 분석 결과 3-4. 액상 습식 제거 관련 게재 논문
			4차년도 (2단계 2차년도)	○ 북극지역 황산염 미세먼지 특성에 영향 요소 분석	Covid 전후의 황산염 미세먼지 농도 추이 분석	**위탁과제보고서** 4-3. 추이분석 결과
(정량) 북극지역 대기 미세먼지 조성관련 정보 획득	20	1,2,3	1차년도 (1단계 1차년도)	○ 최근 3년간 북극지역 대기 미세먼지의 조성관련 변화 Trend 파악 ○ 원격자료를 통한 최근 3년간 대기 미세먼지 조성 변화 Trend 파악(미세먼지 조성자료 산출 1건)	– 확보된 측정자료 기반 미세먼지 조성 등의 시계열 분석 (100%) – 동일기간 위성 등 원격자료 추출 및 자료 확보 (100%)	**위탁과제보고서** 1-4. 에어로졸 조성별 시계열 1-5. 원격자료를 이용한 극지 AOD변화
			2차년도 (1단계 2차년도)	○ 최근 3년간 북극지역 대기 미세먼지의 산란관련 측정 변화 Trend파악 ○ 최근 3년간 북극지역 대기 미세먼지의 흡수관련 측정 변화 Trend파악 (미세먼지 산란, 흡수자료 산출 1건)	Zeppelin지역 미세먼지 산란 및 흡수계수 Trend 분석 (100%)	**위탁과제보고서** 2-3 미세먼지 산란, 흡수계수 경향 분석
			3차년도 (2단계 1차년도)	○ 환북극지역 2개 측정 지점 이상의 미세먼지 화학 조성관련 정보 획득 ○ 환북극지역 2개 측정 지점 이상의 미세먼지 산란 및 흡수계수 관련 정보 획득 (측정지점의 미세먼지 조성자료 산출 1건)	– Zeppelin 미세먼지 조성 자료 및 북극항차 환북극 지역 미세먼지 화학조성 측정 (100%) – Zeppelin 및 환북극 지역 산란 및 흡수계수자료를 이용, 에어로졸 수분 특성 및 모수화 연구 적용 (100%)	**위탁과제보고서** 3-5. 북극 항차 측정자료 현황 및 미세먼지 및 광학 특성 자료
			4차년도 (2단계 2차년도)	○ 북극지역 에어로졸의 광흡수특성 분석 (BC/CO 분석 결과 1건) ○ 북극지역 대기 수분에 의한 황산염 생성 기여도 산출 (북극지역 반응별 황산염 기여도 자료 분석결과 1건)	– 북극지역 에어로졸의 광흡수특성 분석 및 기여도 분석(100%) – 북극지역 황산염 등 흡습성 입자의 대기 수분에 의한 CCN/IN 등 에어로졸 생성모사(100%) – Arctic Haze를 포함한 황산염 고농도 사례의 액상반응에 의한 황산염 생성 매커니즘 파악 및 액상반응에 의한 기여도 파악 (100%)	**위탁과제보고서** 4-4.BC/CO 분석 결과 4-5. 황산염 기여도 산출 알고리즘 4-6. 게재논문
합계	100					

□ 4위탁과제(고려대 : 북극권 환경 변화와 기후변화감시물질 변동성 상호연계성 연구)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정량) 북극, 유라시아, 아시아 지역 기후/환경인자 및 기후변화감시요소 중 대기조성물질 자료 조사 및 수집	30	1	1차년도 (1단계 1차년도)	기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 자료 수집(관측과 재분석 위주)	2차 연도 자료산출: 재분석 및 위성 관측으로부터 기후 7건, 환경 2건, 해양 5건, 대기조성 5건 총 19건 수집 (100%)	**위탁과제보고서** 1차 연도 보고서: p4~p28
			2차년도 (1단계 2차년도)	다양한 모델로부터 기후/환경인자 및 대기조성물질 자료 수집		
			3차년도 (2단계 1차년도)	신규 데이터 지속적 업데이트		**위탁과제보고서** 2차 연도 보고서: p8~p18
			4차년도 (2단계 2차년도)	해당사항 없음		
(정량) 북극권 기후/환경인자 및 북극, 유라시아, 아시아 지역 기후변화감시요소 중 대기조성물질 자료 검증	30	2	1차년도 (1단계 1차년도)	2차년도부터 수행	수집된 자료 중 산불기원 에어로졸 영향 연구에 사용된 인자와 기후 바람 인자를 제외하고 시공간 시각화 (100%)	**위탁과제보고서** 2차 연도 보고서: p8~p18
			2차년도 (1단계 2차년도)	기후/환경/해양 인자 및 대기조성물질 변화/변동 경향 분석정보 산출 (자료 산출물에 대한 시공간 분포 시각화 포함, 총 12건)		
			3차년도 (2단계 1차년도)	해당사항 없음		
			4차년도 (2단계 2차년도)	해당사항 없음		
(정량/정성) 기후/환경인자 및 기후변화감시요소 중 대기조성물질 자료 시공간 지역별 변동성 분석 및 이해	40	3	1차년도 (1단계 1차년도)	3차년도부터 수행		
			2차년도 (1단계 2차년도)	3차년도부터 수행		
			3차년도 (2단계 1차년도)	지역별 기후/환경인자 및 대기조성물질 자료 시공간 변동성 분석(국내 논문 1건)	북극 환경변화에 따라 오염물질이 어떤 영향을 받는지 이해하기 위해 대기조성물질 배출이 높은 지역별 기후인자와 대기 조성물질의 연관성을 확인한 결과를 국문 논문으로 출판(3차연도) (100%)	**위탁과제보고서** 3차 연도 보고서 및 국문 논문 "기후인자와 관련된 동아시아 봄과 가을 PM 2.5 농도 이해" 기후연구지 18(3) 197-208 (증빙2)
			4차년도 (2단계 2차년도)	기후/환경인자 및 대기조성물질 자료 시공간 변동성 분석 및 이해(SCIE급 논문 1건, mrnIF 70이상))	Marine Pollution Bulletin 영문 논문 출판 (100%)	**위탁과제보고서** Marine Pollution Bulletin, 201, 116149. (증빙1)
합계	100					

KOPRI 극지연구소

□ 5위탁과제(고려대 : 북극권 환경변화에 따른 식생별 탄소 flux의 거동 연구)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정성) 북극 툰드라 생태계의 주요 식생별 탄소 플럭스 분석	30	1	1차년도 (1단계 1차년도)	북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	환북극 지역 툰드라 식생의 특징과 종류 및 환경을 파악하고 툰드라 생태계에서의 이산화탄소 플럭스의 발생과 흡수 관련 조건을 파악(100%)	**위탁과제보고서** 1. page 7~8
			2차년도 (1단계 2차년도)	북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정 (RFP 충족) (관련 SCI급 논문 1편)	관목, 초본, 이끼류, 지의류 등 다양한 식생에서 순이산화탄소 교환량과 호흡량을 이용하여 광합성량을 추정하였고, 일부 관련 자료를 이용한 논문 출판(100%)	**위탁과제보고서** 2. page 12, 16~17, 3. Virkkala et al.(2022)
			3차년도 (2단계 1차년도)			
			4차년도 (2단계 2차년도)			
(정성) 북극 동토의 다양한 환경조건에서 식생별 탄소 플럭스 거동 분석	30	1,2	1차년도 (1단계 1차년도)	북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	환북극 지역의 다양한 환경에서 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 및 광합성량의 분포와 정량적인 값을 파악(100%)	**위탁과제보고서** 4. page 10~11
			2차년도 (1단계 2차년도)	북극 동토의 다양한 환경조건에서 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석	식생 및 토양 조건에 따른 이산화탄소와 메탄 플럭스를 분석하였고, 습한 초지에서 활발한 이산화탄소 교환량을 확인할 수 있었고,, 메탄 플럭스는 습한 나지에서 지속적으로 대기로 방출하였음(100%)	**위탁과제보고서** 5. page 11~13
			3차년도 (2단계 1차년도)	북극 동토의 다양한 환경조건에서 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석	극지의 주요 식생인 초본, 이끼류, 지의류에서 기온과 토양 수분에 따른 해빙시기 이산화탄소 및 메탄플럭스를 측정하여 광합성을 통한 식생의 흡수와 미생물에 의한 대기중 방출을 통해 탄소 플럭스 변화를 파악(100%)	**위탁과제보고서** 6. page 14 ~15
			4차년도 (2단계 2차년도)			
(정량) 툰드라 생태계 탄소플럭스 자료(DB) 구축	20	1,2	1차년도 (1단계 1차년도)	북극 해빙시기의 다양한 식생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	7월부터 9월 초까지 알래스카 식생 성장기 전반에 대하여 알래스카 관목과 이끼류에 대하여 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 자료를 확보하고 이를 이용해 광합성량을 계산하여 탄소순환을 구성하는 각 성분별 탄소플럭스 자료를 확보하였고 관련 자료를 이용한 논문 출판(100%)	**위탁과제보고서** 7. page 17 **위탁과제보고서** 8. Virkkala et al.(2021)
			2차년도	북극 해빙시기의 다양한 식	다양한 식생과 환경 조건에 대	**위탁과제보고서**

			(1단계 2차년도)	생별 순 이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	한 온실기체 플럭스의 반응을 조사하고자 해빙시기의 자동 챔버 시스템을 구축하여 이산화탄소 플럭스 자료를 확보(100%)	9. page 18~19
			3차년도 (2단계 1차년도)	북극 동토의 다양한 환경조건에서 주요 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석 (RFP 충족) (관련 SCI급 논문 1편, 상위 20% 이내)	북극의 해빙기 동안 초본, 이끼, 지의류 등 다양한 식생에 대하여 토양 상태가 습한 정도, 식생의 유무, 인위적인 수분 조절(snow fence), 실내 토양수분 조절 실험(SCI급 논문 1편 출판) 등 다양한 환경조건에 따른 이산화탄소 및 메탄 플럭스 자료를 확보하여 세부1의 에디공분산 자료와의 비교하고, 나아가 모델링 검증 자료로 확보(100%)	**위탁과제보고서** 10. page 15, 19~20 **위탁과제보고서** 11. Kim et al.(2022) 논문
			4차년도 (2단계 2차년도)			
(정성) 북극 툰드라 생태계 탄소순환에서 식생의 역할 규명	20	1,2	1차년도 (1단계 1차년도)	북극 해빙시기의 주요 식생별 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	북극 식생의 성장기 동안 관목과 이끼류에 대하여 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 자료를 이용해 광합성량을 추정하면서 관목과 이끼류 식생에서의 이산화탄소 플럭스 차이를 확인할 수 있었음(100%)	**위탁과제보고서** 7. page 17
			2차년도 (1단계 2차년도)	북극 해빙시기의 주요 식생별 순이산화탄소 교환량과 생태계 호흡량 정량화 및 광합성량 추정	이끼, 초본, 지의류가 혼합된 지점에서 이산화탄소 플럭스를 분석하였고, 순이산환탄소 플럭스와 호흡량을 이용하여 광합성량을 추정하였음(100%)	**위탁과제보고서** 12. page 11~12
			3차년도 (2단계 1차년도)	북극 동토의 다양한 환경조건에서 주요 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석	북극 툰드라 생태계에서 식생의 광합성을 조절하는 인자 중 해빙시기에 매우 중요한 토양수분 조건을 고려하여 탄소 플럭스 변화를 감시하면서 식생의 역할을 조사(100%)	**위탁과제보고서** 13. page 14
			4차년도 (2단계 2차년도)	북극 동토의 다양한 환경조건에서 주요 식생별 이산화탄소 및 메탄 플럭스의 발원(흡원) 분석	토양 수분이 지속적으로 공급되는 초본 식생에서 이끼류와 지의류에서 보다 큰 차이(~3배)의 광합성과 호흡량의 차이를 보임. 해빙시기 탄소 플럭스의 정량적인 값을 이용하여 두 편의 논문 출판(100%)	**위탁과제보고서** 14. page 16 15 Lee et al(2024) 논문 16. See et al.(2024) 논문
합계	100					

□ 6위탁과제(서울대 : 위성 영상 기반 북극 동토지역 이산화탄소 플럭스 모니터링)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정성) BESS-Polar를 모델을 위한 입력자료 구축 및 데이터 전처리	20	1	1차년도 (1단계)	▪ 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발을 위한 입력자료 다운로드 및 전처리 - 모델 입력자료 구축 (위성 자료 다운로드 및 그리드화된 자료들 구축) - 데이터 전처리 (공간해상도를 0.05도로 바꾸고, WGS-84 위경도로 재투영)	- BESS-Polar 모델 입력자료 정리(100%) - 입력자료 다운로드 (위성자료 포함)(100%) - 입력자료 간 다른 공간좌표 재투영 (WGS-84) 및 0.05° 공간해상도에 맞추어 리샘플링(100%)	**위탁과제보고서** 첨부1-관련증빙1 참고
			2차년도 (1단계)	▪ 생물리기작 모델 BESS-Polar을 개발하여 호흡 모듈 개발 - 시공간적으로 일관된 자료 구축 (AVHRR과 MODIS 자료가 겹치는 기간 동안 교차 보정	- 1단계 1차년도에 수행된 자료들을 바탕으로 AVHRR 기반 입력자료들을 MODIS에 맞추어 상호교정 수행 완료(100%)	**위탁과제보고서** 첨부1-관련증빙2 참고
(정성) BESS-Polar를 개발하고, 생태계호흡량 및 순생태계교환량 모듈 개발	20	1	1차년도 (1단계)	▪ 생물리기작 모델 BESS-Polar 개발을 위한 입력자료 구축 및 데이터 전처리	- BESS-Polar 모델 입력자료 정리(100%) - 입력자료 다운로드 (위성자료 포함)(100%) - 입력자료 간 다른 공간좌표 재투영 (WGS-84) 및 0.05° 공간해상도에 맞추어 리샘플링(100%)	**위탁과제보고서** 첨부1-관련증빙1 참고
			2차년도 (1단계)	▪ 생물리기작 모델 BESS-Polar을 개발하여 호흡 모듈을 개발하여 총일차생산량, 생태계호흡량, 순 생태계교환량 산출 - 프로그래밍으로 알고리즘 구현 및 스크립트 작성하여 제시	- 호흡 및 순 생태계교환량 모듈이 포함된 BESS-Polar 스크립트 작성(100%)	**위탁과제보고서** 첨부1-관련증빙3 참고
			3차년도 (2단계)	▪ 1982-2022년 기간동안의 BESS -Polar 탄소 플럭스 지도 제작	- 1단계를 통해 개발된 BESS-Polar의 정량화된 탄소 플럭스 지도 제작 (100%)	**위탁과제보고서** 첨부1-관련증빙4 참고
(정성) BESS-Polar 탄소 플럭스를 현장 단위 및 지역 단위 성능 평가	20	1,2,	2차년도 (1단계)	▪ 생물리기작 모델 BESS -Polar의 호흡 모듈을 개발하여 총일차생산량, 생태계호흡량, 순 생태계교환량 산출	- 생물리기작 모델 BESS-Polar의 정량화된 탄소 플럭스 지도(100%)	**위탁과제보고서** 첨부1-관련증빙4 참고
			3차년도 (2단계)	▪ BESS-Polar 탄소 플럭스를 현장 단위에서	- FLUXNET과 KPDC의 현장 자료를 활용하여	**위탁과제보고서** 첨부1-관련증빙5 참고

				평가 (FLUXNET과 극지연수고 자료를 활용하여 현장검증) ▪ BESS-Polar 탄소 플럭스를 지연 단위로 평가 (머신러닝기반의 국외 모델의 탄소플럭스와 비교검증)	BESS-Polar과 비교, 분석 (100%) - FLUXCOM의 탄소 플럭스 모델과 BESS-Polar 비교 분석(100%)	
(정성) 극지방의 순 생태교환량을 시공간 패턴을 분석 (1982~2022)	20	2	4차년도 (2단계)	▪ 극지방 탄소 플럭스의 연간 변동성 분석	- 1982~2022년 기간 동안 북위 60도 이상 극지방의 탄소플럭스(총일차생산량, 호흡량 및 순 생태계교환량)의 추세파악을 위한 시간적 변화패턴 분석(100%) - 1982~2022년 기간 동안의 극지방 탄소플럭스의연간 변동성 분석(100%)	**위탁과제보고서** 첨부1-관련증빙6 참고
(정량) 논문 또는 특허 창출 계획	20	1,2	**4차년도** (2단계 2차년도)	▪ 개발한 호흡 모듈 혹은 순생태계교환량을 활용한 mrnIF 80 이상의 논문 1편 출판	- 개발한 호흡 모듈 혹은 순 생태계교환량을 활용한 mrnIF 80 이상의 논문 1편 출판(100%)	**위탁과제보고서** 첨부1-관련증빙7 참고
합계	100					

KOPRI 극지연구소

첨부2 **연구개발결과 활용계획서**

연구개발결과 활용계획서			
사업명	① 부처사업명(대) 원천기술개발사업 – ② 사업명(중) 해양극지기초원천기술개발사업 – ③ 세부사업명(소) 해양극지기초원천기술개발사업		
과제명	북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명		
주관연구기관명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	주관연구책임자 성명	이방용
총 연구기간	2021.04.27 ~ 2025.03.31 (48개월)	자체평가 해당 연구기간	2021.04.27 ~ 2025.03.31 (48개월)

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

가. 과학기술/학술적 연구성과

사업명	해양극지기초원천기술개발사업	연구책임자	이방용	주관기관	한국해양과학기술원 부설 극지연구소
과제번호	2021M1A5A1065425	과제명	북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명		

※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			국내	국제	출원		등록			저역서	보고서	국내	국제		
SCI	비SCI	SCI	비SCI				국내	국외	국내	국외							
1	0	31	1	0	11	15	3	0	0	0	5	1	2	0	0	0	0

인력양성 및 연구시설(단위 : 명,건)

학위배출		국내외 연수지원				산학강좌	연구기자재
박사	석사	장기		단기			
		국내	국외	국내	국외		
5	3	0	0	0	0	0	11

국제협력(단위 :명,건)

과학자교류		국제협력기반			학술회의개최
국내과학자	외국과학자	MOU체결	국제공동연구	국제사업참여	학술회의개최(국내,국제 통합)

해외파견	국내유치				
50	1	2	4	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	1	0	0	0

기타 성과(단위 : 건)

언론보도 성과	생명자원/신품종/화합물	원자력연구개발사업실적(원자력연구개발사업에한함)				법령반영	정책활용내용	설계기준
		기술보고서	설계문서	장비구축 및 개발	분석방법개발			
1	0	0	0	0	0	0	0	0

나. 전문학술지 논문게재 성과 정보

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202105	Characteristics of stem respiration in black spruce (Picea mariana) stand, interior Alaska	Kim, Yongwon; Lee, Bang-Yong; Kim, Seong-Deog; Suzuki, Rikie;	SCI	POLAR SCIENCE	29()	국외	SCI등재	1.927	예	50
2021M1A5A1065425	202106	Large seasonal and interannual variations of biogenic sulfur compounds in the Arctic atmosphere (Svalbard; 78.9 degrees N, 11.9 degrees E)	Jang, Sehyun; Park, Ki-Tae; Lee, Kitack; Yoon, Young Jun; Kim, Kitae; Chung, Hyun Young; Jang, Eunho; Becagli, Silvia;	SCI	ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS	21(12)	국외	SCI등재	6.133	예	50

KOPRI 극지연구소

			Lee, Bang Yong; Traversi, Rita; Eleftheriadis, Konstantinos; Krejci, Radovan; Hermansen, Ove;								

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202107	Dimethyl Sulfide-Induced Increase in Cloud Condensation Nuclei in the Arctic Atmosphere	Park, Ki-Tae; Yoon, Young Jun; Lee, Kitack; Tunved, Peter; Krejci, Radovan; Strom, Johan; Jang, Eunho; Kang, Hyo Jin; Jang, Sehyun; Park, Jiyeon; Lee, Bang Yong; Traversi, Rita; Becagli, Silvia; Hermansen, Ove;	SCI	GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES	(0)	국외	SCI등재	5.703	예	50

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202108	Soil respiration strongly offsets carbon uptake in Alaska and Northwest Canada	Watts, Jennifer D.; Natali, Susan M.; Minions, Christina; Risk, Dave; Arndt, Kyle; Zona, Donatella; Euskirchen, Eugenie S.; Rocha, Adrian, V; Sonnentag, Oliver; Helbig, Manuel; Kalhori, Aram; Oechel, Walt; Ikawa, Hiroki; Ueyama, Masahito; Suzuki, Rikie; Kobayashi, Hideki; Celis, Gerardo; Schuur, Edward	SCI	ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS	16()	국외	SCI등재	6.793	예	20

KOPRI 극지연구소

			A. G.; Humphreys, Elyn; Kim, Yongwon; Lee, Bang-Yong; Goetz, Scott; Madani, Nima; Schiferl, Luke D.; Commane, Roisin; Kimball, John S.; Liu, Zhihua; Torn, Margaret S.; Potter, Stefano; Wang, Jonathan A.; Jorgenson, M. Torre; Xiao, Jingfeng; Li, Xing; Edgar, Colin;								

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202108	Time-lapse electrical resistivity tomography and ground penetrating radar	Kim, Kwansoo; Lee, Joohan; Ju, Hyeonta	SCI	GEOSCIENCES JOURNAL	25()	국외	SCI등재	2.076	예	50

		mapping of the active layer of permafrost across a snow fence in Cambridge Bay, Nunavut Territory, Canada: correlation interpretation using vegetation and meteorological data	e; Jung, Ji Young; Chae, Namyi; Chi, Junhwa; Kwon, Min Jung; Lee, Bang Yong; Wagner, Johann; Kim, Ji-Soo;								

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202108	Statistical upscaling of ecosystem CO2 fluxes across the terrestrial tundra and boreal domain: Regional patterns and uncertainties	Virkkala, Anna-Maria; Aalto, Juha; Rogers, Brendan M.; Tagesson, Torbern; Treat, Claire C.; Natali, Susan M.; Watts, Jennifer D.; Potter, Stefano; Lehtonen, Aleksi; Mauritz, Marguerite;	SCI	GLOBAL CHANGE BIOLOGY	27(17)	국외	SCI등재	10.863	예	50

KOPRI 극지연구소

			Schuur, Edward A. G.; Kochendorfer, John; Zona, Donatella; Oechel, Walter; Kobayashi, Hideki; Humphreys, Elyn; Goeckede, Mathias; Iwata, Hiroki; Lafleur, Peter M.; Euskirchen, Eugenie S.; Bokhorst, Stef; Marushchak, Maija; Martikainen, Pertti J.; Elberling, Bo; Voigt, Carolina; Biasi, Christina; Sonnentag, Oliver; Parmentier, Frans-Jan W.;								

KOPRI 극지연구소

			Ueyama, Masahito; Celis, Gerardo; St.Louis, Vincent L.; Emmerton, Craig A.; Peichl, Matthias; Chi, Jinshu; Jarveoja, Jarvi; Nilsson, Mats B.; Oberbauer, Steven F.; Torn, Margaret S.; Park, Sang-Jong; Dolman, Han; Mammarella, Ivan; Chae, Namyi; Poyatos, Rafael; Lopez-Blanco, Efren; Christensen, Torben Rojle; Kwon, Min Jung; Sachs, Torsten; Holl,								

KOPRI 극지연구소

			David; Luoto, Miska;								

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202111	Carbon response of tundra ecosystems to advancing greenup and snowmelt in Alaska	Kim, JiHyun; Kim, Yeonjoo; Zona, Donatella; Oechel, Walter; Park, Sang-Jong; Lee, Bang-Yong; Yi, Yonghong; Erb, Angela; Schaaf, Crystal L.;	직접입력	NATURE COMMUNICATIONS	()	국외	SCI등재	14.919	예	13
2021M1A5A1065425	202112	Relationship between cloud condensation nuclei (CCN) concentration and aerosol optical depth in the Arctic region	Ahn, Seo H.; Yoon, Y. J.; Choi, T. J.; Lee, J. Y.; Kim, Y. P.; Lee, B. Y.; Ritter, C.; Aas, W.; Krejci, R.; Strom, J.; Tunved,	SCI	ATMOSPHERIC ENVIRONMENT	267()	국외	SCI등재	4.798	예	50

KOPRI 극지연구소

			P.; Jung, Chang H.;								

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202201	The ABCflux database: Arctic–boreal CO2 flux observations and ancillary information aggregated to monthly time steps across terrestrial ecosystems	Virkkala, Anna-Maria; Natali, Susan M.; Rogers, Brendan M.; Watts, Jennifer D.; Savage, Kathleen; Connon, Sara June; Mauritz, Marguerite; Schuur, Edward A. G.; Peter, Darcy; Minions, Christina; Nojeim, Julia; Commane, Roisin; Emmerton, Craig A.; Goeckede, Mathias;	SCI	EARTH SYSTEM SCIENCE DATA	14(1)	국외	SCI등재	11.815	예	5

KOPRI 극지연구소

			Helbig, Manuel; Holl, David; Iwata, Hiroki; Kobayashi, Hideki; Kolari, Pasi; Lopez-Blanco, Efren; Marushchak, Maija E.; Mastepanov, Mikhail; Merbold, Lutz; Parmentier, Frans-Jan W.; Peichl, Matthias; Sachs, Torsten; Sonnentag, Oliver; Ueyama, Masahito; Voigt, Carolina; Aurela, Mika; Boike, Julia; Celis, Gerardo; Chae, Namyi; Christensen, Torben R.; Bret-Har								

KOPRI 극지연구소

			te, M. Syndonia; Dengel, Sigrid; Dolman, Han; Edgar, Colin W.; Elberling, Bo; Euskirchen, Eugenie; Grelle, Achim; Hatakka, Juha; Humphreys, Elyn; Jarveoja, Jarvi; Kotani, Ayumi; Kutzbach, Lars; Laurila, Tuomas; Lohila, Annalea; Mammarella, Ivan; Matsuura, Yojiro; Meyer, Gesa; Nilsson, Mats B.; Oberbauer, Steven F.; Park, Sang-Jong; Petrov, Roman;								

KOPRI 극지연구소

			Prokushkin, Anatoly S.; Schulze, Christopher; St Louis, Vincent L.; Tuittila, Eeva-Stiina; Tuovinen, Juha-Pekka; Quinton, William; Varlagin, Andrej; Zona, Donatella; Zyryanov, Viacheslav I.;								

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202202	When river water meets seawater: Insights into primary marine aerosol production	Park, Jiyeon; Jang, Jiyi; Yoon, Young Jun; Kang, Sujin; Kang, Hyojin; Park, Kihong; Cho, Kyung Hwa; Kim,	SCI	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	807(0)	국외	SCI등재	10.753	예	80

			Jung-Hyun; Dall`Osto, Manuel; Lee, Bang Yong;								
2021M1A5A1065425	202204	Crop Residue Burning Emissions and the Impact on Ambient Particulate Matters over South Korea	Han, Kyung M.; Lee, Byung T.; Bae, Min-Suk; Lee, Sojin; Jung, Chang H.; Kim, Hyun S.;	SCI	ATMOSPHERE	13(0)	국외	SCI등재	3.110	아니오	33

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202205	Abundance and diversity of antibiotic resistance genes and bacterial communities in the western Pacific and Southern Oceans	Jang, Jiyi; Park, Jiyeon; Hwang, Chung Yeon; Choi, Jinhee; Shin, Jingyeong; Kim, Young Mo; Cho, Kyung Hwa; Kim, Jung-Hyun; Lee, Yung Mi; Lee, Bang Yong;	SCI	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	(0)	국외	SCI등재	10.753	아니오	20

KOPRI 극지연구소

2021M1A5A1065425	202207	Morphological and chemical classification of fine particles over the Yellow Sea during spring, 2015–2018	Kwak, Nohhyeon; Lee, Haebum; Maeng, Hyunok; Seo, Arom; Lee, Kwangyul; Kim, Seojeong; Lee, Meehye; Cha, Joo Wan; Shin, Beomcheol; Park, Kihong;	SCI	ENVIRONMENTAL POLLUTION	(0)	국외	SCI등재	9.988	아니오	20
2021M1A5A1065425	202304	Characterization of active layer at different degrees of patterned ground development using electrical resistivity tomography survey	Park, Keunbo; Kim, Kiju; Kim, Kwanseo; Hong, Won Taek;	SCI	COLD REGIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY	(0)	국외	SCI등재	4.1	아니오	50
2021M1A5A1065425	202501	Trends and classification of aerosol observed from MODIS sensor over Northern Europe and the Arctic	Kyung M Han; Chang H Jung; Chul H Song; Ja H Koo; Young J Yoon; Bang Y Lee; Hyun S Kim; S Seo	SCI	Atmospheric Pollution Research	16(1)	국외	SCI등재	3.9	아니오	50

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도

KOPRI 극지연구소

2021M1A5A1065425	202211	Microbial metabolic responses and CO2 emissions differentiated by soil water content variation in subarctic tundra soils	Kim, Dockyu; Chae, Namyi; Kim, Mincheol; Nam, Sungjin; Kim, Tai Kyoung; Park, Ki-Tea; Lee, Bang Yong; Kim, Eungbin; Lee, Hyoungseok;	SCI	JOURNAL OF MICROBIOLOGY	60(12)	국내	SCI등재	2.902	아니오	30

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202306	Observational evidence linking ocean sulfur compounds to atmospheric dimethyl sulfide during Icelandic Sea phytoplankton blooms	Lee, Kitack; Kim, Jun-Seok; Park, Ki-Tae; Park, Min-Ji; Jang, Eunho; Gudmundsson, Kristinn; Olafsdottir, Solveig R.; Olafsson, Jon; Yoon, Young Jun; Lee, Bang	SCI	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	879(0)	국외	SCI등재	9.8	예	50

KOPRI 극지연구소

			-Yong; Kwon, Sae Yun; Kam, Jonghun;								

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202306	Ocean-atmosphere interactions: Different organic components across Pacific and Southern Oceans	Jang, Jiyi; Park, Jiyeon; Park, Jongkwan; Yoon, Young Jun; Dall`Osto, Manuel; Park, Ki-Tae; Jang, Eunho; Lee, Ji Yi; Cho, Kyung Hwa; Lee, Bang Yong;	SCI	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	878(0)	국외	SCI등재	9.8	예	20
2021M1A5A1065425	202308	Parameterization of polydisperse aerosol optical properties during hygroscopic growth	Jung, Chang H.; Han, Kyung Man; Yoon, Young Jun; Kim, Dongchul; Lee, Ji Yi; Lee,	SCI	AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY	57(8)	국외	SCI등재	5.2	예	25

KOPRI 극지연구소

			Hyung-Min; Um, Junshik; Lee, Seoung Soo; Kim, Yong Pyo;								

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202309	BESSv2.0: A satellite-based and coupled-process model for quantifying long-term global land-atmosphere fluxes	Li, Bolun; Ryu, Youngryel; Jiang, Chongya; Dechant, Benjamin; Liu, Jiangong; Yan, Yulin; Li, Xing;	SCI	REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT	295(0)	국외	SCI등재	13.5	예	30
2021M1A5A1065425	202310	Parameterization of below-cloud scavenging for polydisperse fine mode aerosols as a function of rain intensity	Jung, Chang Hoon; Lee, Hyung-Min; Park, Dasom; Yoon, Young Jun; Choi, Yongjoo; Um, Junshik; Lee, Seoung Soo; Lee, Ji	SCI	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES	132	국외	SCI등재	6.9	예	25

KOPRI 극지연구소

			Yi; Kim, Yong Pyo;								

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202311	Spatial distribution and variability of boundary layer aerosol particles observed in Ny-lesund during late spring in 2018	Barbara Harm-Altstdter; Konrad Brfuss; Lutz Bretschneider; Martin Schn; Jens Bange; Ralf Kthner; Radovan Krejci; Mauro Mazzola; Kihong Park; Falk Ptzold	직접입력	Aerosol Research	1(1)	국외	SCI등재		예	100
2021M1A5A1065425	202403	Morphological classification of fine particles in transmission electron microscopy images by using pre-trained convolution neural networks	Khadgi, Jasmita; Lee, Haebum; Seo, Juchan; Hong, Jin-hyuk; Park, Kihong;	SCI	AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY	58(6)	국외	SCI등재	2.8	아니오	45

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202404	Possible enhancement in ocean productivity	Min Woo Seok;Young Ho	SCI	MARINE POLLUTION BULLETIN	201(2024)	국외	SCI등재	7.001	아니오	100

KOPRI 극지연구소

		associated with wildfire-derived nutrient and black carbon deposition in the Arctic Ocean in 20192021	Ko; Ki Tae Park;Tae Wook Kim								
2021M1A5A1065425	202405	Shipborne observations of black carbon aerosols in the western Arctic Ocean during summer and autumn 2016–2020: impact of boreal fires	Deng, Yange; Tanimoto, Hiroshi; Ikeda, Kohei; Kameyama, Sohiko; Okamoto, Sachiko; Jung, Jinyoung; Yoon, Young Jun; Yang, Eun Jin; Kang, Sung-Ho;	SCI	ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS	24(10)	국외	SCI등재	5.2	예	20
2021M1A5A1065425	202407	Seasonal dynamics of airborne biomolecules influence the size distribution of Arctic aerosols	Eunho Jang;Ki Tae Park;Young Jun Yoon;Kyoung Soon Jang;Min Sung Kim; Kitae Kim; Hyun Young Chung; Mauro Mazzola; David Cappelletti;Bang	SCI	Environmental Science and Ecotechnology	22(2024)	국외	SCI등재	14	예	100

KOPRI 극지연구소

			Yong Lee								

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202407	Decadal increases in carbon uptake offset by respiratory losses across northern permafrost ecosystems	See, Craig R.; Virkkala, Anna-Maria; Natali, Susan M.; Rogers, Brendan M.; Mauritz, Marguerite; Biasi, Christina; Bokhorst, Stef; Boike, Julia; Bret-Harte, M. Syndonia; Celis, Gerardo; Chae, Namyi; Christensen, Torben R.; Murner (Connon), Sara June; Dengel, Sigrid; Dolman, Han; Edgar,	SCI	NATURE CLIMATE CHANGE	(0)	국외	SCI등재	29.6	예	10

KOPRI 극지연구소

			Colin W.; Elberling, Bo; Emmerton, Craig A.; Euskirchen, Eugenie S.; Goeckede, Mathias; Grelle, Achim; Heffernan, Liam; Helbig, Manuel; Holl, David; Humphreys, Elyn; Iwata, Hiroki; Jaerveoja, Jaervi; Kobayashi, Hideki; Kochendorfer, John; Kolari, Pasi; Kotani, Ayumi; Kutzbach, Lars; Kwon, Min Jung; Lathrop, Emma R.; Lopez-Blanco,								

KOPRI 극지연구소

			Efren; Mammarella, Ivan; Marushchak, Maija E.; Mastepanov, Mikhail; Matsuura, Yojiro; Merbold, Lutz; Meyer, Gesa; Minions, Christina; Nilsson, Mats B.; Nojeim, Julia; Oberbauer, Steven F.; Olefeldt, David; Park, Sang-Jong; Parmentier, Frans-Jan W.; Peichl, Matthias; Peter, Darcy; Petrov, Roman; Poyatos, Rafael; Prokushkin, Anatoly S.; Quinton,								

KOPRI 극지연구소

			William; Rodenhizer, Heidi; Sachs, Torsten; Savage, Kathleen; Schulze, Christopher; Sjoegersten, Sofie; Sonnentag, Oliver; St. Louis, Vincent L.; Torn, Margaret S.; Tuittila, Eeva-Stiina; Ueyama, Masahito; Varlagin, Andrej; Voigt, Carolina; Watts, Jennifer D.; Zona, Donatella; Zyryanov, Viacheslav I.; Schuur, Edward A. G.;								

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202407	Permafrost conditions influence the abundance distribution and leaf traits of two closely related dominant shrub species (Rhododendron subsect. Ledum) in interior Alaska	Gaku Amada; Go Iwahana; Kyotaro Noguchi; Yojiro Matsuura; Yongwon Kim; BangYong Lee; Hideki Kobayashi1	SCI	POLAR BIOLOGY	47(2024)	국외	SCI등재	1.5	예	100
2021M1A5A1065425	202409	Comparison of new particle formation events in urban agricultural and arctic environments	Haebum Lee; Hyungjin Cho; Young Jun Yoon; Joonwoo Kim; Bang Yong Lee; Kihong Park	SCI	ATMOSPHERIC ENVIRONMENT	333(2024)	국외	SCI등재	4.2	아니오	45
2021M1A5A1065425	202411	Selective transmission of airborne bacterial communities from the ocean to the atmosphere over the Northern Pacific Ocean	Jiyi Jang; Jiyeon Park;Chung Yeon Hwang; Yeontae Gim; Ki-Tae Park; Young Jun Yoon; Minju Seo; Bang	SCI	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	957(2024)	국외	SCI등재	10.753	아니오	100

KOPRI 극지연구소

			Yong Lee								

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202501	Long-term observations of black carbon and carbon monoxide in the Poker Flat Research Range central Alaska with a focus on forest wildfire emissions	Takeshi Kinase;Fumikazu Taketani; Masayuki Takigawa ;Chunmao Zhu; Yongwon Kim; Petr Mordovskoi;Yugo Kanaya	SCI	ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS	25(2025)	국외	SCI등재	5.2	예	100
2021M1A5A1065425	202501	Trends and classification of aerosol observed from MODIS sensor over Northern Europe and the Arctic	Kyung M Han; Chang H Jung; Chul H Song; Ja H Koo; Young J Yoon; Bang Y Lee; Hyun S Kim; S Seo	SCI	Atmospheric Pollution Research	16(1)	국외	SCI등재	3.9	아니오	50

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2021M1A5A1065425	202502	Aerosol hygroscopicity influenced by	Hyojin Kang;Chang	SCI	JOURNAL OF AEROSOL	186(0)	국외	SCI등재	3.9	예	100

		seasonal chemical composition variations in the Arctic region	Hoon Jung; Bang Yong Lee; Radovan Krejci; Dominic Heslin-Rees; Wenche Aasf ;Young Jun Yoon		SCIENCE						

다. 지식재산권 성과 정보

지식재산권 성과정보

과제번호	출원등록연월	재산권구분	출원등록구분	발명제목	출원등록인	출원등록국	발명자명	출원등록번호	활용형태	기여도
2021M1A5A1065425	20211122	특허	출원	극지 환경 인자를 관측하는 위성 통신 시스템	한국해양과학기술원 (1-2012-034461-6) 외 1명	대한민국	이방용 박근보 양희권	10-2021-0161328	보유기관자체활용	100
2021M1A5A1065425	20221116	특허	출원	극지 환경 인자를 측정하는 복합 센싱 장치 및 이를 이용한 위성 통신 시스템	한국해양과학기술원, 주식회사 이커넥트	대한민국	박근보, 이방용, 양희권	10-2022-0153879	보유기관자체활용	100
2021M1A5A1065425	20231027	특허	출원	극지환경인자 관측시스템용 배터리 장치 및 이의 온도 제어 방법	한국해양과학기술원, 이커넥트	대한민국	박근보, 양희권	10-2023-0145967	보유기관자체활용	100

라. 산업지원 및 연구성과 활용

(단위: 건)

기술확산			연구성과활용(사업화 및 후속연구과제 등)		
기술실시계약체결	기술지도	기술평가	후속연구추진	사업화추진중	사업화완료

마. 기타(학술대회 논문발표)

학술대회 논문발표 성과정보

과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5A1065425	202107	한국입자에어로졸학회	이해범;김준우;박지연;윤영준;박기홍	다양한 대기 환경에서의 나노입자생성(new particle formation) 특성 비교	국내학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1065425	202110	2021 북극연구 공동학술대회	박기태	북극 대기 현장 관측을 통한 기후변화 진단	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1065425	202206	Korea Association for Particle and Aerosol Research (KAPAR)	Hyungjin Cho	2018-2019년 북극에서 구름응결핵과 나노입자 생성 특성 비교	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1065425	202206	Korea Association for Particle and Aerosol Research (KAPAR)	Haebum Lee	지, 도심, 농촌 지역의 나노입자생성 (new particle formation) 특성 비교와 예측	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1065425	202208	제 3회 KGU 연례학술대회 (The 3rd Korea Geoscience Union Annual Meeting)	강효진	A novel approach to estimate critical supersaturation of Arctic clouds	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1065425	202311	2023년 한국기상학회 가을학술대	이지연,채남이,김용원,윤주열,정수종,최태진,김성중,이방용,박상종	알래스카 습윤 툰드라 지역의 호흡 및 광합성의 온도 민감도 차이에 따른 탄소순환 변화	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1065425	202311	2023년도 한국해양학회 추계학술대회	장은호	DMS-derived particle formation in the changing Arctic: biogenic emission and atmospheric oxidation	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1065425	202405	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	예익주,장은호,윤영준,박지연,장지이,김연태,김하련,박기태	Real-time analysis of ambient dimethyl sulfide using a laser-based optical analyzer, TILDAS	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1065425	202406	한국에어로졸학회	서민주,장지이,박종관,김연태,김유진,윤영준,이방용,박지연	Molecular Characterization of Organic Aerosols over North Pacific Ocean and Bering Sea in the Arctic Using a High-Resolution Orbitrap Mass Spectrometry	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1065425	202407	한국입자에어로졸학회 (KAPAR)	조형진,강효진,윤영준,박기홍	Effect of new particle formation on cloud condensation nuclei (CCN) in the Arctic	국내학술대회	대한민국	

KOPRI 극지연구소

2021M1A5A1065425	202407	한국입자에어로졸학회(KAPAR)	Aslan,조형진,박기홍	New particle formation classification via implementation of machine learning	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5A1065425	202109	2021 Annual Meeting of the Geochemical Society of Japan	Tianzheng Huang; Yongwon Kim	Oxygen-17 stable isotopic composition of soil originated N2O under snowpack	국제학술대회	일본	Y

학술대회 논문발표 성과정보

과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5A1065425	202109	The 26th International Symposium on Polar Sciences(ISPS 2021)	Namyi Chae;Juyeol Yun;Taejin Choi;Johann Wagner;Bang Yong Lee	- Carbon dioxide and methane fluxes measurement near tundra ponds ecosystems in Cambridge Bay, Canada	국제학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1065425	202109	The 26th International Symposium on Polar Sciences(ISPS 2021)	이지연;채남이;김용원;윤주열;정수종;김성중;이방용;박상종	Enhanced carbon emission at moist tundra due to increased respiration under warming environment	국제학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1065425	202110	American Association for Aerosol Research(AAAR)	Haebum Lee;Joonwoo Kim;Jiyeon Park; Young-Jun Yoon,;Kihong Park	Comparison of new particle formation(NPF) events in various ambient atmosphere	국제학술대회	미국	Y
2021M1A5A1065425	202111	Permafrost Carbon Network (PCN) Meeting	Yongwon Kim	Non-growing season soil CO2 interior Alaska	국제학술대회	미국	Y
2021M1A5A1065425	202112	2021 AGU(American Geophysical Union) meeting	Yongwon Kim	Phenological characteristics in year-round stem respiration of boreal black spruce (Picea mariana) stand, interior Alaska	국제학술대회	미국	Y
2021M1A5A1065425	202206	Asian Aerosol Conference (AAC)	Haebum Lee;Joonwoo Kim;Jiyeon Park;Young-Jun Yoon;Kihong Park	Characteristics and prediction of new particle formation events in various atmospheric environment	국제학술대회	타이완	
2021M1A5A1	202209	International Aerosol	Haebum	New particle formation (NPF) characteristics	국제학술대회	그리스	

극지연구소

065425		Conference (IAC)	Lee;Joonwoo Kim;Jiyeon Park;Young-Jun Yoon;Kihong Park	and prediction in various atmospheric environments			
2021M1A5A1065425	202209	The 27th International Symposium on Polar Sciences	Namyi Chae; Hyewon Hwang; Juyeol Yun; Taejin Choi; Johann Wanger; Bang Yong Lee	Carbon dioxide and methane fluxes measurement for wet and dry tundra ecosystems in Cambridge Bay, Canada	국제학술대회	대한민국	Y
2021M1A5A1065425	202209	제27차 국제 극지과학 심포지엄 (The 27rd International Symposium on Polar Sciences)	강효진	Various employments of two CCN counters installed in the Zeppelin observatory, Arctic region.	국제학술대회	대한민국	Y

학술대회 논문발표 성과정보

과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5A1065425	202212	American Geophysical Union 2022 Fall Meeting	Yongwon Kim, Sang-Jong Park, Bang-Yong Lee	Effect of crustose lichen (Ochrolecia frigida) on soil CO2 emission in a sphagnum moss community underlain by permafrost, western Alaska	국제학술대회	미국	
2021M1A5A1065425	202306	ICNAA (International Conference on Nucleation & Atmospheric Aerosols)	Haebum Lee, Hyungjin Cho, and Kihong Park	New particle formation (NPF) events in various environments	국제학술대회	오스트레일리아	
2021M1A5A1065425	202312	AGU(American Geophysical Union)	한경만(Kyung Man Han)	Long-term Trends and Classification of Aerosol Observed from MODIS Sensor over Northern Europe and the Arctic	국제학술대회	미국	
2021M1A5A1065425	202411	13th AAC (Asian Aerosol Conference)	Hyungjin Cho, Haebum Lee, Hyojin Kang, Youngjun Yoon, Bang Yong Lee, Kihong Park	Characteristics of new particle formation and cloud condensation nuclei in the Arctic	국제학술대회	말레이시아	

KOPRI 극지연구소

2021M1A5A1065425	202412	2024 Fall AGU Meeting (B42G-1624)	Yongwon Kim; Hideki Kobayashi; Hiroki Ikawa; Sang-Jong Park; Bang-Yong Lee	Annual estimation of soil CO2 emission in unburned and burned black spruce forest of interior Alaska: Snow depth and soil temperature	국제학술대회	미국	

바. 기타(우수 연구활동 수상)

수상실적 성과정보

과제번호	수상연월	수상명	수상자		시상기관	시상국가	수상사유
			성명	소속기관			
2021M1A5A1065425	202204	전재규젊은과학자상(우수상)	장지이	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	대한민국	우수논문 게재
2021M1A5A1065425	202205	제27회 바다의 날 기념 포상 해양수산부장관 표창	장지이	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	해양수산부	대한민국	우수 연구활동
2021M1A5A1065425	202206	2022년도 한국입자에어로졸학회 학술대회 우수논문발표상	이해범	광주과학기술원	한국입자에어로졸학회	대한민국	2022년도 한국입자에어로졸학회 학술대회의 구두 논문발표 부문에서 우수한 논문을 발표
2021M1A5A1065425	202208	우수 포스터상	강효진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	한국지구과학연합회	대한민국	우수 포스터 게재
2021M1A5A1065425	202212	2022년도 기후변화 대응 대표기술 10선 과기부 장관 표창	이방용	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	과학기술정보통신부	대한민국	신기후체제에 따른 기후변화 대응 연구개발 발전 기여에 대한 공로(과기부 제22-03167호)

사. 기타(저역서 성과)

저역서 성과정보

과제번호	발간년월	제목	국내외구분	발행처	단행본구분	저자명
2021M1A5A1065425	202108	북극 동토 연구: 기후변화에 맞서는 우리의 카드	국내	극지연구소 정책개발실	저서	이방용,박상종

아. 기타(보고서 성과)

보고서 성과정보

과제번호	제출일자	제목	주저자

2021M1A5A1065425	202310	북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명(단계보고서)	이방용
2021M1A5A1065425	202403	북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명(연차보고서)	이방용

자. 기타(학위배출인력)

학위배출인력 성과정보

과제번호	학위취득연월	학위구분	학위취득자				진로
			성명	성별	대학	학과	
2021M1A5A1065425	202108	박사	박민한	남성	광주과학기술원	지구환경공학부	박사후연구원
2021M1A5A1065425	202202	박사	장지이	여성	울산과학기술원	도시환경공학과	취업(박사후연구원 포함)
2021M1A5A1065425	202208	박사	이해범	남성	광주과학기술원	지구환경공학부	박사후연구원
2021M1A5A1065425	202308	석사	조형진	여성	광주과학기술원	지구환경공학부	박사과정진학
2021M1A5A1065425	202308	석사	김혜인	여성	울산과학기술원	도시환경공학부	기타
2021M1A5A1065425	202308	석사	이진규	남성	광주과학기술원	지구환경공학부	박사과정진학
2021M1A5A1065425	202402	박사	안서희	여성	과학기술연합대학원대학교	극지연구소 스쿨	취업(박사후연구원 포함)
2021M1A5A1065425	202408	박사	장은호	남성	과학기술연합대학원대학교	극지연구소 스쿨	취업(박사후연구원 포함)

KOPRI 극지연구소

차. 기타(연구기자재 구입 성과)

연구기자재 구입 성과정보

과제번호	구입연월	기자재명	규격	수량	제조국	구매금액	활용용도	설치장소
2021M1A5A1065425	202109	에어로졸 질량분석기	ToF-ACSM	1	미국	413,191,196	대기 에어로졸의 화학적 성분 (유기물, 황산염, 질산염, 암모늄, 염화물)을 1-10분 단위로 관측하고, 분석된 유기에어로졸은 PMF등의 모델링 기법을 통하여 추가 분석함으로	극지연구소 제2연구동 621호

							써 북극 대기 중 에어로졸의 기원을 파악할 수 있음	
2021M1A5A1065425	202110	개회로에디공분산장비	EC150-SS2	1	미국	45,134,105	대기중 CO2 농도를 20Hz 고속측정하고 초음파풍속계(CSAT3A)의 대기난류 자료와 결합하여 동토거점 지면생태계의 이산화탄소 배출량 또는 흡수량을 연속 측정할 수 있음	미국 알래스카 카운실 및 동토거점
2021M1A5A1065425	202110	개회로메탄분석기	LI-7700 및 LI-7550	1	미국	78,562,330	대기중 메탄(CH4) 농도를 20Hz 고속측정함으로서 초음파풍속계의 대기난류 자료와 결합하여 동토 지역에서의 메탄 방출량을 연속 측정할 수 있음	러시아 동토거점 및 북극권 동토거점
2021M1A5A1065425	202203	현미경	Leica-DM750	1	독일	6,985,000	실험실 내 배양하고 있는 극지 식물성 플랑크톤의 개수 및 크기 측정에 사용	극지연구소 제 2연구동 621호

KOPRI 극지연구소

연구기자재 구입 성과정보

과제번호	구입연월	기자재명	규격	수량	제조국	구매금액	활용용도	설치장소
2021M1A5A1065425	202207	구름형성응결핵계수기 (CCNC)	CCN-100	1	미국	132,735,559	본 장비는 전지구 기후인자 중 하나인 에어로졸 입자가 과포화도(Super Saturation)에 다라 구름으로 성장하는지를 측정할 수 있는 장비임. 지상 고정관측소 또는 이동형 관측소에 설치하여 주변 대기의 구름으로 성장하는지 측정	극지연구소 제 2연구동 521호

							가능하며 실험실에서 자연환경과 동일한 조건으로 제작한 챔버에서 발생하는 에어로졸 입자가 구름으로 성장하는지 측정가능함.	
2021M1A5A1065425	202207	실시간 탄소입자 분석기	SP2-D	1	미국	257,358,749	해당 장비는 전 지구 기후인자 중 하나인 에어로졸 입자를 포집하여 검댕(soot) 또는 블랙카본(black carbon)을 선별하여 측정할 수 있는 장비임. 지상 고정관측소 또는 이동형 관측소에 설치하여 주변 대기의 탄소특성을 분석할 수 잇음. 실험실에서 자연환경과 동일한 조건으로 제작한 챔버에서 발생하는 공기를 흡입하여 탄소 성분의 특성을 분석할 수 있음	극지연구소 제2연구동 521호

KOPRI 극지연구소

연구기자재 구입 성과정보

과제번호	구입연월	기자재명	규격	수량	제조국	구매금액	활용용도	설치장소
2021M1A5A1065425	202210	울트라파인 입자계수기	CPC 3756	1	미국	70,688,542	울트라파인 입자계수기는 2.5㎚ 보다 큰 대기 중 에어로졸 입자의 단위 부피 당 수농도를 실시간으로 손실 없이 1㎐ 간격으로 관측할 수 있음. 관측하는 연구장비임. 실시간 3-10㎚ 크기의 에어로졸 수 농도 관측은 에어	극지연구소 제 2연구동 521호

							로졸 입자의 생성 및 성장과정의 물리특성을 이해할 수 있음. 또한, 버블챔버를 통해 생성된 1차 에어로졸의 입자크기분포를 규명할 수 있고, 대기 중 가스상황, 질소 성분이 에어로졸 생성에 미치는 영향을 이해할 수 있음.	
2021M1A5A1065425	202210	대용량 입자포집기	DHA-80	1	스위스	64,570,000	북극 대기 미세입자 포집을 통한 화학 특성 분석 연구를 하기 위하여, 북극 대기 미세입자의 화학특성 분석을 위한 대기 입자 시료 포집하여 PM2.5 대기 미세입자 시료 확보할 수 있다. 시료를 주요 이온 성분, 유기물 특성 및 동위원소 분석에 활용하여 미세입자의 화학특성 분석을 통한 입자 기원 파악하고, 다양한 물리 관측 자료와 연계하여 입자 형성 기작 파악할 수 있다.	극지연구소 제 2연구동 521호

KOPRI 극지연구소

연구기자재 구입 성과정보

과제번호	구입연월	기자재명	규격	수량	제조국	구매금액	활용용도	설치장소
2021M1A5A1065425	202210	입자분류기(DMA controller unit)	DMA Controller Platform 3082	1	미국	56,908,104	입자분류기 컨트롤러는 2-1000nm 크기의 대기 중 에어로졸의 크기별 수농도를 선택적, 실시간으로 분류 할 수 있게 해주는 제	극지연구소 제 2연구동 521호

							어장치임. 에어로졸의 생성과 성장과정을 이해하고 에어로졸과 기후변화 상관관계 연구의 기초자료 활용, 실시간 에어로졸의 크기별 수 농도 관측은 에어로졸 입자의 물리특성 이해를 통한 기후변화 연구에 중요한 요소임.	
2021M1A5A1065425	202211	고속반응 폐회로 이산화탄소/수증기 가스분석기	EC155	1	미국	64,952,605	○ 캐나다 캠브리지베이 거점의 연중 연속 이산화탄소 플럭스 측정 -기존의 개회로 가스분석기와 비교 시 강수 동계기간 자료 취득률이 높을 것으로 예상 되어 연중 동토지역 이산화탄소 플럭스 정량화에 활용 예정임 -생산된 데이터의 공동 활용이 가능하며, 사업종료에 따른 캠브리지베이 관측이 종료될 경우 타 동토 관측지에서 이산화탄소 플럭스 관측에 활용이 가능함	캐나다 캠브리지베이
2021M1A5A1065425	202311	VOC 연속 분석 시스템	PTR-TOR 4000X2	1	오스트리아	745,384,750	기후가스 분석을 통해 북극권의 기후변화 피드백 기작 규명 연구와 현장 집중 관측 연구에 활용	극지연구소 제2연구동 R2-621호

카. 기타(국내외 과학자교류 성과)

국내외 과학자교류 성과정보

과제번호	파견유치	인력교류구	파견유치 연구자	파견국가	파견유치

	기간	분	성명	소속기관	직위	최종학위	전공	유치자국적	목적
2021M1A5A1065425	20210902~20210916	해외파견	박상종	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	대기과학	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20210917~20210924	해외파견	황혜원	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수생	석사	대기과학	캐나다	공동연구
2021M1A5A1065425	20210927~20211007	해외파견	박근보/양희권	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수연구원/대표(이커넥트)	박사	지반공학/전자통신	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20211102~20211118	해외파견	김연태	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원	석사	대기과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1065425	20220319~20220331	해외파견	강효진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	UST 협동연구생	학사	극지과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1065425	20220319~20220402	해외파견	김연태	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원	석사	대기과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1065425	20220328~20220428	해외파견	박기태	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	환경공학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1065425	20220328~20220428	해외파견	장은호	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	UST 협동연구생	학사	극지과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1065425	20220607~20220622	해외파견	최태진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	대기과학	캐나다	공동연구
2021M1A5A1065425	20220607~20220708	해외파견	황혜원	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수생	박사수료	대기과학	캐나다	공동연구
2021M1A5A1065425	20220629~20220710	해외파견	박상종	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	대기과학	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20220705~20220716	해외파견	박근보	한국해양과학기술원 부	선임연구원	박사	지반공학	노르웨이	공동연구

KOPRI 극지연구소

				설 극지연구소					

국내외 과학자교류 성과정보

과제번호	파견유치 기간	인력교류구분	파견유치 연구자					파견국가 유치자국적	파견유치 목적
			성명	소속기관	직위	최종학위	전공		
2021M1A5A1065425	20220707~20220805	해외파견	최태진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	대기과학	그린란드	공동연구
2021M1A5A1065425	20220707~20220805	해외파견	서원석	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수생	박사수료	대기과학	그린란드	공동연구
2021M1A5A1065425	20220830~20220911	해외파견	서원석	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수생	박사수료	대기과학	캐나다	공동연구
2021M1A5A1065425	20220830~20220911	해외파견	황혜원	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수생	박사수료	대기과학	캐나다	공동연구
2021M1A5A1065425	20220914~20220924	해외파견	이방용/홍창희/정철두/조규재/손성현	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원/연구위원/전무/대표/부사장	박사	대기과학/지반공학/측량학/건축학/토목학	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20220914~20220926	해외파견	이지연	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	대기과학	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20220914~20220929	해외파견	박근보/양희권	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	선임연구원/대표(이커넥트)	박사	지반공학/전자통신	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20220914~20220929	해외파견	박상종	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	대기과학	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20230319~20230407	해외파견	장은호	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	UST 협동연구생	학사	극지과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A	20230319~	해외파견	강효진	한국해양과	UST 협동	학사	극지과학	노르웨이	공동연구

1065425	20230407			학기술원 부설 극지연구소	연구생				
2021M1A5A1065425	20230319~20230407	해외파견	박기태	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	환경공학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1065425	20230529~20230609	해외파견	박상종	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	대기과학	미국	공동연구

국내외 과학자교류 성과정보

과제번호	파견유치 기간	인력교류구분	파견유치 연구자					파견국가 유치자국적	파견유치 목적
			성명	소속기관	직위	최종학위	전공		
2021M1A5A1065425	20230529~20230609	해외파견	박근보	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	선임연구원	박사	지반공학	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20230613~20230703	해외파견	채남이	고려대학교	연구교수	박사	미기상학	캐나다	공동연구
2021M1A5A1065425	20230614~20230626	해외파견	황혜원	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연구원	석사	대기과학	캐나다	공동연구
2021M1A5A1065425	20230702~20230713	해외파견	박근보	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	선임연구원	박사	지반공학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1065425	20230712~20230725	해외파견	박민지	포항공과대학교	연구원	석사	환경공학부	아이슬란드	공동연구
2021M1A5A1065425	20230712~20230725	해외파견	양승훈	포항공과대학교	연구원	학사	환경공학부	아이슬란드	공동연구
2021M1A5A1065425	20230712~20230801	해외파견	김용표	이화여자대학교	교수	박사	환경공학	미국	기타
2021M1A5A1065425	20230712~20230801	해외파견	이시윤	이화여자대학교	연구원	학사	환경공학	미국	기타
2021M1A5A1065425	20230716~20230724	해외파견	박상종	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	대기과학	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20230822~20230825	해외파견	최태진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	대기과학	덴마크	공동연구

2021M1A5A1065425	20230830~20230909	해외파견	박상종	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	대기과학	캐나다	공동연구
2021M1A5A1065425	20230830~20230911	해외파견	황혜원	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연구원	석사	대기과학	캐나다	공동연구
2021M1A5A1065425	20230901~20230926	해외파견	오승미	이화여자대학교	연구원	석박통합과정	환경공학	미국	기타
2021M1A5A1065425	20230901~20230926	해외파견	조형진	광주과학기술원	연구원	석사	지구환경공학부	미국	기타
2021M1A5A1065425	20230901~20231010	해외파견	김유진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원	석사	지구환경공학	미국	기타

국내외 과학자교류 성과정보

과제번호	파견유치 기간	인력교류 구분	파견유치 연구자					파견국가 유치자국적	파견유치 목적
			성명	소속기관	직위	최종학위	전공		
2021M1A5A1065425	20230910~20230922	해외파견	박근보	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	선임연구원	박사	지반공학	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20230926~20231010	해외파견	권정희	이화여자대학교	연구원	학사	환경공학	미국	기타
2021M1A5A1065425	20240212~20240920	해외파견	Yongwon Kim	IARC(국제북극연구센터)	교수	박사	지구환경과학	미국	정보교환
2021M1A5A1065425	20240306~20240321	해외파견	김연태	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원	석사	대기과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1065425	20240306~20240321	해외파견	장은호	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	박사과정	석사	극지과학	노르웨이	공동연구
2021M1A5A1065425	20240611~20240630	해외파견	김연태	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원	석사	대기과학	캐나다	공동연구
2021M1A5A1065425	20240613~20240620	해외파견	Yongwon Kim	IARC(국제북극연구센터)	교수	박사	지구환경과학	미국	기타

2021M1A5A1065425	20240625~20241031	해외파견	Yongwon Kim	IARC(국제북극연구센터)	교수	박사	지구환경과학	미국	정보교환
2021M1A5A1065425	20240804~20240827	해외파견	박상종	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	대기과학	그린란드	공동연구
2021M1A5A1065425	20240901~20240913	해외파견	박근보	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	선임연구원	박사	지반공학	미국	공동연구
2021M1A5A1065425	20240904~20240908	국내유치	Darius Ceburnis	NUI Galway	Senior Researcher	박사	Natural Science	아일랜드	정보교환

타. 기타(국제 MOU 체결 성과)

MOU 체결 성과정보

과제번호	체결연월	체결명	대상국	대상기관
2021M1A5A1065425	202110	미국 Alaska Council Native Corporation과의 현지 연구 Land Use Permit 체결	미국	Council Native Corporation Nome Alaska
2021M1A5A1065425	202410	Facility Space Use Permit Modification No.2	미국	University of Alaska Fairbanks

KOPRI 극지연구소

파. 기타(국제공동연구 성과)

국제공동연구 성과정보

과제번호	연구기간	공동연구과제명	우리측연구비	상대국측연구비	참여기관수
2021M1A5A1065425	202105~202112	알래스카 화재 및 동토융해에 따른 온실효과기체의 정량적 평가	240,000,000	100,000,000	1
2021M1A5A1065425	202201~202212	알래스카 화재 및 동토융해에 따른 온실효과기체의 정량적 평가	280,000,000	100,000,000	1
2021M1A5A1065425	202401~202411	북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명	200,000,000	50,000,000	2
2021M1A5A1065425	202401~202503	Quantification of GHGs on changes in wildfire and permafrost thawing, Alaska	141,680,000		1

하. 기타(기타목적활용 및 연론보도 성과)

기타목적활용 성과정보

과제번호	활용연월	활용구분	활용내용
2021M1A5A1065425	202211	연구자료	북극 환경인자 데이터 손실 방지 저전력 센싱시스템 기술 개발을 위한 산-연 협동 : 장기간 고품질 환경 데이터 관측용최적화된 HW/SW로 구성된 북극 환경인자 수집용 복합센싱 시스템 개발

언론보도성과			
과제번호	2021M1A5A1065425		
보도게재일자	20210630	보도및게재처	한겨레신문-미래&과학
기사제목	지구온난화로 늘어난 북극 미세조류가 온난화 늦춘다		
관련연구업적	지구온난화로 늘어난 북극의 미세조류가 지구의 온도를 낮춰 온난화를 늦춘다는 사실에 대해 세계 최초로 직접적인 증거 제시		

2. 연구개발결과 활용 계획 (해당항목에 "○" 표시)

기술이전	기업화	후속연구 추진	타 사업 활용	그 밖의 목적 활용	연구결과 활용 중단
			○	○	

가. 당해연도 활용계획
- 본 과제를 통해, 미국/캐나다/노르웨이/그린랜드/아이슬란드 등 동토지역 환경변화 관측거점 및 스웨덴 고층대기 관측소에서 국제공동연구 등을 통하여 환경변화에 대한 현장관측 및 정밀측정 자료 확보. 이러한 자료의 빅데이터 환경인자 DB를 구축하고, 북극권에서의 육상-대기의 변화 특성을 진단, 분석함. 이러한 관측자료는 5세부과제에서의 모델링을 활용한 예측에 정보 제공하는데 활용할 예정임
- 좀더 효율적인 측정시스템의 개발과 현장 적용을 통한 극지역에 특화된 IoT 기술 접목 smart platform 구축에 활용함

나. 활용방법
- 국제공동연구에서의 북극권 환경에 대한 과학기술적 정보교환과 국제적 기후환경변화 연구 이슈에 동참
- 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 과학활동에 대한 근거자료로 제시 등

다. 차년도 이후 활용계획
- 환북극 관측거점을 기반으로 하여 2024년까지 대기-동토(육상, 생태)-연안 영역에서의 빅데이터 환경인자 확보와 DB 구축, AI/IoT 기술을 통한 기후환경변화 연구 고도화에 활용
- 국제적인 글로벌 이슈 대응에 동참 및 미래 예측과 국가적 대응방안 마련 등에 활용함

3. 기대효과
- 극지 유·무형의 자원과 정보 선점으로 대한민국의 전략적 영향력 확대에 기여
  - 미래 국익 창출 강화를 위해 극지 탐사와 연구를 통한 유·무형 자원 정보 선점 필요
- 글로벌 이슈 해결 동참을 통한 국제사회에서의 '책임완수형 신뢰가능한 파트너' 로서의 위상 확보에 기여
  - 대한민국을 넘어선 세계 속 선진국가로서의 글로벌 이슈 해결 동참 역량 강화에 기여
- 극지 환경변화 연구를 통한 국가와 국민의 안정성 확보에 기여
  - 한반도 이상기상(슈퍼폭염, 한파, 가뭄, 홍수 등) 예측 역량 강화로 국가 발전과 국민의 안전 및 삶의 질적 향상 보호와 국민 자긍심 제고

4. 문제점 및 건의사항
※ 연구성과의 제고를 위한 제도.규정 및 연구관리 등의 개선점
- **북극은,** 지형적, 국제적으로 대부분 북극이사회 국가의 영유권이 행사되고 있는 지역임. 이러한 거버너스적 환경에서 북극의 동토지역 및 대륙붕의 영역에서의 급격한 기후·환경변화에 따라 지구 생태계와 인간 삶에 악영향이 확대되고 있음. 따라서 과학연구 자료획득 및 지속적인 환경 모니터링을

KOPRI 극지연구소

위한 현장 조사가 매우 중요함. 더욱이 북극 동토층의 융해로 인한 전 지구적 생태계 붕괴 및 인간 삶의 질적 저하를 가중시키고 있어, 환경변화에 대한 정밀한 모니터링이 필요함.

- **또한,** 우리나라가 북극이사회 정식옵서버 국가('13. 5)로서, 북극 연안 8개국(북극이사회) 국가와의 국제협력을 통하여 확보한 **관측거점** 및 그 주변영역을 기반으로 **글로벌 이슈에 대응하는 국제공동연구 수행이 필수적이며**, **국제사회에서의 역할이 국가이익에 직결되므로, 지속적으로 국격 제고에 이바지할 수 있으며,** 이를 통해 미래의 불확실성에 대해 보다 정확도를 높힐 수 있도록 **지속적인 투자와 지원이 필요함**

KOPRI
극지연구소

첨부3 자체평가의견서

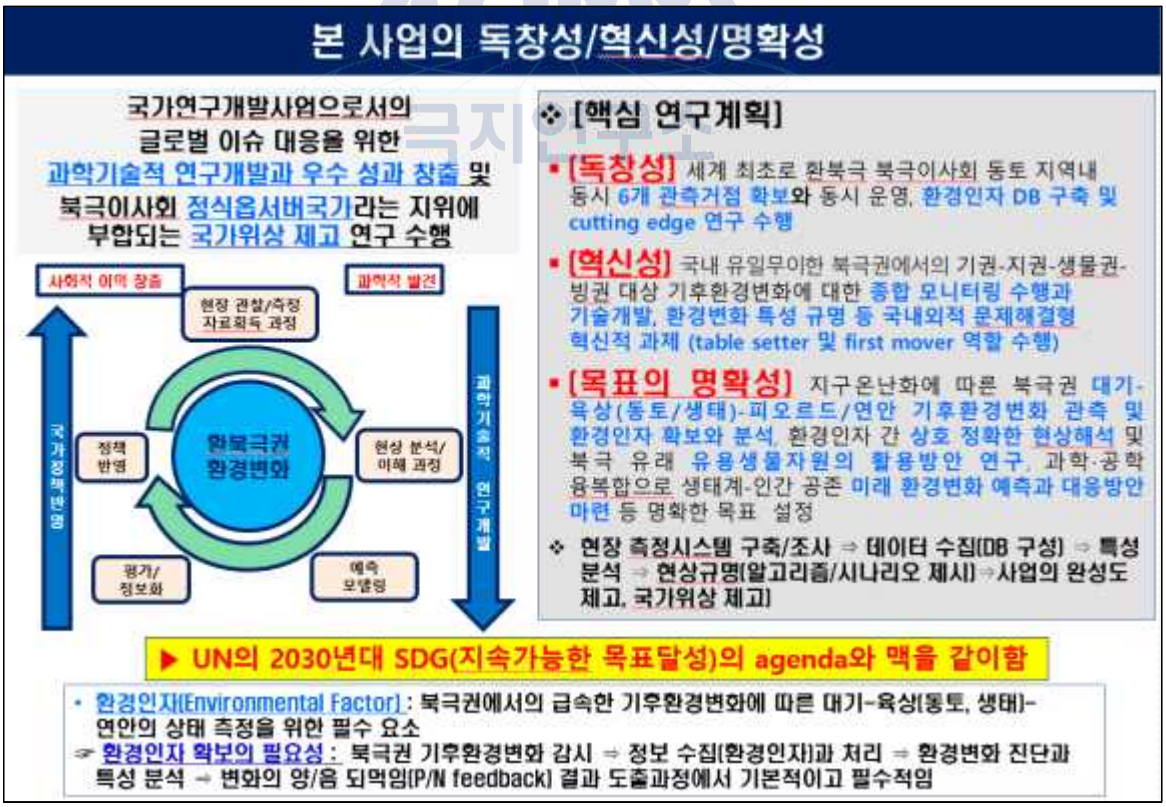
Ⅰ. 연구개발 실적

※ 다음 각 평가 항목에 따라 자체 평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

1. 연구개발성과의 우수성/창의성

■ 등급: (<u>아주 우수</u>, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 과제의 창의성, 혁신성, 국가이익 창출 및 국격제고)
  ① **(극지 이해와 평가 : 독창성)** 환북극 관측거점 활용 극지환경 지속 모니터링, 빅데이터 확보 및 분석, 정보 격차 해소, 피드백 평가(미래 예측) (빅데이터 환경인자 DB 34건 확보 등)
  ② **(과학기술 수준 제고 : 혁신성)** 북극권 동토 지역에서의 국제적, 다학제적인 수월성 연구성과 창출 및 K-Science 위상 제고
  ③ **(과학정보의 연관성과 가용성 강화 : 국가정책 부응)** 북극권 환경변화에 대한 과학기술 측면의 최적화된 정부 R&D 수행
  ④ **(국제사회에서의 지속적 역할 수행 : 국격 제고)** 북극이사회 옵서버 국가로서의 의무적 과학활동을 통한 국제사회에서의 글로벌 이슈 대응 동참 및 국격 향상에 기여



(참고) (1세부과제) KOPRI-KPDC에 등록한 환경인자 DB를 활용한 과학기술적 대표성과 (위탁과제 포함)	
게재년도	**내 용**
1단계 1차년도 **(2021.04~2021.12)** • SCI 논문 8편, (5편 : mrnIF 평균 93.89, IF 평균 8.88 포함) • 환경인자 DB 신규 12건 • 특허출원 1건	※ 1세부과제에서 COVID-19의 확산 지속으로 인하여 부분별로 어려움이 많았음에도 전체적으로 100% 달성함. • 환북극 6개 관측거점 기존 관측시스템 가동(자료 수득률 77%~99%) 최적화 및 거점별 2021년 기상인자 DB 5건(KPDC 등재). • 거점별 온실기체 모니터링 시스템 진단 및 관측 시스템 고도화 계획 작성(SCI급 논문 2편)(100% 달성). • 신규 에어로졸 관측 플랫폼 설계 및 필수 관측 장비 구성 완료(신규 플랫폼 구성에 대한 요약서 작성), 북극 에어로졸 분자 특성 시계열 자료 및 에어로졸 인자 DB 1건(KPDC 등재)(SCI급 논문 2편)(100% 달성). • 환경인자 획득 센서 취득부, 위성 통신 모듈, 게이트웨이 이중화(데이터 손실 최소화 가능)(특허출원 완료), 센싱 인자 DB 6건(토양온도, 토양함수비, CO2, CH4) 달성(100% 달성, 특허출원 1건). • 미세먼지의 조성에 따른 에어로졸의 흡습특성이 CCN생성에 미치는 영향 파악(SCI급 논문 1편) ※ SCI급논문 8편(mrnIF90 이상 5편) / 인재양성(박사 2건) (100%)
1단계 2차년도 **(2022.01~2022.12)** • SCI 논문 5편, (4편 : mrnIF 평균 92.81, IF 평균 10.83 포함) • 환경인자 DB 신규 29건 ※ 1단계 누적 41건 • 특허출원 1건('22.11)	• 북극 거점 기반 에어로졸 DB 1건 추가 (누적 2건) – 북극 대기 중 에어로졸의 화학특성 관측 자료 확보 (100%) • 동토 대기 온실기체, 기상 등 DB 16건/환경인자 DB(누적 4건)(토양온도, 토양함수비, CO2, CH4 포함)(SCI급 논문 2편) / 메탄 플럭스측정 거점 1개, 광합성 측정 거점 2개소 추가 (100%) • 온실기체 플럭스 알고리즘 개발 2건 및 모수화 등 (SCI급 논문 1편) (100%) • 모니터링 시스템 원격 무선전송 및 에너지 하베스팅기술 고도화 (64 노드) (100%) • 모니터링 시스템 자가발전 장시간 저전력 운용(특허출원 1건) (100%) • 북극권 나노입자 측정 및 분석기법 활용 해양 에어로졸 분석 (SCI급 논문 1편) / 나노입자 수농도 관측 DB 1건 ※ SCI급논문 5편(mrnIF90 이상 4편) / 학회수상1건(KAPAR) / 인재양성(박사 1건) (100%)
2단계 1차년도 **(2023.01~2023.12)** • SCI 논문 7편, (5편 : mrnIF 평균 93.89, IF 평균 8.88 포함) • 환경인자 DB 신규 25건 (전체 누적 66건) • 특허출원 1건	▪ 등록 환경인자 종류 (2023년 총 25건 등록)(100% 이상 달성) [거점별 환경인자 DB 18건 KPDC 등록 내역] – 북극 스발바르 동토거점 2건 – 캐나다 캠브리지베이 동토거점 6건 – 알래스카 PAR, NDVI, AWS, Radiation, Soil 등 6건 – 그린란드 노르드 거점 4건 [에어로졸 CCN 시계열, 분자특성 등 DB 3건 KPDC 등록 내역] – 북극 니알슨 제플린관측소 CCN, DMS 자료('23.01.01~ '23.09.30) – 북극 스발바르에서의 에어로졸 분자 특성('17.03.30~ '17.09.03) [멀티 센싱 인자 DB 4건 KPDC 등록 내역] – 알래스카 카운실 거점 토양온도, CO_2, CH_4 등에 대한 자료 확보 ▪ 모니터링 시스템 원격 무선전송 및 에너지 하베스팅기술 고도화 (64 노드) (100%) ▪ 모니터링 시스템 자가발전 장시간 저전력 운용(특허출원 1건) (100%) ※ SCI급논문 7편(mrnIF90 이상 3편) / 인재양성(석사 3명) (100%)
2단계 2차년도 **(2024.01~2025.03)** • SCI 논문 11편, (5편 : mrnIF 평균 96.94, IF 평균 18.49	• 연구비 감액으로 인해, 어려움이 많았음에도 불구하고 전체적으로 100% 달성함 ▪ 등록 환경인자 종류 (2024년 총 21건 등록)(100% 이상 달성) [거점별 환경인자 DB 20건 KPDC 등록 내역] – 북극 스발바르 동토거점 2건 – 그린란드 노르드 기상, 복사에너지 등 4건

포함) • 환경인자 DB 신규 21건 ※ 2단계 누적 46건 (전체 누적 87건)	– 캐나다 캠브리지베이 동토거점 4건 – 알래스카 메탄, 기상, 복사에너지 및 Soil 등 10건 [에어로졸 DB 1건 KPDC 등록 내역] – 북극항해 아라온 탐사 자료 ※ SCI급논문 11편(mrnIF90 이상 5편) / 인재양성(박사 2명) (100%)

2. 연구개발성과의 파급 효과

■ 등급: (**아주 우수**, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 가혹한 북극 환경에서 CPS/IoT 기반 북극 환경인자 수집용 복합센서 통합형 무인 관측 시스템 개발로 장기간 기상, 에어로졸, 플럭스 등 환경인자와 장치 및 설비들의 이상 유무 모니터링에 활용
- 극지 나노입자의 크기분포 및 수농도 장기관측 데이터를 활용, 극지 대기 오염물질 모니터링 국제적 네트워크 구축 및 나노입자 현상 규명 관련 기초과학 영역 확대 효과
- 다년간 누적된 데이터 활용, 인공지능을 활용한 북극권 나노입자생성 예측 기여
- 대기화학모델 입력자료에 대한 분석으로, 활용 가능한 자료의 체계적정리
- 북극지역 대기 미세먼지의 흡습성장 및 광학 특성이 기후에 미치는 영향 파악 기여

3. 연구개발성과에 대한 활용 가능성

■ 등급: (**아주 우수**, 우수, 보통, 미흡, 불량)

KOPRI 극지연구소

① 과학기술적 활용 방안

- 북극 거점들에서의 기상/온실기체/식생/동토 등 환경인자 장기 데이터를 국내외 동토기반 수치모델링 결과 평가에 활용, 관계 분석 결과를 이용해 알고리즘 개발에 활용, 최종적으로 동토 변화에 따른 북극권 환경변화 예측성 개선에 활용

② 경제 · 사회 · 외교적 활용 방안

- 북극의 미발견 새로운 생물 종들과 극한 대사물질 및 효소 후보군을 발굴, 의약학, 정밀화학, 에너지 산업 등에 폭넓게 활용
- 북극 관측거점 지형변동성 추적 관측망 구축 및 운영을 통해 관측거점의 활용성 극대화에 적용 등

③ 북극이사회 옵서버 국가로서의 역할 이행 효과

- 전 지구적인 공동이슈에 대한 옵서버 국가로서의 지위 지속 및 우리나라의 역할과 책임성 명확화에 기여와 북극권에서의 과학적 활동의 근거자료로 제시

1. 목표		2. 수혜자
○ **(통합지표)** – 북극권에서의 다양한 변화 과정(육상–생태–대기 -연안 등) 이해를 위한 지속적 첨단 모니터링과 빅데이터 환경인자 DB 구축 – 환경인자 특성 파악 및 중위도 지역 기상/기후에 미치는 영향 평가 – 동토층 환경인자 관측 고도화 ○ **(개별지표)** - 환북극 관측거점의 원활한 관리, 운영과 환경인자 빅데이터 지속 확보 및 분석 - 북극 대기중 미세먼지의 크기별 생성–성장–기후적 영향에 관한 정량적 DB 구축 및 활용 – IoT/AI 기반 동토층 Smart Grid/Mobile Platform 관측시스템 개발 - 동토 붕괴와 변화 지역에서의 토양 탄소, 미생물의 변화 이해를 통한 토양 탄소 배출 평가 - 과거 및 현재 환경 · 지형 변화 진단 및 복원을 통한 스발바르 피오르드와 융해호 환경 및 지형변화 규명 - 북극 동토거점 주요 온실기체 측정 및 화학/물리/수리적 피드백 평가용 DB 구축 - 북극 동토 지표의 특성 변화에 의한 대기 파동과 기상/기후와의 상관성 규명 – 과거 온난한 시기 동토층 오염물 및 물질 거동이 연안 생태계에 미친 영향 파악 – 북극권 동토 및 주변 지역 과거 기후환경 복원 – 북극 동토층 환경미생물 유래의 메탄산화 미생물 및 효소 발굴과 바이오전환기술 개발 - 국내외 산학연 다학제 협력을 통한 현상 규명 공동연구	➡	○ **(연구주체)** - 극지연구소 및 국내외 학, 연, 산 참여연구자 ○ **(활용주체)** - 북극권 육상–생태–대기–연안 등 국내외 학, 연, 산 연구자 - 극저온 센서 및 시스템 기술 개발자 - 국내외 기후변화 대응 정책가 - 북극 지역 거주자 및 방문자

KOPRI 극지연구소

4. 연구개발 수행의 성실도

■ 등급: (<u>아주 우수</u>, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 본 과제에서는 극지연구소에서 보유, 운영하고 있는 북극권 6개 관측거점을 기반으로 육상(동토)–대기 분야의 지속적인 모니터링과 자료 확보 및 특성 분석을 효율적이고 체계적으로 수행함은 물론, 국내외 연구 저변확대 및 연구성과 제고 등 시너지 효과를 얻기 위해 국내외 전문 연구팀과의 연구 유니트를 구성(위탁 또는 국외학술용역 등)하고 있음.
- 에어로졸 관측 플랫폼 제작으로 필수 에어로졸 관측 장비 확보 계획 체계화 등

5. 공개 발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급: (<u>아주 우수</u>, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 연구재단에 등재된 성과 다운로드(첨부 3 제시 내용) 참조

– SCI급 논문 게재, 특허출원, 저서, 학술활동 등

Ⅱ. 연구 목표 달성도

세부 연구 목표 (연구계획서의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
환북극 동토층 관측거점 운영 고도화와 육상(동토)-대기 기후환경변화 종합 감시 및 피드백 프로세스 규명	35	100	• 온실기체 플럭스 알고리즘 개발 • 동토 환경인자 관측 및 분석을 위한 Smart Polar Platform 구축 • 환북극 동토-대기 환경변화에 따른 온실기체 거동 규명 등
- 동토거점 기상/온실기체/토양/식생 관측시스템 운영 지속 및 관측항목.기간 확대 및 표준화			
- 북극권 나노입자 특성 상시 및 집중 관측자료 확보를 통해 나노입자의 생성 및 성장 원인 규명(1위탁과제)			북극권 나노입자의 특성 장기 및 집중 관측자료 확보, 북극권 환경변화에 따른 나노입자의 생성 원인 변화 규명 등 우수성과 창출
- 북극지역 대기오염 상황을 정교하게 모의하기 위한 극지 대기질 모델링 시스템 고도화(2위탁과제)			북극권 대기질 모델링 시스템 고도화, 위성 관측 에어로졸 자료 장기 추세 경향 분석 등 우수 성과 창출
- 북극 툰드라 생태계의 탄소순환에서 극지 식생의 역할 규명, 환경변화에 따른 탄소순환 이해(5위탁과제)			온난화에 따른 식생 밀도 및 분포의 변화와 동토층 탄소량의 거동과 예측을 위해서 극지 생태계를 구성하는 토양과 식생에서 대기로 방출되거나 흡수되는 이산화탄소량 정량화
- 1982~2022년 기간동안 극지 툰드라 지역의 순생태계교환량 지도 제작 및 시공간 분석(6위탁과제)			BESS-Polar를 모델을 위한 입력자료 구축 및 데이터 전처리, BESS-Polar 모듈 개발 등 우수 성과 창출
북극 동토 기반 현장 관측을 통한 에어로졸의 기후적 역할 규명	35	100	• 북극 동토 에어로졸의 생성-성장 특성 및 기후적 피드백 평가 • 북극 에어로졸 관측시스템 및 DB 고도화 • 북극 동토 에어로졸 생성 및 이동이 한반도를 포함하는 중위도에 미치는 광학적 특성 평가 등
- 북극 미세먼지의 조성 및 흡습성장 특성에 따른 광학 특성 및 기후변화 영향 파악(3위탁과제)			북극지역 미세먼지의 조성 특성 파악, 북극지역 CCN 특성 분석(측정자료분석 및 모델링) 등, 우수성과 창출
- 북극권 기후변화감시요소 중 에어로졸의 형성, 분포, 변동성 특성 분석과 이와 연관되는 기후/환경인자 탐색(4위탁과제)			북극권 및 유라시아 지역 기후, 환경, 해양, 그리고 대기 조성물질 관측 및 재분석 자료 등 19건 수집 분석, 우수 성과 창출
북극 동토거점 환경인자 모니터링을 통한 빅데이터 확보 및 환경변화 규명	30	100	데이터 활용성 제고를 위한 KPDC 내 북극 동토거점 환경인자 DB 가시화 및 분석 기능 탑재
- 6개 관측거점 운영 정상화 및 고도화 추진, 동토 지역 종합 감시			환북극 6개 관측거점 기존 관측시스템 정상 가동 및 환경인자 확보 지속 등
- 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 의무 수행			과기부/외교부 등 정부차원에서의 북극이사회 정식옵서버 국가로서의 환북극 환경변화에 대한 과학기술적 역할 이행 근거자료 제시
합계	100	100	

KOPRI 극지연구소

Ⅲ. 종합 의견

1. 연구개발성과에 대한 종합의견

[연구수행의 타당성]

본 과제는,

- 대한민국 정부와 북극이사회국가와의 긴밀한 국제협력 네트워크 정립과
- 연구분야 설정 및 현지 관측거점 등 인프라 구축, 운영
- 환북극권 기후환경변화 글로벌 이슈 해결 동참, 세계 수준의 우수한 연구 성과창출 및 북극이사회 정식 옵서버 국가로서의 책임있는 역할 수행을 통한 국익 제고와 국격 향상

등의 거시적이며 세계적인 목표를 설정하고 수행하고 있음.

이에 환북극권 동토 지역에 설치한 관측거점을 기반으로 기후환경변화 진단과 정밀 분석 및 이를 통한 미래 예측과 유용 물질 발굴과 활용기술 개발 등 설정한 주제에서 아주 우수한 과학기술적 성과 창출하였음(정부 R&D 과제로서의 선도적 과학활동 수행 100% 완료함)

[연구수행의 적절성]

- 본 과제에서는 극지연구소에서 보유, 운영하고 있는 북극권 5개 관측거점을 기반으로 육상(동토)-대기 분야의 지속적인 모니터링과 자료 확보 및 특성 분석을 효율적이고 체계적으로 수행함은 물론, 국내외 연구 저변확대 및 연구성과 제고 등 시너지 효과를 얻기 위해 국내외 전문 연구팀과의 연구유니트를 구성(위탁 또는 국외학술용역 등)하여, 현장조사 및 환경인자 확보와 분석을 수행하고 있음
- 또한, 연구의 질적 향상을 위해 에어로졸 관측 플랫폼 제작으로 필수 에어로졸 관측 장비 확보 계획 체계화, 환경인자 관측 고도화 등의 업무를 성공적으로 수행하였음

KOPRI 극지연구소

2. 평가 시 고려할 사항 또는 요구사항

- 본 과제는 환북극 동토 지역에, 북극이사회의 정식옵서버 국가로서의 책임있는 과학활동을 수행하기 위한 현장 관측거점을 확보하고 정밀측정시스템을 설치하여 기후환경변화 진단과 환경인자 확보 분석 및 관측자료와 위성자료, 재분석 자료들을 통합한 미래 예측의 목표로 수행하고 있음
- 다만, 자연현상의 정밀성을 추구하기 위해 설치한 관측거점의 접근성이 한정되어 있고, 북극이사회 국가의 주권 영역에서의 활동을 수행하는 만큼, 필수적으로 정부 차원의 연구협약을 체계하고 현장 활동을 수행하므로, 국제 정세의 영향을 받지 않을 수 없음, 또한 COVID-19과 같은 팬데믹 상황이 발생하게 되면 현장 연구에 많은 제약이 따름. 더불어 2024년과 같은 연구비 감액으로 인한 연구 목표와 내용의 조정이 불가피할 수밖에 없음
- 따라서, 이러한 상황 하에서 수행하는 본 과제의 특성을 감안하여 평가될 수 있기를 제안함

3. 연구개발성과의 활용방안 및 향후 조치에 대한 의견

- 과학기술적으로, 인위적 요인 또는 자연적 요인에 의해 발생한 북극권 에어로졸 및 온실기체 등의 기후적 기능을 평가함으로써, 기후변화 전망에 대한 근거 자료 제시
- 주요 온실기체 플럭스(이산화탄소, 메탄)의 정량화를 통한 자료 구축은 모델링을 통한 검증 및 예측에 유용한 정보로써 사용
- 북극 거점들에서의 기상/온실기체/식생/동토 등 환경인자 장기 데이터를 국내외 동토기반수치모델링 결과 평가에 활용하고 온실기체 및 환경인자의 관계 분석 결과를 이용해 수치모델 온실기체 교환 모의 알고리즘 개발에 활용하여 최종적으로 동토 변화에 따른 북극권 환경변화 예측성 개선에 활용
- 확보된 현장 연구자료 및 연구성과들은, 북극 동토거점 환경인자 모니터링이 지속될 경우 10년~30년 이상의 장기 온실기체 자료가 생산되어 가치 증가. 현재 기존 자료를 북극권 이산화탄소 플럭스에 관한 국제 DB화 및 연구논문 작성 진행 중임. 관측시스템 고도화로 환경인자의 종류와 관측 기간 확대 시 온실기체 변동성 분석 및 기상/식생/토양 환경인자의 정량적 관계식 분석에 활용
- 동토변화가 전지구 기후에 미치는 역할 파악을 통한 글로벌 이슈 대응 및 동토변화가 유라시아 극한기상에 미치는 영향파악을 통한 사회 경제적 피해 저감 정책 마련에 기초자료로 활용
- 전 지구적인 공동이슈에 대한 북극이사회 옵서버 국가로서의 지위 지속 및 우리나라의 역할과 책임성 명확화에 기여

Ⅳ. 보안성 검토 (※ 해당사항 없음)

1. 연구책임자의 의견

해당사항 없음

KOPRI 극지연구소

2. 연구기관 자체의 검토 결과

보안성 과제 아님

첨부4 〔해당 사항 없음〕 연구개발성과 공개제한 요청사유서

첨부5 〔해당 사항 없음〕 청년 의무채용 관련 실적

첨부6 〔해당 사항 없음〕 참여기업 의견서

첨부7 〔최종본 제출〕 평가의견에 대한 수정 . 보완 대비표

평가의견 (수정 및 보완사항)	수정 및 보완 내용	해당 페이지	비고
ㅇ 지속적인 북극권 환경변화 연구를 위해 쇄빙선(아라온호 등) 등을 활용한 공간자료 확보 맞 연계 방안 마련이 필요함	ㅇ 국내 유일한 쇄빙연구선인 ARAON호의 극지역 탐사와 관련해서, 현실적으로 본 과제 단독으로 활용하기는 불가능함. 따라서 본 과제에서는 우리나라 ⇄ 북극권 베링해/척치해 등 해양조사 일정에 맞춰서, "동토/해양 특성 변화에 따른 미세먼지 생성-성장 및 구름 응결핵 특성 규명, 위도 변화에 따른 대기 중 바이오 에어로졸의 이동 특성 규명, 아라온 항해 중 실험실 챔버 실험을 통해 해양 유기물이 일차 미세먼지 생성 특성에 미치는 영향 규명" 연구, 3차원 초음파 풍속계를 ARAON에 장착하여 기상 연구 등을 수행함(최종보고서 86p, 91p, 167p, 286p 참조). 아울러 선상관측 자료 확보와 학술활동을 수행하고 있고, 후속과제('25.04~'29.12) 연구에서도 대기 미세먼지 관측 집중 캠페인을 집중적으로 수행 예정임(1세부과제 최종보고서 46p 참조)	*p.46*	

주 의

1. 이 보고서는 과학기술정보통신부에서 시행한 해양극지기초원천기술개발사업 “북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발” 총괄과제의 “북극 동토-대기환경기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명” 1세부과제의 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