

보안과제[] 일반과제[○] (제출용)

BSPN22012-086-12

2021M1A5A1075508

(총괄) NRF-2021M1A5A1065407 / (세부) 2021M1A5A1075508 (위탁) 2021M1A5A1075510
(1단계) (KOPRI) (BSPN21012 / PN22012)

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)

(2세부) 기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해
(Changes in biogeochemical processes of Arctic terrestrial
ecosystem in response to climate change)



한국해양과학기술원부설
극지연구소

과학기술정보통신부

제 출 문

극지연구소장 귀하

이 보고서를 “북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발” (과기부 해양극지기초원천기술개발사업 총괄과제)의 2세부과제 “기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해” 단계보고서(연구기간: 2021.04.27.~2022.12.31)로 제출합니다.

2023년 10월 25일

주관연구기관명 : 한국해양과학기술원부설
극지연구소

주관(총괄)연구책임자 : 이방용('21.04~ '22.12)

세부과제-2 연구기관명 : 극지연구소

세부과제-2 연구책임자 : 정지영('21.04~ '22.12)

연구원 : 김관수, 김민철, 김유진, 김진현,

“ : 남성진, 이유경, 이주한, 정수정,

“ : 최용희, 홍순규

(이상 극지연구소; 퇴직 연구원 포함)

1위탁연구기관명 : 한국기초과학지원연구원

위탁연구책임자 : 장경순('21.04~ '22.12)

(이상 한국기초과학지원연구원)

(이상 성명 가나다순)

(본 보고서는 정부(과학기술정보통신부/한국연구재단)로부터 지원받은 해양·극지기초원천기술개발사업의 일환으로 수행한 연구활동의 1단계(2021.04.27.~2022.12.31.) 보고서로서, 연구개발과제 수행에 참여한 2세부과제와 위탁과제의 연구내용을 담고 있다 (근거 : “한국연구재단 지원사업 관련 법규집” 제12조5항, vol.2021.01.01).

다만, 국가연구개발 혁신법에서 제시한 단계보고서의 양식으로 정부에 기제출한 보고서와는 달리 한국해양과학기술원부설 극지연구소의 연구결과보고서의 제출 양식에 맞추어 부분 수정된 것임을 밝혀 둔다. 아울러 개인정보보호법 등에 저촉될 수 있는 개인 인적사항 및 연락처 등은 표시하지 않았다.

단계 보고서(협약용, 세부과제용)

			양식A101-2				
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	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해					
	영 문	Changes in biogeochemical processes of Arctic terrestrial ecosystem in response to climate change					
⑧ 주관연구기관명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소		⑨ 사업자 등록번호				
⑩ 위탁과제기관명	한국기초과학지원연구원						
⑪ 주관연구책임자	성 명	정지영	국가연구자번호				
	전 공	토양학	직급(직위)				
	소속부서	생명과학연구본부	전자우편				
	전 화		휴대전화				
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	900,000					900,000	
2차년도	900,000					900,000	
3차년도							
4차년도							
5차년도							
합계	1,800,000					1,800,000	
⑬ 총연구기간	2021. 04. 27 - 2024. 12. 31 (45개월)						
⑭ 다년도연구기간	2023. 01. 01 - 2024. 12. 31 (24개월)						
⑮ 당해연도연구기간	2023. 01. 01 - 2023. 12. 31 (12개월)						
⑯ 참여기업 수	중소기업		중견기업		대기업		계
⑰ 국제공동연구	국가명		상대국 연구기관수		상대국 연구개발비		상대국연구책임자수
	캐나다 등 3개국		3				3
⑱ 실무담당자	성 명	임민호	휴대전화		전자우편		
<p>관련 법령 및 규정과 모든 지시 사항을 준수하면서 이 국가연구개발사업을 성실히 수행하고자 아래와 같이 연구개발계획서(연구개발제안서)를 제출합니다. 아울러 이 연구개발계획서(연구개발제안서)에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 선정 취소, 협약 해약 등의 불이익도 감수하겠습니다.</p> <p style="text-align: center;">주관연구책임자 : 정지영 (직인생략) 주관연구기관장 : 강성호 (직인생략)</p> <p style="text-align: center;">과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀 하</p>							

공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관							
위탁연구개발기관	한국기초과 학지원연구 원	장경순	부장			동토층 용존 유기물질 화 학특성 분석 및 상관인자 도출	정부출연 연
	연세대학교 (2단계 추가)	강호정	교수			동토층 온 실기체 (이 산화탄소 및 메탄) 발생량 측정, 분석 및 주요 조 절 인자 구 명	대학



〈 요약 문 〉

양식A201

연구개발 목표 (500자 내외)	<ul style="list-style-type: none"> ● 현장실험을 통해 기후 변화(적설량 증가)에 의한 습윤/건조 툰드라 생태계 변화 규명 ● 실험실 내 토양 인큐베이션 실험을 통해 동토 생태계의 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명 ● 북극 동토 생태계의 구조와 기능에 영향을 미치는 주요 환경인자 규명 ● 기후 변화에 의한 북극 동토 생태계의 구조, 기능 및 생지화학적 순환 변화 전망 			
연구개발 내용 (1000자 내외)	<ul style="list-style-type: none"> ● 적설량 변화에 의한 북극 툰드라 토양의 생지화학적 특성 변화 규명 <ul style="list-style-type: none"> · 동토 생태계에서 방출되는 온실 기체 모니터링을 위해 플럭스 측정 장비 구축 및 안정적 자료 확보 · 습윤/건조 툰드라 지역에서 적설량 증가에 의한 생태계 구조 및 기능 변화 연구: 식생, 토양 유기물, 질소 무기화, 미생물 특성, 온실기체 플럭스 변화 관측 및 인자별 상관관계 규명 · 적설량 증가가 오래된 탄소(old carbon) 분해에 미치는 영향 연구 · 적설량 변화에 대한 툰드라 생태계별 반응 비교 ● 북극권 동토 내 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명 <ul style="list-style-type: none"> · 혐기 및 호기 조건에서 배양 온도와 시간에 따른 유기물 분해 대사 변화 연구 · 탄소 및 질소 양분 증가에 따른 유기물 분해 대사 영향 연구 · 유기물 분해 과정에서 미생물의 탄소 이용 효율 변화 연구 · 유기물 분해 대사와 온실기체 발생 간의 상관성 및 조절인자에 대한 종합 분석 ● 미답지에서 동토 생태계 국제 공동 연구 <ul style="list-style-type: none"> · 캐나다 극지지식청과 협력하여 IMA(Intensive Monitoring Area) 생태계 조사 · 캐나다 IMA 미답지 토양 탄소, 질소 동태 연구, 토양 미생물 특성 조사 · 그린란드 등 고위도 북극 미답지 토양 미생물 특성 조사 			
활용계획 및 기대효과 (500자 내외) (응용분야 및 활용범위 포함)	<ul style="list-style-type: none"> ● 기후 변화에 따른 극지 토양 생태계의 반응 및 생지화학적 순환 변화 기작을 규명함으로써, 앞으로의 동토 환경 변화의 정확한 평가를 통해 기후 변화 모델의 예측력 향상에 기여 ● 영구동토지역의 탄소와 질소 동태 장기모니터링 결과를 관련 연구자들과 공유/종합/분석하여 시공간적 규모가 확장된 국제 공동 논문 성과 도출 가능 ● 동토 생태계 용존유기물 연구는 극지 하천을 통해 북극해로 유입되는 용존유기물 연구의 자료로 활용 가능/육상-해양생태계 연계할 수 있는 연구기반 마련 ● 북극의 미답지 생태계 조사 및 동토층 대상 다중오믹스 정밀 분석을 통해 동토 유래 신규 대사물질 및 효소 후보군을 발굴함으로써 의약학, 에너지 산업 등에 폭넓게 활용될 수 있음 ● 북극 육상 생태계 모니터링 관련 데이터 생산을 통해 북극 이사회 옵서버 국가 지위 유지 및 북극권 글로벌 이슈 대응 기여 			
국문핵심어 (8개)	북극 기후변화	동토층 생태계	적설량 변화	생지화학적 순환
	동토 마이크로바이옴	다중오믹스	토양 유기물 분해	토양 기체 플럭스
영문핵심어 (8개)	Arctic climate change	permafrost ecosystem	snow addition	biogeochemical cycling
	permafrost microbiome	multi-omics	soil organic matter decomposition	soil gas flux

○ 단계별 연구개발 목표와 내용

연구개발 목표 및 내용	1단계	목표	● 북극권 동토 생지화학 순환 연구 기반 구축
		내용	● 북극권 육상 생태계 모니터링 관측망 정비를 통한 생지화학적 순환 변화 관측
	2단계	목표	● 환경별 기후조절인자 변화에 따른 북극권 생태계 변화 규명 ● 북극권 육상환경 변화에 따른 고위도 생지화학적 순환의 변화와 전망
		내용	● 북극권 동토환경 변화에 따른 생태계 생지화학적 순환 및 변화 규명



〈 연구 분야 〉

양식A103

코드구분	중심분야		관련분야1		관련분야2		관련분야3		관련분야4	
	코드	비중	코드	비중	코드	비중	코드	비중	코드	비중
국가과학기술표준분류	ND1103	45 %	ND1106	30 %	LA0503	15 %	LA0506	10 %		%
국가과학기술표준분류 (적용분야)	X99	100 %		%		%		%		%
과학기술분야분류	G20102	40 %	G22104	30 %	G10406	20 %	G13205	10 %		%
6T 기술분류	050116	60 %	020315	20 %	020119	10 %	020111	10 %		%
NTRM 분류	B030308	80 %	B050511	20 %		%		%		%
원천기술 개발분야	0812	50 %	0811	40 %	0499	10 %		%		%

극지연구소

〈 목 차 〉

제 1 장. 연구개발과제의 개요 (총괄)	1
제 2 장. 연구개발과제의 목표 및 수행 내용 (세부-위탁과제 포함)	11
1. 연구개발과제의 목표	12
2. 평가항목별 성과	13
제 3 장. 연구개발과제의 수행 결과 목표 달성 정도 (세부-위탁과제 포함)	15
1. 추진내용 및 연구개발결과	16
2. 대표적 연구성과 및 목표 달성 정도	38
제 4 장. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	44
제 5 장. 연구개발 결과 활용 방안 및 계획	49
1. 연구개발 결과의 활용 방안	50
2. 연구개발 결과의 활용 계획	52

제 1 장
연구개발과제의 개요 (총괄)



■ (극지의 중요성과 국가 기여도)

■ 중요성 (민간 투자가 어려운 국가차원에서의 고유 영역)

[극지는 '기후변화의 바로미터'로서 지구 온난화에 의한 미래 기후환경 변화 영향과 원인에 대한 해답을 찾을 수 있는 최적의 연구 공간]

- ※ 극지연구는 영역적 특성상 접근이 매우 어려워 시작단계에 있으며, 우주개발과 함께 미래 산업에 매우 중요한 정보를 제공할 수 있는 대상임
- ※ 극지는 지구온난화에 민감하게 반응하는 기후시스템으로 구성되어, 과거와 현재 진행 중인 기후변화영향에 대한 연구에 최적화된 "Super Site"로 알려짐(지구 환경 변화 감지와 예측의 최적지인 극지에서 현재 진행되고 있는 기후변화는 우리나라를 비롯한 전지구 기후에 직접적인 영향을 미침)
- ※ 특히, 북극의 급격한 기후환경변화에 따라 실생활 영향이 확대(한파, 폭서 및 슈퍼태풍 등)되고 있어, 과학연구 자료획득 및 지속적인 환경 모니터링을 위한 현장 조사가 매우 중요한 요인임
- ※ 국내의 극지에 대한 기술수준은 선진국대비 약 70% 수준(인프라, 연구비 규모, 연구인력 등 종합 평균, 약 7.2년 격차보임)이므로, 격차 해소와 국제적 과학기술 역량 제고 필요
- ※ 과학기술적, 정치·사회적 중요성
 - 기후변화, 이상기상 현상 등의 글로벌 이슈 해결위한 환경변화 관측 및 DB 축적과 분석 필요
 - 급변하는 극지 기후환경변화에 대한 정밀한 관측과 자체 분석 및 미래 대응 필수
 - 국제 극지과학 거버넌스 내 영향력 확보 및 국가 위상강화 필요
 - 지속적 과학활동과 세계 수준의 연구 성과 창출 및 국제적 의무 수행 필요
 - 북극 현안 대응능력 제고, 국제사회 기여 및 극지과학 역량 강화를 위한 지속적 극지 연구활동 수행
 - 선진국으로서의 대외 국가위상 및 국민 삶의 질 향상과 자긍심 제고

■ 기여도 (글로벌 이슈 대응 국가경쟁력 확보)

- 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

- (국내외 환경/거버넌스 변화) 근래 들어 북극에서의 급속한 기후환경변화 (해빙(海水) 감소, 동토층 해동(解凍), 생태계 변화 등)가 북극권 자체는 물론 대한민국을 비롯한 지구상 곳곳에도 커다란 영향을 미치고 있음. 이러한 심각한 현상 파악과 대응 문제

는 국제사회의 커다란 이슈로 대두되었고, 지속적 모니터링, 정보 공유 확대 및 긴밀한 국제공조체제 강화가 요청되고 있음.

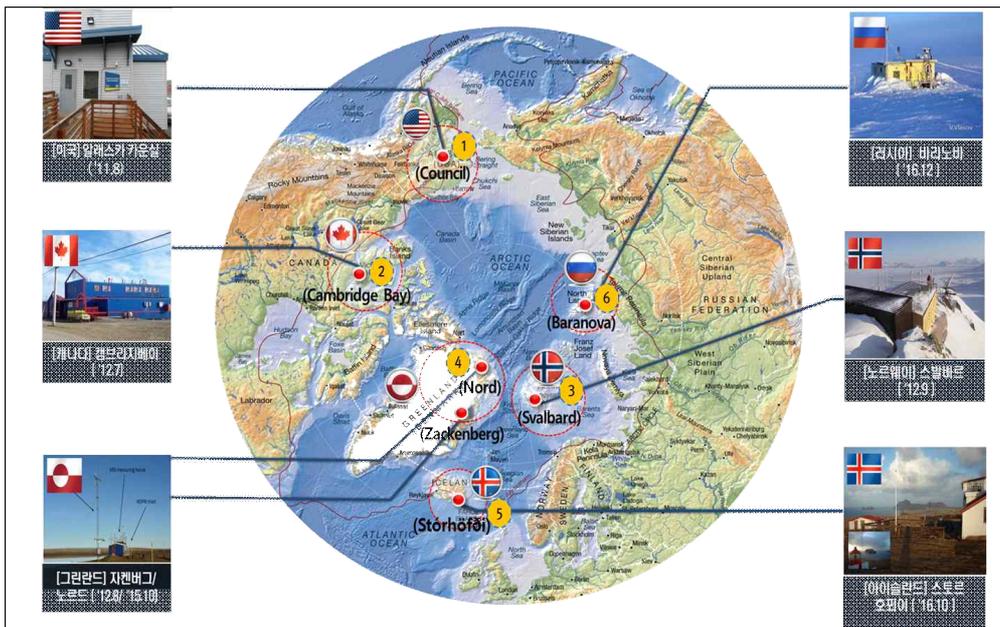
(주요이슈)

- 극지환경변화의 물리적 현상과 요인의 급속한 변화 진행
- ※ 극지는 기후시스템(기권/지권/수권/빙권/생물권)을 모두 갖춘 소지구적 영역으로서, 인간 활동의 증가와 더불어 지구온난화에 따른 변화가 가장 극심하고, 전 지구에 미치는 파급효과가 가중되고 있으나, 아직 현장 모니터링과 과학적 자료 및 연구 미흡
- ※ IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체) 6차 보고서('21.08)와 해양과 빙권 특별보고서(' 19)에서 1.5℃ 기온상승이 기존의 2030~2052년에서 약 10년이 빨라진 2021~2040년에 돌파될 것으로 예측하고 있으며, 특히 영구동토층의 급격한 해동(解凍)과 가파른 온도 상승(0.3℃/10년)으로 대규모 온실가스 방출에 의한 지구온난화의 가속화 경고
- 급격한 동토층의 해동에 의한 생태계의 환경변화가 가속화되면서 전 지구적 규모의 치명적 파급효과 초래
- ※ 북극의 급격한 기후환경변화에 따른 특이현상(슈퍼폭염 및 태풍, 한파, 산불, 홍수, 가뭄 등) 빈도와 강도 증폭으로 지구 생태계와 인간 삶에 악영향 확대
- 선진 각국에서 외교, 환경, 과학, 영유권 분쟁 등 민감한 문제에 선제적 대응을 위한 북극정책 기능 강화
- ※ 북극이사회 국가 및 오픈서버 국가들의 자국 이익을 위한 북극정책 수립 및 발표
- 급격한 북극 기후변화 글로벌 이슈 대응을 위한 국제적인 공조체제 강조
- ※ 광범위한 북극지역에서의 급속한 기후변화 조사/분석/평가 등을 위한 국제적 협력 강조

- **(목적)** 이에, 본 과제에서는, 북극권에서의 급변한 환경변화의 중요성 등을 인식하고, 동토지역에서의 육상-대기-연안 영역을 대상으로 기후환경변화에 대한 관찰/관측 및 환경인자 확보와 DB 구축, 각 인자에 대한 분석을 통해 과거부터 현재까지의 변화양상을 파악하고, 나아가 관측자료/위성자료 및 모델링의 기법을 사용하여 미래를 예측하는데 목적이 있음. 또한 북극이사회 오픈서버국가로서의 의무 과학활동 수행 및 이를 통한 국가위상 제고 및 오픈서버 국가의 자격 유지 등 정치·사회·외교적 업무를 수행함과 동시에 정밀한 과학정보 자료를 우리나라 정책수립에 제공하는데 있음.

■ (과제 개요)

- 『극지기초원천기술개발사업』은 수행 주체인 극지연구소를 중심으로, 과기부의 인적·물적 지원과 외교부의 국제외교적 지원을 받아, 북극이사회 국가들과의 연구 협정을 체결하고, 환북극 동토지역에 6개 관측거점 확보와 정밀측정시스템 구축, 환경인자 빅데이터 DB 확보와 특성 분석 및 미래 대응 연구 수행(북극 동토 연구의 table setter 및 pioneer 역할 담당).
- * 미국, 캐나다, 스발바르, 덴마크(그린란드), 아이슬란드, 러시아 등 6개 북극이사회 국가 동토층에 설치한 연구 사이트 및 정밀측정시스템 등 종합 패키지
- * 대기-동토(지표/지중)-생태계 등의 종합적 연구대상을 특성화하여 북극권 환경변화에 따른 물질이동 중점 연구 수행)



※ 사업 수행 지원근거

◇ 법적근거

- 제4차 국가과학기술기본계획 ('17.12)
 - 미래도전 과학기술 역량 확충/혁신활성화 과학기술생태계 조성/과학기술 행복한 사회 구현 등
- 제2차 북극활동진흥기본계획 ('18.07)
 - 북극 거버넌스 확대/북극 현안대응 주도/정책 추진역량 강화 등

◇ 기획근거

- '극한지 기초원천 연구개발 전략 수립연구' ('17.11, 한국연구재단)
- '글로벌 이슈대응 극지연구개발사업 기획 연구' ('19.11, 과기부/해수부)

○ 국내·외 정책 및 거버넌스와의 부합성

▶ **국내 정부정책 동향과의 부합성(의무적 지원근거)**

비전	세계질서 대전환 이후의 희망적 미래를 실현하기 위한 과학기술 기반의 국가 사회 혁신		
국가 사회 혁신	전략1(전북) 위기 후 빠른 회복을 위한 회복탄력성 강화	전략2(포용) 우리 사회의 포용력을 높이는 사회안전망 구축	전략3(생존) 인류와 국가의 생존보장을 위한 국제협력 해결
	주관과제(예사) 미래 성장동력 및 글로벌 경쟁력 강화	주관과제(예사) 고인력 사회적 기업 육성 혁신	주관과제(예사) 과학기술 기반 탄소중립 실현
과거 혁신 역량 강화	기술매관 시대 R&D 투자 수행 권리의 전유가 혁신	디지털 전환 이후 신시장을 개척하는 R&D 성과활용	전력사(혁신/도약) 인구절벽에 대응한 양극화 및 경제발전, 과학기술 기반 국가위상 제고

※ 과학기술 진흥 관련 / 국가 사회 혁신 관련

❖ **국지활동진흥법 ('21.04.13 제정 / 10.14 시행) :**

- 목적 : 국지활동을 육성·지원하여 극지의 지속가능한 발전과 인류 공동문제 해결을 선도하고, 국가경제 발전 및 국익 제고에 이바지
- 진흥 : 연구개발, 전문인력 양성, 경제활동 진흥, 기반시설 설치 운영, 정보시스템 구축 등 국지활동 활성화 추진

❖ **"2050 북극활동 전략" 발표 ('21.11.30 국무회의 보고) :**

비전	2050 북극 거버넌스 선도국가 도약		
추진 전략	① 북극권 현안 해결 기여	② 북극 외교 지평 확대	
	③ 지속가능한 북극 발전 동창	④ 북극 활동 기반 마련	

■ [사업 기획 및 수행 근거]

- ✓ '극한지 기초원천 연구개발 전략 수립연구' [2017.11. 한국연구재단 수행]
- ✓ '글로벌 이슈대응 극지연구개발사업 기획 연구' [2019.11. 과기부/해수부 공동 수행]

▶ **국제 거버넌스와의 연계성**

❖ 북극기후변화업데이트 2021 (AMAP 보고서) - Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts

- 지속적 급격히 변화하고 있는 북극변화의 물리적 동인 (drivers)
- 북극 극한 현상의 빈도와 강도 증가
- 북극 기후변화가 지역 사회에 큰 영향
- 북극 생태계의 급격한 변화
- 북극의 변화는 전 지구적인 결과 초래
- 북극 온난화에 대한 최신 기후 모델 가동

❖ IPCC AR6('21.8) : 현재 기후상태/가능한 미래 기후 /리스크 평가와 기후정보/미래 기후변화 억제

- 현재 기후상태 판단 (빠르고 광역적 정확해...)
- 가능한 미래 기후 예측 (근미래(~2040) 1.5°C 온난화 도달)
- 리스크 평가와 지역 적응위한 기후정보 (기후영향인자 (Climatic Impact-Drivers: CID)(환경인자) 파악과 전망)
- 미래 기후변화 억제 (온실기체 등 감축 필요)

※ 6차 보고서에서는 CID 각각의 역할 반영함

○ 과제의 독창성/혁신성/타당성

국가연구개발사업으로서의 글로벌 이슈 대응을 위한 과학기술적 연구개발과 우수 성과 창출 및 북극이사회 옵서버국가라는 지위에 부합되는 국가위상 제고 연구 수행

❖ **[핵심 연구계획]**

- **[독창성]** 세계 최초로 환북극 동토 지역내 동시 6개 관측 거점 확보와 동시 운영, 환경인자 DB 구축 및 leading-edge 연구 수행
- **[혁신성]** 국내 유일무이한 북극권에서의 기권-지권-생물권-빙권 대상 환경변화에 대한 종합 모니터링 수행과 기술개발, 환경변화 특성 규명 등 국내외적 문제해결형 혁신적 과제
- **[목표의 명확성]** 지구온난화에 따른 동토지역 육상-대기 환경변화, 동토중내 미생물 활동 변화와 생태계 파급효과 등 규명, 환경인자 간 상호 정확한 현상해석 및 부존 유용생물자원의 활용방안 연구, 과학·공학 융복합으로 생태계-인간 공존 미래 환경변화 예측과 대응방안 마련 등 명확한 목표 설정

❖ 현장조사 → 데이터 수집(DB 구성) → 특성 분석 → 현상규명 (알고리즘/시나리오 제시) → 사업의 완성도 제고, 국가위상 제고

■ **환경인자(Environmental Factor) (기후영향인자 Climatic Impact-Drivers; CID):** 북극권에서의 급속한 환경변화에 따른 대기-생태-동토의 상태 측정을 위한 필수 요소

☞ 환경인자 확보의 필요성 : 북극권 환경변화 인지 → 정보 수집(환경인자)과 처리 → 환경변화 진단과 특성분석 → 변화의 양/음 되먹임(feedback) 결과 도출과정에서의 기본적이고 필수적임

○ 과제의 추진 체계 구성(2022년 기준)



※ 2단계(1차년도)부터 세부과제-2와 세부과제-5에 각각 대학 위탁연구 1개씩 추가함

○ 세부과제별(위탁과제 포함) 특성과 연계성



〈북극 공간활용을 통한 연구 주제별 역할(본 과제에서 북극공간활용이라는 대전제로 개발한 핵심 연구주제들의 역할)〉



- 최종 목표 달성**
- 북극권 육상-대기 기후환경 관측 [고도화 및 환경인자 확보, 물용성 제시]
 - 북극권 육상-대기 상호작용 규명 및 온실기체 플렉스 교환 알고리즘 개발
 - 북극 유래 유용물질의 유용성 및 활용 기술 개발
 - 동토 거점 관측 자료활용 및 기후모델 예측 성능 향상
 - 환경변화 조래 육상-중위도 영향 평가 [피드백]
 - 미래 기후환경 변화 예측(시나리오 제시)

■ 프로세스 종합 개요(과제 구성 및 각 세부과제 수행의 적절성):

북극권에서의 동토-대기-생태-연안 등 영역 대상으로 과거-현재-미래의 시간적 변화까지 4차원적 연구와 생물자원 활용 및 영향 평가라는 체계하에,
 • 세부과제1에서 대기환경 종합적 변화 관측 및 분석(대기화학, 기후화학, 개빙, 자료생산CPS/OT 기술 적용, 전자통신 개빙) 자료전송(원격 빅데이터 전송기술 적용) 등 연구 수행
 • 세부과제2에서 생태변화 및 미생물 거동-지표에 영향/생태계 등 지표 환경변화 측정 및 특성 분석(생물/생태 개빙) 등 연구 수행
 • 세부과제3에서 과거 기후환경 변화 (고기후학적 개빙) 복원 및 인류세 이후 환경변화 추적 및 분석 등 연구 수행
 • 세부과제4에서 정부 R&D로서 산업화에 기여할 수 있도록, 세부과제 2-3 등 KPDC 자료 활용을 통한 유망 생물자원의 발굴 및 활용기술 개발(생물공학 개빙) 등 연구 수행
 • 세부과제5에서 세부과제1-3 등 KPDC 북극 관측자료와 모델/위성을 활용한 자료 저장/분석/연상 진단과 미래 예측(예측과 대응 방안 제시 개빙) 등 연구를 수행하여 상호 연계성과 시너지 효과를 얻을 수 있도록 구성하였음

〈본 과제의 총괄 추진 개념 및 세부주제별 연계성(연구 수행 방법)〉

○ 총괄 로드맵 ('21.04~' 24.12)

주제	전개 (45개월)				최종 목표 달성
	2021년 (1단계 1차년)	2022년 (1단계 2차년)	2023년 (2단계 3차년)	2024년 (2단계 4차년)	
1. 북극 동토-대기환경 기반 종합 모니터링 및 상호관계 규명	6개 관측거점의 운영 최적화/정상가동 북극 현장 실측 및 위성자료 기반 동토 관측체계 기반 체계 구축 1개소 추가, 식생지수 및 광합성 관측 2개소 추가 에어로졸 정밀측정 플랫폼 고도화 및 운영 방안 수립 알래스카 도양기후 관측거점의 생성, 방출량 측정과 환경제어학적 파악 환경인자 원격 분석 플랫폼 구축 시스템 개발(환경인자 4종)	관측 플랫폼 운영 생물 자원 확보 위한 다중 프록시 분석능력 확보 온도 및 시간 변화에 따른 유기물 분해, 대사, 온실가스 발생 변화 파악 다양한 생체물질 고리형 에어로졸 생성 과정 조사 동토와 및 관대생물 토양/중기 기온 온실기체의 방출량 평가 등 포터블형 센서 플랫폼 및 에너지 효율성의 기후 고도화(64 노드) 구축	관측 플랫폼 운영 최적화 관측체계 운영수준 향상 위한 플랫폼 운영 플랫폼 시범 운영 및 국제공동 생체인 네트워크 구축 토양과 지체 측 비파괴 지역 도양기후 온실기체의 생성 및 방출량 상이점 평가 CPS/위성센서 네트워크 기반 환경 인자 관측시스템 구축(128 노드)	최근 40년 한반도 동토 온실기체 플렉스 정량 측정 공역수 정량 측정 에어로졸 정밀측정 플랫폼 정성 가능 및 원격 측정 체계인원 제시 온실기체의 방출량 및 환경제어학적 이윤 지표면 생체인원 개발 Smart Polar Platform 구축 (통신거리 > 3 km)	북극권 육상-대기 기후 환경 관측 [고도화 및 환경인자 확보, 물용성 제시] 북극권 육상-대기 상호작용 규명 및 온실기체 플렉스 교환 알고리즘 개발 극지방 환경 변화 기술 확보 북극 유래 유용물질의 유용성 및 활용 기술 개발 동토 거점 관측 자료 활용 및 기후모델 예측 성능 향상 환경변화 조래 육상-중위도 영향 평가 [피드백] 미래 기후환경 변화 예측(시나리오 제시)
2. 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해	건조/습윤 동토의 강설 조사 실험 관측체계 구축 영기 조건에서의 유기물 분해 대사 변화 파악	관측 플랫폼 운영 생물 자원 확보 위한 다중 프록시 분석능력 확보 온도 및 시간 변화에 따른 유기물 분해, 대사, 온실가스 발생 변화 파악	관측 플랫폼 운영 최적화 관측체계 운영수준 향상 위한 플랫폼 운영 플랫폼 시범 운영 및 국제공동 생체인 네트워크 구축 토양과 지체 측 비파괴 지역 도양기후 온실기체의 생성 및 방출량 상이점 평가 CPS/위성센서 네트워크 기반 환경 인자 관측시스템 구축(128 노드)	관측 플랫폼 운영 최적화 관측체계 운영수준 향상 위한 플랫폼 운영 플랫폼 시범 운영 및 국제공동 생체인 네트워크 구축 토양과 지체 측 비파괴 지역 도양기후 온실기체의 생성 및 방출량 상이점 평가 CPS/위성센서 네트워크 기반 환경 인자 관측시스템 구축(128 노드)	관측 플랫폼 운영 최적화 관측체계 운영수준 향상 위한 플랫폼 운영 플랫폼 시범 운영 및 국제공동 생체인 네트워크 구축 토양과 지체 측 비파괴 지역 도양기후 온실기체의 생성 및 방출량 상이점 평가 CPS/위성센서 네트워크 기반 환경 인자 관측시스템 구축(128 노드)
3. 북극 스발바르 기후-환경 취약성과 회복력 이해	환경변화 추적 관측망 구축/기후환경특원 다중프록시 개발 한-노 스발바르 국제공동연구자 협력체계 구축 위험을 국어 및 환경시료 정밀분석시스템 구축	기후환경변화 특성을 위한 다중 프록시 분석능력 확보 저해상도 기후환경 특이성 분석 기반 스발바르 환경변화 영향 파악	현제 및 과거 기후환경변화 비교를 통한 인간 활동 간섭 영향력 이해 다중 프록시 활용 스발바르 과거 동토 기후환경변화 정량 분석 북극 스발바르 환경변화 패턴 규명	다중 프록시 활용 스발바르 최근 인류세 동토 기후환경변화 정량 분석 다중 프록시 활용 스발바르 최근 인류세 동토 기후환경변화 정량 분석 인간 활동 간섭에 따른 스발바르 환경변화 이해	북극권 육상-대기 기후 환경 관측 [고도화 및 환경인자 확보, 물용성 제시] 북극권 육상-대기 상호작용 규명 및 온실기체 플렉스 교환 알고리즘 개발 극지방 환경 변화 기술 확보 북극 유래 유용물질의 유용성 및 활용 기술 개발 동토 거점 관측 자료 활용 및 기후모델 예측 성능 향상 환경변화 조래 육상-중위도 영향 평가 [피드백] 미래 기후환경 변화 예측(시나리오 제시)
4. 환경변화 조래 환경 미생물로부터 다중 유전자 풀링 분석을 통한 유전자 풀링 분석	북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 및 영향 평가 관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 분석	북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 및 영향 평가 관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 분석	관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 및 영향 평가 관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 분석	관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 및 영향 평가 관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 분석	북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 및 영향 평가 관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 분석
5. 북극권 육상-중위도 기후-환경 연계성 연구	관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 분석	관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 및 영향 평가 관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 분석	관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 및 영향 평가 관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 분석	관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 및 영향 평가 관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 분석	북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 및 영향 평가 관측자료 기반 북극권 육상-중위도 기후변화 연계성 분석

■ 5개 세부과제로 구성 : 1단계(21개월) + 2단계(24개월)로 수행/시너지 효과 → 최종목표 달성

본 과제에서는 총괄적으로 북극이사회 8개 국가 중 북극해 연안 6개 국가(미국, 캐나다, 그린란드(덴마크), 노르웨이(스발바르), 아이슬란드, 러시아 등)내 동토 지역에 관측 거점을 확보하고 정상적으로 가동하며, 동토층에서의 대기-생태-식생 등 환경물리학적 특성과 북극권 온실기체 변동 요인인 동토층 유기탄소 및 미생물의 특성을 이해하는 것을 목적으로 하고 있다. 또한 각 관측 거점에서의 동토층에서의 온난화 기체 특성 관측 및 분석, 전자통신학적 자료 전송 시스템 구축과 적용 등 연구를 수행하였다. 이에 대한 수행 내용과 결과 등에 대해서, 앞에 제시한 전체 로드맵에 의거하여, 각 세부과제별(위탁과제 포함)로 각각 기술하되, 본 보고서에서는 2세부과제만 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-거점확보 및 시스템 구축-확보된 거점에서의 지속적 모니터링-양질의 자료 확보와 모델링을 통한 예측 등의 연구 흐름성을 유지 발전시키면서 계획된 연구의 성공적 달성을 위해 주력하였다.

나. 과제 구성

본 과제의 총괄은 2단계 1차년도('21.04~ '21.12)와 2차년도('22.01~ '22.12)의 기간 동안 대기분야, 생태분야, 환경분야, 지질/지구물리분야, ICT 공학분야, 미생물분야, 수치모델링분야 등 다학제적으로 구성되어 있으며, 2세부과제에서 기후변화에 의한 북극 동토 생태계의 생지화학적 변화를 이해하기 위한 전략으로 이루어져 있다. 본 과제에서의 참여연구원은 우리나라와 국외의 해당분야 전문가 그룹과의 연계로 상승효과를 도모하고자 추진하였다.

◆ 주요 내용(총괄)

- 북극권 6개 관측 거점에서의 토양미생물특성, 이산화탄소 플럭스, 토양물리특성, 메탄 플럭스, 블랙카본 농도, 토양코어, 에어로졸, 기상, 식생(생태)지수, 냉각가스, 토양미생물 유전체 등 환경인자 확보 : 자료의 QC/QA를 통한 안정적 DB 등재 완료-대외 활용도 확산
- 북극권에서 기후환경변화가 동토 생태계에 미치는 영향과 생태계의 반응 파악
- 유용 효소관련 연구분야 및 산업의 성장 가속화: 생산균주 탐색, 유전자 해석기술, 단백질 공학방법에 의한 효소 개량기술, 효소 고정화, 보존, 안정화 기술, 제재화 기술 등
- 기후변화(지구 온난화)에 의한 미생물의 분해대사활성은 증가할 것이며, 더불어 부식질의 분해률과 분해산물 역시 증가하리라 예상됨에 따라, 영구동토층 해동에 따른 탄소 방출량 변화가 주변 생태계에 미치는 영향을 예측하고자 하는 연구 진행
- 북극 지역에서의 이러한 대기 역학 및 대기 물리 과정과 육상의 생지화학 과정의 상호작용을 보다 잘 수치 모사할 수 있는 모형 개발
- 다양한 대기 환경 모델링 기술 중에서 중요한 육상생태계 모델링, 대기경계층 모델링, 가변격자 모델링 기술에 대한 관측 자료 기반의 검증을 수행하고 전 지구시스템 모델의 북극 기후 모델링 특성 파악

◆ **목표의 도전성과 혁신성(총괄)**

- 세계 최초로 북극이사회 국가(미국, 캐나다, 노르웨이, 덴마크(그린란드), 러시아, 아이슬란드 등)와의 양자, 다자협력 체결을 통한 6개 관측 거점 확보 및 정밀측정시스템 개발·운영
 - ※ 현재까지 1개 국가가 북극권 국가내에 다각적인 환경변화 관측 거점을 확보하고 국제공동 연구를 수행하는 국가는 우리나라 이외에 전무함
- 가혹한 북극 기후환경에서의 내한성 입체형 무인정밀측단시스템 설치와 ICT 융복합 자료획득 및 전송시스템 개발(대기-토양-생물/생태계 등 종합적 환경변화 특성 관찰)
 - 북극지역에서의 내한성 종합적, 입체적 관찰 시스템은 본 과제에서 수행하는 것이 독보적이며 혁신적인 것으로 국제사회에서 인정받고 있음(“CAPEC”은 본 과제가 국제사회에서 인정받아 명명된 북극연구 프로그램 명칭임)
- 기존 연구와의 차별적 수월성을 획득할 수 있는 최신의 분석기술을 활용하는 도전적 목표 설정
 - 최신 분석 기술(열분해-기체크로마토그래피-질량분석기 다각적 활용)을 이용하여 대용량의 유기물 특성 데이터 분석
 - 유기물의 특성과 식생 및 다양한 토양 환경인자와의 상관관계가 규명을 목표로 설정
- 동토층 연구에 유용한 자료 획득 및 분석을 통한 연구 성과 도출을 목표로 설정
 - 기후변화에 취약한 고위도 북극 유기물의 특성을 분석한 자료와 결과 매우 희소
 - 접근성 및 기술적 한계로 인해 그간 연구 수행이 어려웠던 북극권 영구동토층에서 코어 시료 확보 및 물리화학/생물학적 특성 규명

◆ **달성 과정의 적절성(총괄)**

- (북극이사회 국가와의 국제협력 수행) 관측 거점의 성공적인 확보를 위해 긴밀한 국제협력 (MoU, LoA 등 6개 국가와의 협정 체결) 체제 구축
 - 북극은 남극과 달리, 북극해를 둘러싼 북극권 국가의 영유권이 주장되고 있어, 원활한 연구수행을 위해서는 과학적·외교적 국제협력이 필수적임
- (국제협력 강화) 국제북극연구활동(AMAP, ICARP III)에서 제시한 연구 주제 설정(참고 자료 별첨) 및 세계기상기구 GAW(Global Atmosphere Watch) 프로그램 중심으로 국제공동연구 수행
 - 공동연구 기관 : 미국 알래스카페어뱅크스대학/국제북극연구센터(UAF/IARC), 노르웨이 극지연구소(NPI), 캐나다 극지지식청(POLAR Canada), 그린란드(덴마크) Aarhus 대학, 아이슬란드 대학교(UoI), 러시아 북극남극연구소(AARI) ▶ 국제공동연구 수행을 통해 본 과제의 역량 강화 및 국제적인 선도 연구프로그램으로 육성
- (거점 확보 및 안정화) 환북극권 동토 지역 내에 환경변화 관측 거점 확보 및 안정적

자료 생산과 전송 체제 구축

- 미국 알래스카 놉 소재 UAF-NWC 한-미 북극공동연구실 기반(2015.7.29. 개소) Council 툰드라 동토지역에서의 에너지플럭스/토양/생태변화/ICT 기반 전송 등 연구 기반 확장
 - 한-노르웨이 제플린관측소 동토대기 구름응결핵 연속관측 DB 기반 구축
 - 각 관측 거점에서의 원활한 자료 수집 및 획득을 위한 GPS/USN기반/cyber-infrastructure 기술 개발과 현장 적용
 - 메탄/이산화탄소 플럭스, 에어로졸, 북극대기 황성분 (DMS), 블랙카본 등 자료생산 및 DB 구축
- (외부 환경 변화 극복) 북극권 국가의 연구 동향이나 정책 변화 반영에 따른 공동연구의 방향성 조정
- 북극권 이사회 국가(미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드(덴마크), 러시아, 아이슬란드 등)들의 북극권 환경변화에 대한 연구 동향과 정책 분석, 본 과제 수행진행 방향에 접목
- (기타 연구과정상 타 기관 모범사례) 정부 정책(북극연구의 활성화 등 ‘북극활동진흥 기본계획’, 국가과학기술기본계획 등)에 대한 자발적, 선제적 업무 수행
- 국제협력의 다변화 또는 양자협력을 통해 정부 정책의 자발적, 효과적 이행
- (북극권 환경변화에 대한 의무적 역할과 책임 이행)
- 북극이사회 옵서버 국가(‘13.5)로서의 정부 정책(‘북극정책 기본계획’ 등)에 대한 자발적, 선제적 업무 수행
 - 극한지 동토 지역에서의 글로벌 이슈 관련 과학적 관심사항에 대한 leading-edge 연구 및 이를 통한 우리나라와 지구적 파급효과 진단과 환경변화 등과 관련된 국제사회에서의 역할 이행
 - 비북극권 국가로서, 환경변화가 극심한 북극권 동토지역 내에서 진행되는 온난화 과정과 생태계 변화 등에 대한 인자를 확보함으로써, 북극권 환경변화에 대한 대응전략 수립 기초자료로 활용함은 물론 우리나라 국가 위상 강화에 기여함

제 2 장
연구개발과제의 목표 및 수행 내용
(2세부과제-위탁과제 포함)



1. 연구개발과제의 목표

1-1. 연구개발 목표

□ 세부과제-2

최종목표	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 순환 변화 이해
세부목표	1. 기후 변화에 의한 습윤/건조 툰드라 생태계 변화 규명 2. 북극권 동토 내 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명 3. 기후 변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 규명 및 상관성 높은 환경인자 제시
연차별목표	○ 1년차 : 동토 생태계 모니터링 관측망 정비를 통한 생지화학적 순환 연구 기반 구축 ○ 2년차(단계) : 적설량 변화에 따른 습윤 툰드라 지역의 생지화학적 과정 변화 분석 및 고위도 북극 툰드라 생태계 구조 파악 ○ 3년차 : 적설량 변화에 따른 건조 툰드라 지역의 생지화학적 과정 변화 분석 및 동토 유기물 분해 대사-온실가스 발생 상관성 규명 ○ 4년차(최종) : 기후 변화에 따른 북극 툰드라 생태계의 구조, 기능, 생지화학적 과정 변화에 대한 종합적 분석

□ 위탁과제-1(한국기초과학지원연구원 : 기후변화에 따른 북극 동토층 환경변화 반응 물질 탐색)

최종목표	○ 초고분해능 FT-ICR 질량분석 기반의 토양 용존유기물 화학특성 정밀분석 플랫폼을 구축하고, 이를 활용해서 기후변화에 의한 북극 동토생태계의 환경변화와 연관된 반응 물질을 탐색하여 상관인자를 발굴하는 것을 목표로 함.
세부목표	1. 초고분해능 질량분석을 활용한 건조 및 습윤 툰드라 동토층 용존유기물 화학변화 정밀분석 2. 겨울철 강설증가로 인한 동토층 용존유기물의 계절적 화학조성 변화 규명 3. 실내 기후변화 모사실험에 의한 동토층 용존유기물 변화 규명 4. 동토층 유기물 변화와 미생물 군집 간의 상관관계 규명
연차별목표	○ 1차년도 : 북극 동토층 용존유기물 특성 정밀분석 플랫폼 구축 ○ 2차년도(단계) : 겨울철 강설증가로 인한 스발바르 동토층 용존유기물 변화 분석 ○ 3차년도 : 건조 및 습윤 툰드라 동토층 용존유기물의 계절별 화학조성 변화 분석 ○ 4차년도(최종) : 실내 기후변화 모사실험에 의한 동토층 토양 유기물 변화 분석 및 툰드라 지역 동토층 유기물 변화와 미생물 군집 간의 상관관계 규명

2. 평가항목별 성과 (1단계)(2021.04.27.~2022.12.31.)

□ 세부과제-2

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약	관련증빙
(정성 및 정량) 적설량 변화에 의한 토양 생지화학적 변화 규명	50	1,2,3	1차년도 (1단계)	<ul style="list-style-type: none"> 현장연구 기반 마련, 플렉스 측정 장비 구축 스발바르 적설모사 실험구 토양 시료 확보 및 미생물 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 거점별 사이트 방문 및 2차년도 연구 수행을 위한 점검 현장 연구용 플렉스 측정 장비(Picarro G4301) 구축 및 사전 테스트 스발바르 적설모사 실험구 현장 조사, 채취된 토양 40점 대상 세균 및 진균 군집 분석 수행 	<ol style="list-style-type: none"> 현장 조사 및 셋업 상황 관련 내용 (p.18-19) G4301 구매 내역 및 테스트 결과(p.19) 현장조사 사진 및 토양 미생물 군집 분석 자료 (p. 23-24)
			2차년도 (1단계)	<ul style="list-style-type: none"> 습윤 토양 증가에 의한 토양 유기물, 질소, 미생물 특성 변화 연구 건조 토양 증가가 미생물 생장에 미치는 영향 연구 	<ul style="list-style-type: none"> 알래스카 카운실 적설량 차이에 따른 대부분 유기물층(활동층)의 탄소, 질소, 무기태 질소 함량 차이 없음. 적설증가에 의해 미생물 체외효소 중 가수분해 효소와 페놀분해효소 활성 분석 캠브리지 베이 적설량 증가에 의해 식생지수가 높아졌으나, 뿌리 분포 비율은 차이없음 	<ol style="list-style-type: none"> 알래스카 카운실 적설량 모사 실험 결과 (p. 19-20) 캠브리지 베이 적설량 모사 실험 결과 (p.20-21)
(정성 및 정량) 북극권 동토 내 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명	30	2,3,	1차년도 (1단계)	<ul style="list-style-type: none"> 배양 온도 및 시간 변화에 따른 혐기 조건에서의 유기물 분해 대사 및 유기물 특성 변화 연구 온실가스 연관 혐기성 미생물 5종 동정 동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 1편 (RFP 총족 정량성과) 	<ul style="list-style-type: none"> 환경발현유전체 기반 혐기 환경 유기물 분해 관련 대사 요약 인큐베이션 시료 대상 유기산, 아미노산 정성/정량 분석 환경유전체 데이터로부터 메탄 생성균 4종 및 혐기 호흡 관련 5종 유전체 동정 시베리아 습지 대상 미생물-온실기체 관계 논문 발표 	<ol style="list-style-type: none"> 환경발현유전체 및 유기산 정성/정량 분석 결과 (p.23) 온실가스 연관 혐기성 미생물 10종 유전체 정보(KPDC등록, p. 24-25) Global Change Biology 논문 발표
			2차년도 (1단계)	<ul style="list-style-type: none"> 배양 온도 및 시간 변화에 따른 호기 조건에서의 유기물 분해 대사-온실가스 발생 변화 연구 온실가스 연관 호기성 미생물 5종 동정 (RFP 총족 정량성과) 동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 1편 (RFP 총족 정량성과) 	<ul style="list-style-type: none"> 인큐베이션 시료 대상 온실가스 발생 변화 분석 단일세포 유전체 기반 호기성 호흡 관련 5종 유전체 동정 알래스카 동토 대상 미생물-온실기체 관계 논문 발표 	<ol style="list-style-type: none"> 온실가스 농도 분석 결과 (p.25) 온실가스 연관 호기성 미생물 5종 유전체 정보(KPDC등록, p. 26) Journal of Microbiology 논문 발표

(정성)미답지에서 동토 생태계 국제 공동 연구	20	1,3	1차년도 (1단계)	<ul style="list-style-type: none"> • 환경인자 측정 센서 구비 • 미답지 탐사 예정지 문헌 조사 및 국제협력 사전 협의 	<ul style="list-style-type: none"> • 토양 온도 및 수분 측정 센서 구입 • 캐나다 IMA, 북그린란드, 러시아 문헌조사 완료, 보고서에 관련 내용 기입, 캐나다 POLAR와 협의 	<p>12. 센서 구매내역 (p.26)</p> <p>13. 문헌조사 내용 및 이메일 증빙(p.27)</p>
			2차년도 (1단계)	<ul style="list-style-type: none"> • 캐나다 IMA 미답지 기후변화 모사 실험 전 TO 상태 파악 • 캐나다 IMA 미답지 식물, 토양 및 미생물 특성 조사 	<ul style="list-style-type: none"> • IMA 미답지 풍향 자료 분석(겨울 주풍향: 북서풍) 및 4곳 식물군집 토양, 미생물 특성 분석 	<p>14. IMA 미답지 탐사 결과 (p. 27-29)</p>
합계	100					

□ 위탁과제-1(한국기초과학지원연구원 : 기후변화에 따른 북극 동토층 환경변화 반응 물질 탐색)

평가항목	기중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약	관련증빙
(정성) 기후변화에 따른 북극 툰드라 지역 동토층 용존유기물 정밀 분석	50	1,2,3,4	1차년도 (1단계 1차년도)	초고분해능 FT-ICR 질량분석을 활용한 북극 동토층 용존유기물 특성 정밀분석 플랫폼 구축	<ul style="list-style-type: none"> • 동토층 용존유기물 정밀분석 플랫폼 최적화 	1.단계보고서 내 북극 동토층 용존유기물 특성 정밀분석 플랫폼 구축 결과
			2차년도 (1단계 2차년도)	겨울철 강설증가에 따른 스발바르 동토층 용존유기물 변화 정밀분석	<ul style="list-style-type: none"> • 스발바르 동토층 스노우펜스 실험에 따른 용존유기물 변화 정밀분석 • 용존유기물과 미생물 상호작용 분석모델 구축 	2.단계보고서 내 스노우펜스 실험에 따른 용존유기물 변화 결과 3. SCIE급 논문 2편 (우수논문 1편 포함)
(정량) 기후변화에 따른 북극 툰드라 지역 동토층 용존유기물 정밀분석데이터 데이터 규모	50	1,2,3,4	1차년도 (1단계 1차년도)	토양 유기물 시료 테스트 분석데이터 확보 (5개 시료 이상, 시료별 1~3000종 이상 유기성분 데이터 도출)	<ul style="list-style-type: none"> • 동토층 토양시료 10종에 대한 특성 분석 데이터 도출 	4.단계보고서 내 동토층 토양 10종의 유기물 특성 분석 결과
			2차년도 (1단계 2차년도)	10개 시료 이상, 시료별 1~3000개 이상 유기성분 데이터 도출	<ul style="list-style-type: none"> • 동토층 토양시료 40종에 대한 특성 분석 데이터 도출 	5.단계보고서 내 동토층 토양 40종의 유기물 특성 분석 결과
합계	100					

제 3 장
연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도
(2세부과제-위탁과제 포함)



1. 추진내용 및 연구개발결과 (위탁과제 내용 포함)

1-1. 연구개발 내용 및 방법

년도	연구개발 목표	연구개발 내용 및 방법	
1차년도 (1단계) (세부 과제-2)	동토 생태계 모니터링 관측망 정비를 통한 생지화학 순환 연구 기반 구축	강설량 모사 실험	<ul style="list-style-type: none"> 이산화탄소/메탄 플럭스 측정 장치 구축 소다라임 현장 설치 강설량 모사 실험구(스발바르 Adventdalen) 대상 토양 시료 채취 및 미생물 특성 분석(생물량 변화 및 환경발현유전체(metatranscriptome) 분석을 통한 미생물 종 조성/기능 변화 분석) 알래스카 카운실 지역은 사람들의 답압으로 땅이 가라앉아 사이트 교란이 생기므로, 플럭스 측정 및 현장조사 시작 전, 사이트 보전을 위한 보드워크 설치 필요
		실내 토양 배양 실험	<ul style="list-style-type: none"> 인큐베이션 온도, 시간 변화에 따른 혐기 환경에서의 유기물 분해 대사 및 유기물의 양적/질적 특성 변화 분석(환경발현유전체 분석을 통한 유기물 분해 유전자의 발현 양상 분석, 질량분석기를 이용한 용존 유기물의 화학조성 변화 정밀분석)
		미답지에서 동토생태계 국제 공동 연구	<ul style="list-style-type: none"> 캐나다 IMA에 설치할 환경인자 측정 센서 구입 미답지 탐사 예정지(캐나다 IMA지역, 그린란드 및 러시아 고위도 북극지역)에 대한 예비 문헌조사 및 국제 협력 파트너들과의 사전협의 진행
2차년도 (1단계) (세부 과제-2)	강설량 변화에 따른 습윤 툰드라 지역의 생지화학 과정 변화 분석 및 고위도 북극 툰드라 생태계 구조 파악	강설량 모사 실험	<ul style="list-style-type: none"> 카운실 및 캠브리지 베이 거점 FD 챔버 설치, 소다라임 실험 카운실 거점에서 플럭스 측정, 토양 유기물 특성 분석 알래스카 카운실 지역 스노우펜스 설치 시험구에서 토양 시료 획득. 토양 인큐베이션 실험을 통한 강설 모사에 따른 미생물의 탄소 이용 효율(carbon use efficiency), 미생물 특성 변화 분석 카운실 거점에서는 토양 코어 시료 채취를 통해 뿌리 생물량 분석 캠브리지 베이 거점에서 mini-rhizotron 설치 후, 스캐너를 통해 주기적으로 뿌리 이미지 촬영 알래스카 카운실 지역 스노우펜스 설치 시험구에서 토양 및 식물 시료의 질소 동위원소(¹⁵N) 분석
		실내 토양 배양 실험	<ul style="list-style-type: none"> 호기 조건에서 인큐베이션 온도, 시간 변화에 따른 활동층의 유기물 분해 대사-온실가스 발생 변화 분석(DNA-SIP기법을 이용한 유기물 분해 미생물 종 조성 분석, 미생물 호흡량 및 유기물 분해능 분석)
		미답지에서 동토 생태계 국제 공동 연구	<ul style="list-style-type: none"> 캐나다 IMA의 실험사이트에서 식물 군집 구조 조사, 토양(TO) 샘플링, 풍향 자료 획득 등 생태계 기초 특성 파악 캐나다 IMA 사이트에서 식생에 따른 토양 미생물의 군집 구조 비교 분석

□ 위탁과제-1(한국기초과학지원연구원 : 기후변화에 따른 북극 동토층 환경변화 반응 물질 탐색)

년도	연구개발 목표	연구개발 내용 및 방법
1차년도 (1단계) (위탁 과제-1)	북극 동토층 용존유기물 특성 정밀분석 플랫폼 구축	<ul style="list-style-type: none"> 초고분해능 FT-ICR 질량분석을 활용한 북극 동토층 용존유기물 화학특성 정밀분석 플랫폼 구축
2차년도 (1단계) (위탁 과제-1)	겨울철 강설증가로 인한 스발바르 동토층 용존유기물 변화 정밀분석	<ul style="list-style-type: none"> 겨울철 강설증가에 따른 스발바르 동토층 용존유기물 변화 정밀분석 글로벌 환경변화에 의한 용존유기물과 미생물 상호작용 분석모델 구축



▣ 세부과제-2 (1단계) 핵심 주제별 추진내용 및 연구개발결과

가) 적설량 변화에 의한 토양 생지화학적 변화 규명

- 현장연구 기반 마련, 플럭스 측정 장비 구축

알래스카 카운실 거점에서는 2021년 2월 해외전문가를 활용하여 스노우펜스 사이트 적설 분포를 실측하고, 대조구의 위치 변경이 필요하였음. 때문에 2021년 9월 기존 4 m 지점에서 15 m 지점으로 대조구 위치를 변경함. 코로나 이후 2년만의 방문이었던 21년 9월과 22년 9월 50년 만의 역사적 태풍으로 인해 스노우펜스와 기둥이 훼손되어 있어 수리 조치함

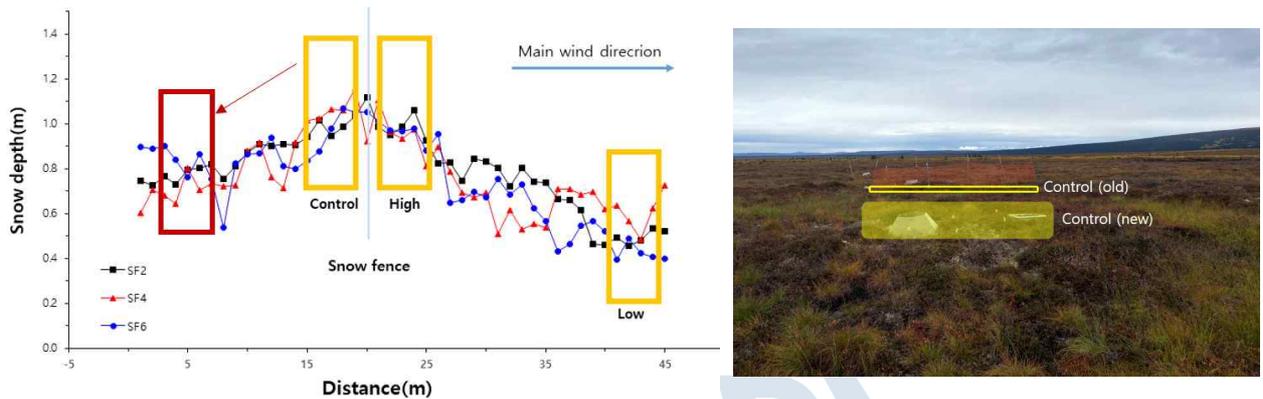


Fig. 1. Measured snow distribution in February, 2021 (left) and the changed location of control (right)



Fig. 2. Layout of snow fences and installed sensors for monitoring in Council, Alaska

캐나다 캠브리지 베이 거점에서는 2017년 겨울부터 스노우펜스를 설치하여 운영 중이며, 대조구 (Control), 적설량이 조금 증가한 지점 (Moderate), 적설량이 많이 증가한 지점 (High) 3개의 처리구가 있음. 현지 거주민 용역을 통해 매년 겨울철 동안 눈 깊이를 측정하고 있음. 2020~21년 겨울 동안 측정 결과, 최고 적설량 기준으로 High 지점은 대조구에 비해 약 50 cm 정도 더 많은 눈이 쌓였음.

2022년 9월까지 두 거점에서 회수한 환경인자는 모두 KPDC에 등록함.

2021년 9월, 2022년 7월 현장 조사를 통해 토양 환경인자 모니터링을 위해 추가로 온도, 수분 센서를 설치함. 향후 토양 공극수 채취를 위한 스테인레스 재질의 suction lysimeter와 뿌리 변화 관찰을 위한 투명 아크릴 튜브를 45° 각도로 65cm 정도 삽입하여 설치.

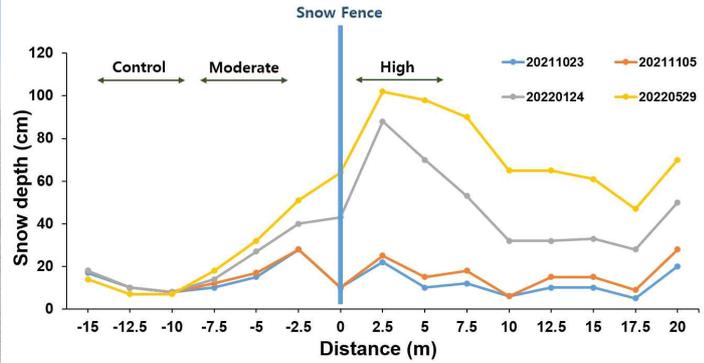
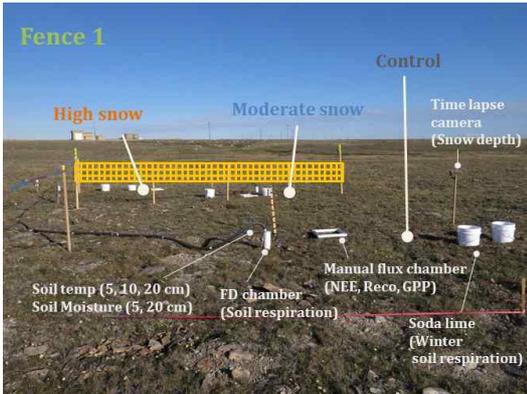


Fig. 3. Layout of snow fences and installed sensors for monitoring (left) and changes in snow distribution across a snow fence during 21/22 winter (right) in Cambridge Bay, Canada

- 플렉스 장비 구축(Picarro G4301)

토양과 대기 사이의 온실기체(이산화탄소, 메탄)의 교환량을 측정하기 위하여 Picarro사에서 나온 G4301 모델을 2021년에 구축. 이는 백팩형으로 이동형 측정이 가능한 장비임. 2022년에는 멀티플렉서를 통해 자동으로 여러 챔버 개폐를 조정할 수 있도록 Eosense사의 오토챔버와 멀티플렉서를 구매함. 2022년 7월 현장에서 플렉스 측정 테스트를 시도하였으나, 장비에 문제가 발생하여 제조사에 수리 의뢰한 상태임.



Fig. 4. The gas analyzer (Picarro G4301) and the connected auto chamber (eosAC-LT)

- 습윤 툰드라 지역 적설량 증가에 의한 토양 유기물, 질소, 미생물 특성 변화 연구

카운실 지역에서는 스노우펜스에 의한 적설량 변화가 표층 유기물층에서는 토양 탄소와 무기태 질소 함량에서 유의한 차이가 없었으나, Oi층의 질소 함량이 L처리구에서 C와 비교하여 유의하게 낮아 C/N비가 높았음 (Fig. 5). 그러나, 적설량 증가는 체외효소 분석 결과 hydrolases activity를 감소시킴. 적설량 증가로 인해 Sphagnum moss의 성장으로 인한 phenolic 증가. 수분함량 증가로 인한 산소이용도 감소로 인해 phenol oxidase activity 감소에 의한 phenolic 증가가 hydrolases 활성을 감소시켰을 가능성을 보여줌 (Fig. 6). 추가 실험을 통해 본 가설 확인 예정. 현재 녹은 표층 시료를 대상으로 분석한 결과이므로, 2022년 7월에 채취한 토양 코어 시료를 대상으로 3차년도에 깊이별로 추가 분석 수행 예정

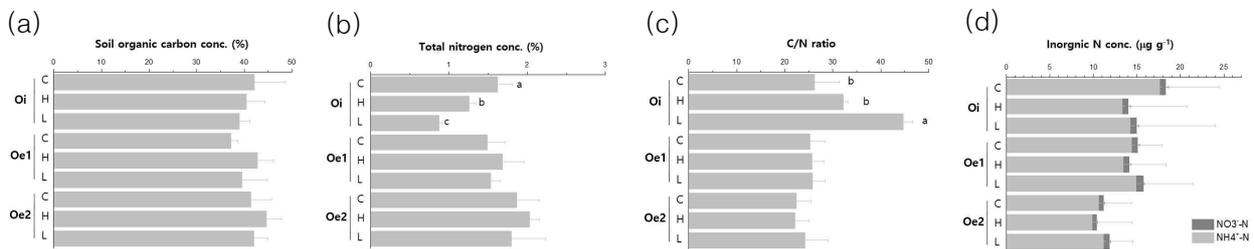


Fig. 5. (a) Soil organic carbon, (b) total nitrogen, (c) C/N ratio and (d) inorganic nitrogen contents under different snow treatments in Council, Alaska

식물체 생장은 지상부는 NDVI 센서를 통해, 지상부는 일정 토양 무게당 뿌리 생물량 측정을 통해 수행 함. NDVI값은 처리구간 차이가 크진 않았으나, 여름 기간동안 H지점이 C보다 다소 높은 경향을 보임 (Fig. 7a). 식물 뿌리 생물량은 Oi, Oe1에서는 처리구간 차이가 나지 않았으나, Oe2 층위에서 L 처리 구에서 높게 나타남 (Fig. 7b). 3차년도 추가 실험을 통해 본 현상이 지속적으로 관찰되는지 확인이 필요하며, 영양염류, 수분함량 등 환경데이터와 함께 종합적으로 분석할 예정임.

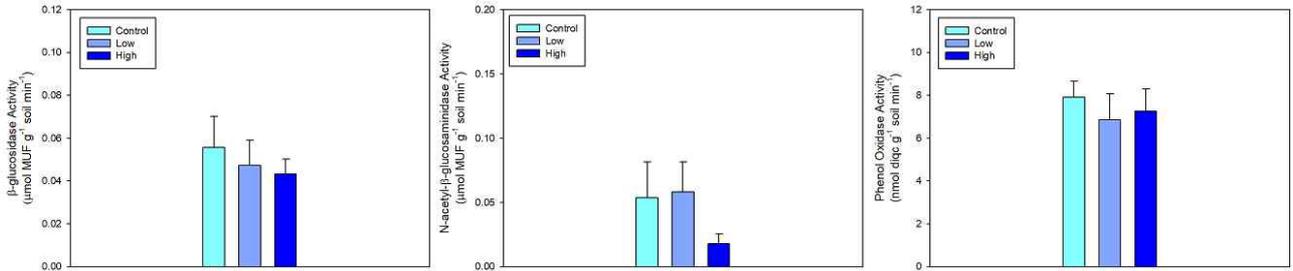


Fig. 6. Extracellular enzyme activities in the Oe layer among snow treatments in Council, Alaska

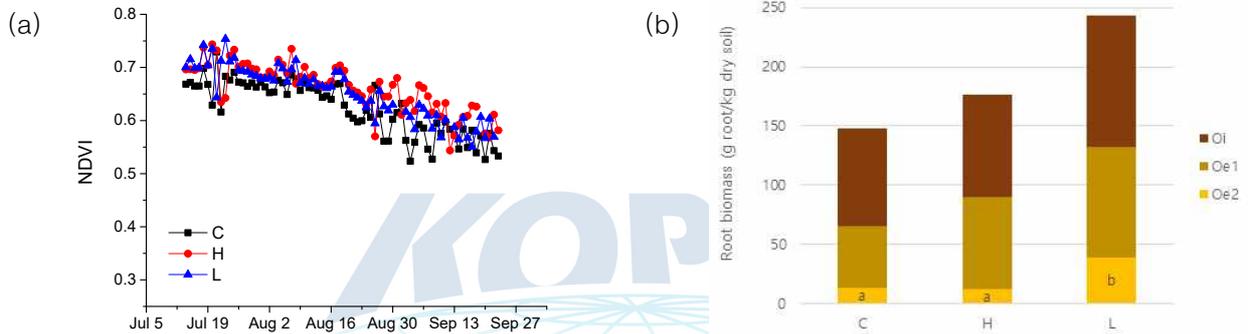


Fig. 7. Monitoring for the aboveground parameter (a) seasonal changes of NDVI in SF1 from June to Sept in 2022 and the belowground parameter (b) root biomass in Council, Alaska

○ 건조 툰드라 적설량 증가가 식물 생장에 미치는 영향 연구

2022년 6월-9월 초까지 현장연구 수행. 식물 지상부 모니터링은 식생지수(NDVI)센서를 사용하여 측정 한 결과, 7월 중순부터 H와 M 지점에서 C보다 높은 값을 나타냄. 센서 측정 지점은 1개의 스노우펜스 결과이므로, 1주일 간격으로 NDVI 카메라를 이용하여 전체 플랫폼을 다 촬영한 데이터를 추후 자료 처리 예정임. 지하부 모니터링은 21년 가을에 설치한 아크릴 튜브 내에 mini-rhizotron을 이용하여 사진을 촬영하였으나, 유기물층 발달이 미약하고, 미사와 점토로 이루어진 미네랄층이 아크릴 튜브 주위에서 굳은 상태이어서 데이터 취득에 한계가 있었음.

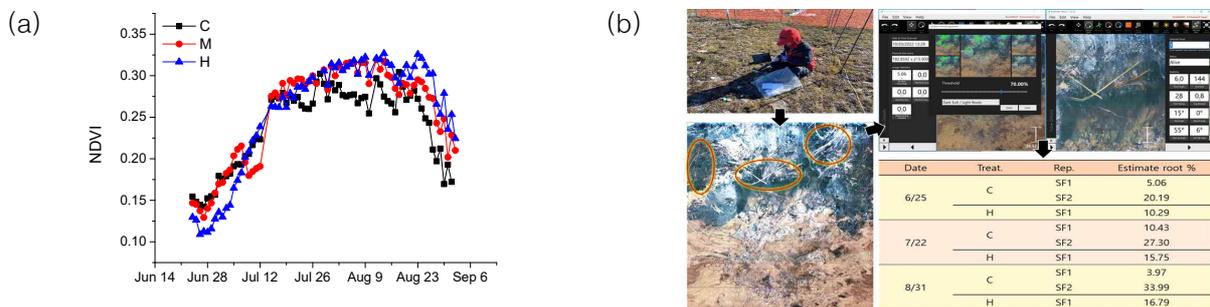


Fig. 8. Monitoring for the aboveground parameter (a) seasonal changes of NDVI in SF1 in 2022 and the belowground parameter (b) root imaging and analysis using Mini-rhizotron and RootSnap program

2022년 7-8월 2달간 수동챔버를 이용하여 생태계 호흡(Reco)과 순생태계 교환량(NEE)을 측정하였고, 이 차이를 이용하여 총일차생산량(GPP)을 계산함. 온도와 PAR 자료를 이용하여 플럭스가 측정되지 않았던 시간 동안 보간함. 블록(block)간 큰 차이와 적은 반복수로 인해 처리구별 차이가 통계적으로 유의하지 않았지만, 평균값을 비교하면, Reco ($M > C = H$), GPP ($C = M > H$), NEE (C (largest C uptake) $> H > M$ (smallest C uptake))의 경향을 나타냄. 이는 추후 다른 인자들과 함께 더 정밀한 분석을 해야하겠지만, H 처리구에서 눈이 녹는 시점이 늦어지면서 GPP가 낮아진 것으로 추정됨.

21/22 겨울 기간동안 소다라임을 통해 관측한 비생육기 생태계 호흡의 경우, 대조구가 M, H보다 유의하게 높게 나타남. 적설 증가가 겨울철 토양 온도를 높여 겨울철 호흡량을 증가시킬거라는 예상과 다른 결과임. 식물피도와 함께 어느 시기에 C가 M, H보다 높은 값을 보이는지 추가 확인이 필요함.

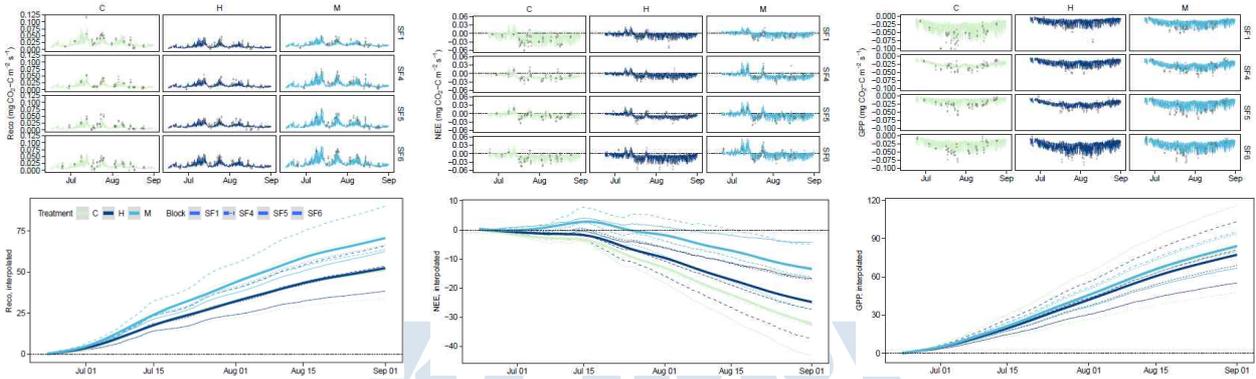


Fig. 9. Observed and interpolated Reco (left), NEE (middle), and GPP (right) (upper) and their cumulative values through the growing season (lower)

22년 하계 기간 동안 독일의 *Max Planck Institute(MPI)의 Axel Steinhof 박사*와 공동연구를 통해 적설량 모사 실험구에서 생태계 호흡량 측정 챔버에서 기체를 포집함 (Fig. 10a). 현장연구 종료시 기체 플라스크를 독일 MPI로 돌려보내, 현재 포집한 기체 내 ^{14}C 를 분석중임. FD 챔버로 획득한 생태계 호흡량은 20, 21년 9-12월 두 해 모두 $0-0.2 \mu\text{mole m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 범위에서 측정됨. 여름철 측정된 생태계 호흡량은 H에서 C보다 높게 나타남 (Fig. 10b). 겨울철 토양 호흡량은 C에서 가장 높게 나타나 $0.23 \text{ g C m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 로서 M과 H보다 약 2.8배 높게 측정됨 (Fig. 11). 22년 8월 초 채취한 토양 유기물층의 체외효소 (β -glucosidase) 활성도는 H에서 C와 M보다 높은 경향을 나타냄 (Fig. 12).

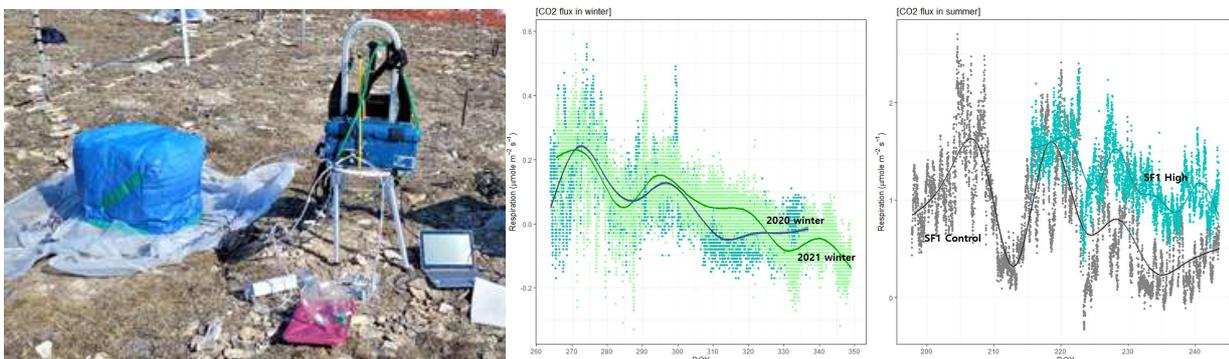


Fig. 10. Soil gas collection in a flask for old carbon (^{14}C) analysis, and CO_2 efflux measured via FD sensors during non-growing season in Cambridge bay, Canada

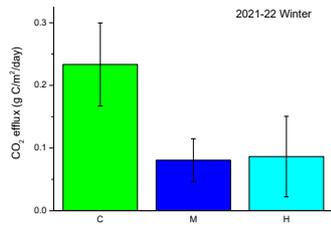


Fig. 11. CO₂ efflux (21/22 winter) measured by sodalime

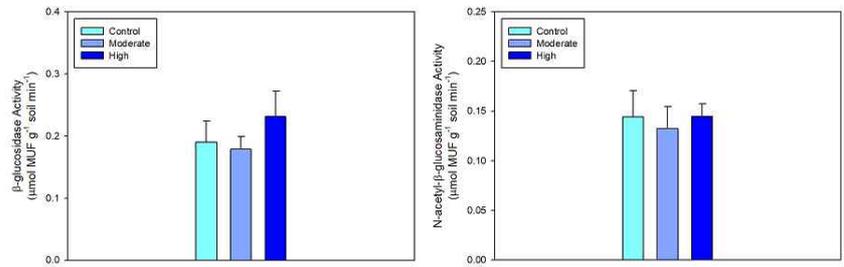


Fig. 12. Extracellular enzyme activities in the organic layer among snow treatments in Cambridge Bay, Canada

해빙기에 쌓인 눈의 높이와 활동층의 변화 파악을 위해 지구물리학 조사방법인 전기비저항탐사와 레이 다 탐사 수행. 2022년 6월 3-21일까지 3일 간격으로 전기비저항탐사(눈 밑의 천부지질의 상태 변화, 6월 6-18일까지 3일 간격으로 쌓인 눈의 감소 경향 파악. 두 물리탐사 자료를 이용하여 스노우펜스 주변의 Control 부분(측선 왼쪽)과 High 부분(측선 중앙)의 변화 비교 분석. 6월 6일에 찍은 C (Fig. 13A)는 눈이 대부분 녹았고, H (Fig. 13B)에서 눈이 많이 쌓여있는 것을 육안으로 확인할 수 있었는데 같은 날 실시한 GPR 자료에서도 이와 같은 결과를 보여줌(Fig. 13C). 가장 많이 쌓인 눈의 두께는 High 부분에서 약 75 cm 로 나타났고 해당 부분에서 멀어질수록 눈의 두께가 얇아지는 것을 확인함.

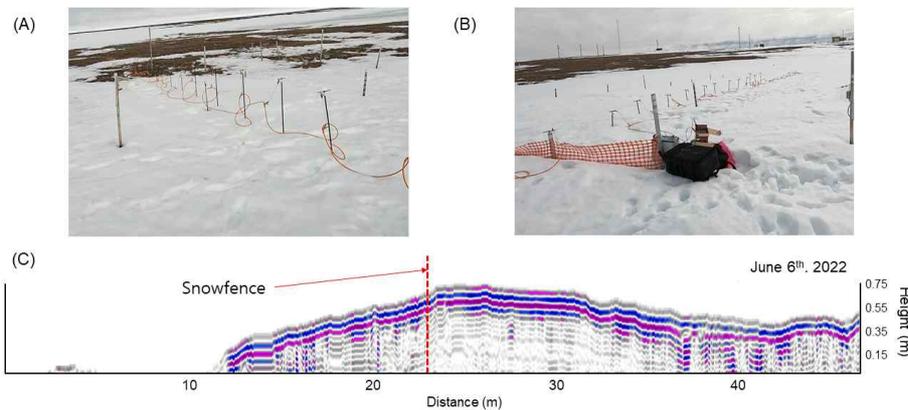


Fig. 13. Snow depth estimated in the Ground penetrating Radar (GPR) section are well correlated with the snow height measured on June 6th, 2022. (A) Control zone, (B) High zone, and (C) Snow depth result of GPR survey.

Fig. 14는 각각 2022년 6월 3일, 12일, 21일에 실시한 ERT 자료로 시간이 지날수록 전기비저항값이 낮아지는 경향을 보임. (A)에서는 Control 부분의 전기비저항 값이 High 부분의 전기비저항값보다 더 높은 경향을 보였고 고비저항대의 두께 또한 더 두꺼움. 9일 후 측정된 (B)의 결과에서는 Control 부분의 전기비저항값이 High 부분의 전기비저항값보다 낮은 결과를 보여 Control 부분이 High 부분보다 빠르게 녹았음. (C)의 결과는 거의 전 구간에서 낮은 전기비저항값을 보였고 High 구간에서 상대적으로 고비저항값을 나타내어 해빙기 기간 동안에는 High 부분의 식생이 Control 부분의 식생보다 늦게 성장할 것으로 판단됨.

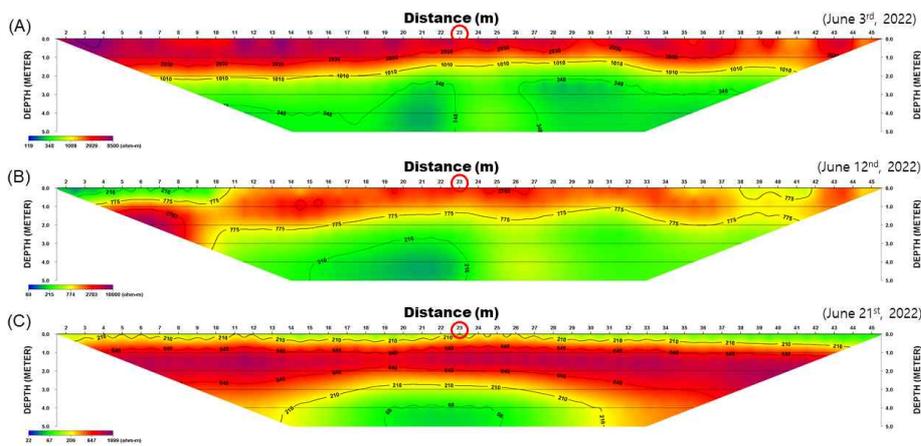


Fig. 14. Time-lapse Electrical Resistivity Tomography (ERT) showing the decrease of electric resistivity of the active layer with time. The ERT measured on (A) June 3rd, 2022, (B) June 12nd, 2022, and (C) June 21st, 2022, The red circles indicate the position of the snow fence.

○ 스발바르 적설모사 실험구 토양 시료 확보 및 미생물 특성 분석



Fig. 15. Map displaying sites with experimental snow fences (A–D) and natural snow depth gradients (marked with ellipses 1–9).

적설 모사 15년차 토양(Adventdalen, Svalbard)을 대상으로 세균 및 진균 군집 분석 결과 세균 군집과 진균 군집 모두 block에 따른 차이가 가장 크게 나타났으며, 다음으로 각 block 내 subplot인 Site(block)에 의한 효과가 크게 나타남. NMDS 결과와 같이 사이트 간 차이가 너무 큰 요소로 작용하여 상대적으로 적설모사 처리(treatment) 단독 효과는 유의하게 나타나지 않음. 다만 진균 군집의 경우 Site(block) x treatment 효과가 유의하게 나타난 것으로 보아 15년에 걸친 적설모사 처리는 세균보다는 진균 군집에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단됨 ($p=0.002$)

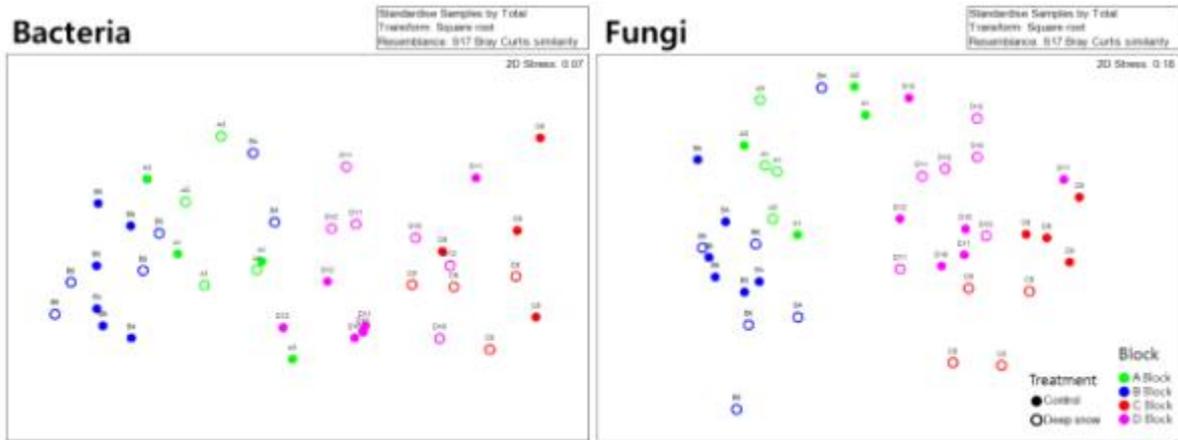


Fig. 16. NMDS ordination plots of bacterial and fungal community compositions.

나) 북극권 동토 내 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명

○ 배양 온도 및 시간 변화에 따른 혐기 조건에서의 유기물 분해 대사 및 유기물 특성 변화 연구

알래스카 카운실 지역 혐기 배양 토양 시료를 대상으로 환경 발현유전체 분석 결과 활동층과 영구동토층 간 전사체 구조가 확연하게 구분되었으며, 두 층 모두에서 온도 변화에 따른 뚜렷한 미생물 전사체 구조 변화가 확인됨. 특히 영구동토층에서 5°C vs. 15°C, 25°C 간에 확연한 차이를 보임. 이는 영구동토층 미생물들이 5°C~15°C 범위의 온도 차이에 대한 민감도가 활동층 미생물 보다 더 큰 것을 의미함 (Fig. 17)

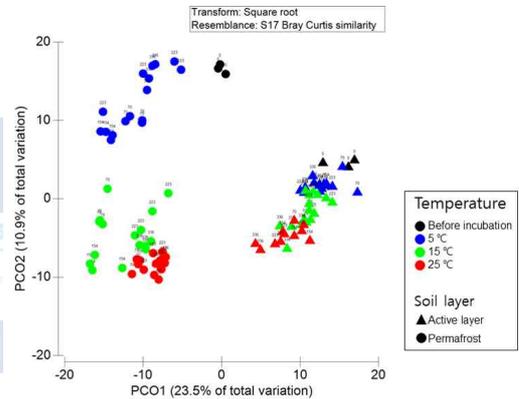


Fig 17. PCoA ordination plots of KEGG ortholog abundances in anaerobic incubation of soil

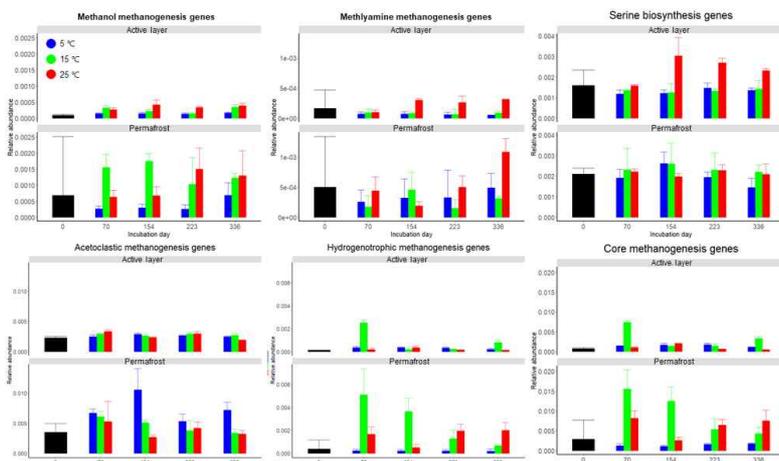


Fig 18. changes in the relative transcript abundance of genes involved in methanogenesis in response to incubation time and temperature

메탄생성기작 유전자의 발현량은 활동층보다 영구동토층에서 2배 이상 높게 나타남 (Fig. 18). 이는 혐기조건에서 발생하는 메탄생성기작에 연관된 혐기 미생물들이 영구동토층에 더 많이 존재하고 있기 때문임. 다양한 메탄생성기작 중 acetoclastic methanogenesis 기작이 활동층과 영구동토층 모두에서 우점하고 있는 것으로 나타났으며, 온도 변화에 따른 발현량 변화는 영구동토층에서 두드러짐

○ 호기 조건에서 온도, 시간 변화에 따른 활동층의 유기물 분해 대사-온실가스 발생 변화 분석

동토 융해에 따른 미생물의 유기물 분해 대사와 이에 따른 온실가스 발생 변화 연구를 위해 5°C와 15°C 두 가지 온도에서 14일간 호기 조건 배양을 수행함 (Fig. 19). 알래스카 카운실 지역의 활동층과 스발바르 아드반트달렌에서 수행된 적설량 모사 실험구 토양을 대상으로 비교 분석을 진행함. 각 배양 조건별 일정 주기로 가스 시료를 포집하여 미생물 활성 및 온실가스 발생 변화 확인함

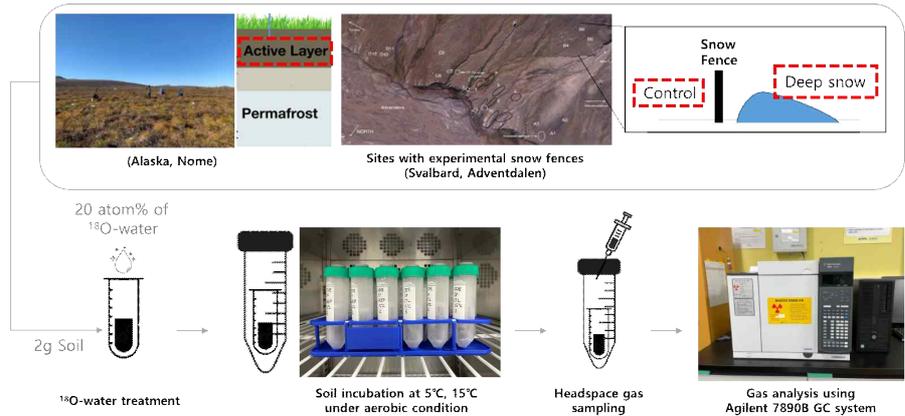


Fig. 19. Aerobic incubation scheme of Alaska and Svalbard soil

CO₂ 발생량을 통한 미생물 호흡량 비교 결과 모든 토양 시료에서 5°C 보다 15°C에서 많은 양의 CO₂가 발생하였음 (Fig. 20). 초기 배양 단계에서 스발바르 15°C 배양 시료는 알래스카 시료보다 CO₂ 발생이 더 빠르게 나타남. 이는 지역별 토양 특성차이가 미생물 활성도에 영향을 미치기 때문으로 사료됨. 또한 스발바르의 스노우 펜스를 이용한 적설량 증가 실험구에서는 배양 온도에 따른 CO₂ 발생량 차이가 상대적으로 크게 나타남. 대표적인 온실가스 중 하나인 N₂O의 경우, 알래스카 활동층과 스발바르 적설량 증가 실험 대조구 토양에서는 배양 온도 따른 발생량 차이가 없었음. 그러나 15°C 적설량 증가 실험구 토양에서 N₂O 발생량 증가가 배양 후기에 관찰됨

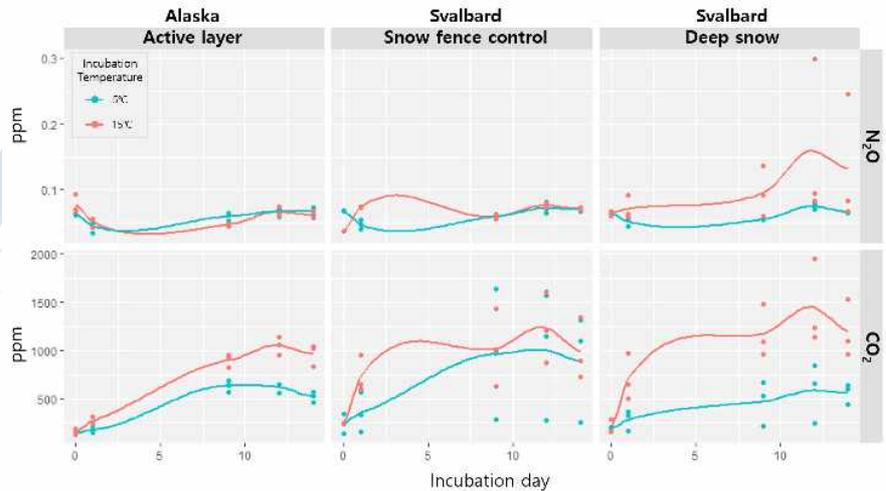


Fig. 20. Greenhouse gas conc. changes during aerobic incubation

○ 온실가스 연관 미생물 종 동정(혐기성 10종, 호기성 5종)

- 알래스카 카운실 토양 시료에서 온실가스 연관 혐기성 미생물 10종 (메탄생성균 4종, 혐기 호흡 및 syntrophic bacteria 5종), 호기성 미생물 5종 (유기물 분해 관련 미생물 3종, 질소 순환 관련 미생물 2종) 총 15종의 미생물을 동정 완료하였고, KPDC에 등록 (Table 1, 2)

Table 1. Genome information of greenhouse gases-associated anaerobic microbial lineages

MAGs	Genome size (bp)	Classification	Characteristic
Day0_PF.bin.62	1097079	Bog-38 sp003162175	Methanogen
Day0_PF.bin.63	841971	Bog-38 sp003170935	Methanogen
Day336_PF_25.bin.157	3690070	<i>Methanosarcina</i> sp001714685	Methane oxidation
Day0_PF.bin.18	2663356	<i>Methanobacterium</i>	Methane production
Day336_PF_25.bin.168	3289153	Fen-1166	Sugar and organic acid degradation
Day336_PF_15.bin.107	2556805	<i>Acetobacterium</i>	Sugar and organic acid degradation
Day336_AL_25.bin.139	2718933	<i>Ethanoligenenaceae</i>	Sugar and organic acid degradation
Day336_PF_25.bin.24	2504280	<i>Syntrophomonas</i>	Sugar and organic acid degradation
Day336_PF_15.bin.115	4930495	<i>Propionisporales</i>	Sugar and organic acid degradation
Day336_AL_15.bin.4	2293704	<i>Paludibacter</i>	propionate-producing

Table 2. Genome information of greenhouse gases-associated aerobic microbial lineages

Cell ID	Genome size (bp)	Classification	Characteristic
AM-408-K21	516,351	Candidatus Nitrososphaera gargensis	Ammonia oxidizing archaea
AM-408-O11	3,392,265	Candidatus Koribacter versatilis	Sugar and organic acid degradation
AM-408-C03	612,366	<i>Gemmatimonas aurantiaca</i>	N2O reduction
AM-411-N08	753,183	<i>Flavobacterium</i> sp.	Complex organic compounds degradation
AM-408-N21	1,527,475	<i>Pseudomonas</i> sp.	Complex organic compounds degradation

다) 미답지에서 동토 생태계 국제 공동 연구

○ 환경인자 측정 센서 구비 (1차년도 연차보고서에 상세 작성함)

토양 온도, 토양 수분 센서(Procheck handheld reader와 TEROS 11) 구비 완료

○ 미답지 탐사 예정지 문헌 조사 및 국제협력 사전 협의 (1차년도 연차보고서에 상세 작성함)

• 캐나다 IMA (Intensive Monitoring Area): IMA 사이트 위치는 누나부트 준주 빅토리아 섬의 그리니어 호수 수역. 캐나다 극지 지식청(POLAR)의 고위도 북극 연구기지(CHARS)에서 육상 연구를 위해 설정. 캐나다 연구팀은 그리니어 호수 주변의 식생 분류를 통해, 이 생태계의 특성을 결정하는 가장 중요한 요인은 겨울철 적설로부터 보호되는 정도와 토양 수분 함량 구배임을 밝히고, 크게 4개의 생태형에서 주요 환경인자 모니터링을 계획/실시하고 있음: mesic, snow, sedge fen, and shrub sedge sites. 현재까지 2개의 에디공분산 측정을 위한 타워를, paired area에 각각 영구동토층 모니터링(deep permafrost hole)을 설치하여 운영 중

• 그린란드: 그린란드 일대에서 수행되었던 토양 미생물 특성 연구에 대한 사전 문헌 조사 수행. 기존에 그린란드 대륙 자체에서 수행된 토양 미생물 특성 연구는 10개 미만임. 주로 그린란드 동부와 서부 해안, Station Nord 주위에서 미생물 특성 연구가 진행됨. 최근 Station Nord에서 2020년에 기후변화모사에 따른 미생물 특성 변화 연구결과가 보고된 바 있음. 하지만 본 연구팀에서 탐사 예정인 Sirius Passet 지역에서의 토양 및 미생물 특성 연구는 현재까지 보고된 바 없음. 미답지 동토 생태계 조사 예정지인 Sirius Passet 지역에서의 표층 대기 온도 범위는 -39.6~16.1℃(현지 AWS 자료)이며, 고위도 지역임에도 불구하고 북그린란드 일대에서 가장 식생이 풍부한 곳 중 하나로 조사된 바 있음.

• 러시아: 러시아의 북극 전략은 「북극정책원칙 2035」(연호 S4175)와 「북극개발 및 국가안보 전략 2035」(연호 S17908)에서 밝히고 있으며, 이중 「북극개발 및 국가안보 전략 2035」에 국제 협력 분야 주요 과제는 (1) 북극을 평화·안정·상호호혜 협력 지역으로 유지 (2) 북극이사회 의장국 성공적 수임 (3) 외국 자본 유치를 위한 협력 (4) 북극경제이사회를 북극 지속 가능 발전을 위한 주요 포럼으로 발전 등 포함. 러시아 바라노바 기지가 위치한 볼세비키 섬의 식생 조사 결과 고위도 북극의 식생 군집의 특징을 보임

○ 캐나다 IMA의 실험사이트에서 식물 군집 구조 조사, 토양(TO) 샘플링, 풍향 자료 획득 등 생태계 기초 특성 파악

2022년 7-8월 캐나다 CHARS 연구지원을 받아 IMA 현장조사 수행. CHARS에서 환경인자를 모니터링하는 영역 중, 주요 4곳 식생분포 지역인 Dryas-Carex, Cassiope-Dryas (snow bed), Shrub-sedge fen, Sedge fen에서 식생 피도, 종조사 후 토양 샘플링 수행.



Fig. 21. Study sites in four ecotypes of IMA

Table 3. Vegetation coverage in four ecotypes of IMA

	<i>Dryas-Carex</i>					<i>Cassiope-Dryas</i>					<i>Salix-Sedge</i>					<i>Sedge Fen</i>				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Coordinates	N69° 13.672, W104° 54.024					N69° 13.665, W104° 54.104					N69° 13.770, W104° 53.873					N69° 13.840, W104° 53.789				
Plot	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Total coverage	25	50	45	35	50	35	50	80	50	30	45	50	60	70	70	70	80	80	80	70
<i>Carex aquatilis</i>											30	40	40	60	45	70	80	80	80	70
<i>Carex</i> spp.	5	7	10	5	20	5	7	7	10	10										
<i>Cassiope tetragona</i>						10	12	30	20	12										
<i>Dryas integrifolia</i>	25	50	45	35	50	25	35	35	10	15	20	15	10	10	25	1		5		
<i>Salix richardsonii</i>						2	5	2		2	5	12	15	5	20			10	5	10
<i>Arctostaphylos alpine</i>					2				1											
<i>Bistorta vivipara</i>	+	1		+	+	1				+	+									5
<i>Equisetum arvense</i> ssp. <i>alpestre</i>																				+
<i>Eriophorum angustifolia</i> ssp. <i>triste</i>																				
<i>Hedysarum boreale</i>					+															
<i>Hulteniella integrifolia</i>					+															
<i>Kobresia</i> spp.						2								2						
Lichen	1	5	5	7	5	20	25	1	15	8	5	5		1						
Moss	+	3		1	2	2	5	2			2	5	10	5	5	10	5	15	10	
<i>Oxytropis maydelliana</i>	+	1	1	5														2		+
<i>Pedicularis albolabiata</i>												1		2		5		5		
<i>Ranunculus</i> sp.																				5
Rock						30	2													
<i>Salix reticulata</i>											7		5							
<i>Saxifraga oppositifolia</i>	+	+	1	2																

Cassiope-Dryas 군집은 유기물층 하부에 거의 자갈로 이루어져 있어, 미네랄층 시료를 채취하지 못하였고, 유기물 층에서 fibric과 sapric materials을 구분하여 시료를 채취함. 캐나다 IMA의 4개의 식생군집별 토양특성 분석 결과, Sedge fen ecotype에서 토양수분함량과 전기전도도가 가장 높고, pH는 가장 낮았음. Dryas-Carex 군집과 Cassiope-Dryas군집의 토양 특성은 유사하였고, Salix-Sedge군집은 건조 툰드라와 Sedge fen 중간의 특성을 보임.

Table 4. Several soil properties in four ecotypes of IMA

Ecotype	<i>Dryas-Carex</i>		<i>Cassiope-Dryas</i>		<i>Salix-Sedge</i>		<i>Sedge Fen</i>	
	Organic	Mineral	Oi	Oa	Organic	Mineral	Organic	Mineral
Sample #	5	4	6	2	5	5	5	5
MC (%)	121±9 ^d	14±0.6 ^b	276±22 ^c	162±75 ^d	400±19 ^b	32±5 ^b	632±48 ^a	127±22 ^a
pH (1:5)	7.6±0.1 ^a	8.7±0.1 ^a	7.2±0.1 ^a	7.7±0.4 ^a	7.1±0.1 ^a	8.3±0.1 ^{ab}	6.1±0.1 ^b	7.9±0.1 ^b
EC (µS/cm, 1:5)	282±17 ^b	114±9 ^b	291±36 ^b	161±44 ^b	495±65 ^b	134±10 ^b	764±94 ^a	332±64 ^a

CHARS 연구진들이 2016년부터 모니터링 중인 환경인자 자료를 공유해주어 대기 온도 연변화와 겨울철(10월-5월) 풍향·풍속 자료를 정리함. 여름철 평균온도는 10-15°C, 겨울철은 -40°C까지 떨어짐. 겨울 주 풍향은 북서풍이었음.

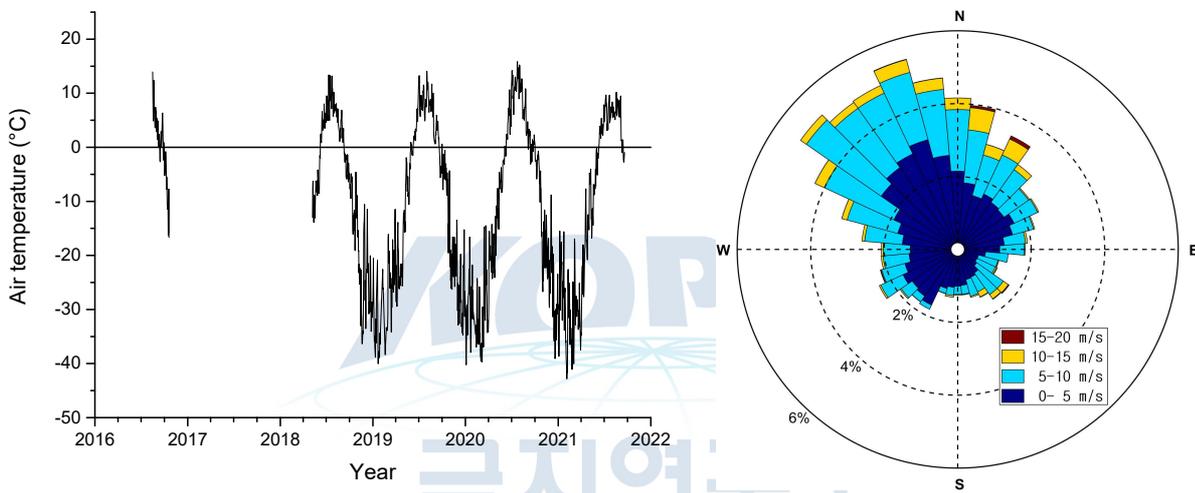


Fig. 22. Mean air temperature and wind speed and direction during winter (October–May) in IMA (data shared by POLAR)

○ 캐나다 IMA 사이트에서 식생에 따른 토양 미생물의 군집 구조 비교 분석

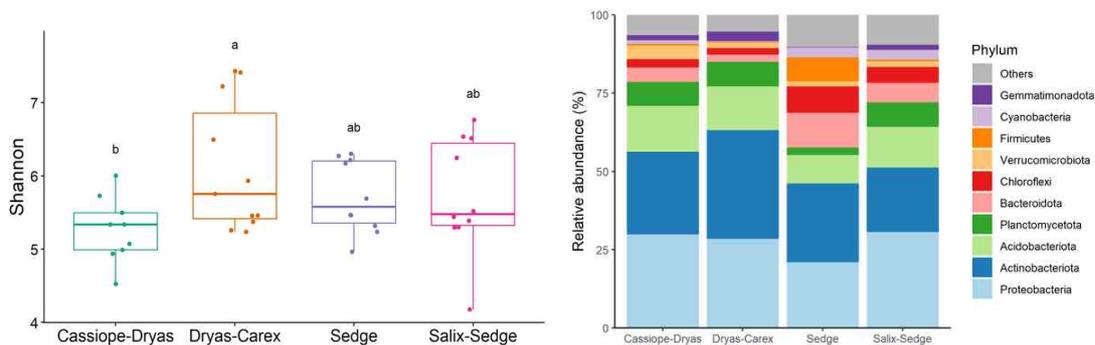


Fig. 23. Comparison of bacterial diversity and phylum composition between four different vegetation types in IMA site, Canada

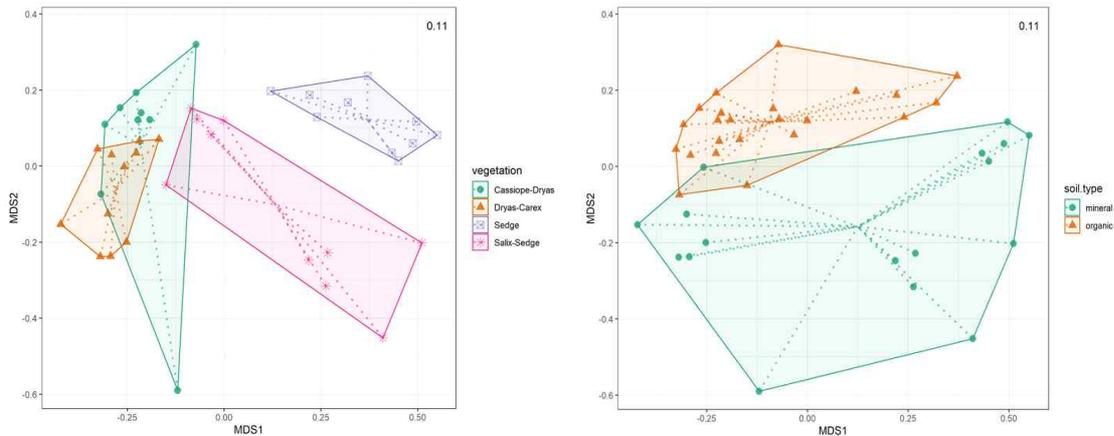


Fig. 24. NMDS displaying bacterial community structure with different vegetation and soil types in IMA site, Canada

캐나다 IMA 사이트를 대상으로 4가지 다른 식생 타입 별 세균 군집 분석 결과 Cassiope-Dryas 혼재된 식생의 토양 세균 다양성이 상대적으로 낮게 검출됨(Fig. 23). 세균 문(phylum) 수준의 분포에서는 Sedge의 경우 다른 식생 타입들에 비해 Firmicutes, Bacteroidota, Chloroflexi의 비중이 상대적으로 높게 나옴. 해당 문들의 하위 분류군들이 대부분 혐기 세균들로 구성되어 있고, 메탄 생성균과 협력 관계를 이루는 syntroph들이 검출되는 것으로 보아 Sedge 식생 하부 토양은 메탄 생성이 이루어지는 혐기 환경으로 추정됨. 식생 타입 별로 세균 군집 구조가 나누어지며 특히 Sedge와 Salix-Sedge 타입이 다른 식생들과는 확연히 구분됨(Fig. 24). 이는 앞서 문 수준의 분포 차이에서 드러난 바와 같이 Sedge 식생 하부에 존재하는 혐기 환경 세균들의 우점에 기인한 것으로 판단됨. 토양 타입 별로도 표층 유기물 토양과 저층 미네랄 토양 간에 확연한 세균 군집 구조 차이를 보이는데 이는 토양 깊이에 따른 세균 분포 차이일 것으로 판단됨.

※ 코로나19 상황에 따른 2021년 북극 현장 연구가 제한된 시점에 추가 수행한 연구내용
○ 기온변화(동결-융해 사이클 변화)에 따른 토양 물리적 구조 변화

기후변화로 인한 적설량 감소는 이른 봄에 토양을 동결-융해 사이클에 과도하게 노출시켜, 토양 생지화학적 변화를 가져옴. 이를 실험적으로 확인하기 위해, 알래스카의 이른 봄(5월-6월)의 일 최고온도(7°C)와 최저온도(-10°C)를 12시간 간격으로 총 7회의 동결-융해 사이클을 모사한 배양기에서 토양 배양을 수행하였음. 그 결과, 동결-융해 사이클 처리구에서 대조구 대비 특정 입단(micro-aggregate, 53-250 μm)과 공극(small-sized mesopore, 0.2-10 μm)이 증가하는 것을 확인했으며, 이에 따라 용존유기물 양 및 특성이 달라지는 것을 확인.

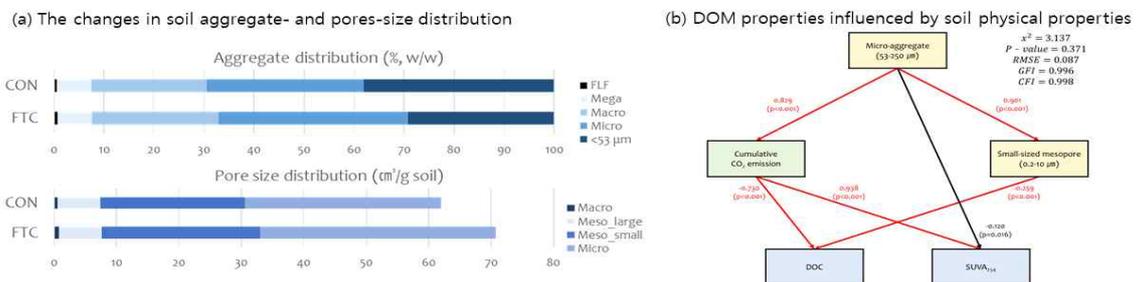


Fig. 25. Summary of the experimental results in the effects of Freeze-thaw cycles on soil biogeochemical properties

▣ 위탁과제-1 (1단계) 핵심 주제별 추진내용 및 연구개발결과

(한국기초과학지원연구원: 기후변화에 따른 북극 동토층 환경변화 반응 물질 탐색; 세부내용 별첨 보고서 기재)

가) 1차년도

1) 연구개발 목표: 북극 동토층 용존유기물 특성 정밀분석 플랫폼 구축

2) 연구개발 내용 및 방법

- 초고분해능 FT-ICR 질량분석을 활용한 북극 동토층 용존유기물 화학특성 정밀분석 플랫폼 구축

✓ 유기물 함량이 적은 동토층 토양시료 내 용존유기물 화학특성 정밀분석을 위한 시료 추출법 최적화를 수행하고, 초고분해능 FT-ICR 질량분석기를 활용해서 분석된 고정밀 질량분석 결과로부터 동토층 용존유기물질의 화학조성 도출을 위한 Empirical Formula Assignment 방법에 대한 최적화 조건을 확립함.



Fig. 26. Advanced analytical platform for characterizing chemical properties of soil organic matter using ultrahigh-resolution FT-ICR mass spectrometry.

✓ Bond Elut PPL(A와 B)과 Oasis HLB(C와 D) 카트리지를 사용해서 추출된 유기성분에 대해 Elemental Formula Assignment 조건 ($C_{50}H_{100}O_{30}N_4S_2$ 대 $C_{50}H_{100}O_{30}N_1S_1$)을 달리해서 얻어진 유기성분 데이터를 비교하여 최적 조건을 확립함.

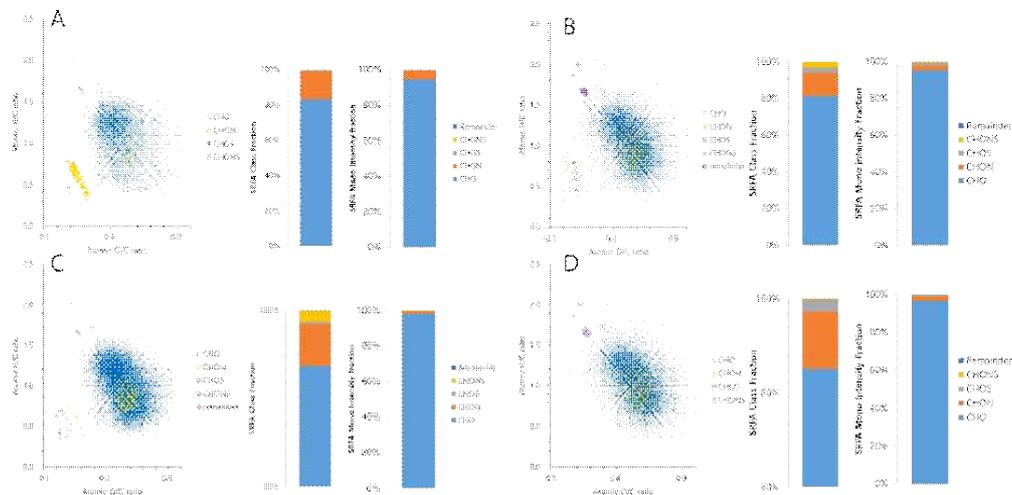


Fig. 27. FT-ICR MS profiles of permafrost SOM samples treated with different SPE conditions.

✓ 알래스카 동토층 시료 10종에 대한 정밀분석을 통해 동토층 용존유기물질에 대한 화학조성 및 특성 결과를 획득함.

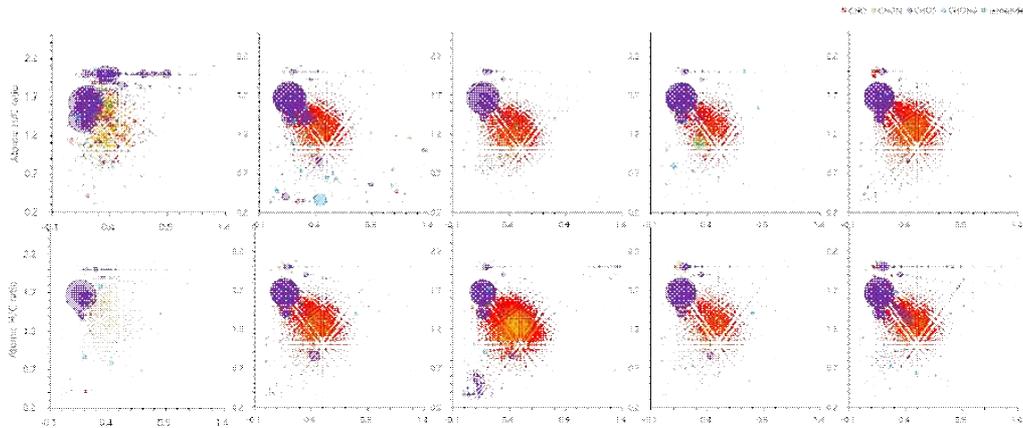


Fig. 28. van Krevelen plots displaying elemental formulas assigned from ten Alaska permafrost SOM samples.

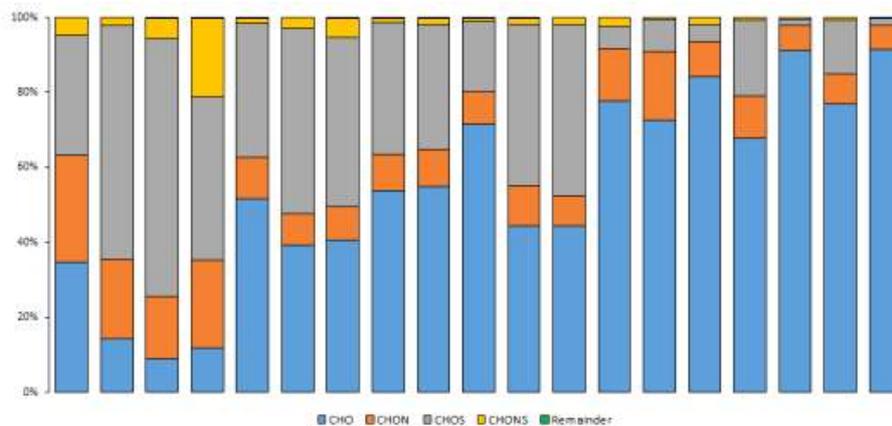


Fig. 29. Chemical class distributions of Alaska permafrost SOM samples.

나) 2차년도(1단계)

1) 연구개발 목표: 겨울철 강설증가로 인한 스발바르 동토층 용존유기물 변화 정밀분석

2) 연구개발 내용 및 방법

- 겨울철 강설증가에 따른 스발바르 동토층 용존유기물 변화 정밀분석

✓ 북극 스발바르 동토층해 지역의 토양 용존유기물 특성을 비교하기 위해서, 활동층과 영구동토층 시료에 대한 혐기배양 시료를 2세부 연구팀으로부터 확보하고, 용존유기물 변화 추이를 비교분석함.

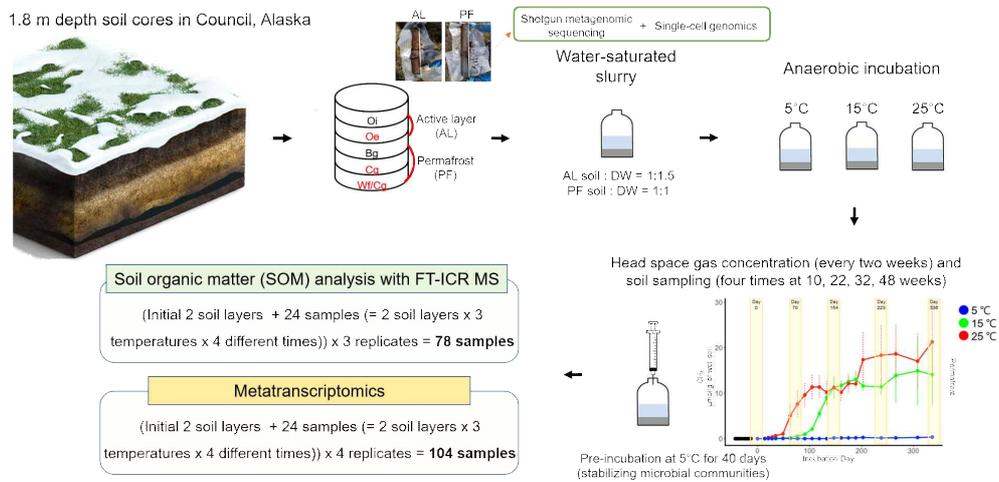


Fig. 30. Experimental flow for investigating the molecular changes of DOM in active layer and permafrost samples after anaerobic incubation.

✓ 활동층과 영구동토층 시료 모두 CHO와 CHON 성분이 주를 이루었으며, 혐기배양 시간에 따른 변화는 크게 확인되지 않았기 때문에, 분석된 용존유기물을 Labile ($H/C > 1.5$)와 Recalcitrant ($H/C < 1.5$) 및 Molecular transformation number를 기준으로 Active (≥ 25)와 Inactive (< 5)로 구분하여 특성을 살펴보았음.

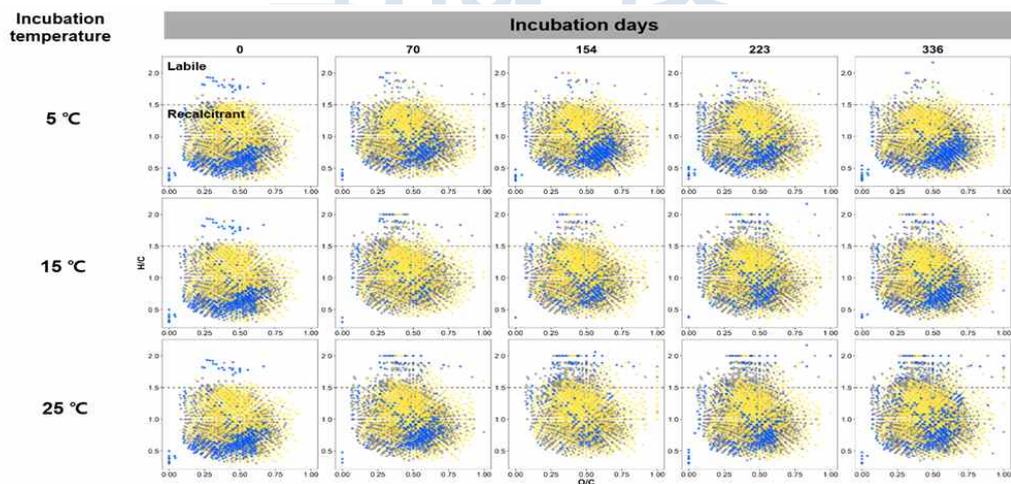


Fig. 31. van Krevelen plots displaying active and inactive compositions in DOM assigned from the active layer samples.

✓ 활동층에는 Labile한 성분보다 대부분 Recalcitrant한 성분으로 구성되었으며, 배양시간에 따른 조성의 큰 변화는 없는 반면, 영구동토층에는 배양시간이 늘어남에 따라서 Recalcitrant-Active한 성분들이 줄어드는 것이 확인되었음.

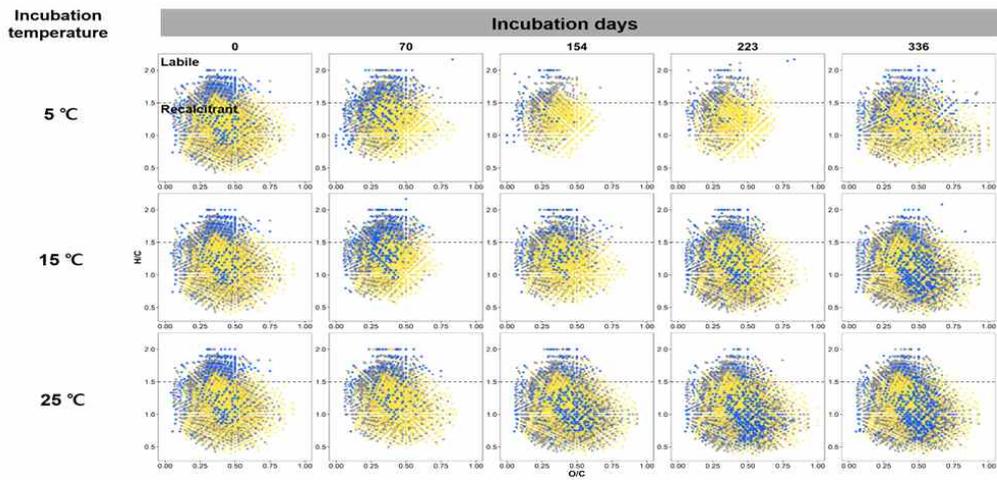


Fig. 32. van Krevelen plots displaying active and inactive compositions in DOM assigned from the permafrost samples.

✓ 혐기배양에 따른 용존유기물의 화학특성을 비교하였을 때, 활동층과 영구동토층 내 용존유기물 모두 배양시간에 따라 AI, DBE, O/C, H/C 특성이 달라지는 것이 확인되었음.

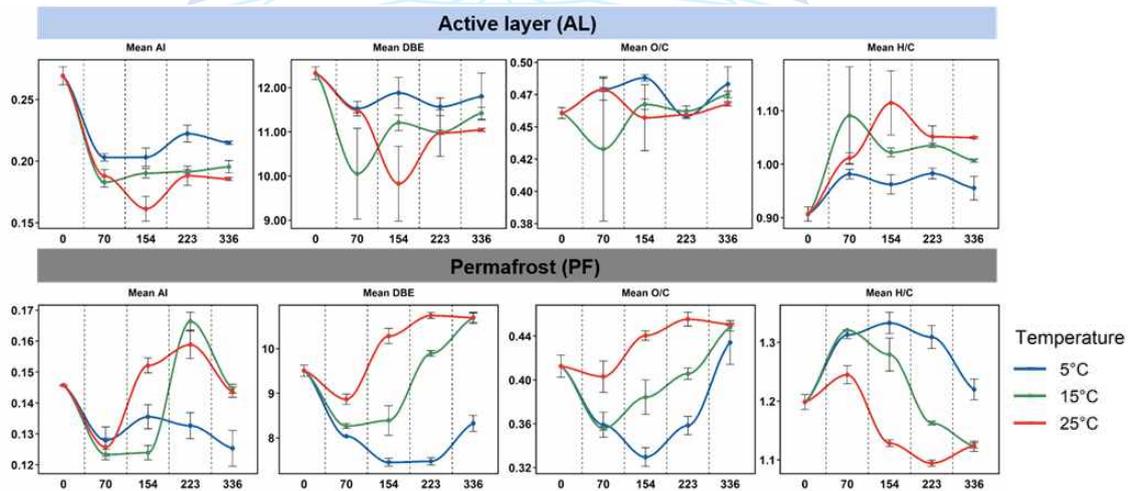


Fig. 33. Chemical properties of DOM in active layer and permafrost samples after anaerobic incubation.

✓ 활동층과 영구동토층 내 용존유기물을 Recalcitrant-Active(RA), Recalcitrant-Inactive(RI), Labile-Active(LA), Labile-Inactive(LI) 4개로 분류하고, 배양시간에 따른 변화를 비교하였을 때, 화학특성을 비교하였을 때, 배양시간에 따라 각 그룹의 비율이 다르게 변하는 것이 확인되었음. 관찰된 화학특성 및 그룹 비율의 변화가 의미하는 바에 대해서는 추후 식생변화 및 미생물 군집변화 데이터와 연계하여 분석할 예정.

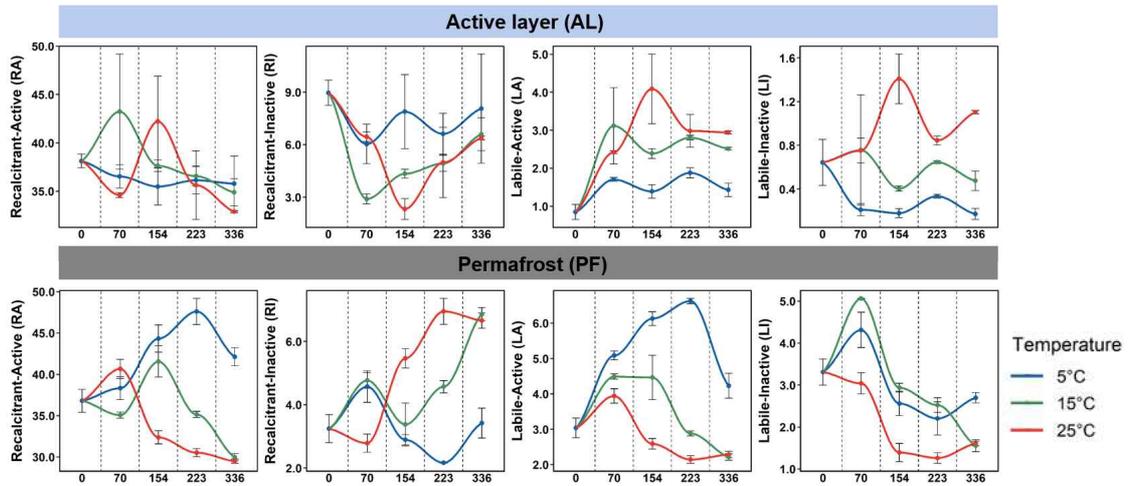


Fig. 35. van Krevelen plots displaying active and inactive compositions in DOM assigned from the permafrost samples.

✓ 강설량 증가에 따른 토양 용존유기물의 변화를 확인하기 위해서, 스발바르 지역 Adventdalen의 강설량 모사 실험구 4곳 (10 사이트)의 스노우펜스 설치 지역에서 대조군과 스노우펜스 실험군 시료를 채취하여 특성분석을 수행함 (2반복, 총 40개 시료).



Fig. 36. Location of sampling sites for snow fence experiment(left) and view of snow fence experiment(right).

✓ PCoA 분석을 통해 대조군과 스노우펜스 실험군 시료 간에 유기성분의 조성 차이가 확인되었으며, 스노우펜스 실험군 시료는 A와 B 실험구와 C와 D 실험구 그룹이 구분되는 것이 확인되었습니다.

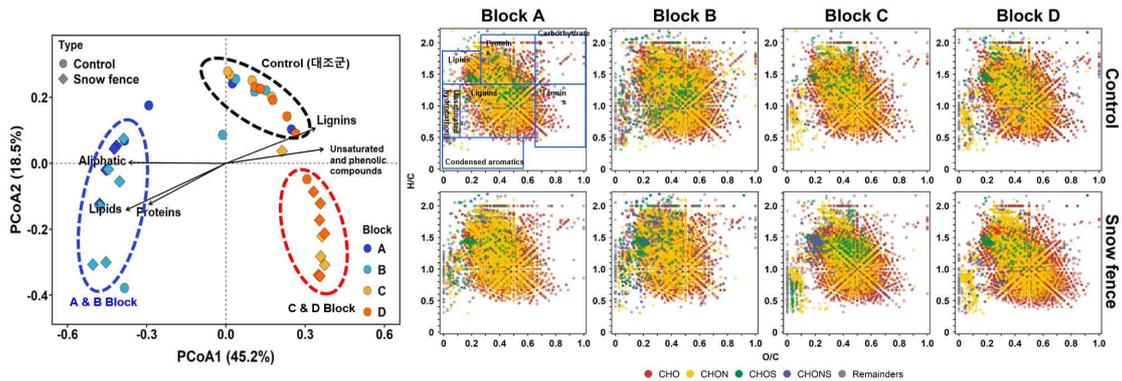


Fig. 37. PCoA plots discriminating chemical compositions of DOM from the snow fence experiment samples(left) and van Krevelen plots displaying the molecular composition of DOM in control and snow fence experiment.

✓ 혐기배양 실험결과와 유사하게, Active한 성분의 분포가 유사하였으며, 대조군 내에서는 Inactive한 성분의 분포와 스노우펜스 처리 후 관측된 Inactive한 성분의 차이가 확인되었음.

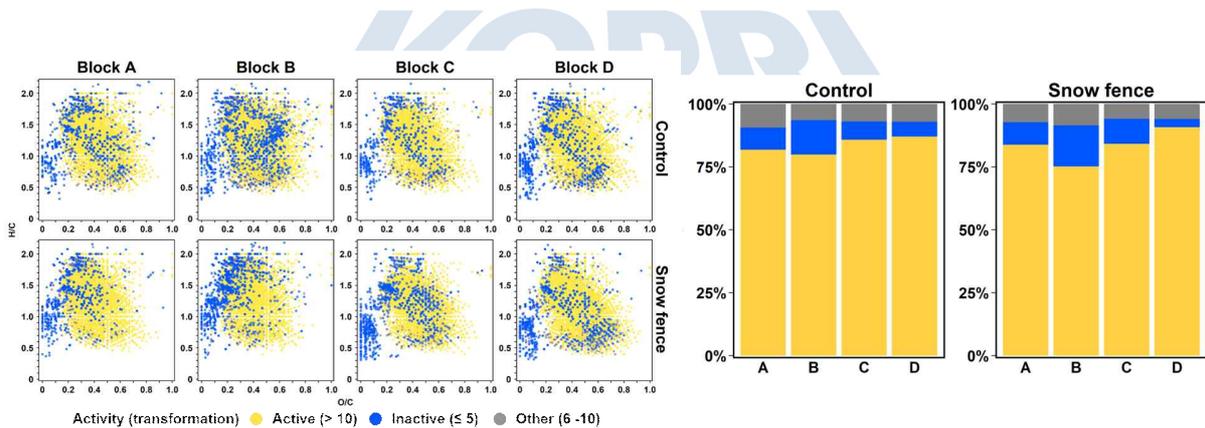


Fig. 38. van Krevelen plots displaying active and inactive compositions in DOM from snow fence experiment(left) and relative proportions of active and inactive components(right).

● 글로벌 환경변화에 의한 용존유기물과 미생물 상호작용 분석모델 구축

✓ 환경 내 존재하는 용존유기물의 특성을 기존의 Labile과 Recalcitrant 분류 외에 추가로, 생물학적 또는 화학적으로 얼마나 변환하는지에 대해 Active와 Inactive라는 특성을 추가하여, 용존유기물의 특성을 보다 상세히 모니터링할 수 있는 분석모델을 구축하였으며, 이를 활용해서 글로벌 환경모사 실험을 통해 용존유기물이 어떻게 반응하는지를 예측할 수 있었음 (중국과학원 연구팀과의 국제공동연구 성과).

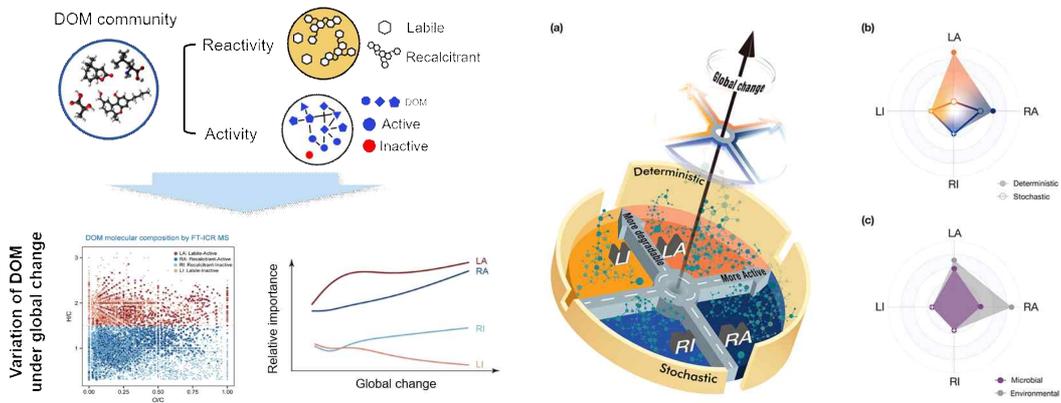


Fig. 39. Framework for studying the effects of global change on DOM composition.

✓ 용존유기물과 미생물 간의 상호작용 분석모델을 이용해서, 지구온난화, 부영양화와 같은 전지구적인 변화에 따라서 생태계 환경이 어떻게 변화하는지 생태학적 네트워크를 분석하였음. (중국과학원 연구팀과의 국제공동연구 성과)

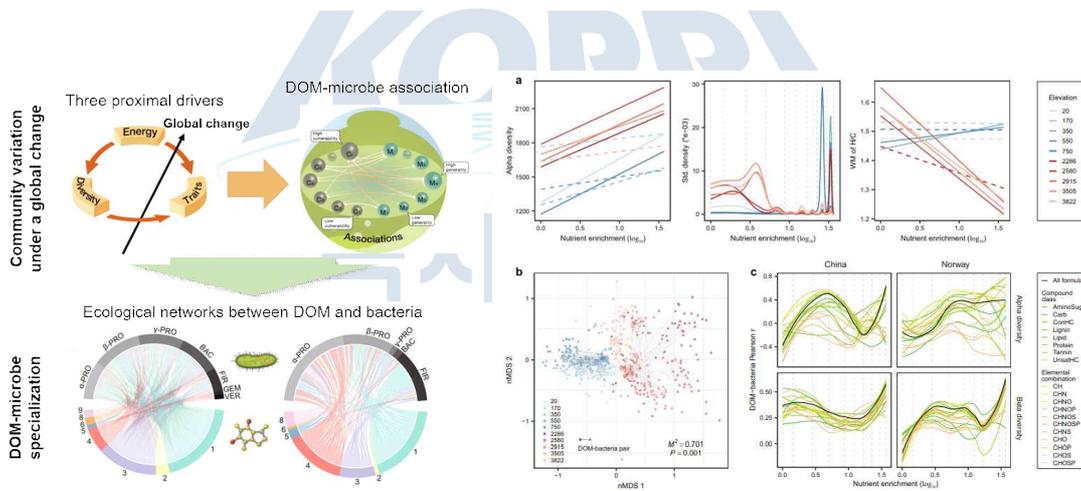


Fig. 40. A framework for studying the effects of global change on DOM-microbe associations(left) and DOM features and their bacterial associations at a compositional level(right).

[참고] 극지연구소 KPDC(Korea Polar Data Center) 환경인자 등재 목록 (2022.11월 현재)

※ 세부과제-2(NRF-2021M1A5A1075508 / 극지연구소 과제분류번호-PN21012, 22012)의 한국극지데이터센터(KPDC; Korea Polar Data Center) 환경인자 등재 목록(1단계 1차년도와 2차년도)

연번	PN21012	등록일
1	[KOPRI-KPDC-00001879]	2021-11-29
	Soil temperature and moisture content data collected from summer climate manipulation plots in Cambridge Bay, Canada from 06/2019 to 09/2021	
2	[KOPRI-KPDC-00001878]	2021-11-29
	Air temperature and humidity data collected from summer climate manipulation plots in Cambridge Bay, Canada from 06/2019 to 09/2021	
3	[KOPRI-KPDC-00001877]	2021-11-29
	Soil temperature and moisture data collected from winter climate manipulation plots in Cambridge Bay, Canada from 06/2019 to 09/2021	
4	[KOPRI-KPDC-00001870]	2021-11-09
	Bacterial and archaeal genome sequence data from anaerobically incubated permafrost soil (Alaska)	

연번	PN22012	등록일
1	[KOPRI-KPDC-00002122]	2022-11-02
	Soil temperature and moisture data collected from winter climate manipulation plots in Cambridge Bay, Canada from 09/2021 to 08/2021	
2	[KOPRI-KPDC-00002123]	2022-11-03
	NDVI data collected from climate manipulation plots in Cambridge Bay, Canada in 2022	
3	[KOPRI-KPDC-00002125]	2022-11-03
	Permafrost core samples in Council, Alaska, USA, 2022	
4	[KOPRI-KPDC-00002124]	2022-11-03
	NDVI data collected from climate manipulation plots in Council, Alaska, USA in 2022	
5	[KOPRI-KPDC-00002126]	2022-11-03
	Soil samples collected in Cambridge Bay, Canada in 2022	
6	[KOPRI-KPDC-00002127]	2022-11-03
	Soil moisture content data collected from winter climate manipulation plots in Council, Alaska, USA from 09/2021 to 09/2022	
7	[KOPRI-KPDC-00002139]	2022-11-03
	Geophysical data across a snow fence	
8	[KOPRI-KPDC-00002154]	2022-11-04
	Chemodiversity of dissolved organic matter of Svalbard soils using FT-ICR MS analysis	
9	[KOPRI-KPDC-00002155]	2022-11-07
	Bacterial and archaeal genome sequence data from Alaska permafrost soil	

2. 대표적 연구성과 및 목표 달성 정도

2-1. 대표적 연구성과

1) 진도관리, 자체평가 결과 등을 반영하여 성과가 우수한 2대 기술을 선정

- (① 동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명) 동토 해빙에 의한 수문학적 변화로 온실기체의 변동과 토양 미생물 군집 변화 연구 및 이들의 상호 연관성 결과 제시
- (② 장기축적 환경인자 DB 활용을 통한 북극 연구 네트워크 기여 및 협력) ITEX (International Tundra EXperiment) 연구 프로토콜에 따라 설치/운영 되어 북극 연구 네트워크에 자료를 제공하고 공동 논문 작성등의 기여

2) 성과별 내용

성과 1	동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명								
① 성과개요									
연구자	극지연구소 권민정, Binu M. Tripathi, 김민철								
과제명	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해								
기술성숙도 (TRL)	기본원리 파악	기본개념 정립	가능 및 개념검증	연구실환경 테스트	유사 환경 테스트	파일럿 현장 테스트	상용모델 개발	실제 환경 최종 테스트	상용 운영
		0							
성과개요	<ul style="list-style-type: none"> • 동시베리아 체르스키 지역에서 10년간의 배수로 수층이 낮아져 건조해진 습지에서 메탄 방출과 미생물의 상호 의존 기작 밝힘. 건조한 지역에서 메탄 생성 및 산화 미생물들의 개체수 감소와 조성 변화가 대기로의 메탄 가스 방출량 감소로 이어짐을 밝혀냄. 또한, 메탄 생성과 관련한 7종의 신종 미생물을 발견 및 상호의존성 메탄 대사경로 확인. 북극 환경 변화에 의한 미생물 변화가 온실가스 배출량 및 종류를 조절하는 주요 요인이 될 수 있음을 밝힘. 								
② 성과내용									
- 주요 기능 및 사양									
주요 기능/사양	내용								
미생물 군집-온실기체 상관관계	환경 변화에 의한 메탄 대사에 관여하는 미생물 개체수 및 조성 변화와 대기로의 메탄 방출량의 상관성을 밝힘								
- 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)									
<ul style="list-style-type: none"> • 기존 연구들에서는 영구동토층 해빙으로 인한 융해호 형성과 이로 인한 메탄 방출 증가에 									

초점이 맞춰짐.

- 반면 본 연구에서는 동토 해빙에 기인한 수문학적 변화로 건조해진 습지 환경에서의 온실가스 변동과 토양 미생물 변화, 그리고 그 상호 연관성에 대한 연구로 차별성을 가짐

- 우수성

- 본 연구에서는 변화하는 동토 환경의 생태계 구성요소들에 대한 다각적 접근을 통해 온실가스 플럭스-미생물 군집-토양 생지화학적 특성 간의 종합적인 상호 연관성 결과 제시
- Deep sequencing 기반 환경 유전체학 기법을 기후변화 연구에 적용함으로써 온실가스 변동과 재구성된 유전체 단위의 미생물 종 간의 밀접한 상관성 확인

- 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 순환 변화 이해	시베리아 습지의 메탄, 이산화탄소 동태 파악을 통해 동토 생태계의 탄소 순환 변화 이해에 기여
분야별 목표	- 북극권 동토 내 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명	- 동시베리아 지역 메탄 대사 기작 규명을 통해 과제 목표인 동토 내 미생물 대사 기작 규명에 기여

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

- 산업화/산업현장 적용: 없음

④ 파급효과/기대효과

- (학술적/기술적/인프라 측면)

본 과제에서 밝혀진 온실가스 관련 미생물 정보는 향후 동토 생태계 탄소 모델 정확도 향상에 기여

- (산업경제적 측면)

새롭게 밝혀진 메탄 대사경로는 향후 메탄 저감 및 자원화 기술개발에 활용될 것으로 기대함

- (사회적 측면)

본 연구를 통해 국제사회의 기후변화 대응 노력에 부합함으로써 우리나라의 국제적 위상 제고

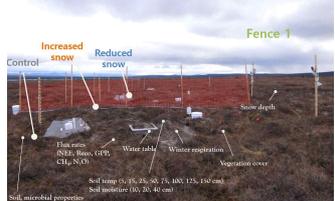
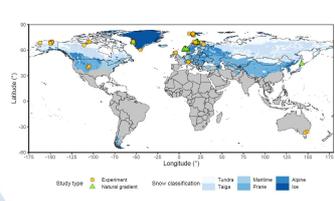
⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간		1								

논문	논문명	학술지명	IF	게재년월
		Disproportionate microbial responses to decadal drainage on a Siberian floodplain	Global Change Biology	10.863

성과 2	장기축적 환경인자 DB 활용을 통한 북극 연구 네트워크 기여 및 협력
------	--

① 성과개요

연구자	극지연구소 정지영, 김민철, 남성진, 정수정								
과제명	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해								
기술성숙도 (TRL)	기본원리 파악	기본개념 정립	가능 및 개념검증	연구실환경 테스트	유사 환경 테스트	파일럿 현장 테스트	상용모델 개발	실제 환경 최종 테스트	상용 운영
		0							
성과개요	<ul style="list-style-type: none"> ITEX (International Tundra EXperiment) 기반 기후변화 모사 실험에서 시료 및 자료 획득 <ol style="list-style-type: none"> 적설모사 5년차 실험구에서 시료 획득 및 식물, 미생물, 기체플럭스, 토양 자료 획득 장기축적 환경인자 DB 활용을 통한 북극 연구 네트워크 자료 제공 및 공동 논문 작성 <ol style="list-style-type: none"> 캠브리지 베이 적설모사 실험구 내 온도 자료 공유를 통한 적설 실험에 대한 논문 출간(Arctic Science, ITEX 30년 특별기획, 2022.02) 캠브리지 베이 온도상승 실험구에서 관측한 생태계 호흡과 환경인자 자료를 공유하여 ITEX 연구자 74명과 Nature에 논문 투고 (2022.11) 						 		

② 성과내용

- 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
장기축적 데이터 공유	북극 연구 네트워크 그룹들과 자료 공유를 통한 논문 성과 도출

- 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)
 - ITEX에서는 주로 식물 관련 데이터를 수집하나, 본 실험에서는 생태계 전반적 인자 측정
 - 74개 사이트의 자료를 수집하여 적설 모사와 자연 적설 차이 효과 비교
- 우수성
 - 본 연구는 건조 툰드라와 습윤 툰드라 지역의 생태계 반응을 비교할 수 있도록 설계됨
 - 기존 자료가 없는 지역에 ITEX 프로토콜에 따라 실험구를 설치하고 데이터를 수집하여, 북극 연구 네트워크에 기여할 수 있음

- 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 순환 변화 이해	북극 생태계에서 가장 중요한 기후환경인자인 적설변화가 생태계에 미치는 영향 이해
분야별 목표	- 적설량 변화에 의한 토양 생지화학적 변화 규명	- 북극 연구 네트워크 자료 공유 및 자연 적설 차이와 적설 모사 실험 간의 영향 차이가 다를 수 있음을 보임

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

- 산업화/산업현장 적용: 없음

④ 파급효과/기대효과

- (학술적/기술적/인프라 측면): 북극의 기후, 생태계 변화 이해 및 동토-기후변화 피드백 이해
- (산업경제적 측면): 없음
- (사회적 측면): 글로벌 이슈 대응에 대한 국가 위상 제고

⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간		1								

논문	논문명		학술지명	IF	게재년월
	Winters are changing: snow effects on Arctic and alpine tundra ecosystems		Arctic Science	2.51	22.02
	Environmental drivers of increased ecosystem respiration with warming in the tundra		Nature		Submi- tted



2-2. 목표 달성 정도

□ 세부과제-1

1차년도														
추진내용	추진 일정												책임자 (소속기관)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
온실기체 플렉스 측정장비 구축														정지영(극지연)
북극 현장조사: 측정 기반 마련														정지영(극지연)
스발바르 적설모사 실험구 시료 확보 및 미생물 분석														김민철(극지연)
실내 토양 배양실험 및 분석														김민철(극지연)
캐나다 IMA 수행연구 준비														정지영(극지연)
2차년도														
북극 현장조사 및 데이터 분석														정지영(극지연)
실내 토양 배양실험 및 분석														김민철(극지연)
캐나다 IMA 현장조사 및 기초 특성 조사														정지영(극지연)

당초계획
 실적

□ 위탁과제-1(한국기초과학지원연구원 : 기후변화에 따른 북극 동토층 환경변화 반응 물질 탐색)

1차년도 (1단계 1차년도)															
개발내용	추진 일정												책임자 (소속기관)	비고 (변경사유 등)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
초고분해능 FT-ICR 질량분석을 활용한 북극 동토층 용존유기물 화학특성 정밀분석 플랫폼 구축														장경순 (한국기초과학지원연구원)	
2차년도 (1단계 2차년도)															
개발내용	추진 일정												책임자 (소속기관)	비고 (변경사유 등)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
겨울철 강설증가로 인한 스발바르 동토층 용존유기물 특성분석														장경순 (한국기초과학지원연구원)	
겨울철 강설증가와 관련된 용존유기물 지표특성 분석														장경순 (한국기초과학지원연구원)	

당초계획
 실적

▣ 국제 북극관련 기구 참여 내역

기타목적활용 성과정보			
과제번호	활용기간	활용구분	활용내용
2021M1A5A10 75508	2021 ~2022	북극국제기구 대표활동	국제북극과학위원회(IASC) 육상 워킹그룹 한국대표 활동(정지영)



제 4 장
연구개발과제성과의 관련분야 기여 정도
(2세부과제-위탁과제 포함)



○ 논문 게재(게재 완료)

- Kwon, Min Jung, Tripathi, Binu M., Goeckede, Mathias, Shin, Seung Chul, Myeong, Nu Ri, Lee, Yoo Kyung, Kim, Mincheol, 2021, Disproportionate microbial responses to decadal drainage on a Siberian floodplain, GLOBAL CHANGE BIOLOGY
- Kim, You Jin, Laffly, Dominique, Kim, Se-eun, Nilsen, Lennart, Chi, Junhwa, Nam, Sungjin, Lee, Yong Bok, Jeong, Sujeong, Mishra, Umakant, Lee, Yoo Kyung, Jung, Ji Young, 2022, Chronological changes in soil biogeochemical properties of the glacier foreland of Midtre Lov acute accent enbreen, Svalbard, attributed to soil-forming factors, GEODERMA
- Ang Hu, Kyoung Soon Jang, Fanfan Meng, James Stegen, Andrew J Tanentzap, Mira Choi, Jay T Lennon, Janne Soininen, Jianjun Wang, 2022, Microbial and environmental processes shape the link between organic matter functional traits and composition, Environmental Science and Technology
- Ang Hu, Jianjun Wang, Mira Choi, Andrew J Tanentzap, Jinfu Liu, Kyoung Soon Jang, Jay T Lennon, Yongqin Liu, Janne Soininen, Xiancai Lu, 2022, Ecological networks of dissolved organic matter and microorganisms under global change, Nature Communications
- Christian Rixen, Christian Rixen, Ji Young Jung, Toke Thomas Hoyer, Petr Macek, Rien Aerts, Juha M Alatalo, Jill T Anderson, Pieter A Arnold, Isabel C Barrio, 2022, Winters are changing: snow effects on Arctic and alpine tundra ecosystems, Arctic Science

○ 학술 발표

- You Jin Kim, Dominique Laffly, Se-eun Kim, Lennart Nilsen, Junhwa Chi, Yong Bok Lee, SuJeong Jung, Umakant Mishra, Yoo Kyung Lee, Ji Young Jung, Factors affecting soil biogeochemical development in the glacier foreland of Midtre Lov enbreen, Svalbard, AGU Fall Meeting 2021, 202112
- Nu Ri Myeong, Woo Jun Sul, Mincheol Kim, Transcriptional response of methanogenic communities to permafrost thaw, ASME 2022(The 12th Asian Symposium on Microbial Ecology), 202204
- Ji Young Jung, Taewoo Lee, Eilhann Kwon, Sungjin Nam, Yoo Kyung Lee, You Jin Kim, Yong Bok Lee, Sujeong Jeong, Elisabeth J. Cooper, Characterization of soil organic matter in different plant communities of high Arctic tundra, SOM 2022 (8th International Symposium on Soil Organic Matter), 202206
- Hyeryeon Gyeong, Min Sung Kim, Dominique Laffly, Ji Young Jung, Yoo Kyung Lee, Kyoung-Soon Jang, Mincheol Kim, Dissolved organic molecules do not follow the successional trajectory of microbial communities in recently deglaciated soils of the High Arctic, ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences), 202209
- Nu Ri Myeong, Woo Jun Sul, Mincheol Kim, Transcriptional response of methanogenic communities to permafrost thaw, ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar

Sciences), 202209

- Sujeong Jeong, Min Jung Kwon, Mincheol Kim, Sungjin Nam, Junhwa Chi, You Jin Kim, Namyi Chae, Yoo Kyung Lee, Ji Young Jung, Snow Depth Manipulation Experiments in Dry and Moist Tundra, ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences), 202209
- 정지영, 권민정, 장경순, 남성진, 지준화, 강호정, 정수정, 이유경, Long-term increased temperature & precipitation experiment in the high Arctic Canada, ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences), 202209
- Sungjin Nam, Taewoo Lee, Eilhann Kwon, Yoo Kyung Lee, You Jin Kim, Yong Bok Lee, Sujeong Jeong, Elisabeth J. Cooper, Ji Young Jung, Soil organic matter characteristics under different vegetation groups in Adventdalen, Svalbard, ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences), 202209
- You Jin Kim, Dominique Laffly, Se-eun Kim, Lennart Nilsen, Junhwa Chi, Sungjin Nam, Yong Bok Lee, Sujeong Jeong, Umakant Mishra, Yoo Kyung Lee, Ji Young Jung, Chronological changes in soil biogeochemical properties of the glacier foreland of Midtre Lovbreen, Svalbard, attributed to soil-forming factors, ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences), 202209
- You Jin Kim, Mats P Björkman, Robert G Bjork, Yong-Hoe Choe, Ji Young Jung, Changes in soil carbon stocks and fractions with warming under different tundra vegetation types in northern Sweden, AGU Fall Meeting 2022, 202212
- Jinhyun Kim, Ji Young Jung, Min Jung Kwon, Mincheol Kim, Sungjin Nam, Sujeong Jeong, Yoo Kyung Lee, Intensified winter precipitation-induced enzymic latch mechanism in moist Arctic tundra may be impeded by an extreme summer drought, AGU Fall Meeting 2022, 202212

○ 언론 홍보 및 저역서

- 김민철, 메마른 동토층에선 메탄가스는 덜 나오고, CO₂ 방출은 늘어나. 한겨레, 2021.08.26.
- 김민철, 땅속 시간은 더 빨리 흐른다. 노컷뉴스, 2022.02.14.
- 김민철, 이유경, 시사기획 창: 고장난 심장, 북극의 경고. KBS, 2022.08.23.
- 김유진, 정지영, Chapter 2. Managing Soil Organic Carbon for Climate Change Mitigation and Food Security, Soil Organic matter and Feeding the Future (CRC Press (공저자 참여)).

○ 수상 실적

- 김유진, Early Career Poster Award, 제27차 국제 극지과학 심포지엄(ISPS 2022), 한국해양과학기술원 부설 극지연구소, 대한민국, 20220920 ~ 21

○ 전문 인력 양성

- 극지연구소 박사 1건(2022년 8월, 경혜련 (박사 졸업))

○ 관련 분야 기여 사항

- 미생물 군집-온실기체 상관관계를 밝힌 본 연구결과(Kwon et al., 2021)는 변화하는 동토 환경의 생태계 구성요소들에 대한 다각적 접근을 통해 온실가스 플럭스-미생물 군집-토양 생지화학적 특성 간의 종합적인 상호 연관성 결과 제시하였고, deep sequencing 기반 환경 유전체학 기법을 기후변화 연구에 적용하여 온실가스 변동과 재구성된 유전체 단위의 미생물 종 간의 밀접한 상관성 확인
- 또한 본 과제에서 축적된 장기 축적 데이터를 북극 연구 네트워크 그룹들과 자료 공유를 통해 논문 성과 도출함. 본 과제의 스노우펜스 실험 디자인은 식물 뿐만이 아닌, 생태계 전반적 인자를 측정하였고, 건조 툰드라와 습윤 툰드라 지역의 생태계 반응을 비교할 수 있도록 설계됨. 알래스카와 캐나다 극지역 중 기존 자료가 없는 지역에 ITEX 프로토콜에 따라 실험구를 설치하고 데이터를 수집하여, 북극 연구 네트워크에 꾸준히 기여할 수 있음

[참고] 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항

- 장기축적 환경인자 DB 활용을 통한 북극 연구 네트워크 기여 및 협력: 캠브리지 베이 적설모사 실험구 내 온도 자료 공유를 통한 적설 실험에 대한 논문 출간(*Arctic Science*, ITEX 30년 특별기획, 2022.02)
- 스발바르 거점에서 빙하후퇴지역에서 토양 생지화학적 특성 변화 연구에 대한 논문 출판(*Geoderma*, IF7.4, 2022.02)
- CRC Press 출간 해외 저서 「*Soil Organic Matter and Feeding the Future*」 중 Chapter 2. Managing Soil Organic Carbon for Climate Change Mitigation and Food Security 출판 (2021.12)
- 2단계 1차년도(2023년)에 계획된 “그린란드 고위도 북극 미답지 토양 및 미생물 특성 조사”를 위한 북그린란드 현장 답사 및 토양 시료 채취 수행(2022.07.08-25). 시료 확보를 통해 3차년도 연구 목표인 “그린란드 고위도 북극 미답지 토양 및 미생물 특성 조사” 무리 없이 달성 가능

구분	RFP 제시		세부(위탁)과제-1		세부(위탁)과제-2		세부(위탁)과제-3		세부과제-4		세부과제-5		총합	
	논문/특허 등	비고	논문/특허 등	비고	논문/특허 등	비고	논문/특허 등	비고	논문/특허 등	비고	논문/특허 등	비고	논문/특허 등	성과 지표 달성도
1단계 1차년도-2차년도														
1차년도 (1단계)			<ul style="list-style-type: none"> • 에어로졸 플랫폼 설계 • 환경인자 DB 10건 • 토양플럭스 등 2개소 • 에어도출 특성 분석 		<ul style="list-style-type: none"> • 강성모사 실험구 가동 • 플럭스 측정 • 유기물 분해 특성 • 용존유기물 플랫폼 구축 • 용존유기물 정량분석 (시료10) 		<ul style="list-style-type: none"> • 시추 구역 3-5점 • 유기물 오염 물질 분석 (토양) 구역 3점 이상 	SCI 1편	<ul style="list-style-type: none"> • 유전체 리아브러리 확보 • 요소 단백질 특성 분석 (논문1) 		<ul style="list-style-type: none"> • 기후변화 연계성 분석 • 기후 모델 모수화 개선 		SCI 1편	100% 이상

<RFP 대비 세부과제에서의 1차년도 성과달성 계획>

제 5 장
연구개발 결과의 활용방안 및 계획



1. 연구개발 결과의 활용 방안

1) 연구개발성과의 활용방안

- 영구동토지역의 탄소와 질소 동태에 관한 장기모니터링 결과는 국제 동토 네트워크 (Permafrost Carbon Network, PCN; International Tundra Experiment, ITEX) 연구자들과 공유/종합/분석하여 시공간적 규모가 확장된 국제 공동 논문 성과 도출 가능
- 적설변화는 겨울철 토양 온도 상승, 식물 생육기 변화, 여름 토양 수분 변화 이외에도 토양 내 얼음층 변화를 주어 열카르스트 지형 형성. 따라서 적설의 효과 이외에도 토양이 가라앉아 생기게 되는 생태계의 생지화학 순환에 대한 이해 추가로 가능함
- sad동토 생태계의 용존유기물의 계절변화 및 동태 연구는 극지하천을 통해 북극해로 유입되는 용존유기물 연구의 자료로 활용 가능/육상생태계와 해양생태계 연계할 수 있는 연구기반 마련
- 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
- 동토기반 모델 개발에서 토양변화에 따른 요인을 정량화하여 모듈 개선 활용 가능
- 기후 변화에 따른 극지 토양의 반응 및 기작을 규명함으로써, 앞으로의 동토 환경 변화의 정확한 평가를 통해 기후 변화 모델의 예측력 향상에 기여
- 북극의 미답지 생태계 조사 및 동토층 대상 다중오믹스 정밀분석을 통해 동토 유래 신규 대사물질 및 효소 후보군을 발굴함으로써 의약학, 에너지 산업 등에 폭넓게 활용될 수 있음

극지연구소

2) 연구개발성과의 기대효과

① 과학기술적 효과

- 극지 동토 생태계에 영향을 미치는 여러 인자를 생태계 모델링에 접목하여, 보다 정확한 기후변화 시나리오 예측 모델 구현에 활용
- 급격한 북극 온난화에 따른 동토변화 이해 및 전지구 기후에 미치는 영향 파악 기대
- 미생물의 종합적인 대사체학적 연구를 통해 미생물의 상호작용을 파악하여, 미래 동토의 미생물 군집 변화 예측 및 기후변화에 미치는 영향 이해를 위한 기초 자료 활용
- 본 과제가 성공적으로 완수되면 북극의 복잡한 메탄 동태에 대한 새로운 연구 방향을 제시할 수 있을 것으로 기대됨
- 북극 동토 내 유기 탄소의 방출로 인한 기후 변화에 대한 메탄균 및 메탄산화균의 영향 규명에 대한 기초자료로 활용 가능할 것으로 기대됨
- 저온 환경에서의 미생물 활성 및 물질대사 연구를 통해 극지 환경에서의 물질순환에 미치는 생물학적 영향 연구에 대한 기초자료로 활용 가능

② 경제·사회적·외교적 효과

- 향후 북극 개발이나 탄소배출권 관련된 정책 설정에 필요한 공공기반 정보로 기여함
- 북극 모니터링 관련 데이터 생산을 통해 북극 이사회 옵서버 국가로서 기여
- 국제환경협정에서의 협상력 향상에 필요한 기반 정보 제공

③ 북극이사회 옵서버 국가로서의 역할 이행 효과

- 동토변화에 대한 화학적, 물리적, 수리학적 피드백 파악을 통한 기후변화에서 동토의 역할 파악 및 전지구 또는 유라시아에 미치는 영향 파악을 통한 사회경제적 영향 파악에 기여
- 북극이사회 옵서버 국가로서의 북극권에서의 글로벌 이슈 대응에 대한 선제적 동참을 통한 지위 유지 및 미래 기후변화 예측에 대한 대응책 제시
- 실험디자인, 미생물/생지화학적 분석, 현장 조사, 통계분석, 학술 논문 작성 등 전 분야에 걸쳐 대학원생들이 참여하며, 관련 주제로 박사학위 논문 작성 등 전문 인력 양성에 큰 기여



2. 연구개발 결과의 활용 계획

구분	활용 계획
기술적 측면	<ul style="list-style-type: none"> • 북지 동토 생태계에 영향을 미치는 여러 인자를 생태계 모델링에 접목하여, 보다 정확한 기후변화 시나리오 예측 모델 구현에 활용 • 급격한 북극 온난화에 따른 동토변화 이해 및 전지구 기후에 미치는 영향 파악 기대
경제적 산업적 측면	<ul style="list-style-type: none"> • 북극 개발이나 탄소배출권 관련된 정책 설정에 필요한 공공기반 정보 • 북극 모니터링 데이터 생산을 통해 북극이사회 옵서버 국가로서 기여 • 국제환경협정에서의 협상력 향상에 필요한 기반 정보 제공
사회적 외교적 측면	<ul style="list-style-type: none"> • 북극이사회 옵서버 국가로서 북극권 글로벌 이슈 대응에 대한 선제적 동참을 통한 지위 유지 및 미래 기후변화 예측에 대한 대응책 제시 • 실험디자인, 미생물/생지화학적 분석, 현장 조사, 통계분석, 학술 논문 작성 등 전 분야에 걸쳐 대학원생들이 참여하며, 관련 주제로 박사학위 논문 작성 등 전문 인력 양성에 큰 기여



주 의

1. 이 보고서는 과학기술정보통신부에서 시행한 해양극지기초원천기술개발사업 “북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발” 총괄과제의 “기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해” 세부과제의 단계보고서이다.
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.