

보안과제[] 일반과제[○] (제출용)

BSPN24012-012-12

NRF-2021M1A5A1065425

RS-2021-NR056058

(총괄) NRF-2021M1A5A1065407 / (세부) 2021M1A5A1075508
(위탁) 2021M1A5A1075510 / 2023M1A5A1084405
(1단계) (KOPRI) (BSPN21012 / PN22012) / (2단계) (PN23012 / PN24012)

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)

(2세부과제) 기후변화에 의한 북극 동토 생태계
생지화학적 변화 이해

(Changes in biogeochemical processes of Arctic terrestrial
ecosystem in response to climate change)

2025. 11. 06.

한국해양과학기술원부설
극지연구소

과학기술정보통신부

제 출 문

과학기술정보통신부장관 귀하

이 보고서를 “북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발“ (과기부 해양극지기초원천기술개발사업 총괄과제)의 2세부과제 “기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해” 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

2세부과제 연구책임자 : 정지영('21.04~ '25.03)

연구원 : 경혜련, 권선주, 김관수, 김덕규,

“ : 김문교, 김민철, 김유진, 김진현,

“ : 남성진, 명누리, 이유경, 이주한,

“ : 장승연, 정수정, 최용희, 홍순규

“ : Binu Mani Tripathi

(이상 극지연구소; 퇴직 연구원 포함)

연구원 : 김정훈

(이상 한양대학교)

1위탁연구기관명 : 한국기초과학지원연구원

1위탁연구책임자 : 장경순('21.04~ '24.12)

연구원 : 김민성

(이상 한국기초과학지원연구원)

2위탁연구기관명 : 연세대학교

2위탁연구책임자 : 강호정('23.01~ '24.12)

연구원 : 김정인, 윤정은

(이상 연세대학교; 퇴직 연구원 포함)

(이상 성명 가나다순)

본 보고서는 정부(과학기술정보통신부/한국연구재단)로부터 지원받은 해양·극지기초원천기술개발사업의 일환으로 수행한 과제에서의 연구활동에 대한 최종보고서로서, 수행 주기에 연구개발기간은 1단계(2021.04.27.~2022.12.31)와 2단계(2023.01.01~2025.03.31)이며, 연구개발과제 수행에 참여한 2세부과제와 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.

극지기초원천기술개발사업 최종보고서 (제출용, 세부과제용)

① 부처사업명(대)	원천기술개발사업	④ 보안등급(보안, 일반)	일반				
② 사업명(중)	해양극지기초원천기술개발	⑤ 과제성격(기초, 응용, 개발)	기초				
③ 세부사업명(소)	해양극지기초원천기술개발						
⑥ 총괄과제명	북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발						
⑦ 세부과제명	국 문	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	134-82-06870				
⑩ 위탁과제기관명	한국기초과학지원연구원, 연세대학교						
⑪ 주관연구책임자	성 명	정지영	국가연구자번호				
	전 공	토양학	직급(직위)				
	소속부서	생명과학연구본부	전자우편				
	전 화	032-760-5532	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	700,000					700,000	
2차년도	800,000					800,000	
3차년도	900,000					900,000	
4차년도	457,000					457,000	
5차년도							
합계	2,857,000					2,857,000	
⑬ 총연구기간	2021. 04. 27 - 2025. 03. 31 (48개월)						
⑭ 다년도연구기간	2023. 01. 01 - 2025. 03. 31 (27개월)						
⑮ 당해연도연구기간	2024. 01. 01 - 2025. 03. 31 (15개월)						
⑯ 참여기업 수	중소기업		중견기업		대기업		계
⑰ 국제공동연구	국가명		상대국 연구기관수		상대국 연구개발비		상대국연구책임자수
	캐나다 등 2개국		2		현물제공		2
⑱ 실무담당자	성 명	임민호	휴대전화	010-8861-4027	전자우편	mhy8861@kopri.re.kr	
이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 연구개발과제 중단, 협약 해약, 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다. 2025년 10월 24일 주관연구책임자 : 정지영 (직인생략) 주관연구기관장 : 신형철 (직인생략) 과 학 기 술 정 보 통 신 부 장 관 귀 하							

○ 공동연구개발기관 등 현황

공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관							
위탁연구개발기관	한국기초과 학지원연구 원	장경순	부장	010-6570- 8253	ksjang@kb si.re.kr	동토층 용존유 기물질 화학특 성 분석 및 상관 인자 도 출	정부출연 연
	연세대학교 (2단계 추 가)	강호정	교수	010-4151- 4327	hj_kang@y onse.ac.kr	동토층 온실기 체 (이 산화탄 소 및 메탄) 발 생량 측 정, 분 석 및 주요 조 절 인자 구명	대학
연구개발기관 외 기관							



〈 요약 문 〉

연구개발 목표 (500자 내외)	● 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)	● 적설량 변화에 의한 북극 툰드라 토양의 생지화학적 특성 변화 규명 · 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) 변화에 미치는 영향 연구 · 적설량 변화에 대한 툰드라 생태계별 반응 비교 ● 북극권 동토 내 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명 · 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 대사과정 연구 · 유기물 분해 대사와 온실기체 발생 간의 상관성 및 조절인자에 대한 종합 분석 ● 미답지에서 동토 생태계 국제 공동 연구 · 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)	● 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

〈 연구 분야 〉

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)	X09	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 %		%		%		%
원천기술개발분야	0812	50 %	0811	40 %	0499	10 %		%		%

〈 보안 등급의 분류 및 결정사유 〉

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

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발 목표 및 평가항목별 성과	1
1. 연구개발 목표	2
2. 평가항목별 성과	2
3. 목표 미달 시 원인 분석	5
4. 연구개발 목표 및 주요내용 변경사항	5
5. 선정/단계/연차점검의견	7
제2장. 추진내용 · 연구결과 및 추진일정 실적	8
1. 추진내용 · 연구결과	8
2. 목표 달성 수준 및 추진일정 실적	71
제3장. 연구 개발 결과의 활용 방안	80
1. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여정도	81
2. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	81
3. 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항	82
제4장. 당초 연구계획 대비 주요 변경사항	83
[첨부목록]	86
첨부1. 연구개발 목표의 달성도 증빙	87
첨부2. 연구개발결과 활용계획서	116
첨부3. 자체평가의견서	138
첨부4. [해당 시] 연구개발성과 공개제한 요청사유서	141
첨부5. [해당 시] 청년 의무채용 관련 실적	141
첨부6. [해당 시] 참여기업 의견서	141
첨부7. [최종본 제출 시] 평가의견에 대한 수정 · 보완 대비표	142

제 1 장
연구개발 목표 및 평가항목별 성과
(2세부과제-위탁과제 포함)



1. 연구개발 목표

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 ○ 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

2. 평가항목별 성과 (기간 : 2021.04.27. ~ 2025.03.31.)

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정성 및 정량) 적설량 변화에 의한 토양 생지화학적 변화 규명	50	1, 2, 3	1차년도 (1단계 1차년도)	- 현장연구 기반 마련, 플렉스 측정 장비 구축 - 스발바르 강설모사 실험구 토양 시료 확보 및 미생물 분석	- 거점별 사이트 방문 및 2차년도 연구 수행을 위한 점검 (100%) - 현장 연구용 플렉스 측정 장비(Picarro G4301) 구축 및 사전 테스트(100%) - 스발바르 강설모사 실험구 현장 조사, 채취된 토양 40점 대상 세균 및 진균 군집 분석 수행(100%)	1. 현장 조사 및 셋업 상황 관련 내용 (1단계 보고서 p.4-5) 2. G4301 구매 내역 및 테스트 결과(1단계 보고서 p.5) 3. 현장조사 내용 및 토양 미생물 군집 분석 자료 (최종보고서 p.17-30)
			2차년도 (1단계 2차년도)	- 습윤 툰드라 지역 적설량 증가에 의한 토양 유기물, 질소, 미생물 특성 변화 연구 - 건조 툰드라 적설량 증가가 식물 생장에 미치는 영향 연구	- 알래스카 카운실 적설량 차이에 따른 대부분 유기물층(활동층)의 탄소, 질소, 무기태 질소 함량 차이 없음, 적설증가에 의해 미생물 체외효소 중 가수분해 효소와 펄로분해효소 활성 분석(100%) - 캠브리지 베이 적설량 증가에 의해 식생지수가 높아졌으나, 뿌리 분포 비율은 차이없음	4. 알래스카 카운실 적설량 모사 실험 결과 (1단계 보고서 p.5-6, 최종보고서 p.13-16) 5. 캠브리지 베이 적설량 모사 실험 결과 (1단계 보고서 p.6-7, 최종보고서 p.13-16)
			3차년도 (2단계 1차년도)	건조 툰드라 지역 적설량 증가에 의한 토양 유기물, 질소, 미생물 특성 변화 연구	캐나다 캠브리지베이 거점 적설량 증가 실험구에서 미생물 군집 및 생지화학적 특성(토양 탄소, 질소, 동위원소,	6. 캠브리지 베이 적설량 모사 실험 결과(3차년도 보고서 p.4-5,

				습윤 툰드라 적설량 증가가 온실기체 방출에 미치는 영향 연구	- 무기태질소) 분석(100%) - 알래스카 카운실 거점 적설량 증가 실험구에서 CO₂, CH₄ 변화량 측정 (100%)	최종보고서 p. 13-16) 7. 카운실 적설량 모사 실험구 온실기체 측정 결과 (3차년도 보고서 p.7, 최종보고서 p. 13-16)
			4차년도 (2단계 2차년도)	- 적설량 증가가 오래된 탄소(old carbon) 변화에 미치는 영향 관련 논문 1편(RFP 총측, 상위 20% 이내, 정량성과) - 적설량 변화에 대한 습윤 vs. 건조 툰드라 생태계 반응 비교	- 카운실의 적설량 증가 실험구에서 오래된 (분해가 어려운) 탄소 분획이 감소함을 확인 - 알래스카 카운실과 캐나다 캄브리지 베이 거점에서 적설량 변화에 의한 식물, 미생물, 토양 변화 비교 결과 제시 및 논문 투고(100%)	8. 최종보고서 p.16-17, Global Change Biology (mrnlF = 100) 논문 심사 중 9. 적설량 변화에 의한 생태계 비교 결과(최종 보고서 p. 9-17)
(정성 및 정량) 북극권 동토 내 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명	30	2,3,	1차년도 (1단계 1차년도)	- 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 총측 정량성과)	- 환경발현유전체 기반 혐기 환경 유기물 분해 관련 대사 요약 - 인큐베이션 시료 대상 유기산, 아미노산 정성/정량 분석(100%) - 환경유전체 데이터로부터 메탄 생성균 4종 및 혐기 호흡 관련 5종 유전체 동정(100%) - 시베리아 습지 대상 미생물-온실기체 관계 논문 발표(100%)	10. 환경발현유전체 및 유기산 정성/정량 분석 결과 (최종보고서 p.31-33) 11. 온실가스 연관 혐기성 미생물 10종 유전체 정보(KPDC등록, 최종보고서 p. 34) 12. Global Change Biology 논문 발표
			2차년도 (1단계 2차년도)	- 배양 온도 및 시간 변화에 따른 호기 조건에서의 유기물 분해 대사-온실가스 발생 변화 연구 - 온실가스 연관 호기성 미생물 5종 동정(RFP 총측 정량성과) - 동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 1편(RFP 총측 정량성과)	- 인큐베이션 시료 대상 온실가스 발생 변화 분석 (100%) - 단일세포 유전체 기반 호기성 호흡 관련 5종 유전체 동정(100%) - 알래스카 동토 대상 미생물-온실기체 관계 논문 발표(100%)	13. 온실가스 농도 분석 결과 (최종보고서 p.34) 14. 온실가스 연관 호기성 미생물 5종 유전체 정보(KPDC등록, 최종보고서 p. 35) 15. Journal of Microbiology 논문 발표
			3차년도 (2단계 1차년도)	양분의 농도 변화에 따른 유기물 분해 대사-온실가스 발생 변화 연구	표층 식생 차이 및 산물 발생 등에 의해 생태계에 유입되는 양분의 농도 변화(함량 및 조성)가 동토 활동층의 유기물 분해 및 온실가스 발생에 미치는 영향 규명(100%)	16.알래스카 북극 툰드라&침엽수림 및 산물지역 동토 코어 분석 결과 (최종보고서 p. 41-49, 52-55)
			4차년도 (2단계 2차년도)	- 유기물 분해 대사과정 연구 - 유기물 분해	다중 오믹스 기반 동토 유기물 분해 대사과정 재구성(100%)	17.동토 유기물 분해 대사과정 종합 분석 결과

				대사-온실기체 발생 상관성 및 조절인자에 대한 종합 분석	온도/산불/식생 차이에 따른 유기물 분해 대사-메탄 발생 과정 상관성 및 주요 조절인자 도출(100%)	(최종보고서 p. 38-39) 18. 온실기체 발생 조절인자 관련 실내 모사 실험 결과(최종보고서 p. 40, 50, 53)
(정성)미답지에서 동토 생태계 국제 공동 연구	20	1,3	1차년도 (1단계 1차년도)	- 환경인자 측정 센서 구비 - 미답지 탐사 예정지 문헌 조사 및 국제 협력 사전 협의	- 토양 온도 및 수분 측정 센서 구입 - 캐나다 IMA, 북그린란드, 러시아 문헌조사 완료, 보고서에 관련 내용 기입, 캐나다 POLAR와 협의 (100%)	19. 센서 구매내역 (1단계 보고서 p.11) 20. 문헌조사 내용 및 이메일 증빙(1단계 보고서 p.12)
			2차년도 (1단계 2차년도)	- 캐나다 IMA 미답지 기후변화 모사 실험 전 T0 상태 파악 - 캐나다 IMA 미답지 식물, 토양 및 미생물 특성 조사	IMA 미답지 풍향 자료 분석(겨울 주풍향: 북서풍) 및 4곳 식물군집 토양, 미생물 특성 분석 (100%)	21. IMA 미답지 환경 자료 및 탐사 결과 (최종보고서 p. 55-57,59)
			3차년도 (2단계 1차년도)	- 캐나다 IMA 미답지 토양 유기물 집중 연구 - 그린란드 교위도 북극 미답지 토양 및 미생물 특성 조사	- IMA미답지 토양 및 식물 탄소 및 질소 함량, 동위원소 분석 수행 (100%) - 그린란드 시리우스 파셋 지역 토양 및 미생물 군집구조 분석 수행 (100%)	22. 캐나다 IMA 토양, 식물 분석결과 (최종보고서 p.57-58) 23. 그린란드 토양 및 미생물 분석 결과(최종보고서 p.60-61)
			4차년도 (2단계 2차년도)	- 그린란드 토양 질소 동위원소 측정 - 북극 동토 미답지 생태계 구조 종합 분석	- 그린란드 토양 탄소 및 질소 안정동위원소 분석 수행(100%) - IMA와 그린란드 시리우스 파셋 지역 생태계 구조 통계 분석 수행(100%)	24. 그린란드 토양 안정동위원소 분석결과 (최종보고서 p. 60) 25. 두 지역 미답지 토양, 미생물 구조 종합 분석 결과 (최종보고서 p.62-64)
합계	100					

3. 목표 미달 시 원인 분석 (해당사항 없음)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

2) 자체 보완활동

3) 연구개발 과정의 성실성

4. (해당 시) 연구개발 목표 및 주요내용 변경사항

구분	변경 전	변경 후	변경 사유 및 조치사항	협약변경 승인일
1-2. 연차별 목표 (조건/환경)	동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 2편	동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 1편	1단계 2차년도 “동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 2편” 중 1편을 2021년 조기 달성하였으므로, 1차년도 1편, 2차년도 1편으로 조정	2022.01.01
1-2. 연차별 목표 (조건/환경)	캐나다 IMA 미답지 온도상승챔버/스노우펜스 설치	캐나다 IMA 미답지 기후변화 모사 실험 전 T0 상태 파악	기후변화 모사 실험은 실험 시작 전 시료 확보, 분석을 통하여, 생태계 특성의 공간적 변이에 대한 이해가 우선시 되어야 함. 또한, 스노우 펜스 설치의 주방향 바람을 확인 후, 수직으로 설치해야 함. 기존 풍향 자료가 없음을 확인. 2022년 풍향 자료 수집 및 T0 조건에서 생태계 특성에 대한 이해 후, 23년 설치 예정	2022.01.01
2-1. 연구개발 내용, 방법 및 추진체계	캐나다 IMA의 실험사이트에서 식물 군집 구조 조사, 토양(T0) 샘플링, 온도상승챔버 (open top chamber, OTC)와 스노우펜스 (snow fence, SF) 설치	캐나다 IMA의 실험사이트에서 식물 군집 구조 조사, 토양(T0) 샘플링, 풍향 자료 획득 등 생태계 기초 특성 파악	토양호흡을 통한 14C분석은 모암이 탄산염 기반일 경우, 기원 추적에 어려움이 있음. 따라서, 알래스카와 캐나다 두 사이트에서 오래된 탄소 분해 추적을 위해 양쪽 사이트에 동일하게 적용 가능한 방법으로 변경	2022.01.01
2-1. 연구개발 내용, 방법 및 추진체계	카운실 거점에서 플렉스 측정, 14C를 이용한 토양 호흡 분석	카운실 거점에서 플렉스 측정, 토양 유기물 특성 분석	전체적인 연구목표 및 내용에 있어서 주요 변경사항은 없음 당해연도(2단계 1차년도)부터는 신규위탁연구과제 1개(연세대)를 추가하여 공동연구를 진행하여, 토양 기체 플렉스 데이터 처리를 통해 보다 강화된 목표달성 모색 선정평가 지적사항인 「연차별 유연한 예산 편성」에 대	23.03.28

			해, 세부-2에서 수정 및 보완사항 작성한내용: (세부-2) 2, 3차년도에 현장연구를 위한 연구활동비의 비중이 가장 높으며, 3, 4차년도에는 플럭스 자료 분석 및 생지화학적 모델링 연구 수행을 위한 위탁연구개발비를 증액하는 등 연차별 예산을 유연하게 편성함	
연차별 목표 3차년도 (2단계 1차년도)	캐나다 IMA 미답지 지중탐사	캐나다 IMA 미답지 토양 유기물 집중 연구	캐나다 공동연구 상대기관인 POLAR소속 생태연구자들의 퇴직과 이직 후, 동분야 연구자 미충원. 현장 연구 셋업보다는 현재 확보한 토양 시료로 탄소, 질소 동태 추가 집중 연구로 POLAR와 공동연구 수행	23.03.28
연차별 목표 4차년도 (2단계 2차년도)	러시아 고위도 북극 미답지 토양 및 미생물 특성 조사	러시아 사이트 연구 잠정 중단	러-우 전쟁으로 인한 러시아와의 공동연구 현재 중단	23.03.28
연구목표 및 주요내용	캐나다 IMA 미답지 질소 동위원소 측정	그린란드 토양 시료 질소 동위원소 측정	캐나다 IMA 토양 질소동위원소 측정목표 3차년도 조기 달성	연구비 삭감으로 인한 일부 목표 축소/변경으로 조정
	적설량 증가가 오래된 탄소(old carbon) 분해에 미치는 영향 관련 논문 1편	적설량 증가가 오래된 탄소(old carbon) 변화에 미치는 영향 관련 논문 1편		
	적설량 모사실험 토양을 이용한 유기물 분해 관련 토양 인큐베이션 실험	적설량 모사 실험 토양 대신 다양한 알래스카 지역 토양을 사용하여 실험 진행		
	적설량 변화에 대한 습윤 vs. 건조 툰드라 생태계 반응 비교	적설량 변화에 대한 습윤 vs. 건조 툰드라 생태계 반응 비교 (비교 반응변수 인자 수, 현 목표 대비 80%로 축소)		
	유기물 분해 과정에서 미생물의 탄소 이용 효율 변화 연구	유기물 분해 대사과정 연구		
	유기물 분해 대사-온실기체 발생 상관성 및 조절인자에 대한 종합 분석	유기물 분해 대사-온실기체 발생 상관성 및 조절인자에 대한 종합 분석(분석시료 수를 현 목표 대비 70%로 축소)		
	적설량 모사 실험구에서 생태계 호흡 측정, 소다라임 실험을 통한 비생육기 플럭스 측정, 14C 측정 및 토양유기물 분해를 통한 오래된 탄소 변화 분석	적설량 모사 실험구에서 소다라임 실험을 통한 비생육기 플럭스 측정, 토양유기물 분해를 통한 오래된 탄소 변화 분석		
	적설량 모사실험 토양을 이용한 유기물 분해 관련 토양 인큐베이션 실험	적설량 모사 실험 토양 대신 다양한 알래스카 지역 토양을 사용하여 실험 진행		
	적설량 변화에 따른 식물 군집, 유기물 함량 및 특성, 질소 무기화 과정, 온실기체 플럭스, 미생물 특성 변화(생물량, 특성 변화(생물량,	적설량 변화에 따른 식물 군집, 유기물 함량 및 특성, 미생물 특성 변화(생물량, 군집구조, 물질대사, 유기물		

	군집구조, 물질대사, 유기물 분해능 등) 종합 분석	분해능 등) 종합 분석		
	생태계 내 주요 구성인자인 식물, 미생물, 온실기체, 환경 인자 간의 상관관계 이해	생태계 내 주요 구성인자인 식물, 미생물 환경 인자 간의 상관관계 이해		

5. 선정/단계/연차점검의견

선정평가	1. 종합의견 : 현재 수행하고자 하는 과제와 기존에 수행한 과제와의 차별성을 구체적으로, 뚜렷하게 제시할 필요가 있음. 2. 수정 및 보완사항 : 기존 과제는 온도상승 모사 실험 중심이고 신규과제는 적설량 모사 실험 중심 연구 수행 계획임을 계획서에 제시함 3. (필요시)연구비 조정사항 : 없음
단계평가	1. 종합의견 : 적설량 변화에 따른 미생물 변화에 따른 온실가스 발생 간의 상관성 설계를 통해 대기온실가스 변화와 기후변화의 연구 설계를 정교화 할 필요가 있음. 관측 내용과 세부과제 5 모델내용 연관을 보여야함. 2. 수정 및 보완사항 : 세부2의 적설량 변화 실험구에서 현장 온실기체 발생 측정이 이루어지고, 토양 시료 채취를 통해 미생물 군집 구조 및 생물량, 체외효소 활성 분석을 계획하여, 토양 발생 온실가스와 미생물 변화와의 상관성을 밝힐 예정임. 또한, 단계평가시 평가위원의 지적사항을 수렴하여, 단계보고서내 용어 ‘적설량’ 을 ‘적설량’ 으로 일괄 변환. 세부2의 생산자료를 세부5의 모델 검증자료로 제공. 3. (필요시)연구비 조정사항 : 없음
2단계 1차년도 연차점검	1. 종합의견 : 없음 2. 수정 및 보완사항 : 연구비 삭감으로 인한 일부 목표 축소/변경으로 조정 3. (필요시)연구비 조정사항 : 정부의 정책적 연구비 삭감

제 2 장
추진내용 · 연구결과 및 추진일정 실적
(2세부과제-위탁과제 포함)



1. 추진내용 및 연구개발결과

가. 적설량 변화에 의한 토양 생지화학적 변화 규명

○ 적설모사 실험 개요

2017년 9월 말~10월 초, 캐나다(캠브리지베이: 건조 툰드라)와 미국(알래스카 카운실: 습윤 툰드라)지역에서 겨울철 온도 상승이 생태계에 미치는 영향을 분석하기 위해 겨울철 온도상승을 모의하는 스노우펜스(snow fence)를 설치하였다(Fig. 1). 적설량 변화는 단열 효과로 인한 겨울철 토양의 온도 변화 뿐만 아니라, 여름철 토양에 공급되는 수분량, 식물 생육 기간 변화 등에 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 습윤 툰드라인 알래스카 카운실 사이트와 건조 툰드라인 캐나다 캠브리지베이에 2017년 스노우펜스를 설치하여 적설량 변화에 의한 생태계 변화, 특히 식물, 미생물, 토양 유기물 등을 관측하였다 (Table 1). 이 외에도 노르웨이 스발바르 지역은 UiT의 Elisabeth Cooper 교수님이 2006년부터 운영하고 있는 건조 툰드라 사이트에서 시료를 채취하여, 상대국 연구팀이 진행하지 않은 미생물 분석을 수행하였다.

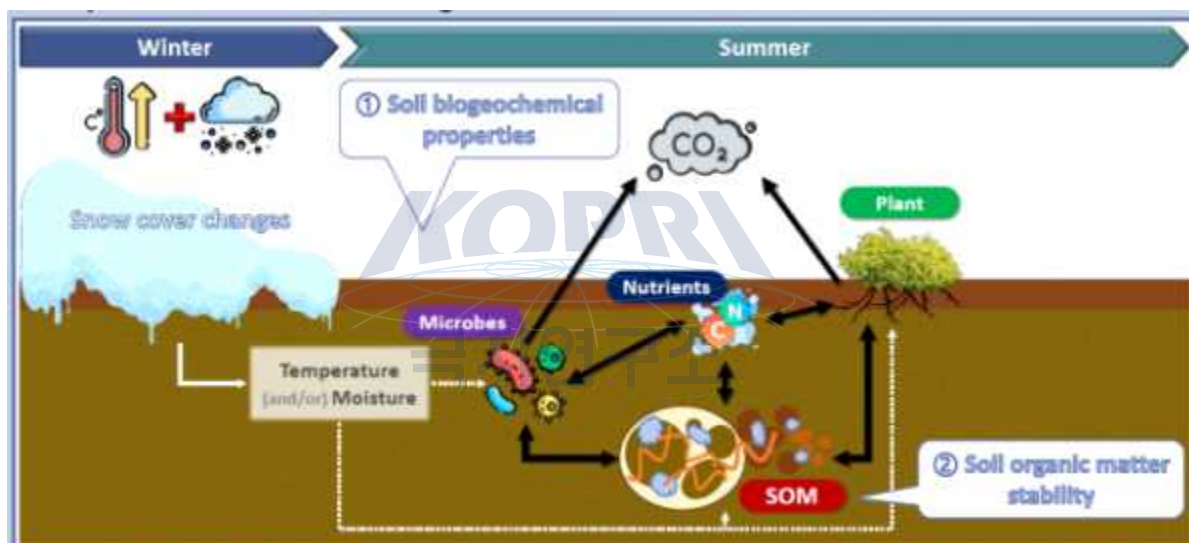


Fig. 1. Impacts of snow cover changes on Arctic tundra soils.

Table 1. Study sites for snow fence and parameters for measurement.

	Snow fence sites		
	Canada Cambridge Bay	USA Council, Alaska	Norway Svalbard
Ecosystem Type	Dry tundra	Moist tundra	Dry tundra
Start year	2017	2017	2006
Fence size	H 1 m × W 8 m	H 1.2 m × W 8 m	H 1.5 m × W 6.2 m
Snow depth	High: >75 cm	High: 94 cm	High: 150 cm
	Moderate: >50 cm	Low: 55 cm	Moderate: 60–150 cm
	Control: 10–15 cm	Control: 75 cm	Control: <60 cm
Env. parameters	Soil moisture & temperature	Soil moisture & temperature	–
	Ecosystem respiration, soil pH, electrical conductivity (EC)		
Soil properties	Soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN), inorganic nitrogen (NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻), water extractable organic carbon/nitrogen(WEOC and WEON), soil organic matter fractionation		
Vegetation	Normalized difference vegetation index (NDVI)		

○ 적설량 변화에 대한 습윤 vs. 건조 툰드라 생태계 반응 비교

적설량 변화 연구는 1단계 2차년도(2022) 캐나다 캠프리지베이에서, 2단계 1차년도(2023) 알래스카 카운실 거점에서 집중 하계 연구를 수행하였고, 획득된 모든 결과에 대해 1단계 보고서와 2단계 1년차 보고서에 상세히 기술을 하였다. 본 최종보고서에는 서로 다른 생태계 반응을 종합적으로 비교하고자 하여, 앞선 보고서에 포함된 내용을 재분석하고, 추가 실험된 내용들을 포함하여 두 생태계 반응을 비교하여 기술하였다.

- 적설량 변화 실험구 관리 및 환경 인자 (2021~2024)

• 토양 온도, 수분

본과제 연구기간인 2021-2023년 9월까지 획득된 모든 환경데이터는 KPDC에 등재되어 있다(등재 자료 69-70 쪽 참조). 과제 최종보고서에서는 두 생태계 집중 관측 시점에서 여름과 겨울 환경 인자 자료를 발췌하여 요약 정리하였다 (Table 2).

습윤 툰드라인 알래스카 카운실 및 건조 툰드라인 캐나다 캠프리지베이 지역에서 2년 동안 실시간으로 측정된 겨울철과 여름철 평균 토양 온도와 토양 수분 함량은 적설량이 증가하였을 때, 두 사이트 모두 토양 온도가 증가하였지만, 여름철 토양 수분 함량에는 뚜렷한 경향이 관찰되지 않았다. 카운실(AK) 지역 대조구의 겨울철 토양 온도는 토양 깊이 10cm에서 평균 -0.71°C ($-1.65\sim-0.10^{\circ}\text{C}$), 20cm에서 -0.76°C ($-3.00\sim-0.20^{\circ}\text{C}$), 40cm에서 -0.22°C ($-1.20\sim-0.20^{\circ}\text{C}$)로 있었다. 적설량 증가 실험구에서는 겨울철 토양 온도가 모든 깊이에서 대조구에 비해 약간 높았으며, 토양 깊이 10cm에서는 $+0.39^{\circ}\text{C}$ (평균 -0.32°C , $-0.70\sim-0.10^{\circ}\text{C}$), 20cm에서는 $+0.61^{\circ}\text{C}$ (평균 -0.15°C , $-0.80\sim-0.25^{\circ}\text{C}$), 40cm에서는 $+0.26^{\circ}\text{C}$ (평균: 0.03°C , $-0.15\sim-0.20^{\circ}\text{C}$)이었다. 여름철 대조구의 평균 토양 온도는 10cm에서 6.04°C ($0.02\sim11.17^{\circ}\text{C}$), 20cm에서는 4.23°C ($0.10\sim8.23^{\circ}\text{C}$), 40cm에서는 2.01°C ($0.07\sim5.23^{\circ}\text{C}$)로 나타났다. 적설량 증가구에서도 여름철 기온이 약간 높게 나타났다. 10cm에서는 $+0.33^{\circ}\text{C}$, 20cm에서는 $+0.50^{\circ}\text{C}$, 40cm에서는 $+0.71^{\circ}\text{C}$ 상승하였다. 또한 토양 동결 시기는 처리구 간 차이가 있었다. 대조구에서는 10월 말(10cm), 11월 초-중순(20cm), 12월 초-1월 중순(40cm)에 0°C 이하로 토양 온도가 떨어졌다. 적설량 증가구에서는 10cm 깊이의 토양만 대조구와 동시에 0°C 이하로 떨어졌고, 20cm에서는 동결이 1~2주 지연되었고, 40cm에서는 1월이 지나도 0°C 이하로 떨어지지 않았다.

캐나다 캠프리지베이 지역의 겨울철 토양 온도는 대조구에서 토양 5cm 평균 -16.69°C ($-21.95\sim-8.36^{\circ}\text{C}$), 10cm -16.38°C ($-21.62\sim-8.35^{\circ}\text{C}$), 20cm -15.55°C ($-20.79\sim-7.63^{\circ}\text{C}$)이었다. 반면, 적설량 증가구에서는 겨울철 토양 온도가 주변 땅에 비해 각 깊이에서 유의미하게 높았으며, 5cm에서 $+7.43^{\circ}\text{C}$ (평균: -9.26°C ; $-13.72\sim-4.74^{\circ}\text{C}$), 10cm에서 $+7.26^{\circ}\text{C}$ (평균: -9.11°C ; $-13.64\sim-4.59^{\circ}\text{C}$), 20cm에서 $+6.58^{\circ}\text{C}$ (평균: -8.98°C ; $-13.35\sim-4.62^{\circ}\text{C}$)로 나타났다. 여름철 대조구의 평균 토양 온도는 5cm에서 5.37°C ($-9.63\sim17.07^{\circ}\text{C}$), 10cm에서 4.95°C ($-9.92\sim15.53^{\circ}\text{C}$), 20cm에서 3.86°C ($-10.18\sim12.73^{\circ}\text{C}$)였다. 적설량 증가구는 대조구와 비교했을 때 2021년 6월에만 여름 기온이 약간 상승한 반면, 나머지 기간 동안 모든 깊이에서 기온이 낮거나 비슷했다. 캠프리지베이 지역의 토양 동결 시기는 처리구간 차이가 없었으며, 주변과 심층 땅의 토양 온도는 10월 초와 중순 사이에 처음으로 0°C 이하로 떨어졌다.

Table 2. Mean soil temperature and moisture during winter (from December to February) and summer (from June to August) at the moist tussock tundra (Council, AK) and dry tundra (Cambridge Bay, Canada) sites.

Site	Council, AK (moist tundra)						Cambridge Bay, Canada (dry tundra)					
Depth	10 cm		20 cm		40 cm		5 cm		10 cm		20 cm	
Snow cover	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H	C	H
Soil temperature during winter (°C)												
December	2021	NA	NA	-0.87	-0.12	-0.06	0.06	2020	-13.43	-6.3	-13.10	-6.65
	2022	-0.31	0.12	-0.13	0.03	0.15	0.13	2021	-13.47	-5.75	-13.11	-5.58
January	2022	NA	NA	-0.37	0.06	-0.03	0.03	2021	-16.32	-9.85	-16.03	-9.70
	2023	-0.91	-0.45	-0.85	-0.23	-0.20	0.06	2022	-17.26	-8.00	-17.04	-7.86
February	2022	NA	NA	-1.52	-0.44	-0.76	-0.08	2021	-19.06	-12.78	-18.74	-12.64
	2023	-0.93	-0.40	-0.91	-0.24	-0.52	-0.02	2022	-20.39	-10.17	-20.11	-10.03
Soil temperature during summer (°C)												
June	2022	NA	NA	3.22	2.85	0.50	0.23	2021	-1.05	2.13	-1.64	1.59
	2023	0.96	1.23	0.95	0.60	0.14	0.01	2022	1.82	-0.05	1.26	-0.98
July	2022	5.50	6.40	3.93	4.66	1.78	2.32	2021	7.13	6.73	6.72	5.99
	2023	6.99	7.59	4.67	5.60	2.26	2.78	2022	10.46	11.00	9.90	9.69
August	2022	5.97	7.34	4.68	6.38	3.30	4.85	2021	6.01	3.62	5.76	3.36
	2023	7.86	9.64	6.42	8.56	4.35	7.29	2022	7.54	7.94	7.34	7.36
Soil moisture during summer (cm³/cm³)												
June	2022	NA	NA	0.53	0.51	0.46	0.26	2021	0.25	0.28	NA	NA
	2023	0.44	0.31	0.28	0.25	0.14	0.17	2022	0.28	0.22	NA	NA
July	2022	0.54	0.51	0.50	0.53	0.49	0.47	2021	0.35	0.36	NA	NA
	2023	0.61	0.62	0.54	0.60	0.50	0.45	2022	0.34	0.35	NA	NA
August	2022	0.58	0.57	0.54	0.60	0.51	0.47	2021	0.35	0.36	NA	NA
	2023	0.60	0.62	0.53	0.59	0.50	0.48	2022	0.34	0.34	NA	NA

• 적설량

캠브리지베이에서 적설량 모니터링은 현지 인원을 고용하여 주기적으로 적설 깊이를 측정하고 타임랩스 카메라를 한 지점에 설치하여 적설량을 측정하고 있다. 알래스카 카운실은 SF1번 지점에 타임랩스 카메라를 설치하여 적설량을 측정하고 있다. 스노우펜스 설치 시점인 2017년부터 현재까지 측정된 자료는 모두 KPDC에 데이터를 등재하였고, 본 보고서에는 눈 녹는 시기와 최대 눈 높이 데이터를 간단하게 정리하였다. 캠브리지베이는 처리구별 적설량의 차이가 뚜렷하게 나타났고, 눈이 완전히 녹아 땅이 드러나는 시기도 차이가 나타나는 것을 확인하였다 (Table 3). 그러나, 알래스카 카운실 지점은 카메라의 배터리 문제로 적설량과 눈이 녹아 땅이 드러나는 시기에 대한 데이터가 부족한 상황이다 (Table 4).

Table 3. Snow melting date and snow depth by treatment in Cambridge bay, Canada.

Year	C		M		H	
	snow melting date	max snow depth(cm)	snow melting date	max snow depth(cm)	snow melting date	max snow depth(cm)
2021/22	2022.06.12	27.2	2022.06.15	46.7	2022.06.21	97.4
2022/23	2023.06.04	22.8	2023.06.10	56.0	2023.06.14	87.2
2023/24	2024.06.06	22.8	2024.06.12	55.0	2024.06.18	89.2

Table 4. Snow melting date and snow depth by treatment in Council, Alaska.

Year	C		H		L	
	snow melting date	max snow depth(cm)	snow melting date	max snow depth(cm)	snow melting date	max snow depth(cm)
2022/23	2023.06.02	118	2023.06.05	110	No record	97
2023/24	No record	No record	2024.06.06	110	No record	No record

• 지중탐사 결과

캐나다 캄브리지베이는 2022년 6월 전기비저항탐사(ERT)와 레이다탐사(GPR)를 이용하여 해빙기간 스노우 펜스 주변의 구간별 천부 지질변화를 파악하였다. 해빙기 스노우 펜스 주변의 지구물리탐사 결과, Fig. 2a,c,d는 9일 간격으로 1~10 m 구간까지 얼어있는 상태에서 녹아가는 상태를 잘 나타내었고, 스노우 펜스가 위치한 23 m 지점 내외에서는 겨울철 쌓인 많은 눈에 의해 얼은 부분이 가장 얇지만 가장 늦게까지 눈이 존재하여 지면에 태양복사 에너지를 가장 늦게 받는 영향으로 인해 여전히 얼어있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 2b는 눈이 쌓인 높이를 GPR 탐사 결과로 나타내었는데 0~10 m 와 23 m 내외 지점의 적설량이 큰 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

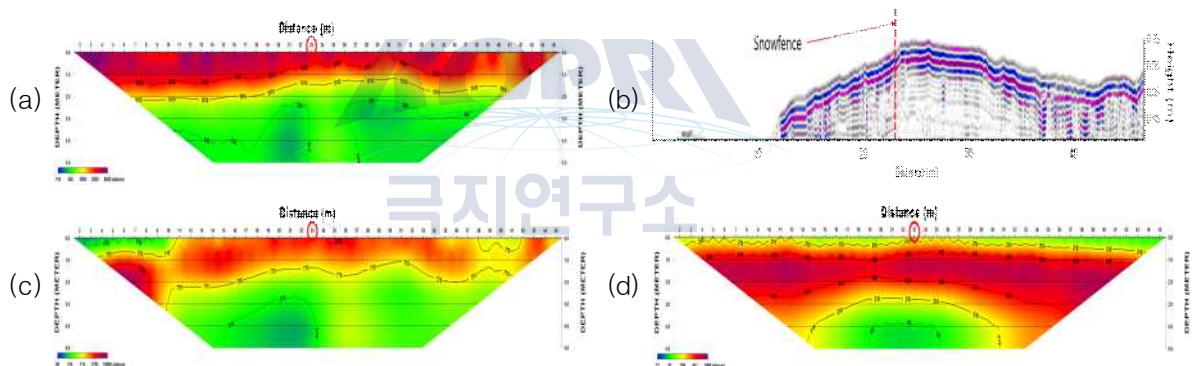


Fig. 2. (a) ERT section on 3rd June, (b) GPR result on 6th June, (c) ERT section on 21st June, and (d) ERT section on 21th June. Red circle is location of snow fence.

미국 알래스카 카운실 지역에서는 2023년 7월 스노우펜스가 천부 지질에 주는 영향을 파악하기 위해 스노우펜스가 설치된 곳과 스노우펜스가 설치되어있지 않았던 지점의 천부지질 상태를 전기비저항탐사(ERT)와 레이다탐사(GPR)를 이용하여 파악하였다. 아래 그림은 스노우펜스를 설치한 곳인 Fig. 3a,b과 설치하지 않은 곳 Fig. 3c,d의 천부 지질의 차이를 보여준다. 스노우 펜스를 설치한 곳의 활동층 두께는 0.5~2 m로 편차가 심하고 스노우 펜스를 설치하지 않은 곳의 활동층 두께는 0.3~0.5 m로 거의 변화가 없으며 동토층이 얇은 곳에서 발견되는 것을 확인할 수 있다. 적설 모사 실험을 위해 설치한 스노우 펜스는 적설에 영향을 주었고 이 자료에서 스노우 펜스가 활동층 변화에 영향을 준 것을 나타냅니다. 각 지역에서 실시한 지중탐사에 대한 보다 자세한 결과는 1단계 보고서와 2단계 1연차 보고서에 기술되어 있다.

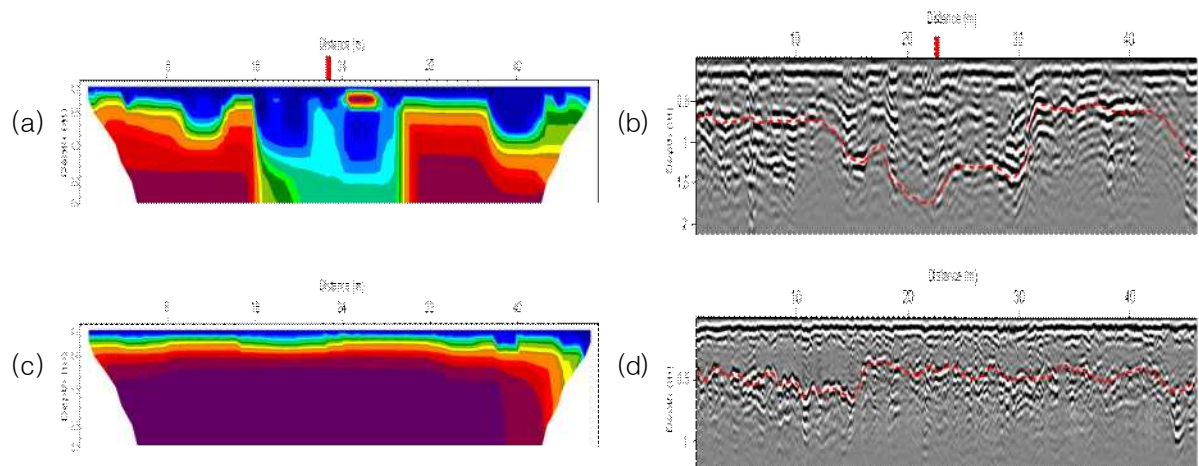


Fig. 3. (a) ERT, (b) GPR section at snow fence. (c) ERT, and (d) GPR section at bare ground. The red tick is location of snow fence. Red dotted line is boundary of active layer and permafrost.

– 생물인자: 식물과 미생물

적설량 증가에 대한 생물학적 반응은 식물(NDVI), 생태계호흡(R_{eco}), 미생물(총 PLFA) 3가지 변수를 비교하였다. 식생피도의 대체 변수로서 측정한 NDVI는 7월 21일부터 8월 20일까지 대조구에 비해 적설량 증가구에서 일관되게 더 높게 유지되었으며, 카운실 지역에서는 평균 6%, 캠프리지베이 지역에서는 8%의 증가를 보였다(Fig. 4a, b). R_{eco} 는 지역 간에 다른 패턴을 보였다(Fig. 4c, d). 카운실 지역에서는 R_{eco} 가 적설량 증가구에서 대조구에 비해 일관되게 더 높았으며, 7월 말부터 9월 중순까지 증가율은 2%에서 40%에 달했다. 반면, 캠프리지베이 지역에서는 측정 시기에 따라 R_{eco} 가 다양한 경향을 보였다. 7월 말에는 적설량 증가구에서 R_{eco} 가 대조구에 비해 7~23% 낮았지만 시간이 지남에 따라 이러한 차이는 점차 감소했다. 8월 초와 중순에 R_{eco} 는 적설량 증가구에 대한 반응으로 증가(23~69%)와 감소(1~28%)를 번갈아 나타냈다. 8월 초에는 5일 중 3일에 더 많은 증가가 관찰되었으며, 8월 중순에는 더 일관되지 않은 패턴을 보였다. 미생물 생물량을 정량적으로 나타내는 총 PLFA는 카운실(AK) 지역의 대조구에 비해 적설량 증가구에서 20%의 증가를 보였지만(Fig. 4e), 이 차이는 통계적으로 유의하지 않았다. 캠프리지베이 지역에서도 대조구와 적설량 증가구의 총 PLFA 값의 차이가 나타나지 않았다(Fig. 4f). 적설량 증가 실험구 내에서 채취한 식물체 앞의 C, N을 분석한 결과 식물체의 C 함량은 적설량 증가구와 대조구에서 유의한 차이가 없었다(Table 5). 그러나 식물체 내 N 함량은 적설량 증가구에서 카운실의 관목 식물인 참백산차(*Ledum palustre*)와 캠프리지베이의 관목 식물인 민담자리꽃나무(*Dryas integrifolia*)에서 유의하게 증가하였고, C/N 비 또한 유의하게 낮았다.

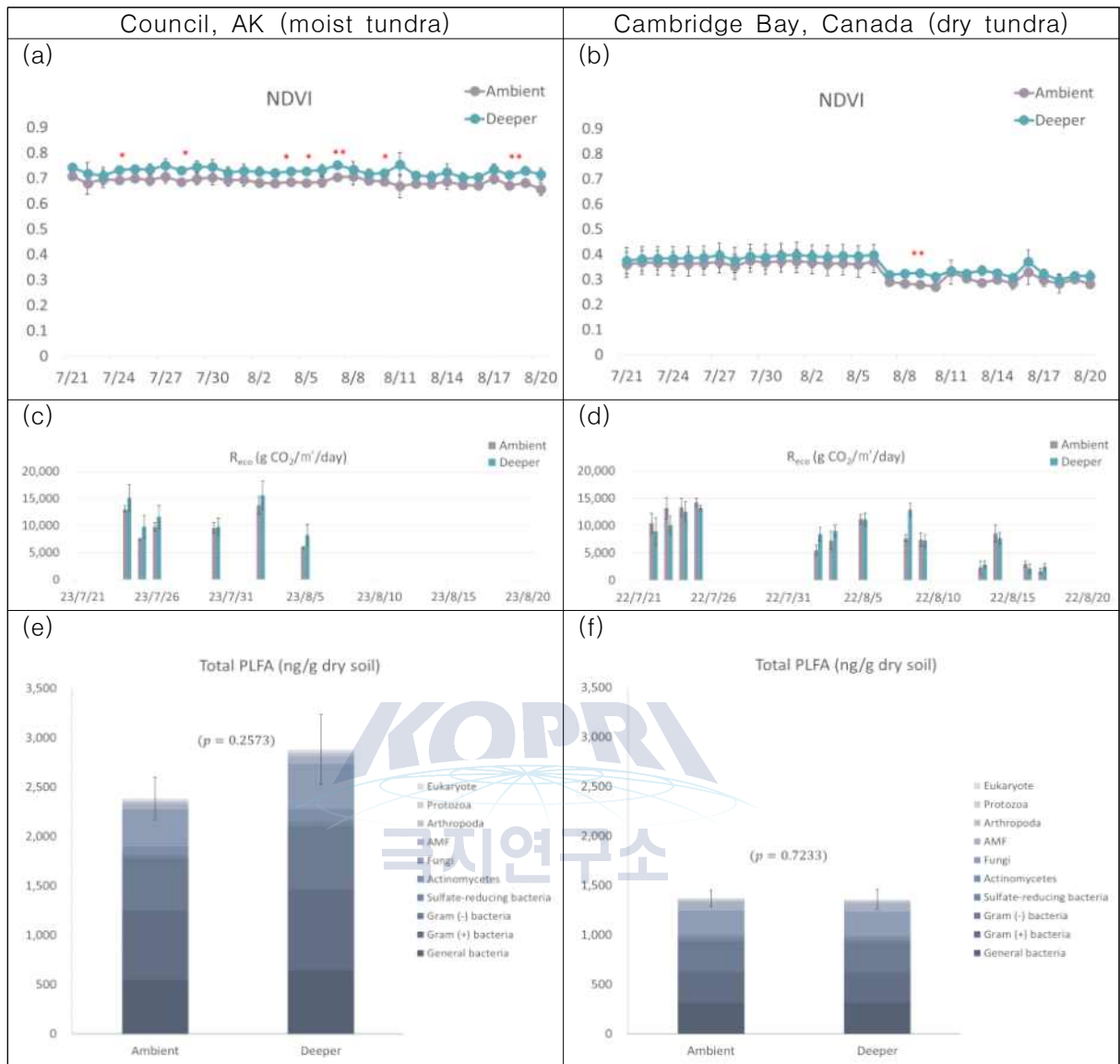


Fig. 4. Biological responses to deeper snow cover at moist (Council, AK) and dry tundra (Cambridge Bay) sites: (a) NDVI, (b) ecosystem respiration (R_{eco} ; b), and (c) total PLFA. 'Ambient' and 'Deeper' represent the control and high snow plots, respectively.

Table 5. Changes in carbon (C) and nitrogen (N) contents in plant leaves in response to deeper snow.

Site	Council (MT)						Cambridge Bay, (DT)	
Species	<i>Eriophorum angustifolia</i>		<i>Ledum palustre</i>		<i>Sphagnum</i> spp.		<i>Dryas integrifolia</i>	
Treatment	C	H	C	H	C	H	C	H
C (%)	46.5 (± 0.17)	46.4 (± 0.13)	52.5 (± 0.06)	52.3 (± 0.13)	43.2 (± 0.16)	42.9 (± 0.29)	46.2 (± 0.41)	45.1 (± 0.67)
N (%)	2.2 (± 0.08)	2.2 (± 0.09)	1.3 (± 0.03)	1.4** (± 0.03)	0.5 (± 0.04)	0.5 (± 0.03)	1.5 (± 0.06)	1.8* (± 0.89)
C/N	21.7 (± 0.74)	20.9 (± 0.93)	40.7 (± 0.91)	37.2** (± 0.90)	92.2 (± 6.44)	80.3 (± 4.56)	30.7 (± 0.95)	25.5** (± 0.89)

– 토양 특성

두 툰드라 지역의 토양 화학적 특성은 Table 6에 간략하게 요약하였으며, 카운실과 캠브리지베이 현장 모두에서 적설량 증가에 의한 유의한 차이는 없었다. 통계적 유의성은 없지만, 카운실 지역 토양 유기물층과 미네랄층 모두 적설량 증가에 의해 DOC, TDN, 무기 질소 함량이 증가하는 경향을 보였다. 그러나, 캠브리지베이 지역은 모든 토양 층위에서 적설량 증가로 인한 DOC 함량 차이가 보이지 않았으나, 미네랄 층에서 TDN 함량이 적설량 증가구에서 대조구보다 40% 증가했다.

Table 6. Soil chemical properties affected by deeper snow cover at moist tussock tundra (MT) and dry tundra (DT) sites. 'Ambient' and 'Deeper' represent the ambient and deeper snow plots, respectively.

Site	Council (MT)		Cambridge Bay (DT)	
Treatment	<i>Ambient</i>	<i>Deeper</i>	<i>Ambient</i>	<i>Deeper</i>
SOC (%)	7.5 (± 0.43)	8.5 (± 1.12)	0.7 (± 0.06)	0.8 (± 0.12)
TN (%)	0.3 (± 0.03)	0.3 (± 0.05)	<0.1	<0.1
DOC ($\mu\text{g/g}$)	139.3 (± 25.03)	235.4 (± 70.80)	21.7 (± 6.00)	21.1 (± 5.04)
TDN ($\mu\text{g/g}$)	7.02 (± 1.58)	12.55 (± 2.80)	1.25 (± 0.53)	1.76 (± 0.44)
Inorganic N ($\mu\text{g/g}$)	0.01 (<0.01)	0.02 (± 0.01)	1.45 (± 0.61)	1.45 (± 0.59)

적설량 증가에 따른 토양 유기물 변화를 자세히 살펴보기 위해, 미네랄층 시료를 대상으로 밀도와 크기 차를 통한 토양유기물 분획 실험을 진행하였다. 각 분획의 토양 탄소 분포에서 가장 많이 차지하고 있는 분획은 fPOM과 MAOM이었고, 이에 대해 C/N비와 질소 안정동위원소를 분석하였다 (Fig. 5). 카운실과 캠브리지베이 지역에서 fPOM과 MAOM의 C/N비와 15N값은 적설량 증가에 의한 유의한 차이를 나타내지 않았다 (Fig. 5a). 다만, 카운실 지역의 참백산차는 적설 증가에 의해 식물잎의 C/N비가 유의하게 감소하고, 15N값은 유의하게 증가하였고, 캠브리지베이 지역의 민담자리꽃 나무는 적설량 증가구에서 대조구보다 C/N비가 유의하게 감소($p = 0.007$) 하였고, 15N은 근사적으로 유의하게 증가하였다($p = 0.098$). 캠브리지베이 지역의 fPOM은 적설량 증가구에서 대조구 대비 유의하게 C/N비가 낮아졌다. 15N과 C/N비 모든 데이터를 모아 분포를 보았을 때, 카운실 지역에서 C/N비는 참백산차, fPOM, 유기물층이 서로 유사하였고 MAOM과 북극황새풀은 다른 그룹으로 구분되었다. 카운실 지역의 15N의 경우에는 낮은 15N값을 보인 참백산차를 제외한 나머지 시료는 -2~2% 사이 유사한 값을 나타내었다. 캠브리지베이 지역은 처리구에 상관없이 fPOM의 C/N비는 $30.8(\pm 3.28)$ 으로 Dryas (28.1 ± 1.16)와 유사하였고, MAOM의 C/N비는 $11.5(\pm 0.32)$ 으로 가장 낮았다. 15N은 처리구에 상관없이 fPOM 분획에서 $1.2\%(\pm 0.43)$ 으로 토양 O층($0.9 \pm 0.33\%$)과 유사하였고, MAOM은 $5.1\%(\pm 0.18)$ 로 가장 큰 값을 나타냈다.

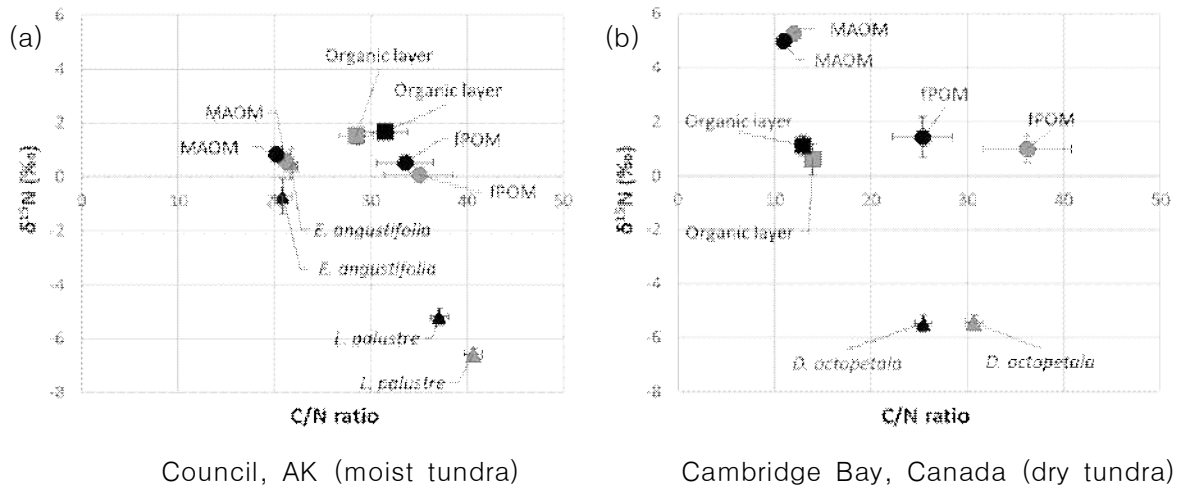


Fig. 5. Carbon- to- nitrogen (C/N) ratio and nitrogen stable isotopic ratio ($\delta^{15}\text{N}$) of soil organic matter in different fractions, with comparison to plant aboveground biomass and organic layer soil. In all markers, gray represents the control plot, and black represents the high snow plot.

— 적설량 증가가 오래된 탄소(old carbon) 변화에 미치는 영향

토양 유기물 분획 실험을 통해 획득한 각 분획(fraction)의 양과 탄소 함량을 고려하여 계산한 각 분획에 저장된 탄소의 비율은 카운실 지역에서는 적설량 증가에 의해 fPOM에 저장된 탄소의 비율이 유의하게 증가하였고($p < 0.01$), MAOM에 저장된 탄소의 상대적 비율이 유의하게 감소하였다($p < 0.05$, Fig. 6). 반면, 캄브리지베이 지역은 실험 결과의 변이가 커서, 적설량 증가에 의해 각 분획에 저장된 탄소 비율의 차이가 유의하지 않았다 (Fig. 6). 카운실 지역에서는 적설량 증가 이후 늘어난 식물 생산이 fPOM 증가에 영향을 미쳤을 거라 판단이 된다. 카운실 지역에서 MAOM의 변화를 설명하기 위해, 이의 특성을 먼저 설명하자면, MAOM은 토양 내 여러 분획 중에서도 오래된 탄소이며 변화가 어려운 pool로서 이해되고 있다. 그럼에도, 카운실 지역에서의 감소는 MAOM의 화학적 특성, 즉 상대적으로 높은 C/N비와 낮은 ^{15}N 값(Fig. 5a)을 보았을 때, 분해가 많이 진행되지 않았음을 알 수 있다. 또한, 일반적으로 MAOM은 미네랄 표면과 유기물의 상호작용에 의해 강하게 결합되어있어 변화가 잘 일어나지 않지만, 카운실 지역의 MAOM은 미네랄-유기물 이외에도 결합력이 더 약한 유기물-유기물간의 상호작용으로 축적이 되어있는 부분도 있을 것으로 판단되어, 이는 적설량 변화에 더 민감하게 반응을 했을 것으로 해석된다. 캄브리지베이 사이트는 MAOM이 화학적/물리적으로 모두 안정적인 것으로 나타났다. MAOM의 C/N비는 10-12 값으로 미생물 C/N비와 유사하여(Fig. 5b), 미생물에 의해 충분히 분해된 상태의 물질들이 MAOM으로 존재하는 것으로 판단된다. ^{15}N 또한 다른 pool보다 높은 값을 나타내어, 유기물 변환 과정이 많이 이루어진 것으로 판단된다.

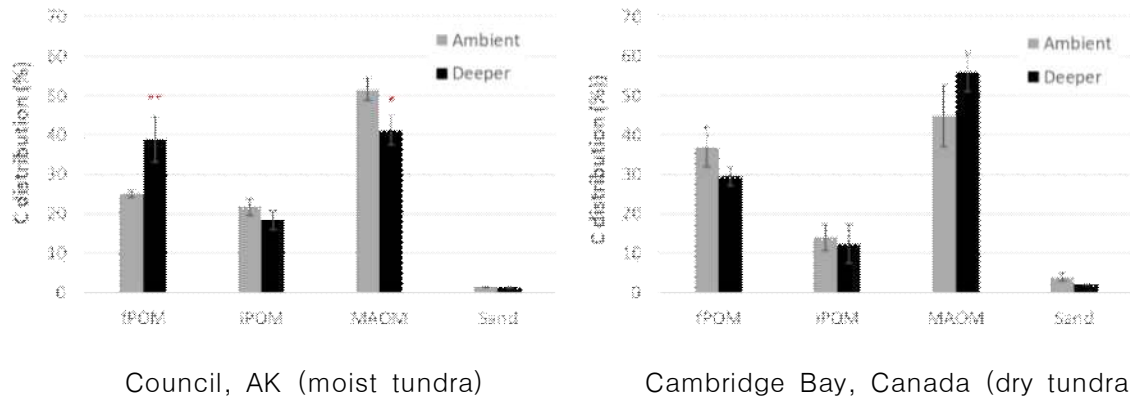


Fig. 6. Carbon (C) distribution in each fraction influenced by increased snow cover at moist tussock tundra (Council, AK) and dry tundra (Cambridge Bay, Canada) sites. 'Ambient' and 'Deeper' represent the control and high snow plots, respectively. Double asterisks (**) indicated statistical significance at $P < 0.05$, while a single asterisk (*) indicates marginal significance at $P < 0.10$.

– 스발바르 적설량 변화 실험구 결과

본 연구에서는 노르웨이 스발바르 아드벤트달렌(Advantdalen) 지역에 설치된 적설량 증가 모사 실험구에서 스노우 펜스 설치 2015년 (9년차) 및 2021년 (15년차) 시기에 토양 시료를 채취하고 각종 미생물 군집 (세균, 진균)의 종 다양성, 군집 구조, 생물량 변화 종합 비교 분석을 수행하였다(Fig. 7). 사이트에 설치된 snow fence들 중에서 총 10개 (A1, A3, B5, B6, B7, C8, C9, D10, D11, D12)에서 시료 채취를 진행하였다.

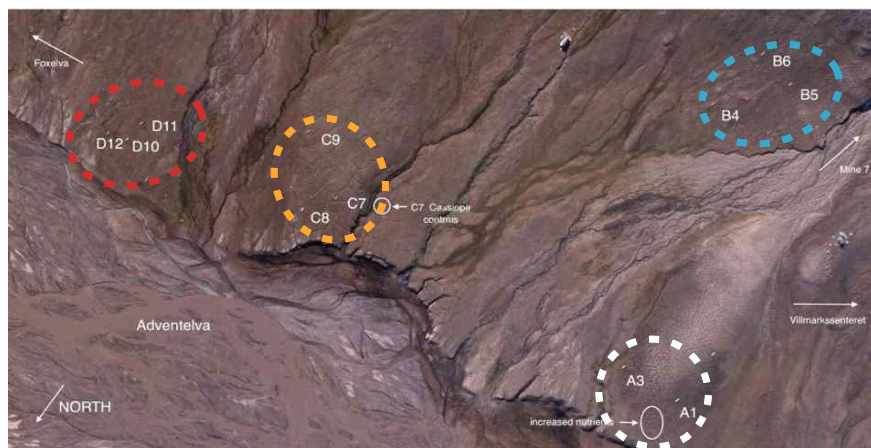


Fig. 7. Map of the snow fences in the study site located in Advantdalen, Svalbard, Norway. Dotted circles indicate the block A, B, C, D and the letters show the location of the snow fences.

- 2015년 (9년차) 채취 토양 시료 분석 결과

2015년 토양 채취는 식물 생육기의 시작과 끝 사이에 총 5번에 걸쳐 (6월초, 7월초, 7월중, 8월초, 7월말) 진행하였다. 채취한 토양 시료 0.3 - 0.5g에서 토양 미생물 DNA를 추출하기 위해 DNeasy PowerMax Soil Kit(QIAGEN, Germany)를 사용하였다. 추출된 토양 미생물 DNA는 DNeasy PowerClean Pro Cleanup Kit(QIAGEN, Germany)를 사용하여 정제했고, 정제된 DNA는 Qubit dsDNA HS Assay Kit(Thermo Fisher Scientific, USA)를 사용하여 정량했다. 추출된 DNA를 이용하여 세균과 진균을 대상으로 amplicon sequencing을 진행하였다. Bacterial 16S rRNA 증폭을 위한 bacteria-specific primer set은 27F 그리고 1492R 이 사용되었으며, fungal ITS region 증폭을 위한 fungal-specific primer set은 ITS1KYO2 그리고 ITS1KYO1 이 사용되었다. Forward 그리고 reverse primers에 PacBio barcode sequence를 연결하여 one-step barcoded PCR을 진행하였다. 그리고 PacBio Express Template Kit 2.0을 이용하여 Multiplexed 16S 그리고 ITS amplicon SMRTbell library를 제작 및 정제하였으며, 이후 PacBio Sequel II system을 이용하여 시퀀싱을 진행하였다. PCR, library prep, 그리고 sequencing 단계는 모두 Integrated Microbiome Resource (www.imr.bio) 에서 수행되었다. Adapter and primer sequences는 Cutadapt v2.10를 이용하여 trim하였으며, amplicon sequence variants (ASVs) 생성을 위해 DADA2 v1.26.0를 이용하였다. Representative ASV sequences의 genus-level taxonomy assign을 위해 naïve Bayesian classifier (confidence threshold of 80)을 이용하였으며, 세균은 SILVA v138.1 database 그리고 진균은 UNITE v9.0 database를 이용하였다. 종 수준 동정은 NCBI database (downloaded 2023년 3월)를 이용한 BLAST search를 통해 진행하였다.

Amplicon sequencing 결과, 세균 군집 구조는 적설량 증가에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 대신, block 간의 차이가 더 크게 작용하고 있는 것을 확인할 수 있었는데(Fig. 8), 이는 스노우펜스에 의한 적설량 변화 영향보다는 block 위치에 따른 또는 여기서 기인한 미세 지형 및 기후 차이가 세균 군집에 더 큰 영향을 미치고 있을 것으로 해석된다.

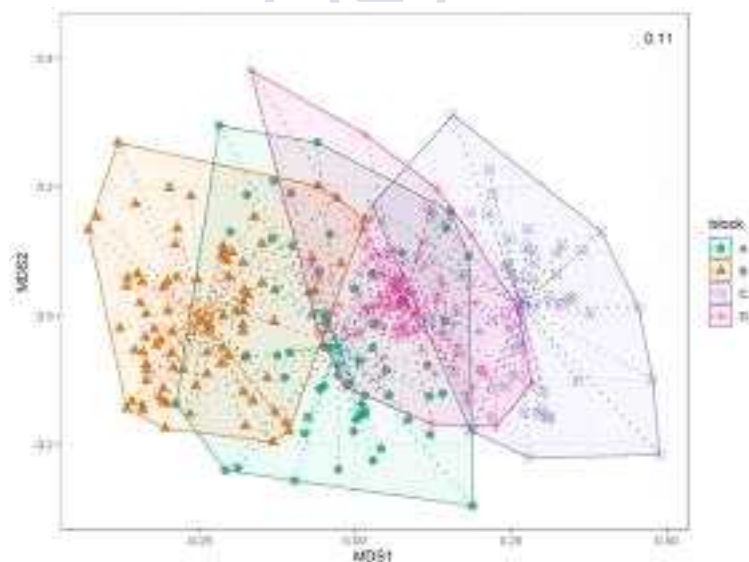


Fig. 8. Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) ordination plot depicting differences in the composition of bacterial communities by the blocks. Ordinations are based on Bray-Curtis dissimilarity.

Bacterial phylum의 상대풍부도 분석 결과, 모든 block에서 Proteobacteria, Acidobacteria, Planctomycetes, Actinobacteria, Bacteroidetes, Chloroflexi 순으로 상대풍부도가 높게 나타났으며, bacterial phylum 상대풍부도의 block간의 차이나 적설량에 의한 차이는 군집구조와 마찬가지로 통계적으로 유의하지 않았다(Fig. 9). Bacterial OTU를 이용해 계산한 Shannon diversity index의 경우 block A 및 D에서 적설량 증가에 따라 감소하는 경향이 나타났으나, block B 및 C에서는 통계적으로 유의하지 않았다(Fig. 10).

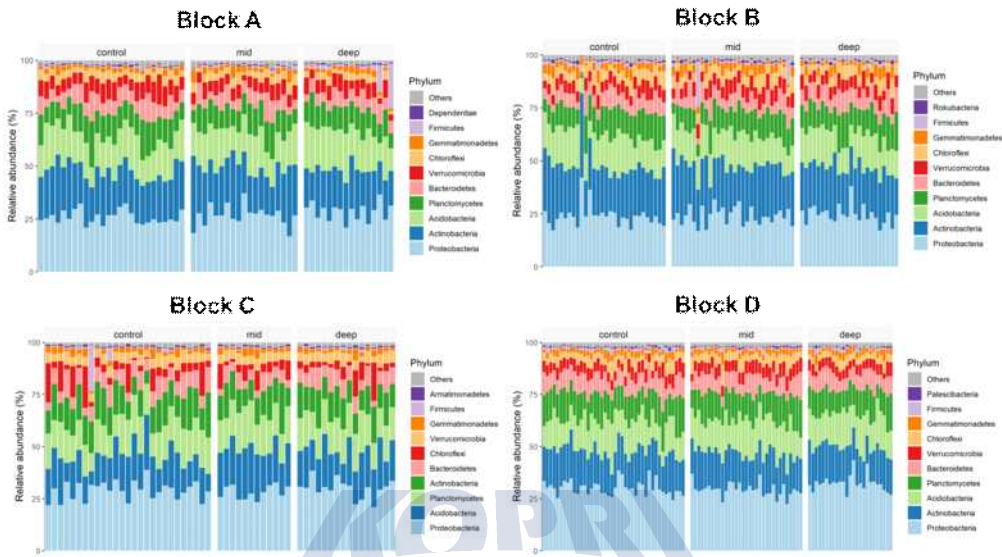


Fig. 9. Relative abundances of bacterial phylum in each blocks with enhanced snow depth (control<mid<deep).

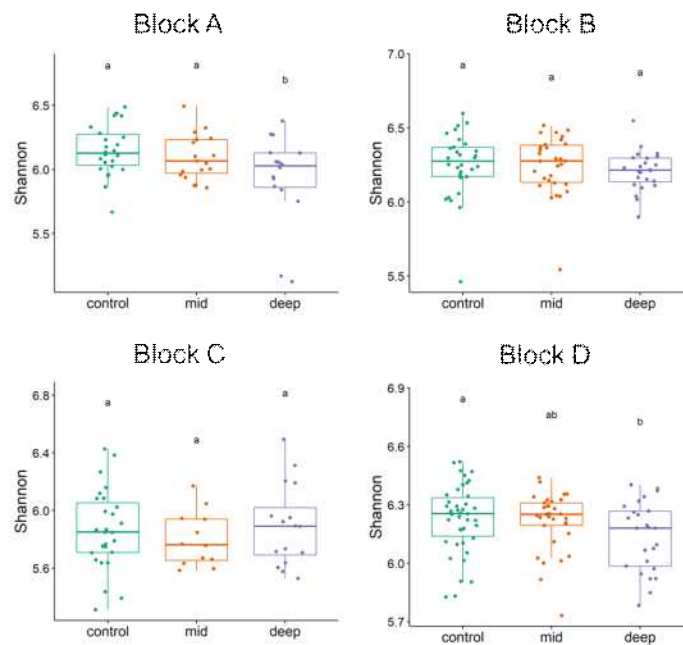


Fig. 10. Shannon diversity index of bacterial OTUs in each blocks with enhanced snow depth (control<mid<deep).

진균 군집 구조 역시 block 간의 차이가 크게 작용하고 있는 것으로 나타났으나(Fig. 11), 각 스노우펜스 개별 진균 군집 구조 변화 경향을 확인하면 적설량 증가에 따른 변화가 관찰되었다(Fig. 12). 그러나 변화의 방향은 각 스노우펜스 별로 제각각 나타나, 일관된 경향을 확인할 수는 없었다. 따라서, 세균과 달리 진균은 적설량 변화에 따라 군집구조가 변화하긴 했으나 이 변화의 경향은 block에 따른 위치 차이나 미세 기후 차이에 가장 큰 영향을 받고 있는 것으로 해석된다.

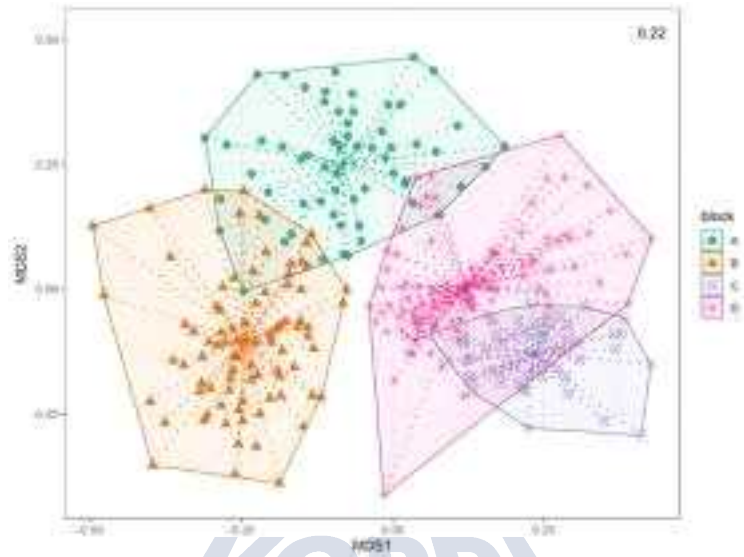


Fig. 11. Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) ordination plot depicting differences in the composition of fungal communities by the blocks. Ordinations are based on Bray–Curtis dissimilarity.

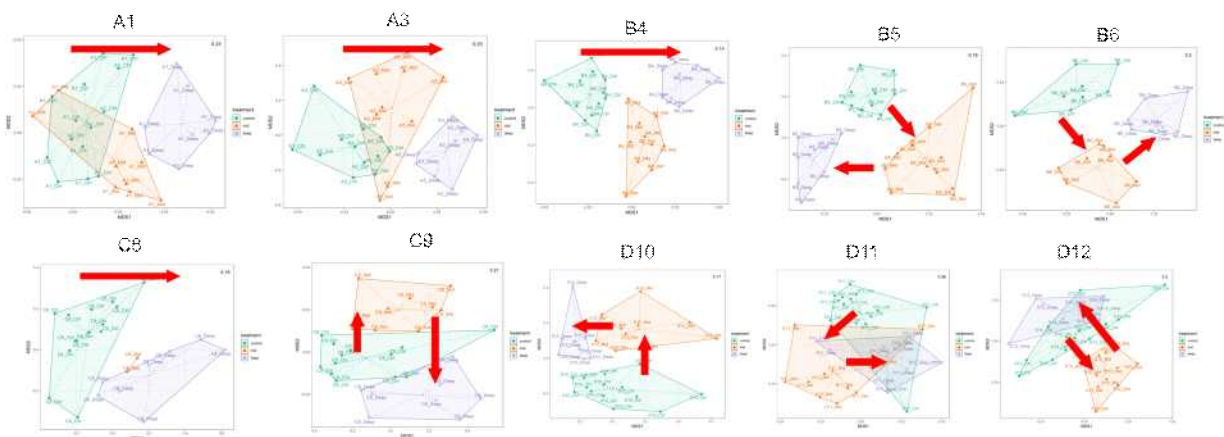


Fig. 12. Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) ordination plot depicting changes in fungal community structure with the enhanced snow depth in each snow fence. Colors in green, orange, and purple indicate control, mid, and deep snow depth treatment, respectively.

Fungal phylum의 상대풍부도 분석 결과, 모든 block에서 Basidiomycota, Ascomycota, Mortierellomycota 순으로 상대풍부도가 높게 나타났다(Fig. 13). Bacterial 상대풍부도, diversity indexes, fungal functional traits 등은 일부 block에서 적설량 증가에 따라 변화하기도 하였으나, 앞선 결과들과 마찬가지로 모든 block에서 공통된 변화 경향을 나타내지는 않았다(Fig. 13, 14, and 15).

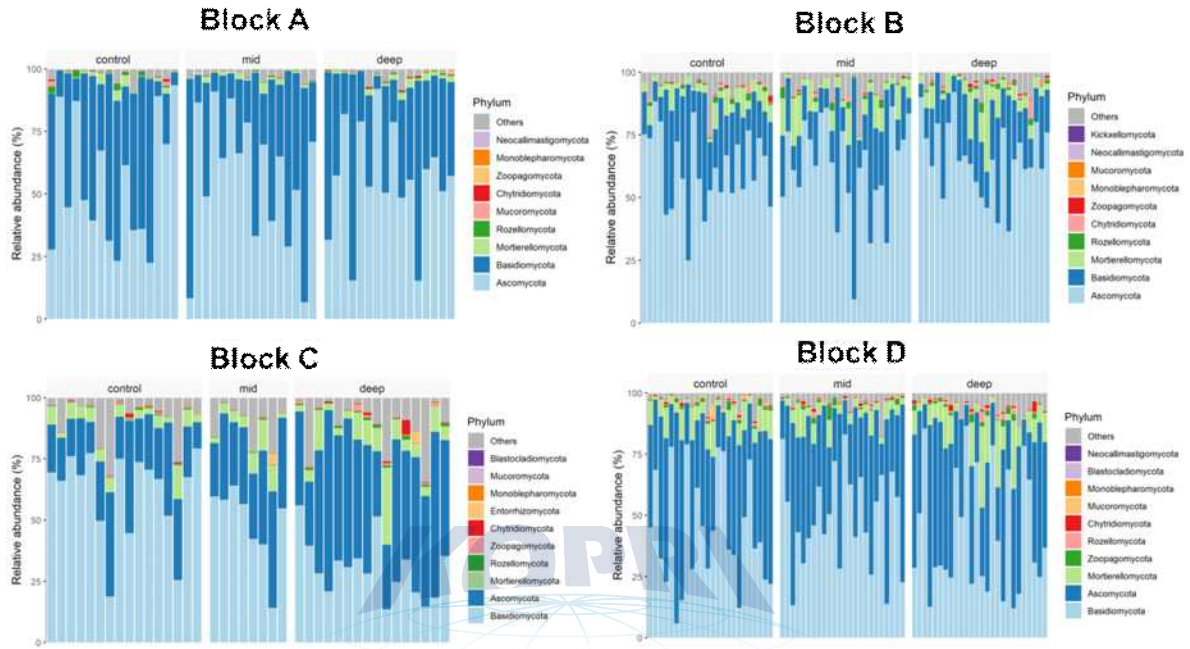


Fig. 13. Relative abundances of fungal phylum in each blocks with enhanced snow depth (control<mid<deep).

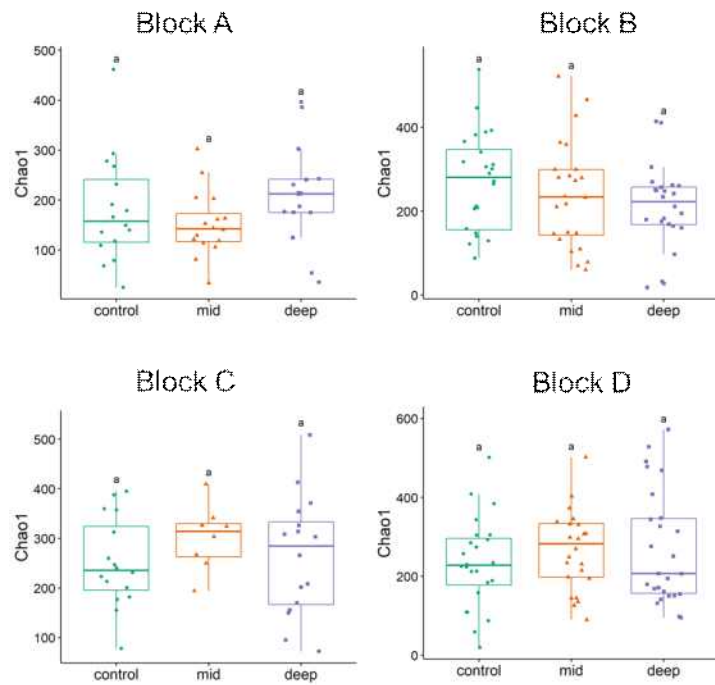


Fig. 14. Chao1 index of fungal ASVs in each blocks with enhanced snow depth (control<mid<deep).

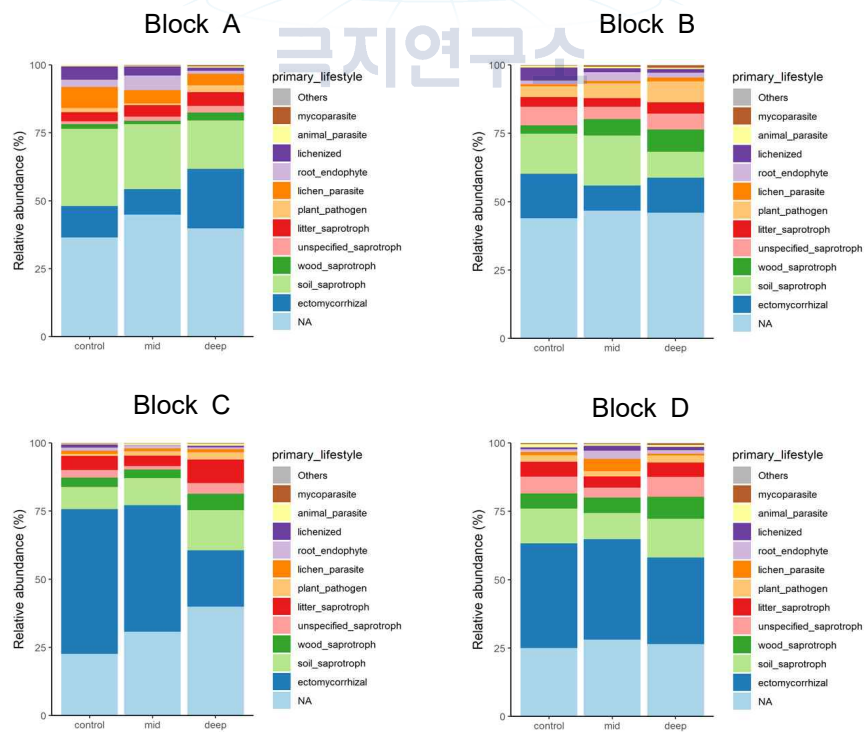


Fig. 15. Relative abundances of fungal functional traits in each blocks with enhanced snow depth (control<mid<deep).

- 2021년 (15년차) 채취 토양 시료 분석 결과

앞선 2015년 (9년차) 토양 시료의 세균과 진균 군집분석 결과 block 간의 차이 이외에 스노우펜스에 의한 적설량 증가 영향이 잘 나타나지 않고 일부 진균 군집에서만 나타났는데, 이는 세 가지 설명 가능한 경우가 존재한다. 첫 번째는 실제 적설량 증가의 영향은 세균 군집에는 잘 존재하지 않고 진균 군집에만 일부 영향을 미쳤을 경우, 두 번째는 적설량 증가의 영향이 토양 미생물 군집의 변화에 영향을 미치기까지의 속도가 느려서 9년 보다 더 긴 기간이 필요했을 경우, 마지막 세 번째는 이용한 amplicon sequencing이 가진 방법론적인 한계 (coverage 및 resolution 측면) 때문에 실제 미생물 군집에 변화가 있었음에도 관찰되지 않았었을 경우로 정리해 볼 수 있다. 따라서, 두 번째와 세 번째 가능성을 확인하기 위해서, 적설량 증가 영향을 6년간 더 받은 2021년(15년차)에 스노우펜스 토양 시료를 새로 채취하고 기존에 이용했던 amplicon sequencing 보다 더 다양하고 더 정교한 분석법을 적용해 보았다.

2021년 토양 시료 채취는 2015년과 달리 식물 생육기 중반에 1회에 걸쳐서만 이루어졌다. 이번 토양 미생물 군집 분석에는 amplicon sequencing 보다 더 고해상도의 미생물 군집 자료를 얻을 수 있는 shotgun metagenome 방법론을 적용하였다. 토양 미생물 DNA 추출 과정은 2015년과 동일한 프로토콜로 진행하였다. Sequencing library는 TruSeq Nano DNA library prep kit (Illumina, USA)를 사용하여 준비했고, shotgun metagenome sequencing은 DNA Link Inc. (대한민국 서울) 에서 S4 flow cell of NovaSeq 6000 platform (2 x 150bp)에서 수행되었다. Raw sequencing read는 Trimmomatic v0.39 기본 옵션을 이용해 퀄리티 필터링을 진행하였다. 필터링된 read는 MEGAHIT v1.2.9 (options; --presets meta-large --kmin-1pass --min-contig-len 300)를 이용하여 assemble 하였다. Raw read를 assembled contig에 mapping 하는 작업은 Bowtie2 v2.5.1 및 Samtools v1.17를 이용하여 진행하였다. Binning은 MetaBAT2 v2.15 (option; -minContigLength 2500 -minContigDepth 1), MetaDecoder v1.0.19 (default option), 그리고 Semibin v.2.0.2 (option; --self-supervised)를 이용하였다. MAG refinement는 DAS Tool v1.1.7 (default option)을 이용하였다. Chimeric MAGs의 제거는 GUNC v1.0.6를 이용하였으며, MAG 퀄리티는 CheckM2 v1.0.2 (default options)을 이용하여 확인하였다. Combined bins의 dereplication은 dRep v3.4.3 (option; -comp 70 -con 10 -S_ani 0.95)으로 진행하였다. 그 후, GTDB-Tk v2.3.2 (release 08-RS214 database)를 이용하여 classification을 하였으며, CoverM v0.7.0 (option; -m relative_abundance mean --min-read-aligned-percent 0.75 -min-read-percent-identity 0.95)을 이용하여 각 MAG의 상대풍부도를 계산하여 분석에 이용하였다 (<https://github.com/wwood/CoverM>). 또한, 미생물 군집 구조 분석을 정량적으로 보완하기 위해 토양에서 phospho-lipid fatty acid (PLFA)를 추출하고 기체크로마토그래피와 연결된 MIDI's automated Microbial Identification System (MIS)를 이용 fatty acid methyl esters (FAMES) 농도를 측정하였다. 풍부도에 기반한 미생물 군집 분석은 실제 활성을 가지는 미생물 군집과 다소 차이가 발생할 수 있기 때문에 ecoplate를 이용하여 적설량 변화에 의한 미생물 군집의 실제 유기물 대사 양상 변화를 측정하였으며(Fig. 16), 그로 인한 유기물 조성의 차이를 확인 해보기 위하여 vario MICRO Element Analyzer (EA) (Elementar, Germany)를 이용하여 총탄소와 총질소 함량을 측정하였으며, 세부 유기물 조성을 확인하기 위해 위탁과제 1과 협업하여 FT-ICR MS 방법론을 적용하였다(Fig. 17).

A1 Water	A2 β -Methyl-D-Glucoside	A3 D-Galactonic Acid γ -Lactone	A4 L-Arginine	A5 Water	A6 β -Methyl-D-Glucoside	A7 D-Galactonic Acid γ -Lactone	A8 L-Arginine	A9 Water	A10 β -Methyl-D-Glucoside	A11 D-Galactonic Acid γ -Lactone	A12 L-Arginine
B1 Pyruvic Acid Methyl Ester	B2 D-Xylose	B3 D-Galacturonic Acid	B4 L-Asparagine	B5 Pyruvic Acid Methyl Ester	B6 D-Xylose	B7 D-Galacturonic Acid	B8 L-Asparagine	B9 Pyruvic Acid Methyl Ester	B10 D-Xylose	B11 D-Galacturonic Acid	B12 L-Asparagine
C1 Tween 40	C2 i-Erythritol	C3 2-Hydroxy Benzoic Acid	C4 L-Phenylalanine	C5 Tween 40	C6 i-Erythritol	C7 2-Hydroxy Benzoic Acid	C8 L-Phenylalanine	C9 Tween 40	C10 i-Erythritol	C11 2-Hydroxy Benzoic Acid	C12 L-Phenylalanine
D1 Tween 80	D2 D-Mannitol	D3 4-Hydroxy Benzoic Acid	D4 L-Serine	D5 Tween 80	D6 D-Mannitol	D7 4-Hydroxy Benzoic Acid	D8 L-Serine	D9 Tween 80	D10 D-Mannitol	D11 4-Hydroxy Benzoic Acid	D12 L-Serine
E1 α -Cyclodextrin	E2 N-Acetyl-D-Glucosamine	E3 γ -Amino Butyric Acid	E4 L-Threonine	E5 α -Cyclodextrin	E6 N-Acetyl-D-Glucosamine	E7 γ -Amino Butyric Acid	E8 L-Threonine	E9 α -Cyclodextrin	E10 N-Acetyl-D-Glucosamine	E11 γ -Amino Butyric Acid	E12 L-Threonine
F1 Glycogen	F2 D-Glucosaminic Acid	F3 Itaconic Acid	F4 Glycyl-L- Glutamic Acid	F5 Glycogen	F6 D-Glucosaminic Acid	F7 Itaconic Acid	F8 Glycyl-L- Glutamic Acid	F9 Glycogen	F10 D-Glucosaminic Acid	F11 Itaconic Acid	F12 Glycyl-L- Glutamic Acid
G1 D-Cellobiose	G2 Glucose-1- Phosphate	G3 α -Keto Butyric Acid	G4 Phenylethyl- amine	G5 D-Cellobiose	G6 Glucose-1- Phosphate	G7 α -Keto Butyric Acid	G8 Phenylethyl- amine	G9 D-Cellobiose	G10 Glucose-1- Phosphate	G11 α -Keto Butyric Acid	G12 Phenylethyl- amine
H1 α -D-Lactose	H2 D,L- α - Glycerol Phosphate	H3 D-Malic Acid	H4 Putrescine	H5 α -D-Lactose	H6 D,L- α - Glycerol Phosphate	H7 D-Malic Acid	H8 Putrescine	H9 α -D-Lactose	H10 D,L- α - Glycerol Phosphate	H11 D-Malic Acid	H12 Putrescine

Fig. 16. List of 23 organic substrates in Ecoplate for analyzing microbial decomposition rate (triplicated).

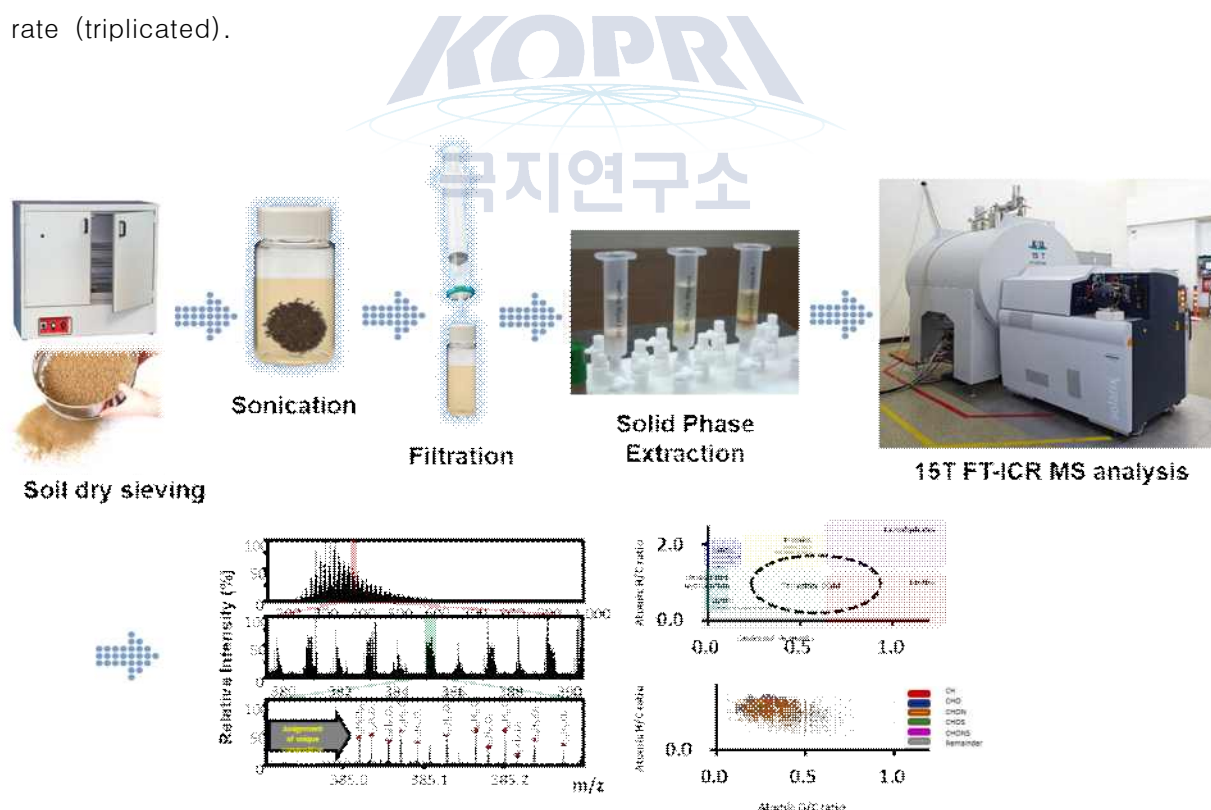


Fig. 17. Conceptual diagram of the workflow of FT-ICR MS analysis for determining composition of soil organic matter.

Soil metagenome 분석에서 recover한 species-level bacterial MAGs을 이용하여 군집 구조를 비교해보았다(Fig. 18). 2015년도의 amplicon sequencing 기반의 결과와 마찬가지로 block 간의 세균 군집 구조 차이는 확연하게 나타나지만, 적설량의 증가 (control vs. deep)에 따른 세균 군집 구조 차이는 보이지 않았다.

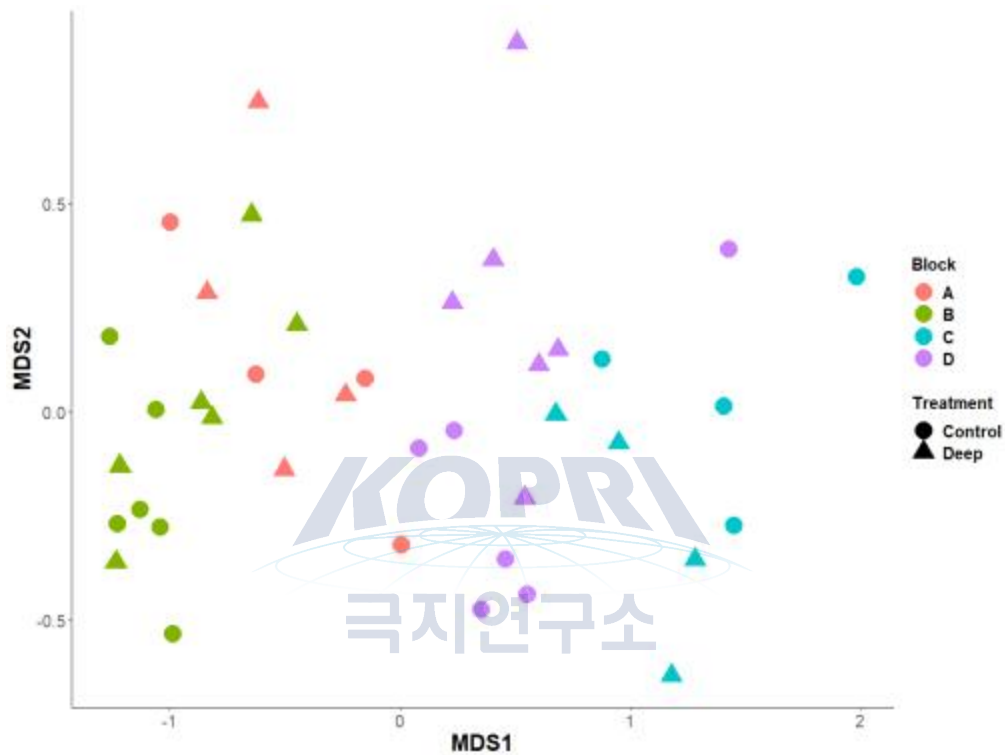


Fig. 18. Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) ordination plot depicting differences in the composition of bacterial MAGs by the blocks. Ordinations are based on Bray–Curtis dissimilarity.

PLFA를 이용한 미생물 군집구조 분석 결과에서 또한 적설량 증가에 따른 토양 미생물 군집구조의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(Fig. 19). 다만, PLFA 분석 결과에서 모든 block에서 공통되게 나타난 유일한 경향은 적설량이 증가함에 따라 진균/세균 비(fungi/bacteria ratio)가 감소하는 것이었다(Fig. 20).

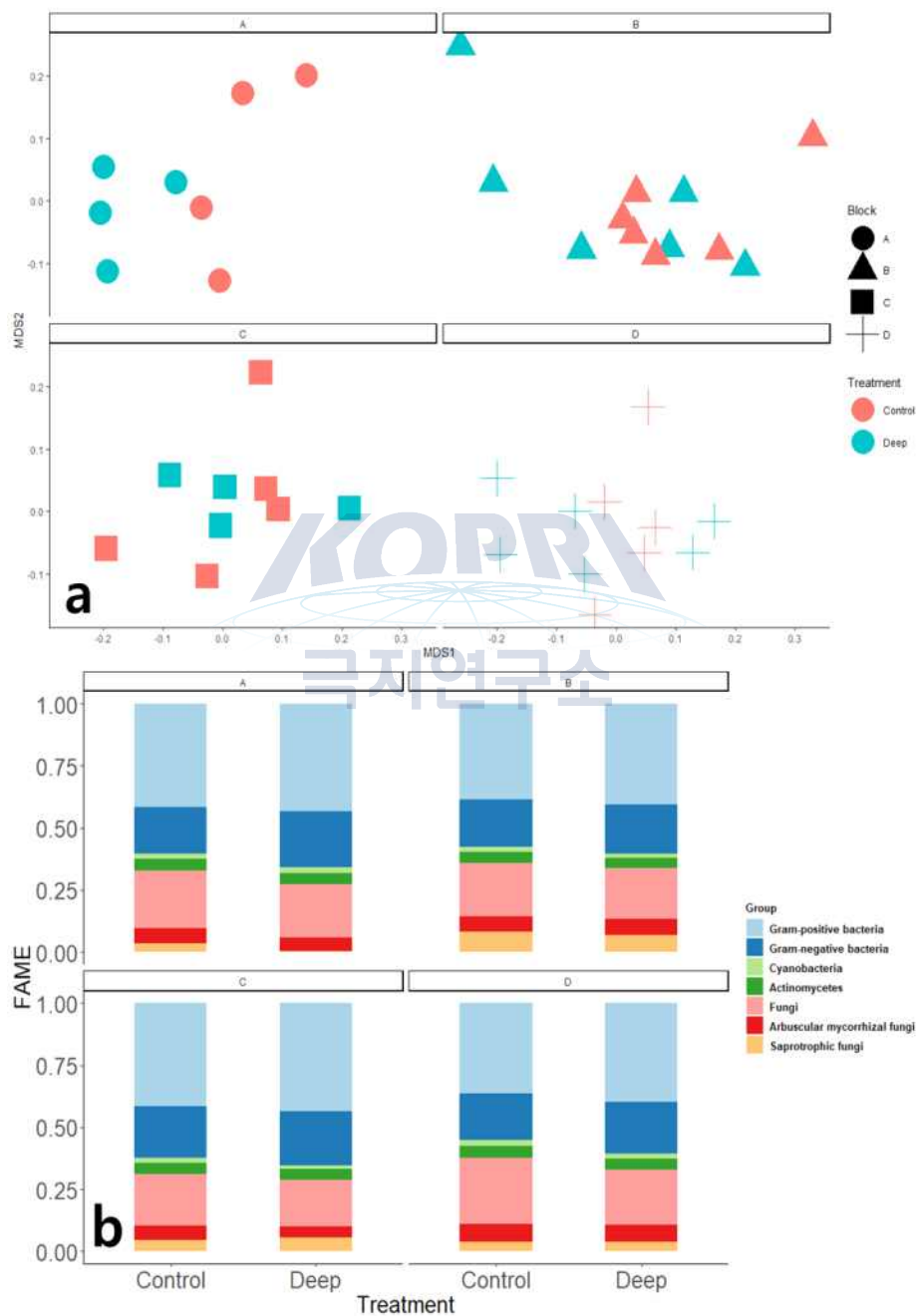


Fig. 19. Composition of microbial community revealed by FAMES obtained from PLFA analysis. (a) Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) ordination plot and (b) Relative abundance of microbial groups.

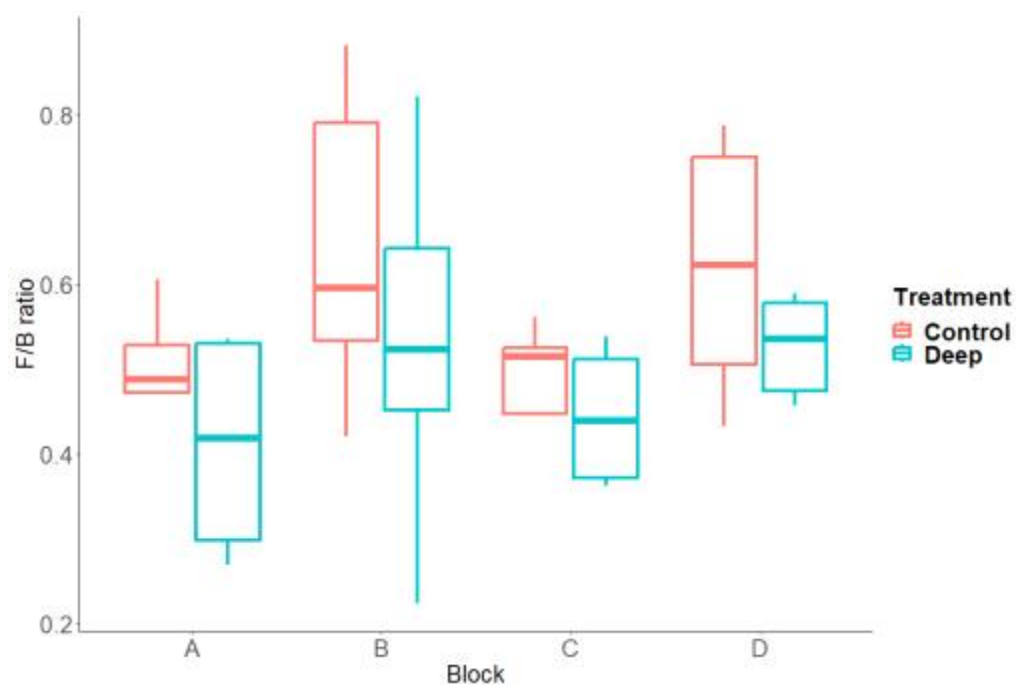
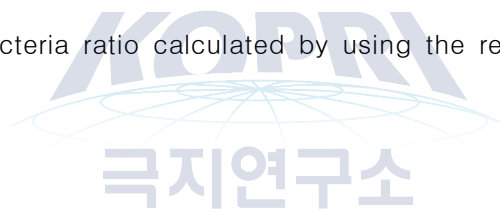


Fig. 20. Fungi to bacteria ratio calculated by using the results of PLFA analysis.



Ecoplate를 활용하여 미생물 활성 변화를 측정된 결과, block A와 B에서는 전체 유기물 기질 분해 활성도가 증가하였고, block C에서는 감소하였으며, block D에서는 큰 차이가 없었다(Fig. 21a). 다만, 얼마나 다양한 유기물 기질을 분해하는지를 나타내는 풍부도(richness)를 계산해본 결과, 모든 block에서 적설량 증가에 의해 풍부도가 증가하였다(Fig. 21b). 따라서, 적설량의 증가는 유기물 분해 활성을 증가시키기도 감소시키기도 하는 등 block 위치에 따라 차이가 있었지만, 분해 가능한 유기물 기질의 종류는 일관되게 증가시키는 방향으로 측정되었다.

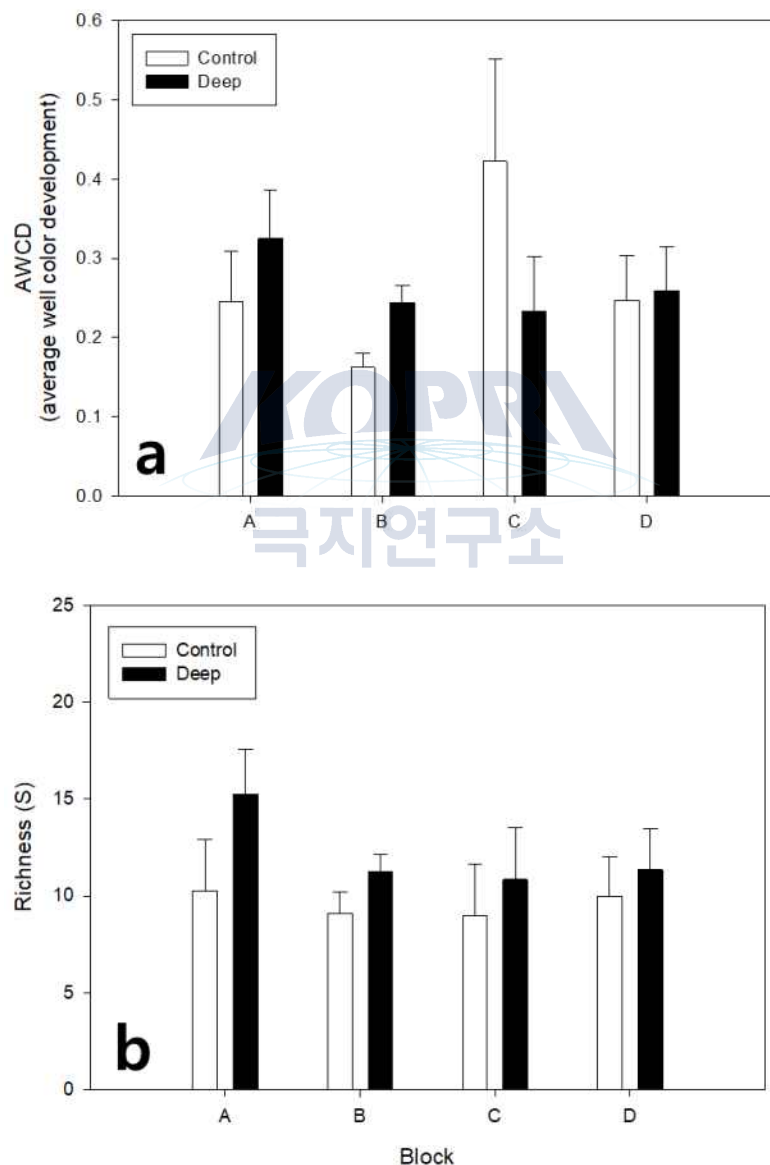


Fig. 21. Results of Ecoplate analysis. (a) Rate of microbial decomposition of the organic substrates in Ecoplate and (b) Richness of the decomposable substrates.

적설량 증가에 따른 토양 유기물 중 총탄소 값은 통계적으로 유의하지 않았으나(Fig. 22a), 총질소의 경우 모든 block에서 유의하게 감소하여, 이로 인해 C/N비가 큰 폭으로 증가하였다(Fig. 22b and 22c). FT-ICR MS를 활용한 토양 용존 유기물 조성 분석 결과, 적설량 증가에 따라 유기물 조성의 차이가 일부 보였고(Fig. 23). 특히, block 별로 확인하였을 때 차이가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 24).

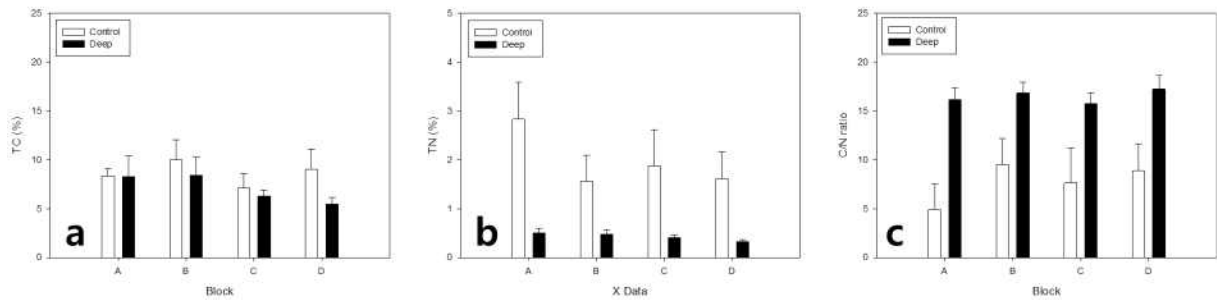


Fig. 22. Effects of enhanced snow depth on (a) Total carbon, (b) Total nitrogen, and (c) C/N ratio.

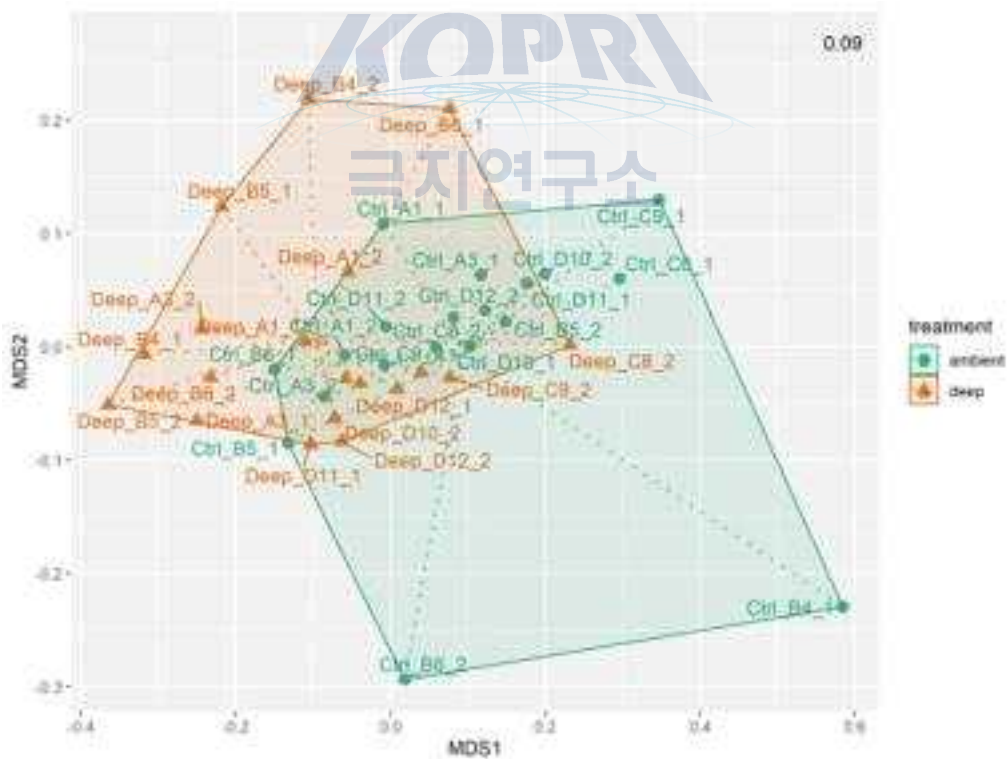


Fig. 23. Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) ordination plot depicting differences in the composition of dissolved organic matters by enhanced snow depth treatments. Ordinations are based on Bray–Curtis dissimilarity.

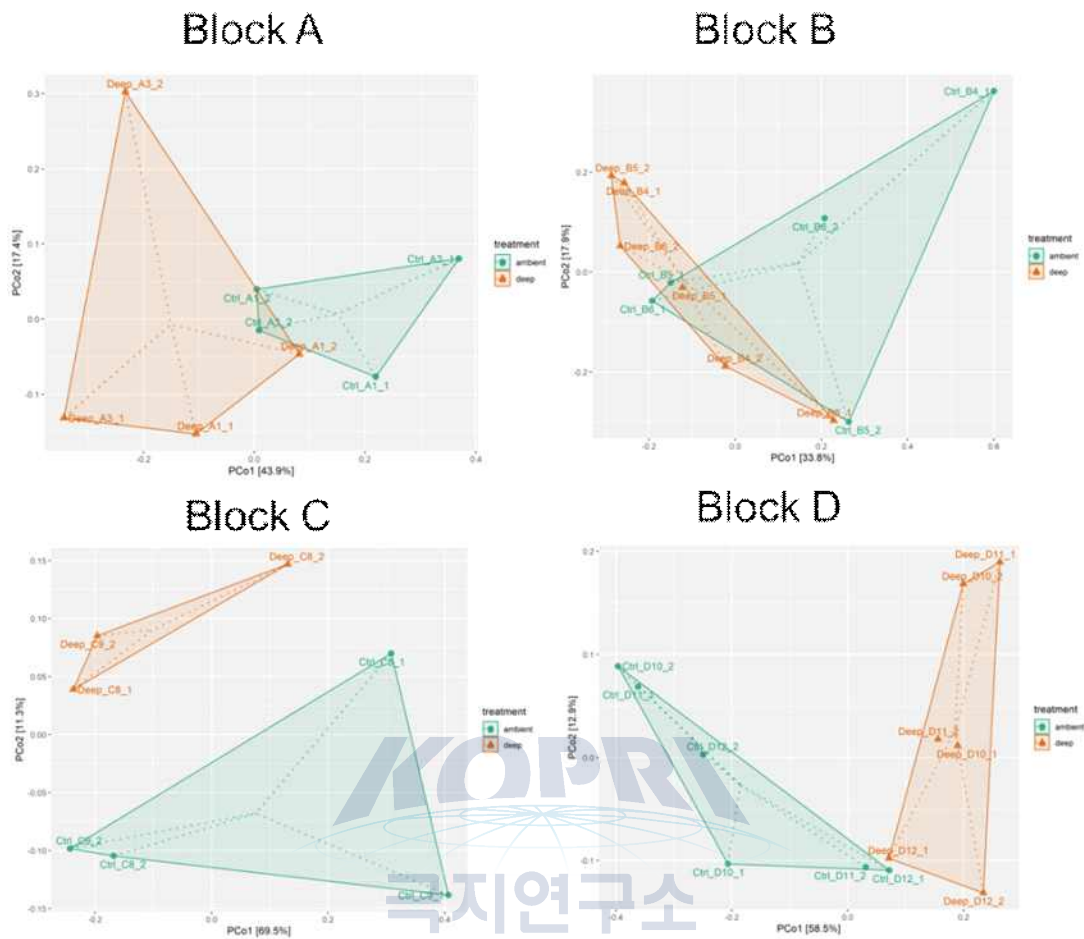


Fig. 24. Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) ordination plot depicting changes in composition of soil organic matters with the enhanced snow depth treatments in each block.

노르웨이 스발바르의 아드반트달렌 지역에 설치된 스노우펜스를 이용한 적설량 증가 실험 결과를 다음과 같이 정리하였다. 2015년과 2021년 채취한 토양에서 추출한 DNA를 활용한 미생물 군집 분석 결과는 세균의 경우 적설량 증가보다는 지리적인 위치 차이가 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 진균 군집은 세균 군집 보다는 더 크거나 빠르게 적설량 증가에 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 PLFA 결과에서 모든 block에서 공통적으로 진균/세균 비율이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 ecoplate를 이용해 확인한 유기물 분해 풍부도 증가 및 토양 유기물 C/N비 증가와 상관관계가 있는 것으로 판단된다.

나. 북극권 동토 내 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명

○ 배양 온도 및 시간 변화에 따른 미생물 대사 기작 변화 분석

미생물 대사 기작 분석을 위하여 혐기 배양 토양 시료로부터 RNA 추출 후 HiSeq 4000을 이용한 메타전사체 분석을 수행하였다. rRNA reads 제거 후 남은 mRNA 서열에 대한 functional annotation을 위해 KEGG Orthology(KO) DB 매칭을 수행하였다.

토양 층위, 배양 시간, 배양 온도에 따른 전체적인 메타전사체 구조 변화를 확인하기 위해 Principal Coordinates Analysis (PCoA) 분석을 수행하였다. 분석 결과 활동층과 영구동토층의 메타전사체 구조는 확연하게 구분되었으며, 두 층 모두에서 온도 변화에 따른 뚜렷한 미생물 전사체 구조 변화가 확인되었으며(Fig. 25), 특히 영구동토층에서 5°C vs. 15°C, 25°C 간에 확연한 차이를 보였다. 이는 영구동토층 미생물들이 5°C~15°C 범위의 온도 차이에 대한 민감도가 더 큰 것을 의미한다.

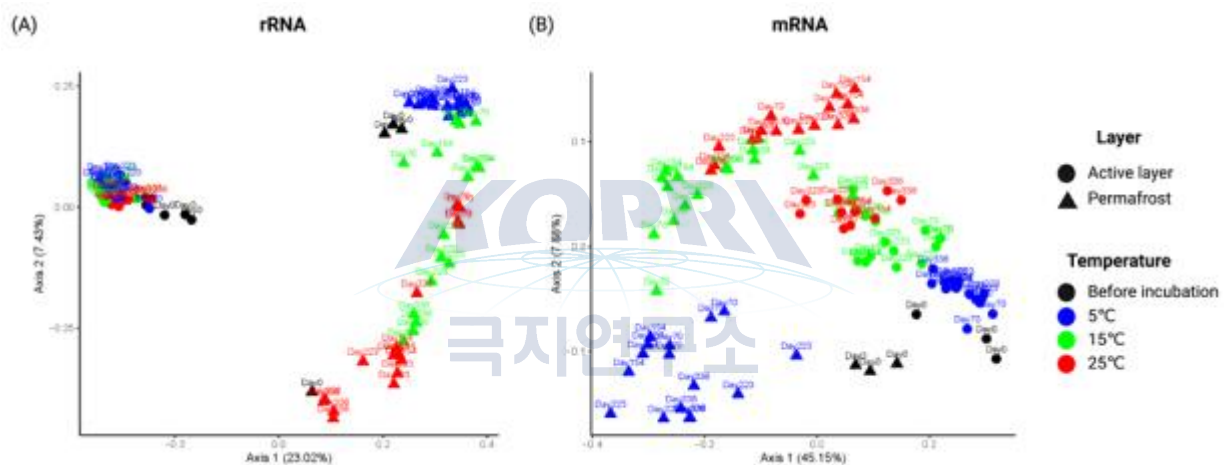


Fig. 25. Temperature-driven changes in microbial community composition and activity.

• 유기산과 아미노산 함량 분석

HPLC를 활용하여 혐기 배양 동토 시료 내 유기산 (Acetic acid, Propionic acid, Butyric acid, IsoValerate, Valerate, Caproate, Heptanoate, EtOH)과 아미노산(Aspartic acid, Glutamic acid, Asparagine, Serine, Glutamine, Histidine, Glycine, Threonine, Citrulline, Arginine, Alanine, GABA, Tyrosine, Valine, Methionine, Phenylalanine, Isoleucine, Leucine, Lysine, Proline) 함량 분석을 수행하였다.

각 유기산과 아미노산은 온도 및 시간 변화에 따라 다양한 증감패턴을 나타내었다(Fig. 26). 평균 유기산 농도는 활동층에서 더 높게 나타났다(EtOH 제외). EtOH은 대다수의 시료가 검출한계 이하로, 시간과 온도 변화에 따른 변화 확인이 어려웠다. Acetic acid과 propionic acid은 영구동토층 고온 배양 시료에서 배양 시간 경과에 따라 감소하는 패턴을 보였으나 활동층에서는 모든 온도에서 큰 변화가 관찰되지 않았다.

아미노산 분석 결과, 시료에 포함된 아미노산의 검출 함량 미달로 인해 Lysine, Proline은 활동층 저온 시료와 영구동토층 전 시료에서 검출되지 않았고, Asparagine, Glutamine, Histidine, Threonine, Citrulline, Arginine, GABA, Tyrosine, Valine, Methionine, Phenylalanine, Isoleucine, Leucine은 활동층 시료에서만 주로 검출되었다. Serine은 모든 온도 처리구에서 배양 시간 경과에 따라 활동층과 영구동토층에서 상반되는 패턴을 보였다. Serine은 배양 시간 경과에 따라 활동층에서는 농도가 증가한 반면 영구동토층에서는 감소했다(Fig. 27).

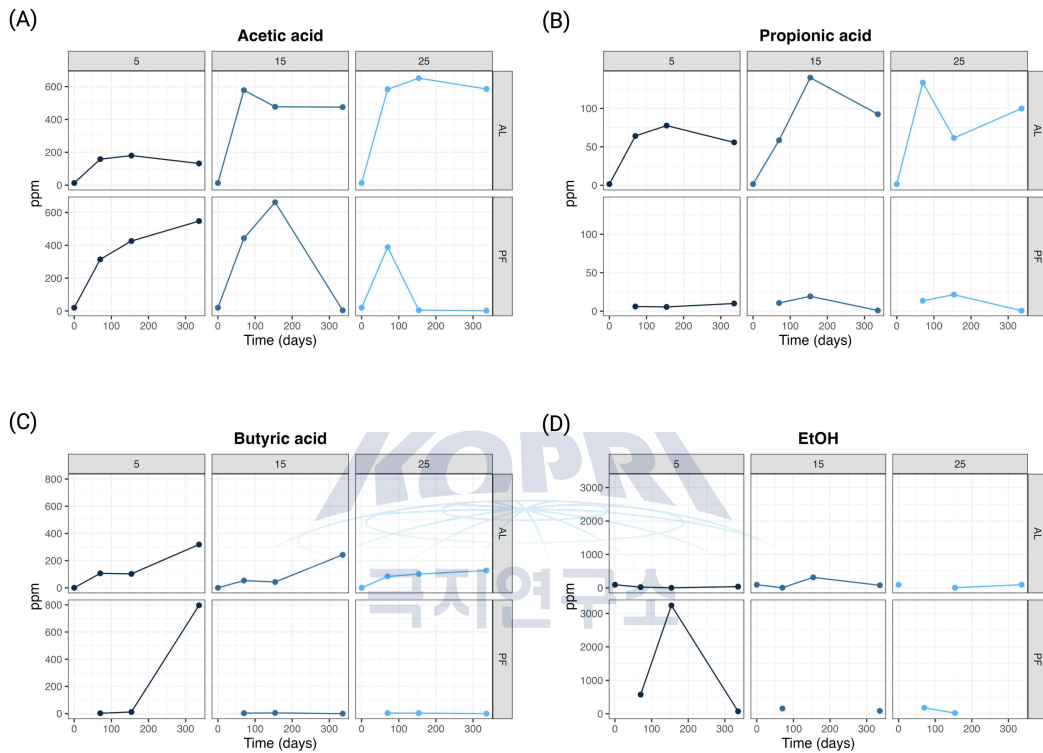


Fig. 26. Organic acid concentration across different incubation temperatures.

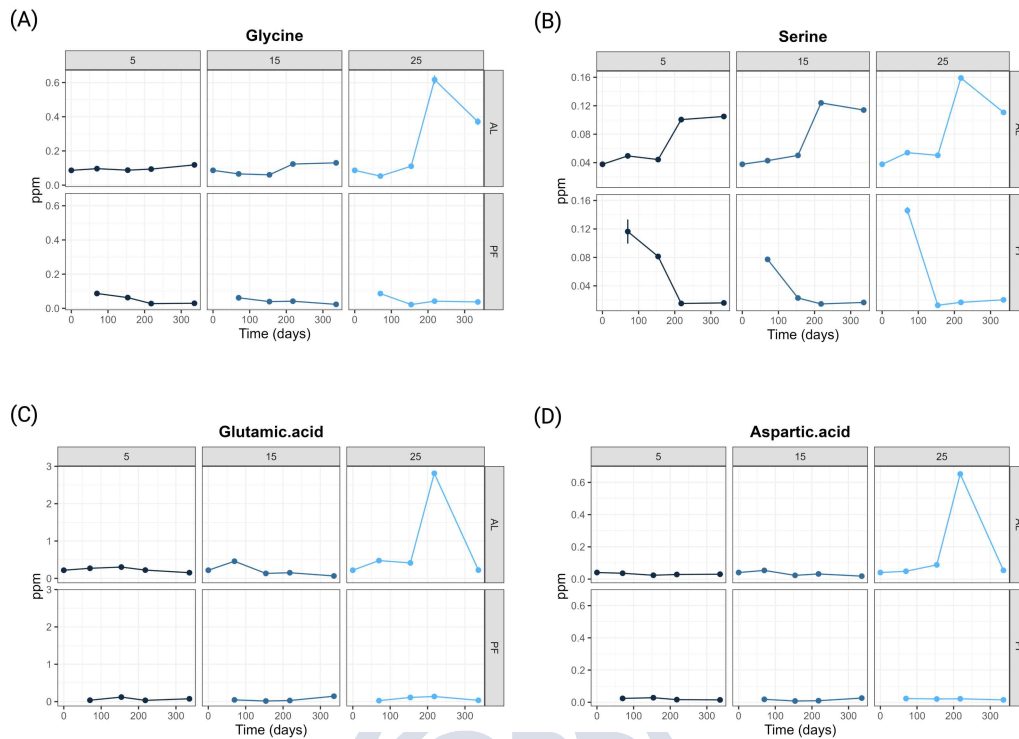


Fig. 27. Amino acid concentration across different incubation temperatures.

- 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 수행하였다(Fig. 28). 알래스카 카운실 지역의 활동층과 스발바르 아드반트달렌에서 수행된 적설량 모사 실험구 토양을 대상으로 비교 분석을 진행하였다. 각 배양 조건별 일정 주기로 가스 시료를 포집하여 미생물 활성 및 온실가스 발생의 변화를 확인하였다.

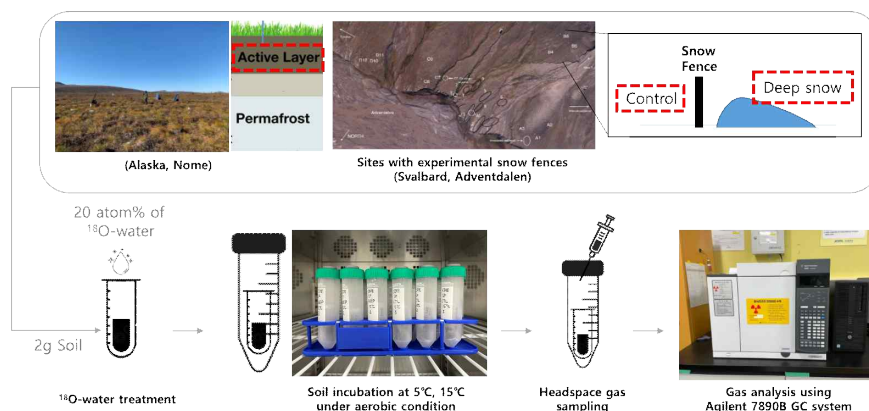


Fig. 28. Aerobic incubation scheme of Alaska and Svalbard soil

CO₂ 발생량을 통한 미생물 호흡량 비교 결과, 모든 토양 시료에서 5℃보다 15℃에서 많은 양의 CO₂가 발생하였다(Fig. 29). 초기 배양 단계에서 스발바르 15℃ 배양 시료는 알래스카 시료보다 CO₂ 발생이 더 빠르게 나타났다. 이는 지역별 토양 특성 차이가 미생물 활성도에 영향을 미치기 때문으로 사료된다. 또한 스발바르의 스노우 펜스를 이용한 적설량 증가 실험구에서는 배양 온도에 따른 CO₂ 발생량 차이가 상대적으로 크게 나타났다. 대표적인 온실가스 중 하나인 N₂O의 경우, 알래스카 활동층과 스발바르 적설량 증가 실험 대조구 토양에서는 배양 온도 따른 발생량 차이가 없었다. 그러나 15℃ 적설량 증가 실험구 토양에서 N₂O 발생량 증가가 배양 후기에 관찰되었다.

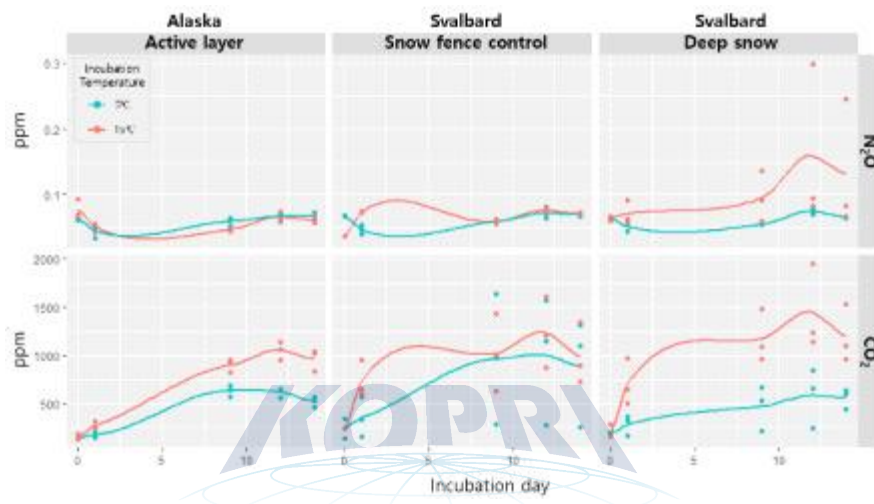


Fig. 29. Greenhouse gas conc. changes during aerobic incubation

• 온실가스 연관 미생물 종 동정(혐기성 10종, 호기성 5종) (RFP 총족 정량성과)

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 등록하였다 (Table 7, 8).

Table 7. 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 8. 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	Gemmatimonas aurantiaca	N ₂ O reduction
AM-411-N08	753,183	Flavobacterium sp.	Complex organic compounds degradation
AM-408-N21	1,527,475	Pseudomonas sp.	Complex organic compounds degradation

- 양분 농도 변화(탄소원 첨가)에 따른 활동층의 유기물 분해 대사-온실가스 발생 변화 상관성 이해(유기물 분해 미생물 군집 및 토양 유기물 조성 변화 분석)

표층 식생 차이 및 산불 발생 등에 의해 생태계에 유입되는 양분의 농도 변화(함량 및 조성)가 동토 활동층의 유기물 분해 및 온실가스 발생에 미치는 영향을 분석하고 그 기작을 규명하고자 하였다. 침엽수림과 툰드라 생태계의 표층 우점 식생 차이 (침엽수림-침엽수, 툰드라-초목 및 선대식물)는 유입 유기물 양 (침엽수림>툰드라), 난분해성 유기물 함량 (침엽수림>툰드라), 유기물 분해 저해 물질 (침엽수림<툰드라), 근권 발달 정도 (침엽수림>툰드라) 등의 차이를 가져오며, 이는 동토 활동층의 유기물 분해 대사-온실기체 발생 기작에 영향을 미칠 수 있다. 알래스카에 분포한 침엽수림 6곳과 툰드라 5곳에서 최대 2m의 토양 코어를 채취하여 온실기체 농도를 비교해본 결과, 이산화탄소는 표층에서 심층으로 갈수록 농도가 감소하는 추세를 보였다(Fig. 30). 이는 표층이 심층에 비해 상대적으로 산소이용도 및 온도가 더 높아, 미생물이 활발하게 유기물을 분해하였기 때문으로 생각된다. 이산화탄소의 깊이별 분포는 침엽수림과 툰드라 사이의 중대한 차이가 나타나지 않았다. 메탄의 경우는, 표층에서 중심층으로 갈수록 농도가 증가하다가 다시 심층으로 내려갈수록 감소하는 포물선 모양을 보였다(Fig. 30). 표층의 경우는 산소이용도가 높아서 메탄생성기작(methanogenesis)이 잘 일어나지 않고 심층의 경우는 거의 얼어있기 때문에 미생물 활성이 없어서 메탄 농도가 낮은 것으로 판단된다. 또한, 중심층의 경우 zero-curtain layer라 불리는 영역의 존재로 인해 미생물의 활동이 가능한 부동기간이 타 층보다 더 길기 때문에, 오랜 기간 메탄생성균(methanogen)에 의해 매년 더 많은 양의 생성된 메탄이 축적되어 나타난 결과라 추정된다. 침엽수림은 툰드라에 비해 모든 깊이에서 전반적으로 낮은 메탄 농도를 나타냈는데, 이는 침엽수림의 근권에서 툰드라 지역보다 상대적으로 산소이용도가 높아 메탄생성이 억제되어 나타난 결과로 생각된다.

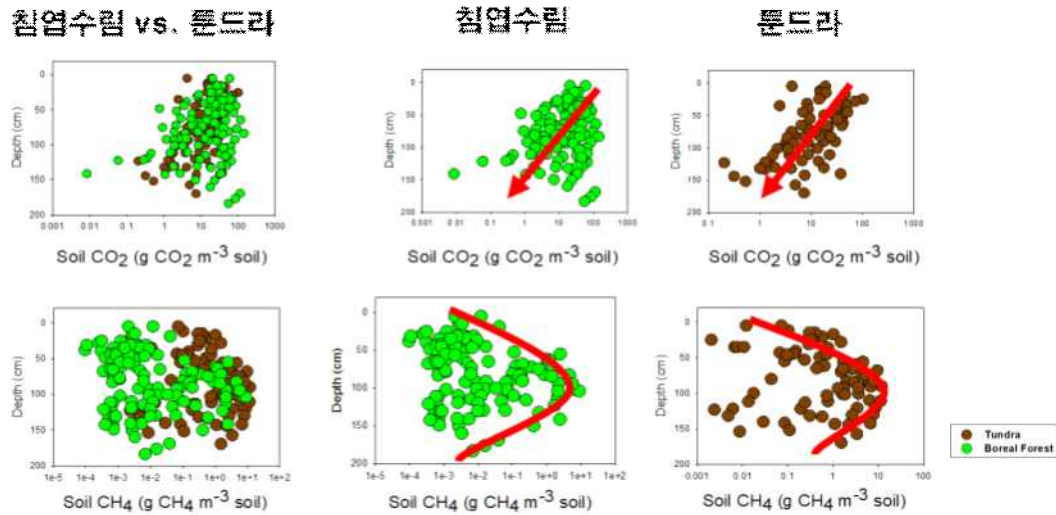


Fig. 30. Different depth profiles of concentrations of carbon dioxide and methane trapped in the soils of active and permafrost layer in Arctic tundra and boreal forest in Alaska, USA collected in APR 2023.

산불 발생에 의한 표층 유기물의 변화가 동토 활동층 유기물 분해에 미치는 영향을 알아보기 위해 알래스카 침엽수림 및 툰드라 생태계에서 산불이 발생한 지역의 토양을 채취하고, 같은 생태계 내에서 산불의 영향을 받지 않은 지역의 토양과 비교분석을 진행하였다. 현장시료 분석 결과, 툰드라 토양에서는 산불에 의한 유기물 감소가 중대하게 나타났으나, 침엽수림 토양에서는 비교적 비슷한 수준으로 유지되는 경향을 보였다. 실험실 인큐베이션 결과에 따르면, 침엽수림 지역에 산불이 발생하면, 식물 유래 바이오매스의 불완전 연소에 의해 biochar와 비슷한 형태의 물질이 축적될 것이고, 이들이 유기물 분해 저해 물질인 phenolics를 배출하여 산불 발생 이후 토양 유기물 분해를 억제하는 것으로 확인되었다(Fig. 31).

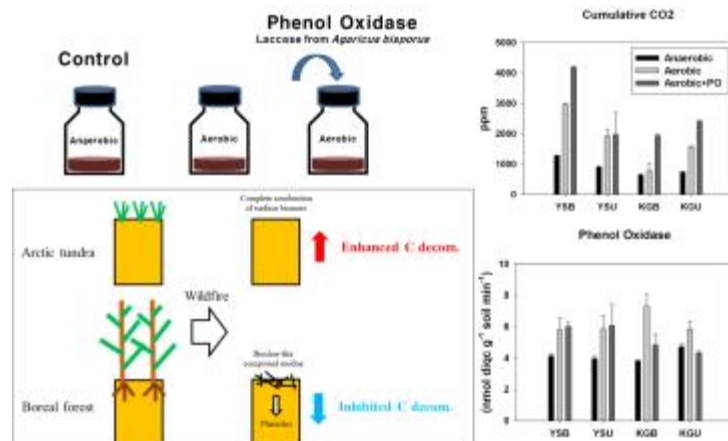


Fig. 31. Experimental design for determining the effects of wildfire on the decomposition of soil organic matter, and its results and conceptual diagrams.

• 온도 변화에 따른 유기물 분해 대사-온실가스 발생 기작 변화 분석

알래스카 카운실 동토 혐기배양 시료를 대상으로 온도 변화에 따른 미생물 유기물 분해 대사 및 온실기체 발생 기작 유전자 활성 변화를 확인하기 위하여 메타전사체 분석을 진행하였다. 이를 통해, 온도 변화에 의한 활동층과 영구동토층의 미생물 군집구성이 유기물 분해 대사-온실기체 발생 기작에 영향을 미침을 관찰했다(Fig. 32). 특히 온도 증가 조건의 활동층에서는 유기물 분해와 관련된 유전자(e.g., K07272-rgpF, K10189-lacF, K01760-metC)의 활성이 유의미하게 증가하였으며, 영구동토층에서는 메탄 생성과 관련된 유전자(e.g., K00399-mcrA, K14126-mvhA)의 활성의 유의미한 증가가 확인되었다. 이는 온도 증가에 의해 동토 미생물의 유기 화합물 분해 활성과 강력한 온실가스인 메탄 생성 활성의 증가를 시사한다.

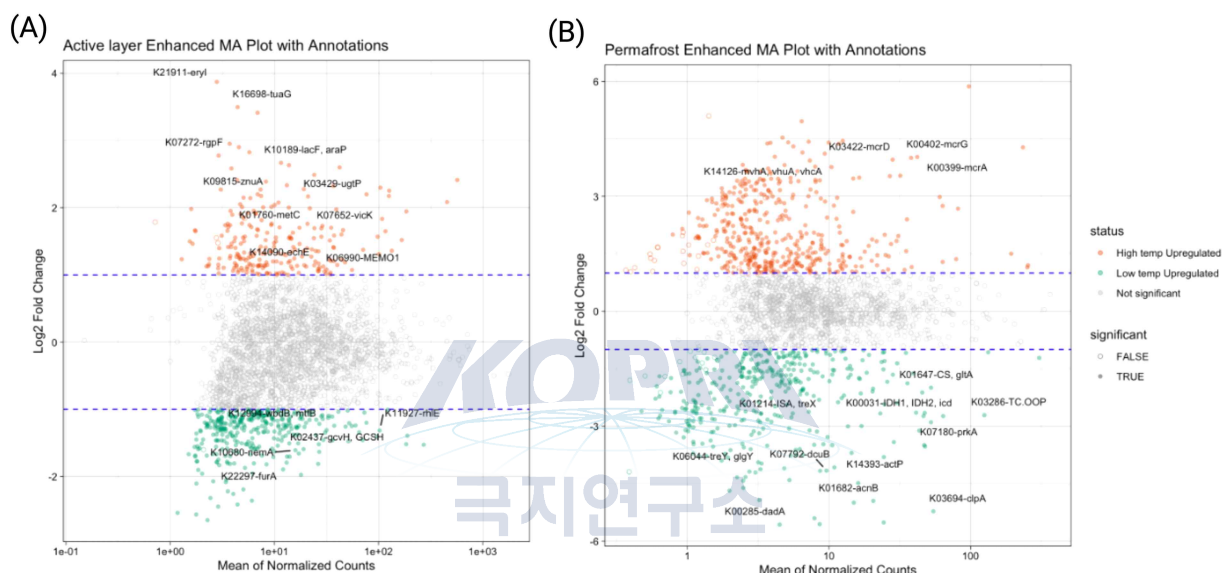


Fig. 32. Differential gene expression under low- and high-temperature.

온도상승에 의한 메탄 생성기작 활성 증가는 활동층과 영구동토층에서 모두 발생하였으나, 영구동토층에서 더 높은 수준의 활성도 증가가 관찰되었다. 메탄 생성 기작은 활용 기질에 따라 크게 4가지로 나눌 수 있다: 수소영양성 메탄 생성기작 (hydrogenotrophic methanogenesis), 아세트산 분해 메탄 생성 (acetoclastic methanogenesis), 메탄올 메탄 생성(methanol methanogenesis), 메틸아민 메탄 생성(methylamine methanogenesis).

활동층에서는 메탄생성균 *Methanobacterium_B* 에 의한 수소영양성 메탄 생성기작의 활성이 주로 확인된 반면, 영구동토층에서는 4가지 메탄 생성기작의 활성이 모두 활동층과 비교하여 높게 나타났다(Fig. 33). 그중에서도 *Methanosarcina* 에 의한 아세트산 분해 메탄 생성기작이 고온 조건에서 가장 크게 활성이 증가했다. 이를 통해, 활동층과 영구동토층에서의 메탄 생성 경로 활성은 온도 상승 조건에 따라 서로 다른 변화 양상을 보였으며, 특히 영구동토층에서 관찰된 메탄 생산기작 다양성과 아세트산 분해 메탄 생성기작 활성 증가를 토대로 온도 상승 환경에서 메탄 생성과 배출에는 아세트산을 생성하는 토양 유기물 분해기작이 최종적으로 중요한 영향을 미칠 수 있음을 유추할 수 있다.

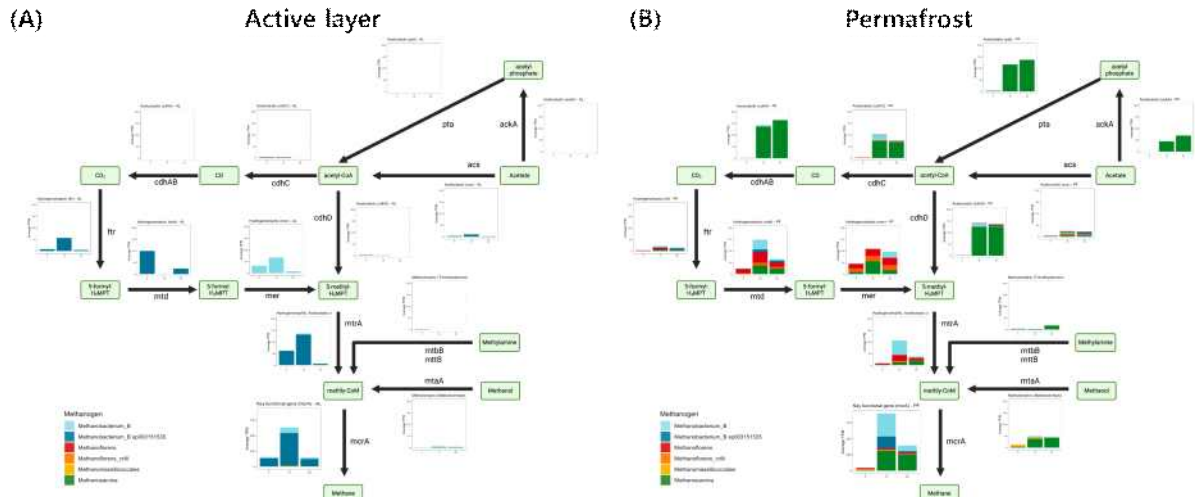


Fig. 33. Methanogenesis pathways in the active layer and permafrost at different temperatures.

• 유기물 분해 대사-온실기체 발생 상관성 종합 분석

토양 유기물은 유기물 분해 미생물에 의해 최종적으로 이산화탄소 혹은 유기산으로 분해된다. 온도 증가에 의한 미생물의 유기물 분해 활성 증가는 유기산 생성을 증가시킨다. 특히 다양한 유기산 중 아세트산의 경우 메탄 생성에 직접적으로 이용되는 기질로 아세트산 생성 미생물과 메탄생성균과의 상호작용이 매우 중요하다. 따라서, 메탄생성균과 아세트산 생성 미생물 간의 상관성 분석을 수행하였다.

영구동토층의 고온 환경에서 관찰된 아세트산 분해 메탄 생성 기작 활성을 보유하고 있는 메탄생성균 *Methanosarcina* (PF-MAG_7)와 아세트산 생성 미생물로 확인되는 *JAFTV01* (PF-MAG_204)의 상대 점유도를 비교한 결과, 강한 양의 상관관계가 나타났다(Fig. 34). 이를 통해, 메탄생성균과 아세트산 생성 미생물 간의 상호작용이 있으며 이를 통해 메탄 생성 활성에 기여가 가능함을 유추할 수 있다. 또한, 온도 변화에 따른 기능 유전자 발현량 비교 결과 또한 고온의 환경에서 발현량이 증가하는 패턴이 *Methanosarcina* (PF-MAG_7)의 메탄 생성 유전자 *mcrA*와 *JAFTV01* (PF-MAG_204)의 아세트산 생성 유전자 중 하나인 피루브산 산화 유전자 *por*에서 동일하게 관찰되었다(Fig. 34). 이러한 결과는 유기물 분해 기작과 온실기체 발생 간의 밀접한 기능적 연관성을 시사한다.

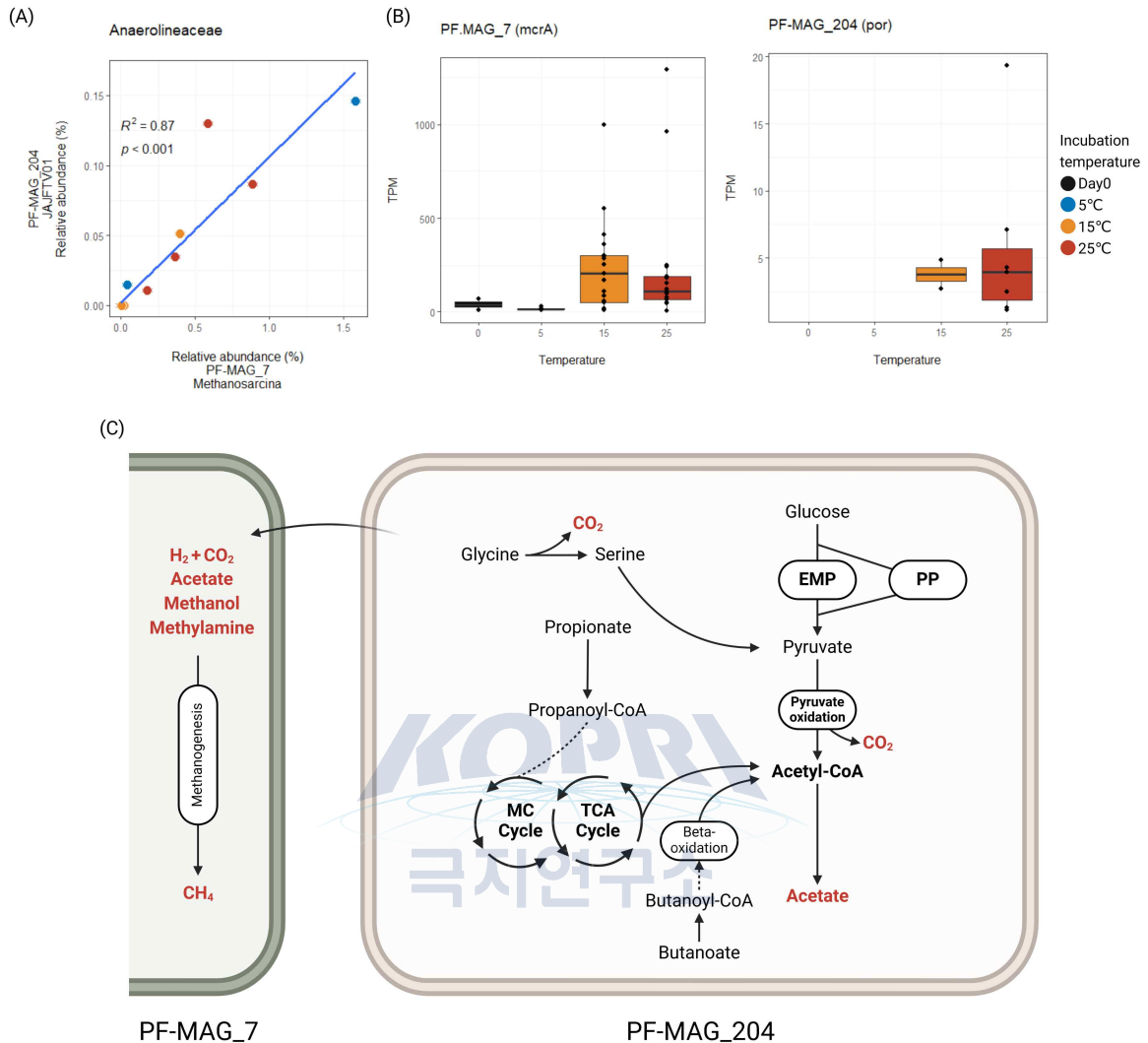


Fig. 34. Correlation of *Methanosarcina* (PF-MAG_7) and acetate-producing bacteria (PF-MAG_204) with methanogenesis activity and metabolic pathways.

최종적으로 유기물 분해 대사-온실기체 발생 상관성 종합적으로 이해하기 위하여, 배양 시기별 온도 상승 조건의 영구동토층에서 방출되는 메탄 농도, 토양 아세트산 농도, 메탄생성균의 아세트산 분해 메탄 생성 기작 유전자 활성도 비교를 수행하였다. 관찰된 메탄 농도 증가 패턴과 메탄 생성 경로를 주도하는 미생물 활동을 직접적으로 연결할 수 있었다. 고온 조건에서는 메탄 농도의 급격한 증가가 배양 100일 전후 명확하게 나타났으며, 이는 아세트산 농도와 아세트산 분해 메탄 생성 경로 활성화 시기 간의 밀접한 연관성을 보였다(Fig. 35). 이를 통해, 메탄 농도 증가와 아세트산 농도 변화, 그리고 *Methanosarcina*의 유전자 활성 간의 패턴 비교를 통해, 메탄 생성 활성은 아세트산 생성 및 활용과 밀접하게 연결되어 있음을 확인했다.

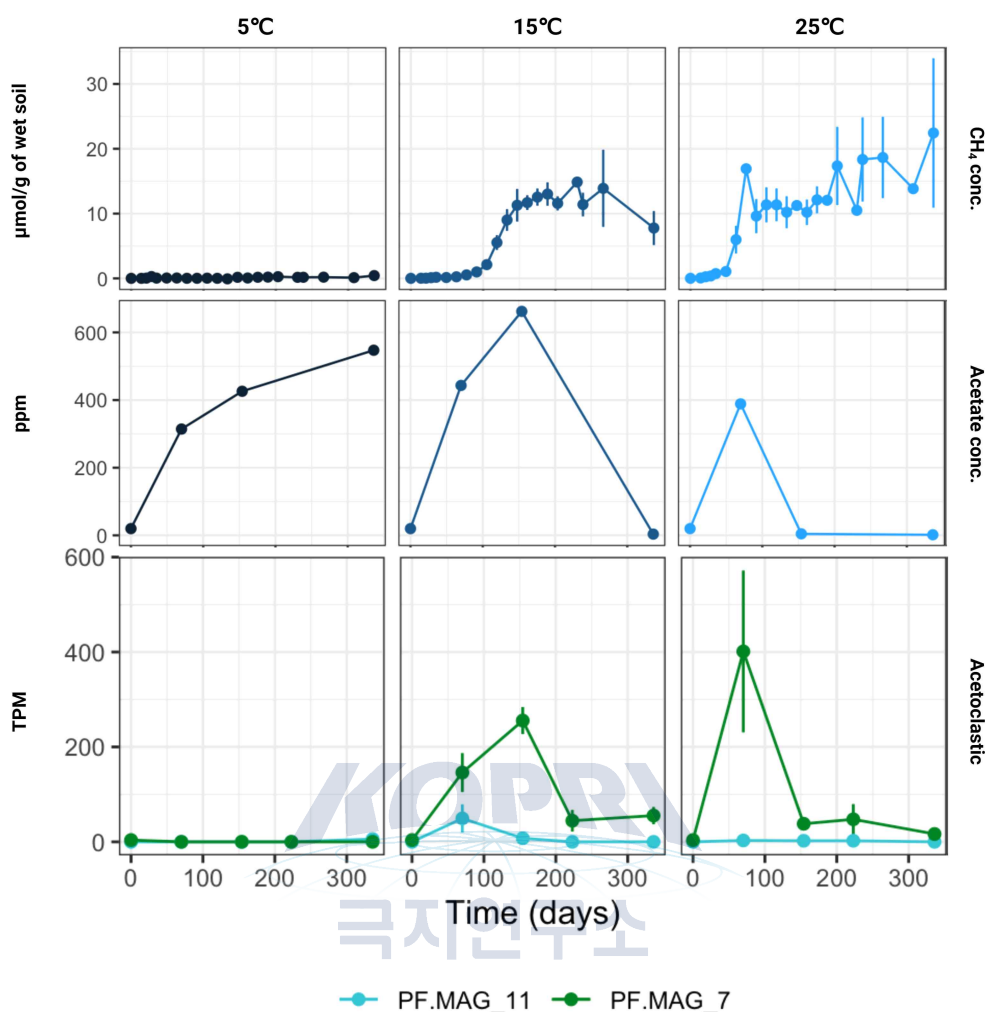


Fig. 35. Temporal dynamics of methanogenesis pathways in Alaskan permafrost.

알래스카 영구동토층과 활동층에서 온도 상승이 유기물 분해 대사와 메탄 생성 경로에 미치는 영향을 종합적으로 분석한 결과, 온도 상승은 유기물 분해 대사 및 메탄 생성 경로의 활성화를 통해 메탄 배출 증가를 유도하며, 이는 아세트산과 같은 유기산 생산 활성을 지닌 미생물의 활성과 메탄 생성균 *Methanosarcina*의 활성이 핵심 요소임을 확인했다. 이러한 결과는 온실기체 발생 기작과 유기물 분해 기작 간의 강력한 상호작용이 있음을 보여주며, 이들 간의 연계된 대사 과정이 메탄 배출 증가를 주도하는 중요한 메커니즘임을 시사한다.

○ 생태계 구배에 따른 동토 유기물 및 온실기체 분포와 미생물학적 대사 기작 연구

동토에 유입 및 저장되는 양분(유기물)은 대부분 표층 식생의 일차생산에 의해 생성된 바이오매스에서 유래되며, 표층 식생의 특성(초본/관목, C3/C4, plant functional traits 등)에 따라 유기물의 특성 (함량 및 조성) 또한 상이하게 나타난다. 이러한 유기물의 특성 차이는 토양 미생물에 의한 유기물 분해 대사 및 온실기체(이산화탄소 및 메탄) 발생량에 영향을 미치는 인자로서 작용한다. 본 연구에서는 생태계 구배를 가지는 서로 다른 표층 식생이 서식하고 있는 동토 지역을 비교하여, 생

태계 구배에 따른 동토 유기물 및 온실기체 분포를 규명하고 이와 관련된 미생물학적 대사 기작에 대해 비교분석을 시도하였다. 이를 통해 향후 기후변화에 의해 표층 식생 군집이 변화하는 등의 현상이 발생했을 때의 동토 유기물 및 온실기체 동태 변화에 대한 정보를 제공하고자 한다.

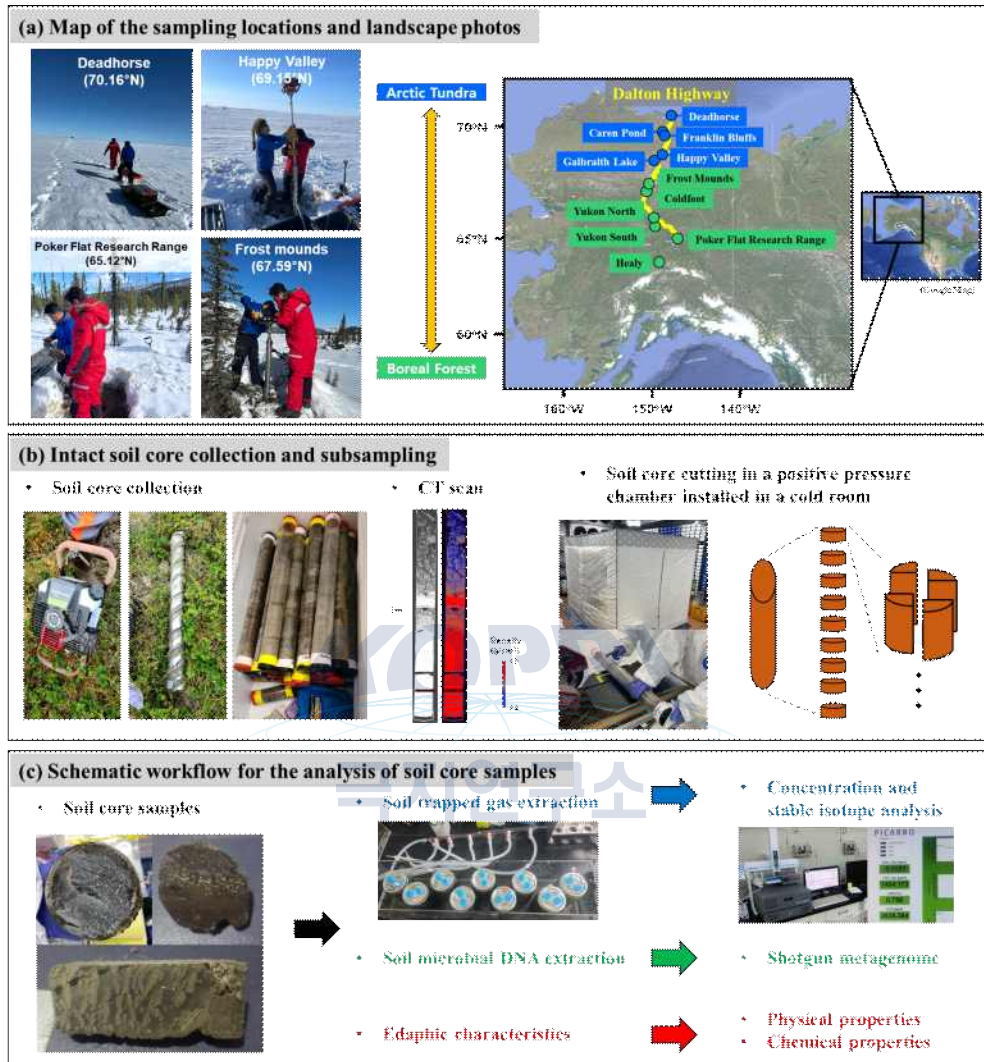


Fig. 36. Sampling sites and workflow for soil core sample analysis. (a) Map of sampling locations and landscape photos, (b) Intact soil core collection and subsampling, and (c) schematic workflow for the analysis of soil core samples.

연구 대상지는 알래스카 중부에서 북쪽 해안 지역까지 Dalton 고속도로(일부 공원 및 Elliot 고속도로 포함)를 따라 970km의 위도 구배에 걸쳐, Healy(북위 63.88° 서경 149.18°)에서 Deadhorse(북위 70.16° 서경 148.46°)까지 분포해 있다. 해당 지역은 한대산림과 북극 툰드라 생태계 유형을 포함한다(Fig. 36a). 북극 툰드라 지역은 연속적인 영구 동토층에 주로 분포해있으며, 표층 우점 식생은 non-tussock sedge와 이끼류로 구성되어 있는 반면, 한대 산림은 검은 가문비나무가 우점하는 불연속적인 영구동토층 지역에 분포하고 있다(Fig. 36a). 북극 툰드라 지역은 총 5곳(DH, Deadhorse; CP, Caren Pond near Sagavanirktok river; FB, Franklin Bluffs; HV, Happy Valley; and GL, near Galbraith Lake) 그리고 한대산림 지역 6곳(FM, frost mounds on

the southern slope of Mt. Sukakpak, CF, Coldfoot, YN, North of Yukon river, YS, South of Yukon river, PR, Poker Flat Research Range, and HL, Healy)을 포함하여 총 11개 지점에서 냉동 토양 코어를 채취하였다(Table 9).

Table 9. Basic information about the study sites and core samples

Ecosystem Types	Sites	ID	Coordinates	Core length (cm) ^a
Arctic Tundra	Deadhorse	DH	N 70.16° W 148.46°	1.6
	Caren Pond	CP	N 69.96° W 148.73°	1.5
	Franklin Bluffs	FB	N 69.67° W 148.71°	1.6
	Happy Valley	HV	N 69.14° W 148.84°	1.5
	Galbraith Lake	GL	N 68.47° W 149.49°	1.8
Boreal Forest	Frost Mounds	FM	N 67.59° W 149.78°	1.6
	Coldfoot	CF	N 67.18° W 150.30°	1.2
	Yukon North	YN	N 66.08° W 150.16°	1.6
	Yukon South	YS	N 65.84° W 149.64°	1.4
	Poker Flat Research Range	PR	N 65.12° W 147.48°	1.4
	Healy	HL	N 63.88° W 149.18°	1.6

^a Core length denotes the combined length of the upper and lower cores.

토양 코어 채취는 아직 눈이 남아있는 2022년 4월에 진행되었으며, 현장에서 삽으로 눈을 치운 후 SIPRE 코어러(직경 7.6cm, 길이 90cm; John's Machine Shop, Fairbanks, AK, USA)와 코어러 내부에 삽입되는 1mm 두께의 폴리염화비닐 파이프 라이너를 사용하여 진행되었다. 11개 지점에서 표면에서 아래로 90cm까지의 상부 코어 및 90cm 아래에서 최대 1.8m 깊이까지의 하부 코어를 각각 채취하였다. 상부와 하부 코어의 총 길이 연장은 현장의 지반 조건에 따라 지점당 1.0~1.8m 길이로 분포하였다. 채취된 코어는 양쪽 끝을 실리콘 뚜껑으로 밀봉한 후 운반 과정 내 냉동 보관했다. 현장에서는 영하 기온의 눈 속에 보관했고, 알래스카 대학교 페어뱅크스 노스웨스트 캠퍼스에서는 -20° C에 보관했으며, 미국 알래스카주 노에서 대한민국 인천까지 극지연구소 쇠빙연구선 아라온(ARAON)으로 운송하는 동안에도 냉동 상태를 유지하였다.

코어 전처리 과정에서 해동 및 오염을 방지하기 위해 극지연구소의 냉장 창고(4° C)에 설치된 HEPA 필터가 장착된 양압 휴대용 챔버 (ATU-125CR, Class 100 클린룸; JOUL, 대한민국) 내부에서 수행하였다. 먼저, 토양 코어는 길이에 따라 10 cm 간격으로 전기톱을 사용하여 절단하였다. 각 코어는 길이에 따라 8~19개로 시료를 절단하였으며, 절단 시료의 길이는 7~17cm, 무게는 144~990g 사이에 분포하였다. 각 절단 시료는 길이 방향으로 네 조각(각 >35g)으로 절단하여(Fig. 36b), 각각의 조각은 토양 기체 측정, 토양 특성 분석 및 토양 미생물 DNA 추출에 사용하였다(Fig. 36c and Table 10)

Table 10. List of the dataset measured and analyzed in this study

Categories	Contents
Site information	Site name, site ID, coordinates, core collection time, ecosystem type
Trapped gas properties	Stock of soil trapped gas (CH ₄ , CO ₂ , N ₂ O), Stable isotope signatures of CH ₄ ($\delta^{13}\text{C-CH}_4$, $\delta^2\text{H-CH}_4$) and CO ₂ ($\delta^{13}\text{C-CO}_2$)
Soil physical properties	Soil bulk density, total porosity, water filled porespace, CT scan image
Soil chemical properties	Soil moisture, soil organic matter, dissolved organic carbon total dissolved nitrogen, ions (Li ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , NH ₄ ⁺ , F ⁻ , Cl ⁻ , Br ⁻ , NO ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻)
Soil microbial characteristics	Abundance of <i>mcrA</i> , <i>pmoA</i> , and <i>mmoX</i> gene

토양 가밀도는 토양의 105° C 건조 중량과 토양 코어 부피의 비율을 계산하여 얻었다. 물과 공기로 채워질 수 있는 토양 공극의 백분율인 공극률과 물로 채워진 공극의 비율인 water-filled pore space(WFPS)는 아래 Equation 1 and 2 를 사용하여 계산했다.

$$\text{Soil porosity}(\%) = (1 - \rho_{\text{bulk}}/\rho_{\text{particle}}) \times 100 \text{ (Equation 1)}$$

$$\text{WFPS}(\%) = \text{Water Content}_{\text{volumetric}}(\%) / \text{Soil porosity}(\%) \times 100 \text{ (Equation 2)}$$

(where, ρ_{bulk} is soil bulk density (g cm^{-3}) and ρ_{particle} is soil particle density (g cm^{-3}). Soil bulk density was determined using directly measured values. For soil particle density, values of 1.0 g cm^{-3} were used for organic-rich soil segments with $\geq 15\%$ organic carbon content, while 2.66 g cm^{-3} for soils with $< 15\%$ organic carbon content)

토양 수분 및 토양 유기물 함량은 각각 105° C에서 24시간 건조 후 450° C에서 4시간 동안 건조 시 질량 손실 비율을 이용하여 계산했다. 토양 pH는 휴대용 pH 미터(Orion Star A215, Thermo Scientific, USA)를 사용하여 1:5 혼탁액(토양:물)을 이용 측정했다. 그런 다음 이 혼탁액을 0.45 μm 주사기 필터 (Advantec, Japan) 로 여과하여 TOC 분석기 (Multi N/C 3100 (CLD), Analytik Jena, Germany)로 용존 유기 탄소 및 총질소 함량을 측정했다. 남은 여과액은 0.2 μm 주사기 필터(Advantec, Japan)로 다시 여과한 후, 이온 크로마토그래피(Dionex Aquion, Thermo Fisher Scientific, USA)로 음이온(F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻) 및 양이온(Li⁺, Na⁺, NH₃⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)의 농도를 측정에 이용되었다. 표준 곡선을 위한 표준 용액은 Dionex Seven Anion Standard II & Six Cation-II Standard (pH 3.0 $\pm$ 0.3) (Thermo Fisher Scientific, USA)를 사용하였다.

3차원 컴퓨터 단층 촬영(3D-CT) 스캔은 위치한 안정성평가연구원(전라북도 정읍)의 16채널 나선형 CT 스캐너(Somatom Emotion, Siemens Healthcare, Munich, Germany, 소프트웨어 버전 syngo CT 2007E)로 수행하였다. 냉동 토양 코어를 갠트리에 놓고 4 $\times$ 0.6 mm collimation/acquisition 및 0.6 mm slice thickness (depth-wise)로 HR spiral mode scan을 수

행했다.

토양 시료에 갇혀 저장되어 있던 기체는 wet extraction 방법론을 약간 수정하여 포집하였다. 먼저, 냉동 상태의 절단된 토양 시료를 냉각된 (-20°C) 포화 NaCl 용액으로 채워진 1L mason jar에 넣고 headspace없이 밀봉하였다. 이후, NaCl 용액의 약 절반을 Ar 가스(1 atm, N50 99.999% 고순도)로 치환 후, 토양의 해동을 위해 mason jar를 상온에서 몇 시간 동안 두었다. 완전히 해동된 후, 토양 시료에 갇혀있던 기체를 포함하는 headspace 기체 시료를 주사기로 50mL 포집하였다. 포집된 기체 시료는 3개의 12mL Labco Exetainer에 각각 옮겨 담아, 하나는 가스 농도 측정을 하였고, 나머지 두 개는 안정 동위원소 분석용으로 이용하였다. 가스 시료의 메탄 및 이산화탄소 농도는 cavity ring-down spectroscopy (CRDS, Picarro, USA)로 측정하여 Equation 3에 전체 메탄 저장량을 계산하였다.

$$\text{Trapped methane stock (g CH}_4\text{ m}^{-3}\text{ soil)} = C_{\text{methane}} \times V_{\text{headspace}} / V_{\text{soil}} \quad (\text{Equation 3})$$

(where, C_{methane} is the concentration of methane in the gas sample ($\text{g CH}_4\text{ mL}^{-1}$), $V_{\text{headspace}}$ is the volume of the headspace in the Mason jar during wet extraction (mL), and V_{soil} is the volume of soil sample used for wet extraction (m^3))

기체 시료의 $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ 및 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 안정 동위원소 분석은 미국 캘리포니아 주에 있는 UC DAVIS의 stable Isotope Facility (SIF)에서 수행하였다. $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ 분석용 바이알은 Thermo Scientific Delta V Plus isotope-ratio mass spectrometer에 연결된 Thermo Scientific GasBench II + PreCon trace gas concentration system에서, $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ 용 바이알은 Thermo Finnigan Delta Plus XL isotope-ratio mass spectrometer에 연결된 Thermo Scientific GasBench II를 이용하였다. 메탄의 경우 Agilent GS-CarbonPLOT capillary column ($30\text{ m} \times 0.32\text{ mm ID} \times 3\text{ }\mu\text{m film thickness}$, 30°C , $1.0\text{ mL/min flow rate}$)을, 이산화탄소는 Agilent PoraPLOT Q GC column ($25\text{ m} \times 0.32\text{ mm ID} \times 10\text{ }\mu\text{m film thickness}$, 50°C , 2.0 mL/min 유량)을 사용하여 IRMS에 주입하여 기체 시료의 동위원소 측정을 수행했다. $\delta^{13}\text{C}$ -탄소 안정성 동위원소에 사용된 표준 물질은 각각 Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)였다. 탄소 안정성 동위원소 비율은 아래 Equation 4를 이용해 계산하였다.

$$\delta = (R_{\text{sample}}/R_{\text{reference}} - 1) \times 1000 \quad (\text{Equation 4})$$

(where, R_{sample} is the molar ratio ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ or $^2\text{H}/\text{H}$) of samples, and $R_{\text{reference}}$ is the molar ratio of international references. The δ values are conveniently presented in parts per thousand (‰))

각 토양 절단 시료 10g에서 토양 미생물 DNA를 추출하였으며, DNA 추출, 정제, library prep, raw sequence filtering은 2021년 스발바르 아드벤트달렌 시료와 동일한 방법으로 수행하였다. Shotgun metagenome 결과에서 메탄 생성균과 메탄 산화균 군집의 다양성과 풍부도를 분석하기 위해 퀄리티 필터링된 metagenome read에서 메탄 생성 및 메탄 산화에 관여하는 주요 기능성 유전자를 검색했다(*mcrA* encodes the α - subunit of the methyl coenzyme M reductase (MCR), *pmoA* gene encodes the β - subunit of the particulate methane monooxygenase (pMMO),

and *mmoX* gene encodes the α - subunit of the soluble methane monooxygenase (sMMO)). GraftMv0.14.025의 기능성 유전자 별 reference database (gtdbk)를 사용하여 *mcrA*, *pmoA*, 그리고 *mmoX*의 기능성 유전자 서열을 검색하고 추출했다. MicrobeCensus v1.1.126을 사용하여 추정된 genome equivalent 값으로 RPKG (reads per kb per genome equivalent) 통계량 기능성 유전자의 상대풍부도를 표준화하여 이후 분석에 이용하였다.

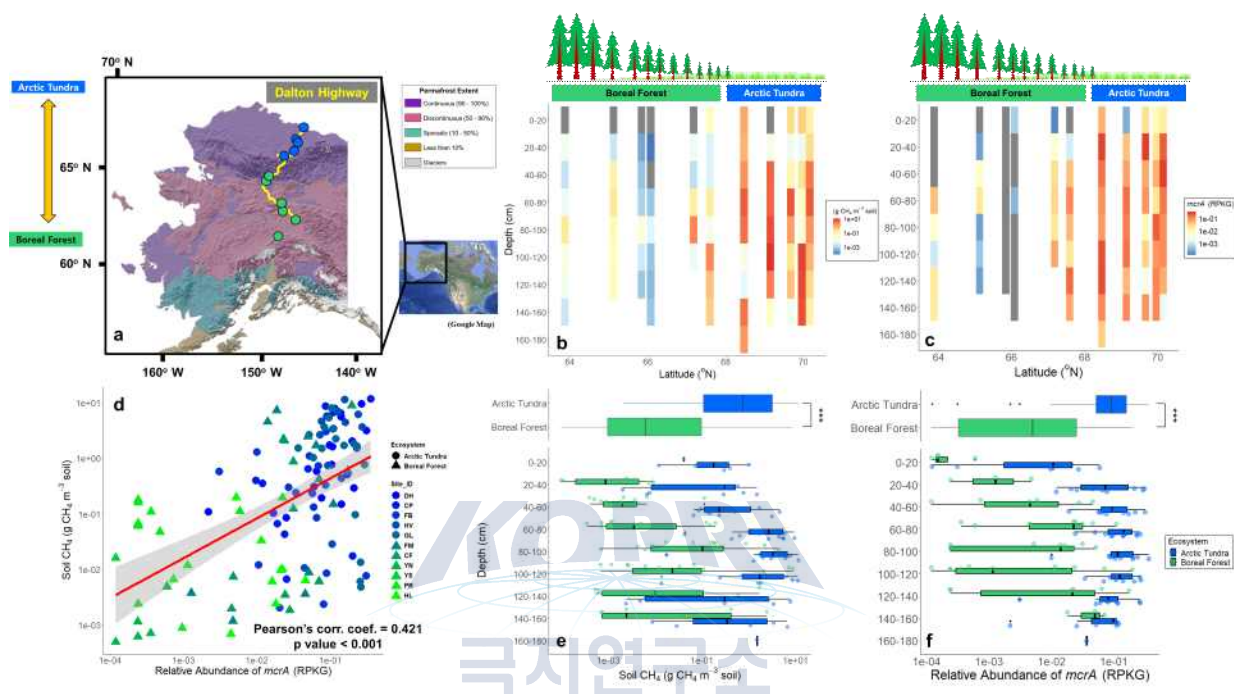


Fig. 37. Latitudinal distribution and depth profiles of soil CH₄ stock and relative abundance of methanogen in Alaskan permafrost. (a) Map of the study sites where the soil cores were collected, and ecosystem types and permafrost extent were displayed. The map was edited from the figures in published literatures. Latitudinal distribution of (b) soil CH₄ stock and (c) relative abundance of methanogen of each soil cores. Relative abundance of methanogen was obtained from abundance of metagenome-extracted *mcrA* functional genes and normalized by RPKG (reads per kb per genome equivalent) statistics. The depth was divided into 20 cm intervals, with red and blue indicating high and low values, respectively. (d) Relationship between soil CH₄ stock and relative abundance of methanogen (n=123). A linear mixed effect model was used and the error bands surrounding the red regression lines represent the 95% confidence interval of the correlation. The above box plot shows statistically significant differences between Arctic tundra and boreal forest (unpaired t-test, n=76 for Arctic tundra and n=70 for boreal forest, ***p<0.001). The thick central lines represent the median value, the boxed areas represent the interquartile range, and the whickers show the maximum and minimum values. Depth profiles of (e) soil CH₄ stock and (f) relative abundance of *mcrA* (RPKG).

기체 시료 분석 결과, 알래스카 동토 상부 1.8m에 저장된 메탄은 평균 $1.35 \pm 0.20 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ soil}$ 로 나타났으며, 알래스카 전체 면적으로 환산할 경우 대략 6 Tg CH_4 으로 나타났다. 토양 저장 메탄량은 위도 ($p < 0.001$)와 토양 깊이 (i.e. layers, $p < 0.001$)에 따라 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다. 토양 저장 메탄량은 위도가 증가함에 따라 같이 증가하였는데 ($r = 0.34$, $p < 0.001$) (Fig. 37b), 이는 고위도로 갈수록 낮은 평균기온에서 기인한 낮은 미생물 활성(메탄 생성 포함)이 예측됨이 일반적임을 고려하면 흥미로운 결과이다. 북극 툰드라($2.16 \pm 0.33 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ soil}$)는 평균적으로 한대산림($0.55 \pm 0.18 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ soil}$)보다 약 4배의 토양 저장 메탄량을 나타냈으며, 특히 토양 저장 메탄량 중간값의 경우 약 100배의 차이를 보였다(한대산림 0.61×10^{-2} 및 북극 툰드라 $0.75 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ soil}$) (Fig. 37b). 북극 툰드라와 한대 산림의 토양 저장 메탄량의 깊이별 분포는 토양 표층에서는 낮은 농도를 보이고 표층 아래에서 최고 농도를 보이는 뚜렷한 패턴을 나타냈다. 가장 높은 토양 저장 메탄량 평균값은 북극 툰드라($4.43 \pm 1.15 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ soil}$)와 한대산림($0.69 \pm 0.40 \text{ g CH}_4 \text{ m}^{-3} \text{ soil}$) 모두 80–100 cm 깊이에서 관찰되었으며, 이 층은 활동층과 영구 동토층 사이의 transition zone으로 추정된다(Fig. 37e). 따라서 북극 툰드라와 한대산림의 transition zone은 토양층 중 가장 큰 토양 CH_4 저장소 역할을 하며, 이는 이후 서술할 독특한 물리화학적 및 미생물학적 특성에서 비롯된 것으로 간주된다.

토양 코어 분석 결과, 토양 유기물 함량과 용존 유기탄소의 농도는 한대산림에서 더 높게 나타났는데 (Fig. 38d, e), 이는 한대산림의 우점 표층 식생인 가문비나무와 같은 목본류 식생이 북극 툰드라의 사초류와 이끼와 같은 우점 식생 보다 높은 일차생산량과 생물량 가지고 있어서 유입되는 유기물 자체의 양이 많기 때문에 토양 유기물 함량이 높은 것으로 보인다. 또한 한대산림은 북극 툰드라에 비해 평균기온이 높아 미생물 분해 활성도 높아, 용존 유기 탄소 농도가 높게 측정된 것으로 보인다. 토양 pH는 탄산암 기반암의 영향이 큰 북극 툰드라에서 8에 가까이 높게 나타났으며 (Fig. 38f), 총 용존 질소 및 암모늄이온의 농도도 북극 툰드라에서 더 높게 나타났다(Fig. 38g, h). 각 토양 물리화학적 인자들과 기체 농도 및 특성 사이의 상관관계를 Fig. 38j에 나타냈다.

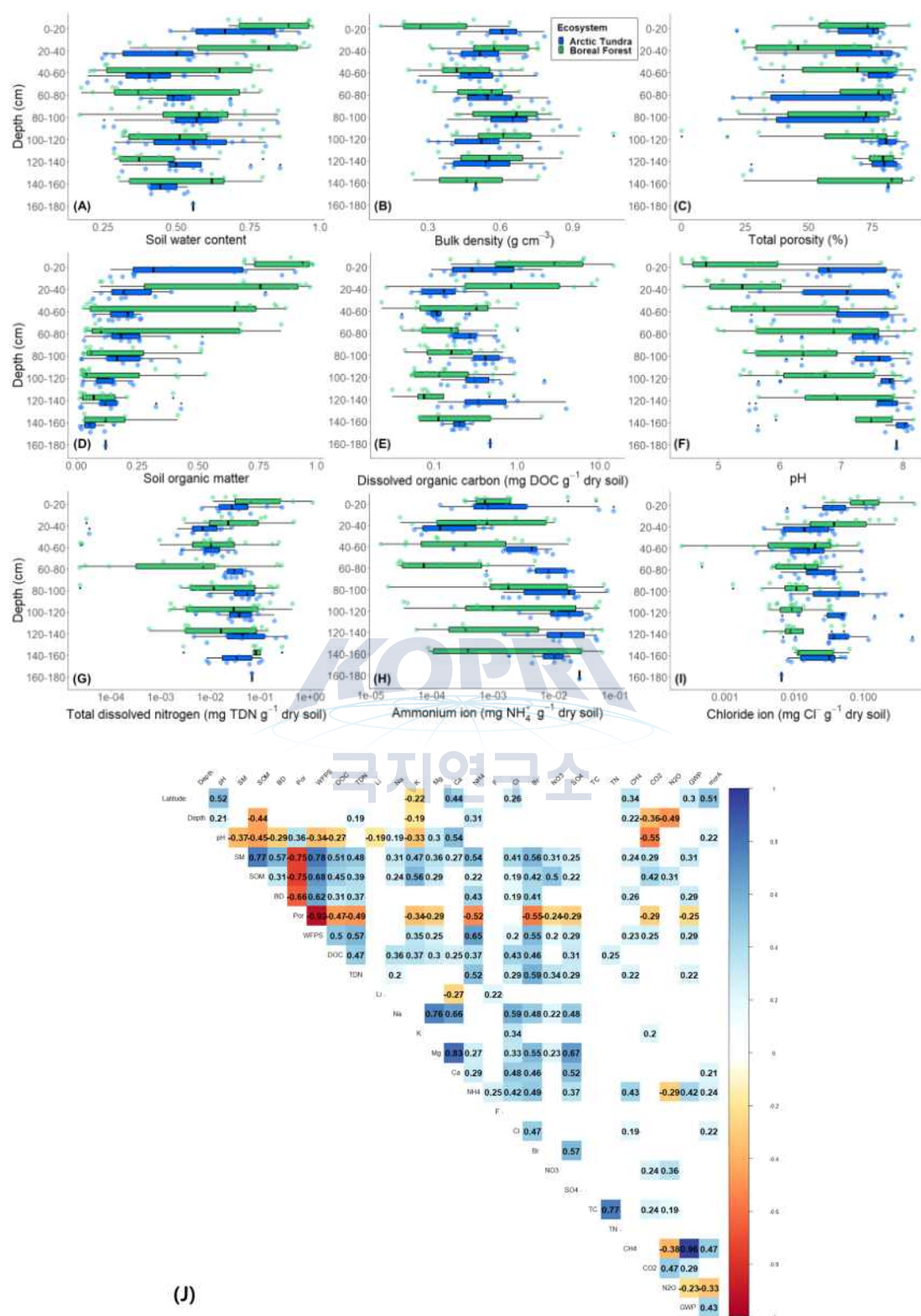


Fig. 38. (A–I) Physicochemical characteristics of soil samples and (J) Pearson's correlation coefficients between edaphic variables. Red and blue indicate negative and positive correlations, respectively.

본 연구에서 최대 토양 저장 메탄량이 transition zone에서 관찰된 원인은 (1) 물리적인 배치, (2) 풍부한 메탄 생성, 그리고 (3) 제한된 메탄 산화 세 가지의 가능성을 생각해 볼 수 있다. 먼저, 확산은 토양 시스템 내에서 기체 수송에 중요한 역할을 하기 때문에, 확산을 방해하는 조건은 transition zone에서 생성된 CH₄의 축적을 초래할 수 있다. 높은 토양 가밀도와 낮은 공극률은 토양 시스템 내 확산적 가스 수송의 통로 역할을 하는 토양 공극이 제한되어 있음을 보여주는 인자이고, 이는 토양 내 CH₄의 이동성을 감소시킬 수 있다. 토양 저장 메탄량의 분포와 유사하게, 두 생태계 모두 80–100 cm 토양층에서 가장 높은 토양 가밀도가 관찰되었으며(Fig. 38b), 유의하지 않지만 같은 층에서 더 낮은 공극률이 관찰되었다(Fig. 38c). 따라서, 80–100 cm 토양층의 더 높은 가밀도와 더 낮은 공극률은 메탄이 인접한 토양층으로 확산되는 것을 저해하여 이 층 내에 높은 메탄 농도를 나타낼 수 있다. 또한, 이러한 토양 특성은 표면으로부터의 산소 이동을 줄여 더욱 혐기 상태를 만들어 80–100 cm 토양층에서 메탄 생성을 활성화시키는 조건도 만들었다. 토양 가밀도의 증가와 공극률의 감소는 수리전도도의 감소로 이어져 확산에 의한 CH₄ 수송뿐만 아니라 80–100 cm 토양층 근처의 공극수 이동을 통한 용존 CH₄ 이동 또한 방해하여, 해당 토양층의 메탄 축적을 야기할 수 있다. 게다가, 동토의 동결–융해 주기는 겨울철에 토양 표면에서부터 불투과성 얼음층을 형성하여 CH₄의 대기 방출을 막고 CH₄의 하향 이동을 유발한다. 따라서 토양 CH₄의 깊은 토양층에서 축적은 일부 물리적인 배치효과에서 기인하는 것으로 생각된다.

기체 시료의 안정성 동위원소($\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ and $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$) 분석 결과, 토양에 갇혀서 저장되어 있던 메탄은 주로 미생물학적 메탄생성과정(특히, hydrogenotrophic methanogenesis)에서 기인했다는 근거를 얻을 수 있었다(Fig. 41). 메탄 생성균의 상대적 풍부도는 토양 CH₄ 저장량과 유사하게 위도에 따라 증가하는 경향을 보이며(Fig. 37c), 토양 저장 메탄량과 뚜렷하게 양의 상관관계(Pearson's correlation, $r=0.421$, $p<0.001$)를 가졌다(Fig. 37d). 북극 툰드라와 한대산림 사이의 메탄 생성균의 상대적 풍부도에는 유의미한 차이를 보였다($p<0.001$, Fig. 37f). 북극 툰드라와 한대산림에서 공통적으로 높은 상대적 풍부도를 나타내는 메탄 생성균 군집은 *Ca. Methanoflorens*로 나타으며, 그 다음으로 생태계에 따라서, 북극 툰드라의 경우 *Methanobacterium* 및 *Methanosarcina* 그리고 한대산림의 경우 *Methanoperedens* 등의 상대적 풍부도가 높게 나타났다(Fig. 39a). 메탄 생성균의 전체 군집구조를 비교하기 위해 NMDS plot을 그려본 결과, 북극 툰드라와 한대산림에서 발견된 메탄 생성균의 군집이 구분되었으며, 메탄 생성균 군집의 차이를 불러오는 원인으로는 토양 유기물 함량, pH, 암모늄 이온 농도 등으로 나타났다(Fig. 39b). 메탄 생성균의 깊이 분포는 transition zone에서 미세하게 최대값을 나타내는 경향을 보였지만, two-way ANOVA 등을 적용했을 때 통계적으로 유의하지 않았다(Fig. 37f and 39a). 따라서 한대산림에 비해 북극 툰드라에서 메탄 생성 균집의 풍부도가 더 높은 것은 두 생태계의 토양 저장 메탄량 차이를 설명할 수 있을지언정, 토양 저장 메탄량이 왜 transition zone에서 최대값을 보이는지에 대한 강력한 근거로서는 작용하지 못하는 것으로 확인되었다.

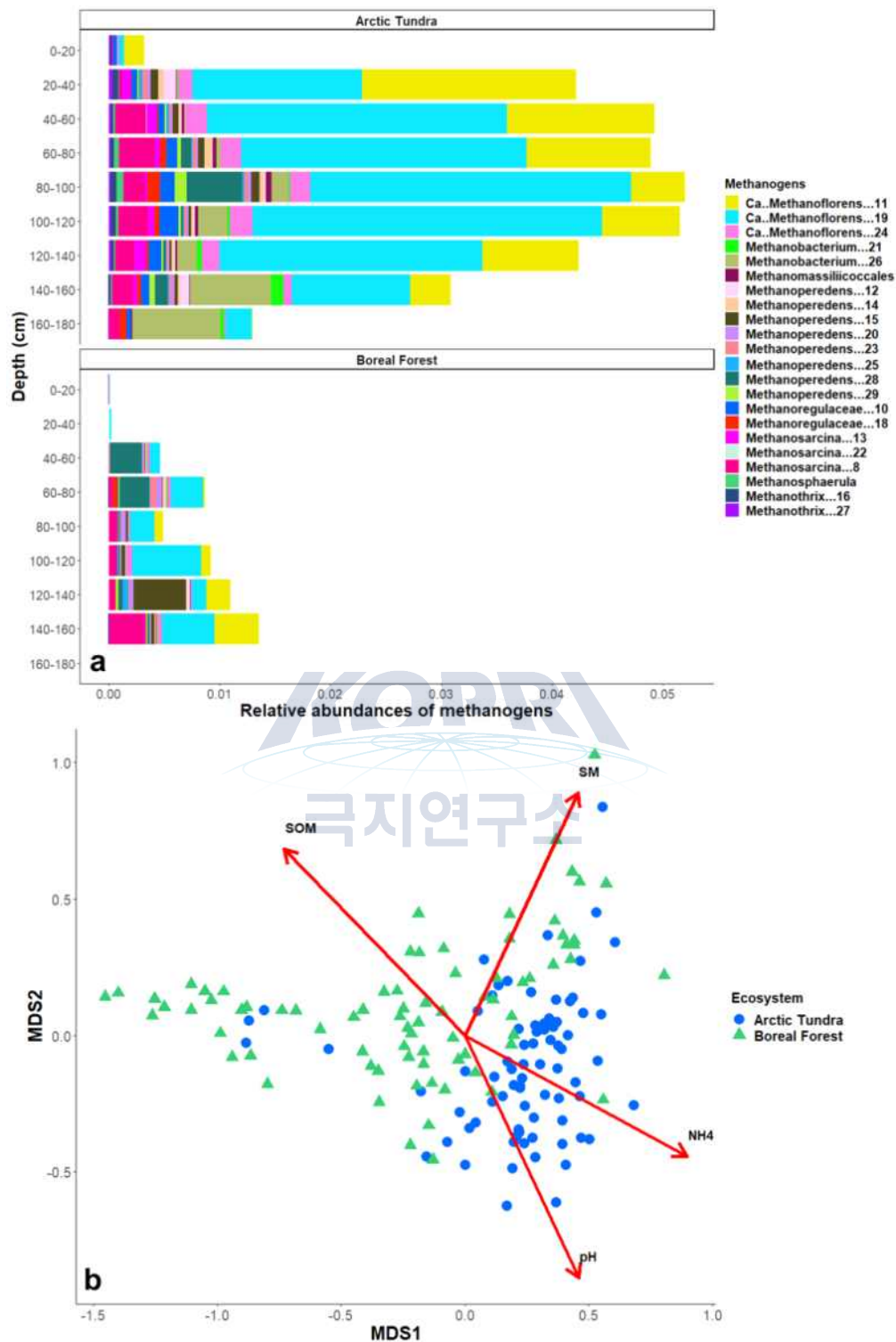


Fig. 39. Composition of methanogenic community. a Mean relative abundance of methanogenic MAGs according to ecosystem type and soil depth. b Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) ordination plot depicting changes in the composition of methanogenic communities. Ordinations are based on Bray–Curtis dissimilarity.

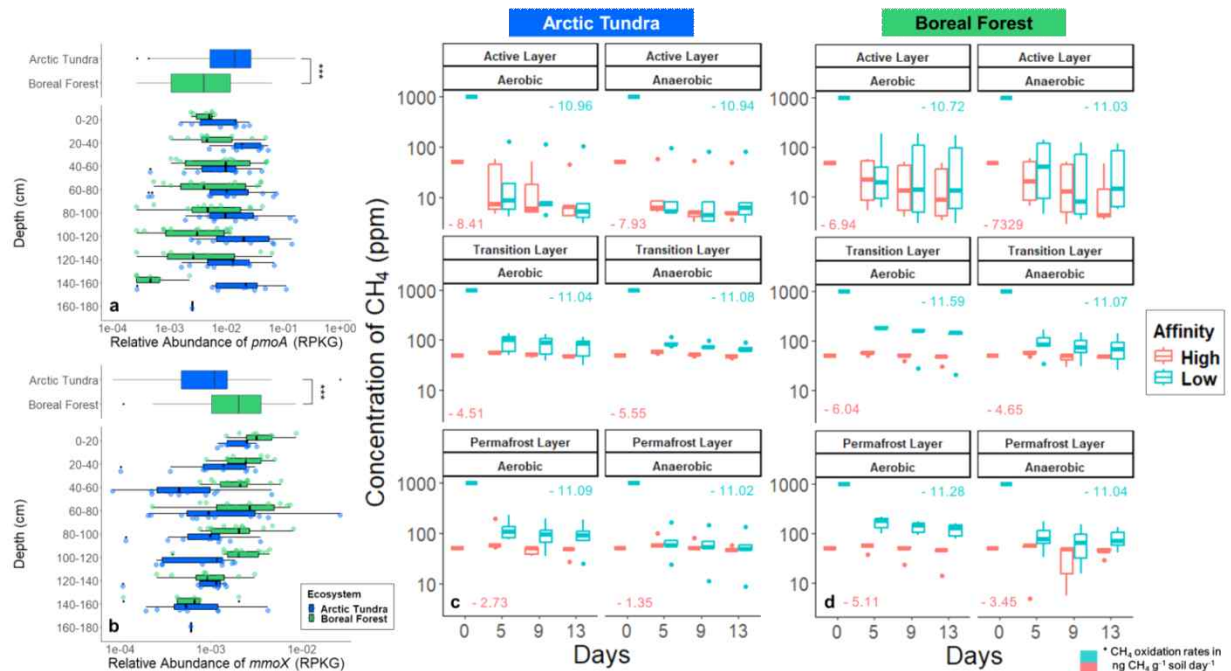


Fig. 40. Depth profiles of relative abundance of methane oxidizers and potential CH_4 oxidation rate. Different depth profiles of relative abundances of (a) *pmoA*, and (b) *mmoX* genes in Arctic tundra and boreal forest soils. The abundances of the genes were normalized using the RPKG (reads per kb per genome equivalent) statistics. The above box charts show statistically significant differences between Arctic tundra and boreal forest (unpaired t-test, $n=79$ for Arctic tundra and $n=78$ for boreal forest, $***p<0.001$). Results of the aerobic and anaerobic soil incubation experiment by layers under high (initial CH_4 conc. = 1000 ppm) and low (initial CH_4 conc. = 50 ppm) affinity CH_4 oxidation conditions using the soils of (c) Arctic tundra and (d) boreal forest. Numbers indicates potential CH_4 oxidation rate in $\text{ng CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ soil day}^{-1}$ calculated from the changes in headspace CH_4 concentration ($n=5$ for Arctic tundra and $n=6$ for boreal forest).

유사하게, *pmoA*와 *mmoX*의 상대 풍부도를 이용해 확인한 메탄 생성균의 분포 또한 생태계 유형 ($p<0.001$)에 따라서 통계적으로 유의한 차이를 보였지만, 깊이에 따른 분포는 역시 설명하지 못하는 것으로 나타났다(Fig. 40a, b). 그리고 *pmoA*와 *mmoX*의 분포 차이가 상반되게 나타났는데, *pmoA*는 북극 툰드라에서 한대산림 보다 더 높은 상대풍부도를 나타냈으나 *mmoX*의 경우는 그 반대로 나타났다 (Fig. 40a, b). 깊이별 메탄 산화 포텐셜을 실내 토양배양 실험을 통해서 분석한 결과, 북극 툰드라와 한대산림 모두 표층에서는 high affinity 및 low affinity 메탄 산화가 동시에 활성이 나타난 반면, transition zone과 영구동토층에서는 low affinity 메탄 산화만 활성을 나타내었다(Fig. 40c, d). 토양 표층은 대기와 맞닿아 있기 때문에, 대기 농도의 메탄을 산화하는 high affinity 메탄 산화 활성이 나타난 것으로 생각된다. Low affinity 메탄 산화의 경우 모든 토양 층에서 활성을 나타내고 있었는데, 이는 앞서 기체 시료 분석 결과 확인된 동토에 저장된 높은 농도의 메탄을 이용하는 메탄 산화균이 활성을 나타내고 있기 때문으로 보인다. 전반적으로 메탄 산화균의

상대풍부도나 메탄 산화 포텐셜의 깊이별 차이가 크게 나타나지 않아서, 메탄 산화(특히, 북극 동토 지역에서 활발할 것으로 예상되는 anaerobic oxidation of methane (AOM))가 토양 저장 메탄량의 분포에 미치는 영향은 상대적으로 미미할 것으로 예상된다.

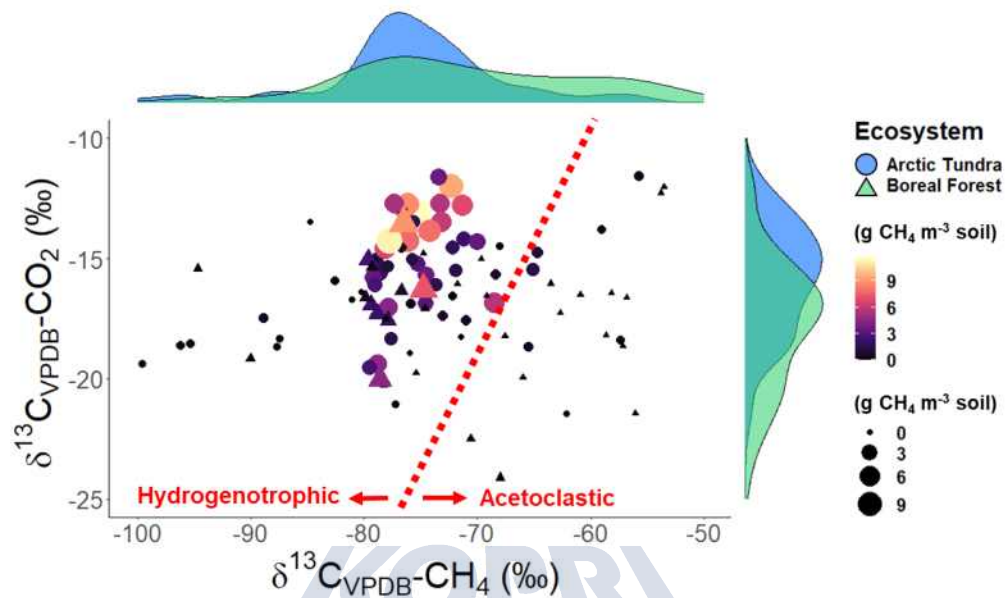


Fig. 41. ^{13}C stable isotope signatures of soil CH_4 and CO_2 . Isotopic composition of the extracted CH_4 and CO_2 gases from the soil cores. ^{13}C Reference material was Vienna Peedee Belemnite (VPDB). Bright and large points refer high soil CH_4 stock, and dark and small points refer low soil CH_4 stock ($n=72$ for Arctic tundra and $n=37$ for boreal forest). A red line indicates border of which methanogenic pathways are predominant, hydrogenotrophic or acetoclastic. Histograms show the distribution of each isotope signatures, and blue and green color indicate Arctic tundra and boreal forest, respectively.

종합하면, 토양 저장 메탄량의 분포는 한대 산림에 비해 북극 툰드라에서 더 높은 수치를 보이고, transition zone이 위치할 것으로 예상되는 80–100cm 깊이에서 최대값을 나타내며, 이는 메탄 생성균이 더 풍부하고 토양의 물리적 특성 분포가 주 원인인 것으로 판단된다.

○ 산불 발생에 의한 동토 유기물 분해 및 관련 미생물 군집 변화 연구

산불의 발생 빈도와 강도는 북극 툰드라와 한대산림에서 최근 지속적으로 증가하는 추세를 보이는데, 이렇게 산불이 발생할 경우 표층 식생 및 토양 유기물 연소, 토양 건조/융해에 따른 물리화학적 변화 등을 일으켜 다량의 토양 유기탄소 분해 및 대기 중 배출을 증가시킨다. 본 연구에서는 북극 툰드라와 한대산림에서 산불이 발생했을 때의 토양 유기물 거동/분해 및 관련 미생물 군집의 변화를 규명하고 두 생태계 간의 비교분석을 시도하였다. 이를 통해 산불이 동토 유기물 분해 및 관련 미생물 군집에 미치는 영향의 생태계별 차이에 대한 정보를 제공하고자 한다.

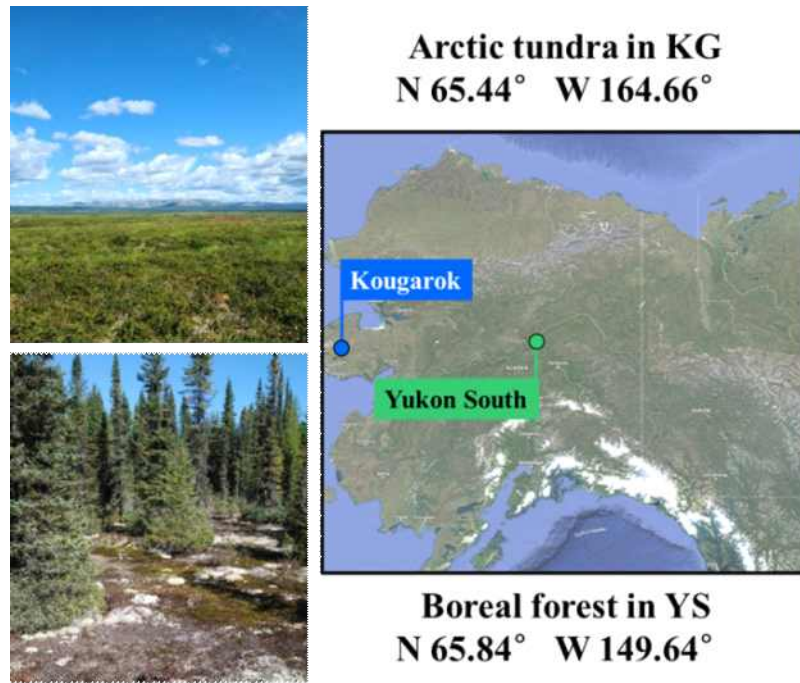


Fig. 42. Map of study site. Arctic tundra near Kougarok and boreal forest near Yukon South.

연구 대상지는 알래스카에 위치한 동일 위도 대의 북극 툰드라 1 지점과 한대산림 1 지점으로 정했다(Fig. 42). 각 사이트는 지난 몇 년 산불이 강하게 발생했던 지역으로, Nome에서 정북쪽으로 100마일 정도 떨어진 Kougarok 지역에 위치한 북극 툰드라(KG)와 Yukon 강 남쪽에 위치한 한대산림(YS) 두 곳이다. 두 사이트 KG 및 YS의 콘트롤 및 산불지점에서 각각 최대 1m의 토양 코어를 채취하였고, 이를 토양 생지화학 측정과 토양 미생물 DNA 추출 및 분석에 이용하였다. 토양 코어의 채취/운반/전처리/분석 등은 위 생태계 구배 연구에 적용된 방법론을 이용했다.

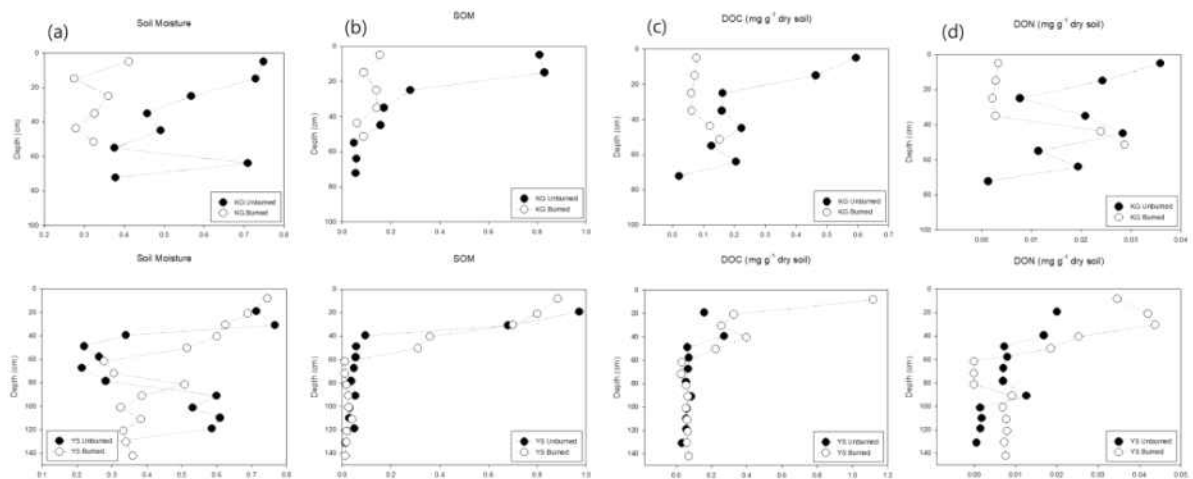


Fig. 43. Different influences of wildfire on soil moisture, soil organic matter (SOM) content, concentration of dissolved organic carbon (DOC), and dissolved organic nitrogen (DON) between Arctic tundra and boreal forest soils.

산불지역 토양 코어 분석 결과, 북극 툰드라에서는 산불이 토양 생지화학 인자에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 나타났다. 북극 툰드라 표층 토양의 토양 수분, 토양 유기물 함량, 용존 유기탄소, 용존 유기질소가 모두 산불에 의해 큰 폭으로 감소하였다(Fig. 43). 한대산림에서도 산불에 의한 표층 토양 수분 및 유기물의 감소가 일부 나타났으나 북극 툰드라의 경우보다는 상대적으로 낮았으며, 오히려 용존 유기탄소 및 용존 유기질소의 경우는 소폭 증가세를 보였다 (Fig. 43). 따라서, 산불은 한대산림 보다는 북극 툰드라 토양에서 훨씬 대규모의 토양 유기물 감소를 유발할 것으로 예측된다. 이는 두 가지 기작이 가능한데, 하나는 산불 당시 식생 바이오매스와 토양 유기물이 직접적으로 연소되어 대기 중으로 이산화탄소의 형태로 배출되는 것이고, 다른 하나는 산불 이후 가속화된 유기물 분해 속도에 의한 사후적 토양 유기물 분해이다. 이를 확인하기 위해 각 지점 표층 토양을 Fig. 44a에 나타난 조건을 가해 enzymic latch 강도 규명 인큐베이션 실험을 진행하였다. 대조구 조건은 혐기조건으로 유지하였고, 순서대로 호기조건 및 호기조건+phenol oxidase 첨가(*Agaricus bisporus* 추출 laccase) 조건을 구성하고 각 조건별 반응의 차이(본 연구에서는 토양 유기물 분해에 의한 이산화탄소 발생량의 차이)를 이용하여 enzymic latch 기작을 확인하였다. 결과에서 보이는 바와 같이 한대산림에서 산불이 발생하였음에도 불구하고 북극 툰드라에 비해 enzymic latch 기작이 여전히 잘 작동하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 북극 툰드라 산불이 산불 이후 시기에 토양 유기물이 상대적으로 분해되기 쉬운 환경을 조성하여 유기물의 지속적인 분해 및 대기 중 방출을 유발할 가능성이 높음을 알 수 있다.

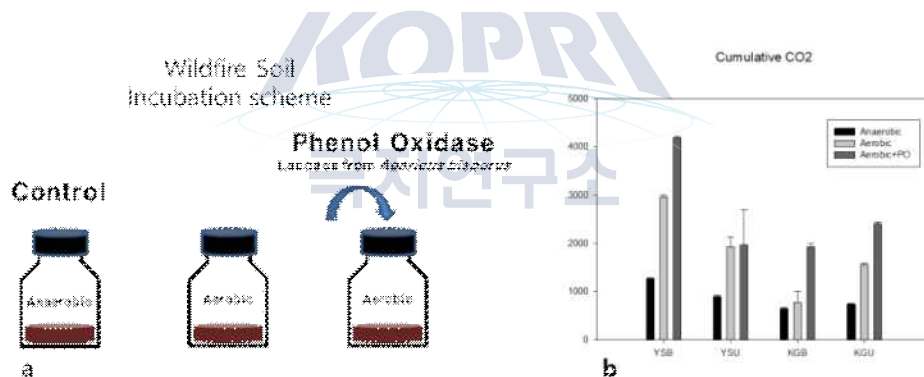


Fig. 44. The incubation experiment for determining enzymic latch mechanism. (a) Schematic diagram for the incubation and (b) results.

산불은 북극 툰드라와 한대산림 토양 모두에서 토양 미생물 군집에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig. 45). 한대산림에서는 모든 토양 깊이에서 Proteobacteria의 상대풍부도가 증가하는 것이 관찰되었으며(Fig. 46), 그 외 phylum에서는 그다지 주목할만한 상대풍부도 변화가 관측되지는 않았다. 그러나 북극 툰드라에서는 특히 Chloroflexi와 Rhizobiales의 표층에서의 증가가 관찰되었는데, 이들 분류군은 토양 유기물을 분해하는 체외효소 생성에 깊게 관여하고 있는 것으로 알려져 있으며, 따라서 북극 툰드라에서는 산불이 이들 분류군의 풍부도를 증가시켜 체외효소 활성에 의한 토양 유기물 분해를 가속화할 가능성을 보여준다.

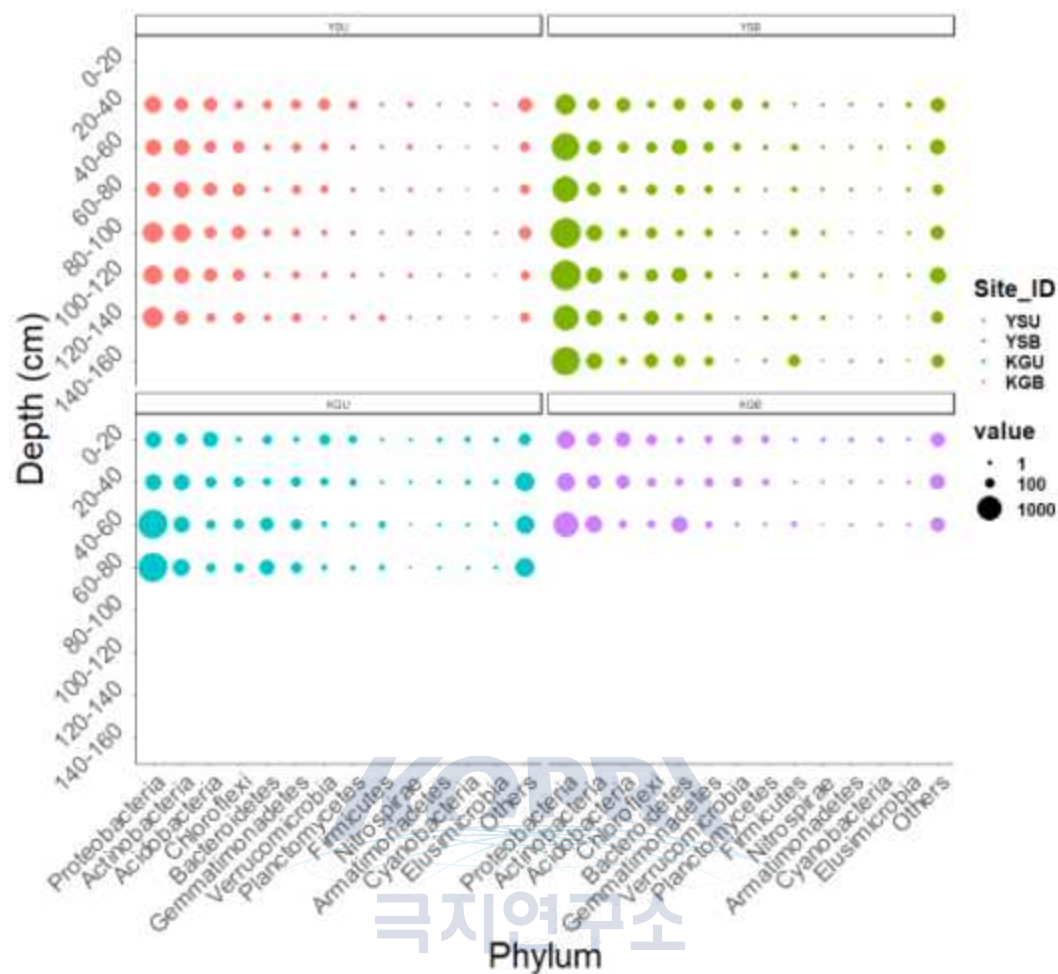


Fig. 45. Changes in relative abundance of bacterial phylum affected by wildfire in Arctic tundra and boreal forest soils.

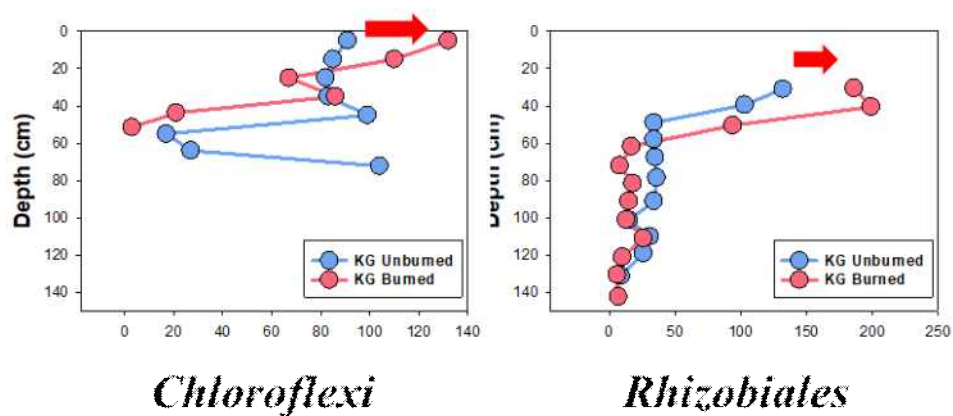


Fig. 46. Changes in abundance of *chloroflexi* and *rhizobiales* affected by wildfire in Arctic tundra soils.

요약하면, 북극 툰드라의 산불은 토양 유기물이 미생물학적 분해에 취약한 조건을 조성하는데 반해, 한대산림의 산불은 목본류 바이오매스의 불완전연소 등을 통해 토양에 잔존 피놀릭 물질을 제공하여, enzymic latch 기작을 어느 정도 유지시켜 유기물 분해를 저해시키고 상대적으로 안정한 상태를 유지하게 할 가능성이 높은 것으로 판단된다(Fig. 47). 따라서, 산불 이후 시기의 탄소 배출 관점에서 한대산림보다 북극 툰드라가 산불에 더 취약할 수 있음을 보여준다.

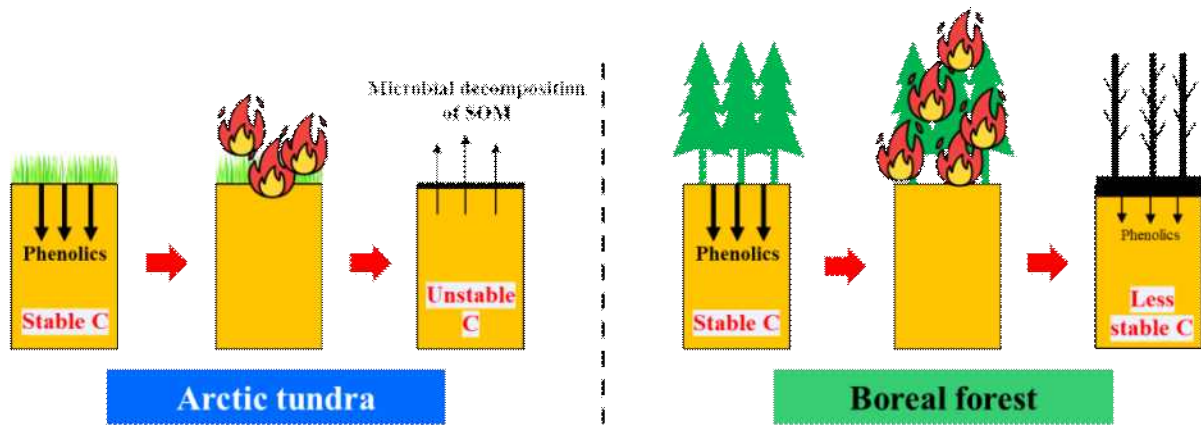


Fig. 47. Schematic diagram of different influences of wildfire on soil organic matter decomposition and stability between Arctic tundra and boreal forest soils.

다. 미답지에서 동토 생태계 국제 공동 연구

○ 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 수역이다. 캐나다 극지 지식청(POLAR)의 고위도 북극 연구기지(CHARS)에서 육상 연구를 위해 설정한 곳이다. 캐나다 연구팀은 그리니어 호수 주변의 식생 분류를 통해, 이 생태계의 특성을 결정하는 가장 중요한 요인은 겨울철 강설로부터 보호되는 정도와 토양 수분 함량 구배임을 밝히고, 크게 4개의 생태형에서 주요 환경인자 모니터링을 계획/실시하고 있다: 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 중이다.

– 그린란드: 그린란드 일대에서 수행되었던 토양 미생물 특성 연구에 대한 사전 문헌 조사 수행하였다. 기존에 그린란드 대륙 자체에서 수행된 토양 미생물 특성 연구는 10개 미만이다. 주로 그린란드 동부와 서부 해안, Station Nord 주위에서 미생물 특성 연구가 진행되었다. 최근 Station Nord에서 2020년에 기후변화모사에 따른 미생물 특성 변화 연구결과가 보고된 바 있다. 하지만 본 연구팀에서 탐사 예정인 Sirius Passet 지역에서의 토양 및 미생물 특성 연구는 현재까지 보고된 바 없다. 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 있다.

– 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 분야를 포함하고 있다. 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 포함하고 있다. 러시아 바라노바 기지가 위치한 볼세비키 섬의 식생 조사 결과 고위도 북극의 식생 군집의 특징을 보인다.

○ 캐나다 IMA의 실험사이트의 생태계 특성

– 대기 환경 인자 (온도, 풍향, 풍속)

CHARS 연구진들이 2016년부터 모니터링 중인 환경인자 자료를 공유해주어 대기 온도 연변화와 겨울철(10월-5월) 풍향·풍속 자료를 정리하였다. 여름철 평균온도는 10-15℃, 겨울철은 -40℃까지 떨어지고, 겨울 주 풍향은 북서풍이었다.

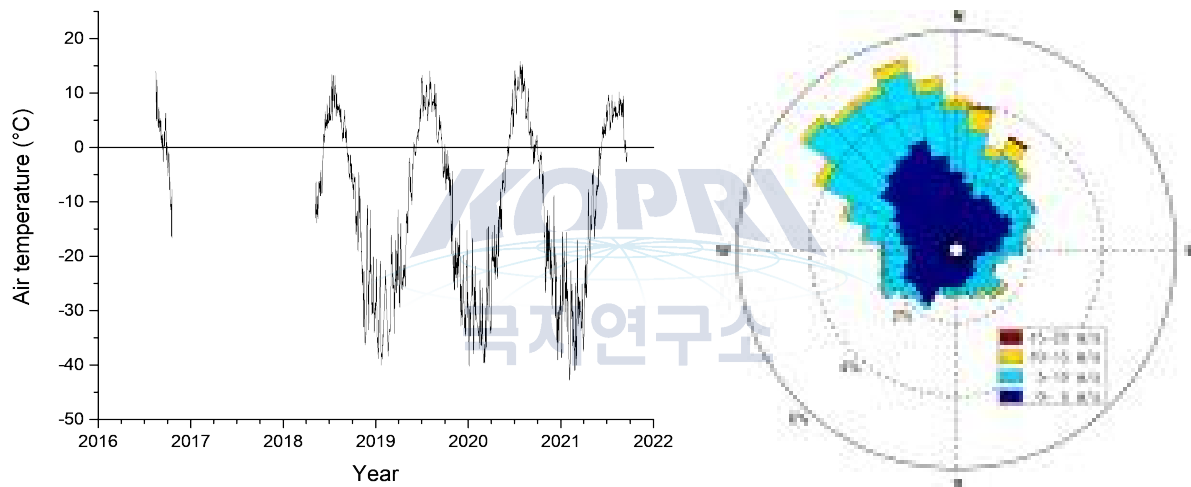


Fig. 48. Mean air temperature and wind speed and direction during winter (October–May) in IMA (data shared by POLAR).

– 식생 군집 조사

2022년 7-8월 캐나다 CHARS 연구지원을 받아 IMA 현장조사 수행하였다. CHARS에서 환경인자를 모니터링하는 영역 중, 주요 4곳 식생분포 지역인 Dryas-Carex, Cassiope-Dryas (snow bed), Shrub-sedge fen, Sedge fen에서 식생 피도 조사를 수행하였고(Table 11), Dryas-Carex 군집은 가장 건조한 지역으로서, 식생 피도가 가장 낮았다. Cassiope-Dryas 군집은 눈이 늦게까지 남아있는 움푹 패인 지역에 위치하지만, 수분함량이 높게 유지되지는 않아 Dryas 식물이 더 우점하였고, Cassiope의 피도

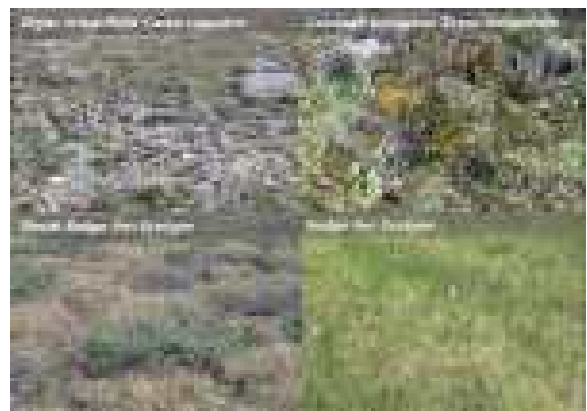


Fig. 49. Four vegetation groups in IMA

는 높지 않았다. Salix-Sedge는 사초과 식물이 우점하였고, Salix는 전체 면적의 25%내외로 패치를 이루며 분포하였다. Sedge fen은 수분함량이 가장 높은 곳으로 대부분 *Carex aquatilis*가 분포하였고, 소수의 수생, 습생 식물들이 낮은 피도로 존재하였다.

Table 11. Vegetation coverage in four ecotypes of IMA

	Dryas-Carex					Cassiope-Dryas					Salix-Sedge					Sedge Fen				
Coordinates	N68° 12.672, W104° 54.024					N68° 12.652, W104° 54.104					N68° 12.770, W104° 52.673					N68° 12.640, W104° 52.789				
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	60	50	30	45	50	65	70	70	70	80	85	80	70
<i>Carex aquatilis</i>											30	40	45	60	45	70	80	90	80	70
<i>Carex</i> spp.	5	7	10	5	10	5	7	7	10	10										
<i>Cassiope tetragona</i>						10	12	15	20	12										
<i>Dryas integrifolia</i>	25	50	45	25	50	25	35	35	10	15	20	15	15	10	25	1	5			
<i>Salix richardsonii</i>						1	1	2		1	5	12	15	5	20		10	5	10	
<i>Arctostaphylos alpine</i>					2			1												
<i>Betula nana</i>		1				1														5
<i>Eleocharis acicularis</i> ssp. <i>alpestris</i>																				
<i>Eleocharis angustifolia</i> ssp. <i>alpestris</i>																				
<i>Hedysarum boreale</i>					1															
<i>Hypericum integrifolium</i>					1															
<i>Salix</i> spp.																				
Lichen	5	5	5	7	5	20	25	1	10	5	5	5	1							
Moss	5	5	1	1	1	2	5	2			2	5	10	5	5	10	5	15	10	
<i>Oxytropis magdalenae</i>		1	1	5																
<i>Pedicularis albicollaris</i>																				
<i>Ranunculus</i> sp.																				
Rock						50	2													
<i>Salix ventricosa</i>											1		5							
<i>Saxifraga oppositifolia</i>																				

- 토양 특성

Cassiope-Dryas 군집은 유기물층 하부에 거의 자갈로 이루어져 있어, 미네랄층 시료를 채취하지 못하였고, 유기물 층에서 fibric과 sapric materials를 구분하여 시료를 채취하였다. 캐나다 IMA의 4개의 식생군집별 토양특성 분석 결과, Sedge fen ecotype에서 토양수분함량과 전기전도도가 가장 높고, pH는 가장 낮았다. Dryas-Carex 군집과 Cassiope-Dryas 군집의 토양 특성은 유사하였고, Salix-Sedge 군집은 건조 툰드라와 Sedge fen 중간의 특성을 보였다. Sedge fen 지역은 용존 유기탄소 함량이 가장 높았고, Salix-Sedge, 건조툰드라 순으로 감소하였다. Sedge fen의 미네랄층의 용존유기탄소 함량은 다른 지역보다 매우 높았고, Salix-Sedge 군집의 미네랄층에서 TOC/TN비율이 가장 높게 나타났고, 나머지 토양은 11-13 사이의 값을 나타내었다. Sedge fen과 Salix-Sedge 군집은 미사 함량이 70%이상, 점토 함량이 약 20%로 모래의 함량이 10%이내이었으나, Dryas-Carex 군집에서는 모래와 미사가 40-50%, 점토 함량이 10% 이내로 앞서 다른 식물군집과 다른 특성을 보였다.

Cassiope-Dryas(CD), Dryas(D), Sedge(Se), Salix-Sedge(SS) 4 지점에서 채취한 식물체의 탄소, 질소 함량 및 동위원소 분석 결과, Cassiope 식물이 탄소 함량이 가장 높고, 질소 함량이 가장 낮았다. 질소 함량의 변화는 식물별로 뚜렷하지 않았으나, 탄소의 경우 식물 군집 내 분포와 상관없이, 식물별 탄소 함량의 범위가 유사하였다(Table 13). 이는 C,N 동위원소비(Fig. 50a)에서도 일관된 패턴으로 나타났다.

식물 군집별 토양 내 탄소, 질소 함량 분석 결과, 습한 지역인 Se와 SS 지역에서의 질소 함량이 높고, 건조지역인 CD와 D에서는 함량이 매우 낮았다(Table 14). 탄소 동위원소비는 mineral layer에서 더 높은 패턴을 나타내었고, 습한 지역보다는 CD에서 더 높은 값을 나타내었다 (Fig. 50b). 이는 건조한 지역에서 분해가 많이 이루어짐으로 동위원소의 값이 높은 것으로 사료된다. 질소 동위원소는 습한 지역인 Se와 SS에서 높았다.

Table 12. 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>	
Soil Layer	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
TOC(mg/g)	0.36±0.113	0.03±0.015	0.33±0.038	0.15±0.080	0.51±0.104	0.04±0.017	0.69±0.046	0.16±0.070
TN(mg/g)	0.030±0.008	0.003±0.002	0.028±0.006	0.013±0.008	0.042±0.011	0.002±0.001	0.061±0.005	0.012±0.006
TOC/TN	11.7±1.02	11.9±4.54	12.1±1.49	11.5±0.82	12.5±1.24	25.3±6.74	11.3±1.19	13.6±1.23
Sand (%)	-	48.5±10.8	-	-	-	5.7±0.7	-	6.2±4.2
Silt (%)	-	41.7±5.9	-	-	-	71.0±5.2	-	77.5±2.1
Clay (%)	-	9.8±5.6	-	-	-	23.3±4.8	-	16.4±3.5

Table 13. C & N contents in plant species under different vegetation types in IMA, Canada

Community	Plant	#	C(%)	SD	N(%)	SD
CD	Cassiope	5	51.3	2.9	0.86	0.05
	Dryas	6	48.0	0.7	1.48	0.23
	Sedge	4	44.3	0.4	1.64	0.28
D	Dryas	6	46.9	0.7	1.33	0.18
	Sedge	3	43.1	0.8	1.26	0.40
Se	Moss	4	38.5	0.9	1.40	0.08
	Sedge	4	42.2	0.5	1.76	0.12
SS	Dryas	5	42.8	0.5	1.33	0.07
	Salix	3	40.6	0.5	1.83	0.10
	Sedge	5	40.1	0.5	1.57	0.11

Table 14. Soil organic C & total N contents under different vegetation types in IMA, Canada

Community	Layer	#	C (%)	SD	N (%)	SD
CD	Org	6	36.0	3.9	2.14	0.26
	Oa	2	23.5	13.0	1.54	0.78
	Min	1	0.8		0.08	
D	Org	5	33.7	4.6	2.22	0.37
	Min	4	1.2	0.5	0.09	0.03
Se	Org	5	44.4	0.6	2.84	0.12
	Min	5	8.6	3.1	0.58	0.20
SS	Org	5	40.5	2.8	2.72	0.26
	Min	5	2.6	1.5	0.19	0.11

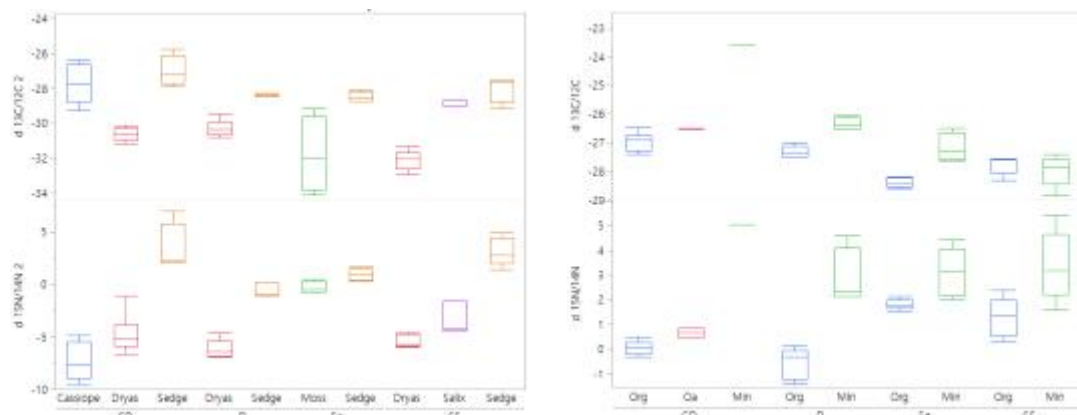


Fig. 50. C and N isotopes ratios in each plant species (left) and in soil layers (right) under different vegetation types.

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

• 캐나다 IMA 사이트 토양 미생물 군집 분석

캐나다 IMA 사이트를 대상으로 4가지 다른 식생 타입 별 세균 군집 분석 결과 Cassiope-Dryas 혼재된 식생의 토양 세균 다양성이 상대적으로 낮게 검출되었다(Fig. 51). 세균 문(phylum) 수준의 분포에서는 Sedge의 경우 다른 식생 타입들에 비해 Firmicutes, Bacteroidota, Chloroflexi의 비중이 상대적으로 높게 나왔다. 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 추정된다. 식생 타입 별 세균 군집 구조가 나누어지며 특히 Sedge와 Salix-Sedge 타입이 다른 식생들과는 확연히 구분된다. 이는 앞서 문 수준의 분포 차이에서 드러난 바와 같이 Sedge 식생 하부에 존재하는 혐기 환경 세균들의 우점에 기인한 것으로 판단된다. 토양 타입 별로도 표층 유기물 토양과 저층 미네랄 토양 간에 확연한 세균 군집구조 차이를 보이는데 이는 토양 깊이에 따른 세균 분포 차이일 것으로 판단된다(Fig. 52).

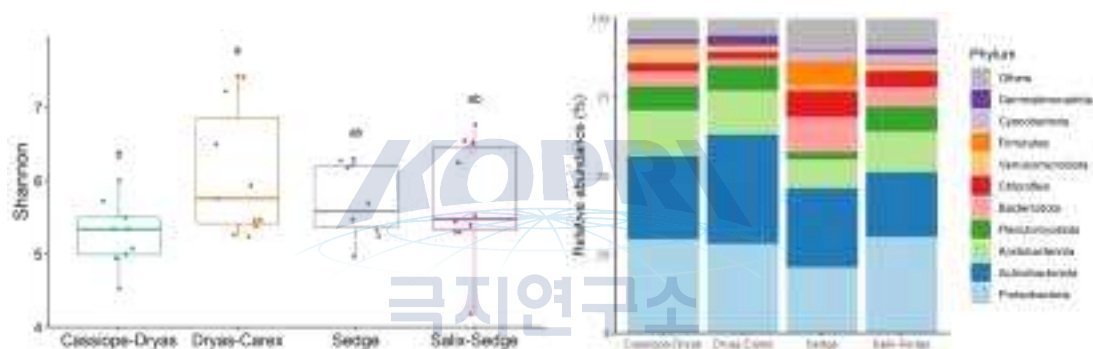


Fig. 51. Comparison of bacterial diversity and phylum composition between four different vegetation types in IMA site, Canada.

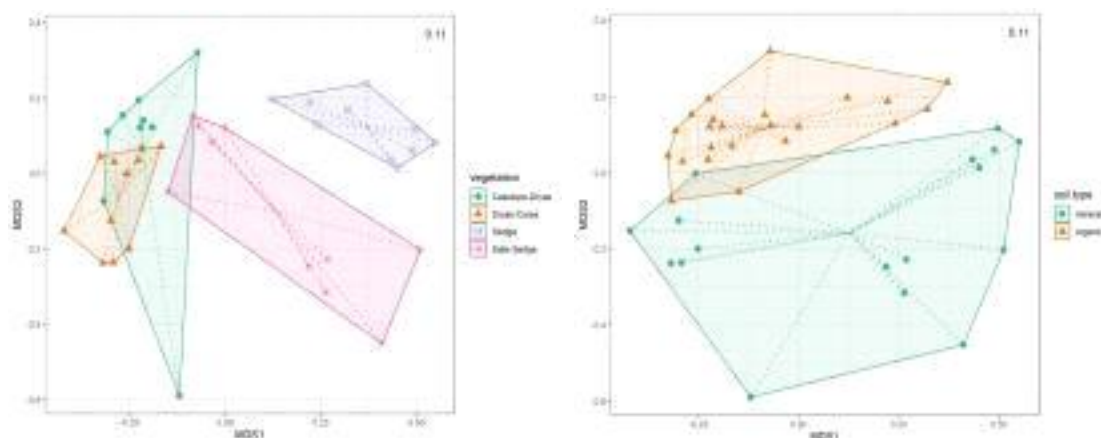


Fig. 52. NMDS displaying bacterial community structure with different vegetation and soil types in IMA site, Canada.

○ 그린란드 고위도 북극 미답지 토양 및 미생물 특성 조사

– 그린란드 고위도 북극 미답지에서 식생에 따른 토양 특성 비교 분석

그린란드 Sirius Passet지역의 토양 분석 결과(Table 15), 일반적으로 Carex, Cassiope, Dryas 식생 아래 토양 화학적 특성은 매우 넓은 범위로 분포되어 있었다. 대부분 염기성 토양에 서식하였고, 특히 Oxyria 근권의 pH가 8.7로 매우 높았다. Cassiope, Dryas, Carex 식생 아래 유기탄소 함량이 높았고, 나머지 식물근권은 2%이하의 값을 나타내었다. 토성 또한 시료간 편차가 컸으나, 미사 함량이 가장 높았고, Saxifraga는 모래와 미사 함량이 매우 다양한 지역에서 서식하였다.

Table 15. Soil physico-chemical properties under different vegetation groups in Sirius Passet, Greenland

	MC	pH	EC	TC	TIC	SOC	TN	C/N ratio	Sand	Silt	Clay
Carex	124.1 (83.9)	7.4 (0.5)	140.8 (22.4)	6.4 (2.8)	0.5 (0.3)	5.9 (3.1)	0.4 (0.2)	13.1 (1.3)	9.6 (13.0)	70.0 (9.3)	20.4 (8.8)
Cassiope	70.7 (32.3)	7.2 (0.1)	209.6 (44.1)	11.5 (3.7)	0.5 (0.1)	11.0 (3.6)	0.7 (0.2)	14.7 (0.7)	21.4 (7.2)	63.1 (2.7)	15.5 (5.6)
Dryas	54.4 (67.1)	7.8 (0.7)	178.9 (70.2)	7.7 (9.1)	1.3 (0.5)	6.4 (9.3)	0.5 (0.7)	8.8 (3.7)	24.8 (11.7)	62.8 (9.2)	12.4 (9.3)
Oxyria	9.6 (2.0)	8.7 (0.2)	245.5 (25.3)	2.1 (0.3)	1.2 (0.2)	0.9 (0.4)	0.1 (0)	7.5 (1.6)	32.9 (3.3)	57.2 (2.7)	9.9 (1.8)
Salix	20.8 (10.4)	8.2 (0.3)	185.2 (45.3)	3.4 (3.4)	1.4 (1.4)	2.0 (2.2)	0.2 (0.1)	9.3 (4.6)	28.4 (17.2)	61.7 (14.4)	9.9 (2.9)
Saxifraga	24.3 (13.2)	7.5 (0.6)	105.9 (22.2)	2.8 (1.1)	0.7 (0.4)	2.1 (1.5)	0.1 (0.1)	13.2 (2.1)	40.8 (28.4)	47.8 (21.8)	11.4 (6.8)
Silene	10.3 (3.1)	8.4 (0.1)	236.8 (64.2)	1.9 (0.8)	0.7 (0.4)	1.2 (0.7)	0.2 (0)	7.2 (2.7)	17 (5.9)	69.7 (4.5)	13.3 (1.8)

– 그린란드 토양 시료의 탄소 · 질소 동위원소 분석

그린란드 Sirius Passet지역의 토양 탄소, 질소 안정동위원소 분석 결과(Fig. 53), 모든 식물군에서 $-26 \sim -28$ 사이의 값을 나타내어 C3식물의 특성을 보였고, 식물 군집에 따른 특이성은 뚜렷하게 보이지 않았다. 질소 안정동위원소 또한 대부분 0 이상의 값을 보였다. Cassiope 군집 아래 토양의 경우 $\delta^{15}\text{N}$ 은 다른 식물군집 아래 토양보다 depleted되어 있는데, 캐나다 IMA 식물 동위원소 분석 결과 Cassiope식물의 잎이 다른 식물체들보다 특히 더 $\delta^{15}\text{N}$ 이 낮은 것을 볼 수 있다. 따라서, 토양 $\delta^{15}\text{N}$ 의 낮은 값은 식물체에서 유래된 특성이 토양에 반영된 것으로 여겨진다.

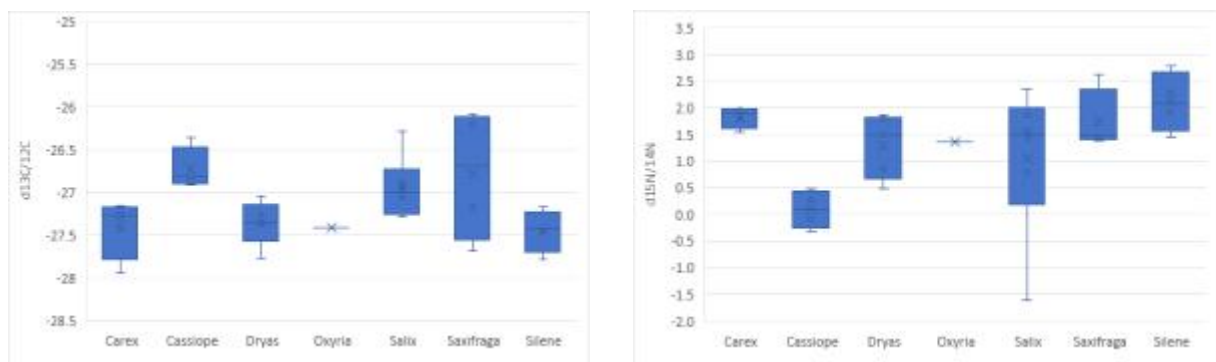


Fig. 53. C and N isotopes ratios in soil layers under different vegetation types.

– 그린란드 고위도 북극 미답지에서 식생에 따른 토양 미생물의 군집 구조

북그린란드 Sirius Passet 지역에서 식물 타입 별로 근권 미생물 군집 분포를 살펴본 결과 세균 군집의 경우 문(phylum) 레벨 분포에 차이가 크지 않은 반면, 진균 군집은 식생의 종류에 따라 큰 차이를 보였다(Fig. 54). Salix, Dryas, Oxyria 식물 속에서는 Basidiomycota가 우점하고, Silene, Cassiope tetragona, Saxifraga 에서는 Ascomycota가 우점하였다. 북위 80도가 넘는 최북단 육상 지역이지만 지구상의 다른 지역들의 근권 토양에서 발견되는 세균, 진균 군집 구성과 큰 차이를 보이지 않았다.

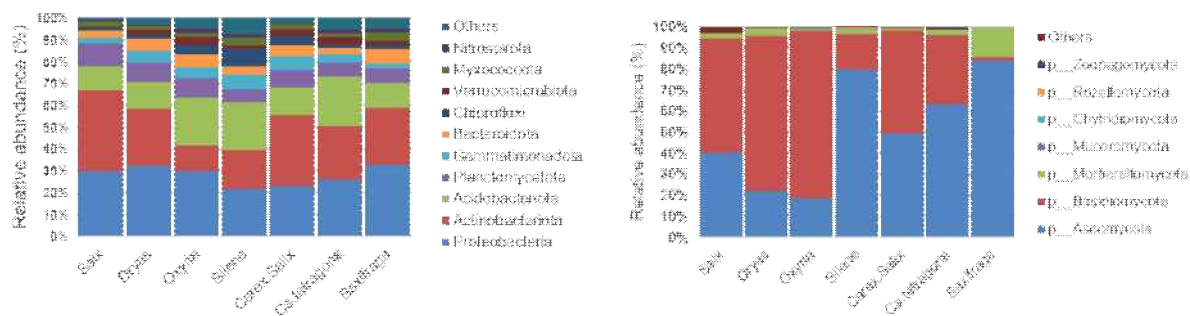


Fig. 54. Differences in relative abundances of bacterial (left) and fungal (right) phylum among cover vegetation types in the high Arctic soils of Sirius passet, Greenland.

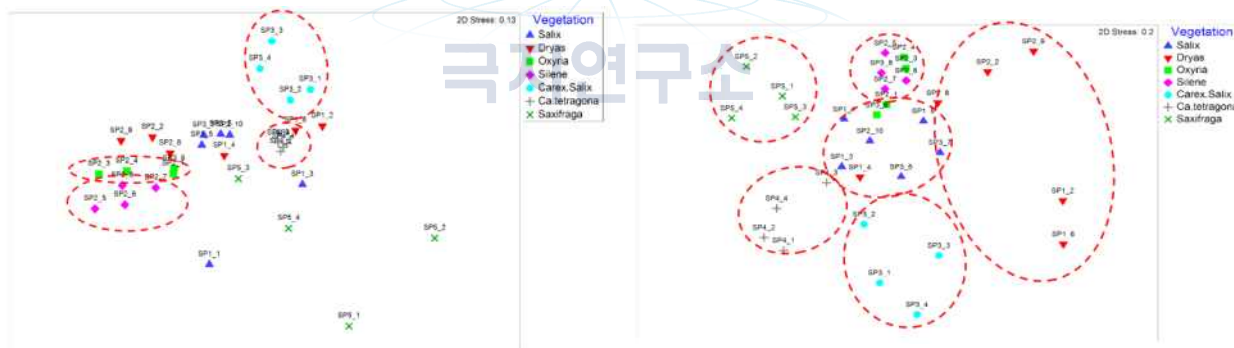


Fig. 55. Differences in community structure of bacterial (left) and fungal (right) phylum among cover vegetation types in the high Arctic soils of Sirius passet, Greenland.

근권 미생물의 군집구조를 살펴본 결과, 진균 군집이 세균 군집에 비해 식생 타입 별로 유사하게 묶이는 경향이 더 크게 나타났다(Fig. 55). 이는 세균 군집에 비해 진균 군집이 각 식물 종 특이적인 특성과의 연관성이 더 큼을 의미하며, 세균 군집은 식물 종 간 차이 외에 다른 요소도 군집구조를 결정하는 데 큰 요인이라 판단된다.

○ 북극 동토 미답지 캐나다 IMA와 그린란드 북극 미답지 생태계 구조 종합 분석

– 북그린란드 Sirius Passet과 캐나다 IMA 사이트 간 미생물 특성 비교 분석

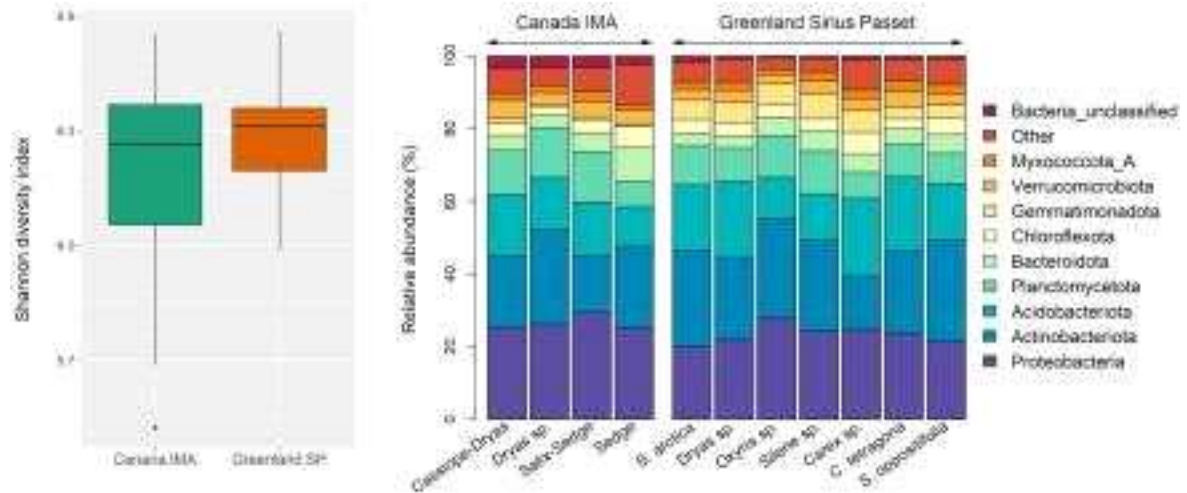


Fig. 55. Comparison of bacterial diversity (left), and bacterial phylum composition (right) between Canada IMA and Greenland Sirius Passet areas.

두 사이트 간 비교를 위해 표층 유기물 토양만을 포함하여 비교를 수행하였다. 북그린란드 Sirius Passet과 Canada IMA 지역 간 세균 군집 다양성(Shannon index)과 문(phylum) 레벨 분포가 유사하여 사이트 간 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 식생 타입별로도 문(phylum) 레벨에서 유사하게 분포하는 것으로 나타났으며, 두 지역 모두 Proteobacteria, Actinobacteriota, Acidobacteriota, Planctomycetota가 우점하였다(Fig. 55).

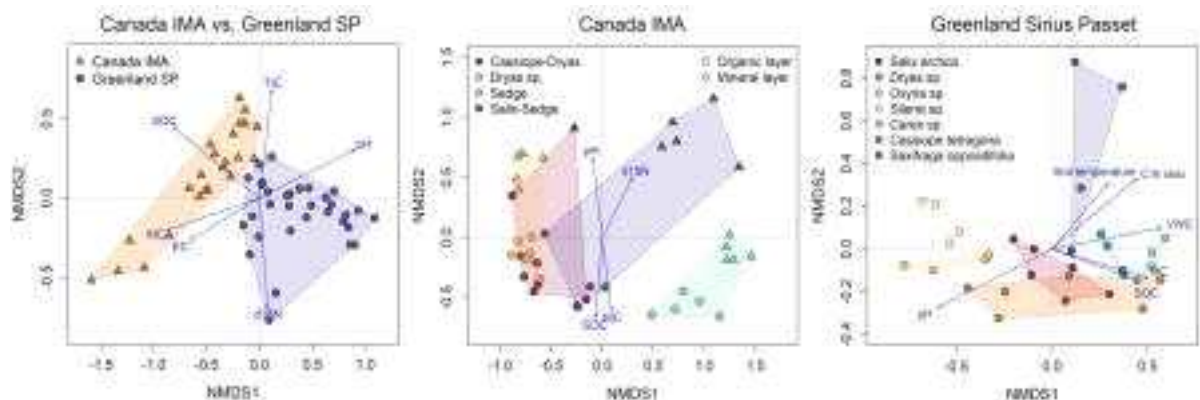


Fig. 56. NMDS plots displaying bacterial community structure and their association with vegetation type and edaphic factors in Canada IMA and Greenland Sirius Passet areas.

미생물 군집의 alpha diversity 및 문 레벨의 분포 결과와 달리, 두 지역 간 세균 군집구조는 확연한 차이를 보임(PERMANOVA, Pseudo-F=4.3, $p<0.001$) (Fig. 56). 토양 특성 중 pH와 SOC가 두 지역 간 세균 군집구조의 차이를 결정짓는 가장 큰 요소로 나타났다. 북그린란드 Sirius Passet에 비해 Canada IMA 사이트의 SOC 함량이 상대적으로 높은 것(19.4 ± 14.9 vs. 4.2 ± 5.3)이 두 지역 간 세균 군집구조를 나누게 한 주요 요인으로 판단된다.

캐나다 IMA 사이트의 경우 표층 유기물 토양과 하부 미네랄 토양 간의 세균 군집구조가 확연히 나뉘는 것으로 나타났으며, 두 층위 간 SOC 함량과 pH 차이가 세균 군집구조 간 차이와 큰 연관성을 보였다. 또한, 식생 타입별로도 근권 세균 군집구조의 차이가 나타났는데 특히 Sedge의 경우 다른 Cassiope와 Dryas 식생 타입과 확연히 다른 세균 군집 구성을 보였다.

북그린란드 Sirius Passet 사이트의 경우 토양 pH, 토양 표층 온도, C:N ratio, SOC 함량 등이 세균 군집구조를 결정짓는 주 요인들로 나타났다. Dryas와 Salix arctica를 제외하고 식생 타입별로 근권 세균 군집구조가 유사하게 묶이는 경향을 보였다. 토양의 수분함량이 높은 곳에 Carex sp., Cassiope tetragona, Saxifraga oppositifolia가 분포하고 이 곳의 표층 토양 온도와 SOC 함량 또한 높게 나타났다. 반대로 건조한 지역에 Oxyria sp., Silene sp. 및 Dryas sp.가 분포하며 토양 pH는 습윤 지역보다 상대적으로 높은 약알칼리성을 띄었다. 따라서, 토양의 수분함량 차이가 식생 타입을 결정하고 이로 인해 토양의 이화학적 특성을 변화시키고 근권 세균 군집구조에도 영향을 준 것으로 판단된다.

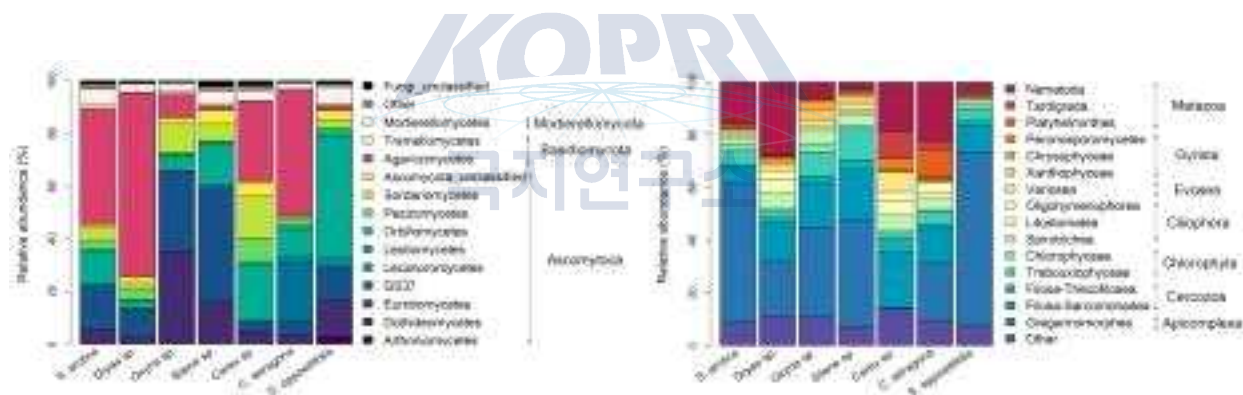


Fig. 57. Composition of fungal communities at the class level (left), and micro-eukaryotic communities at the phylum level (right) across different vegetation types in Sirius Passet, Greenland.

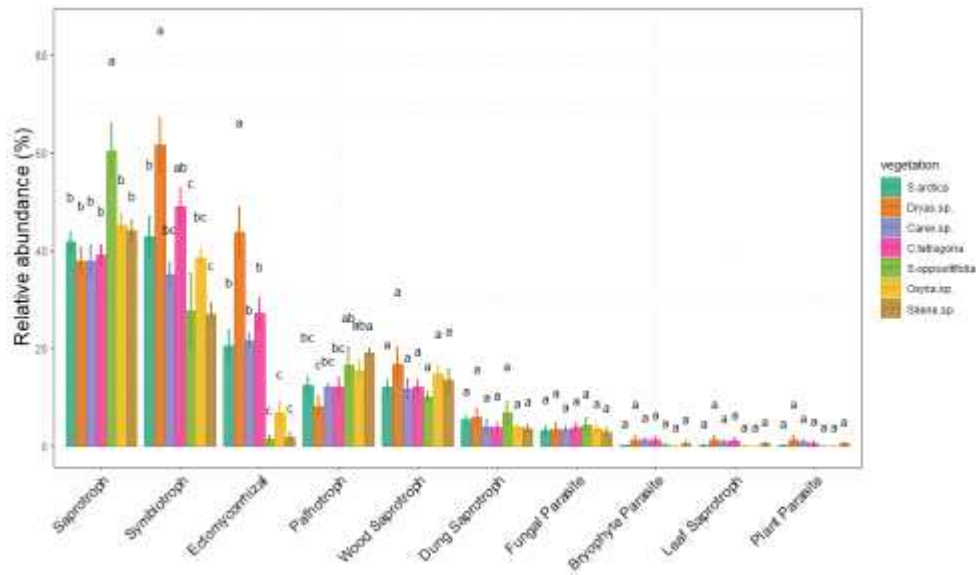


Fig. 58. Functional traits of fungal communities across different vegetation types in Sirius Passet, Greenland.

북그린란드 Sirius Passet 사이트에서 식생 타입 별 근권 진핵 미생물 군집(진균, 원생생물, 후생동물) 구성을 살펴보았다. 진균의 경우 식생 타입 별로 강(class) 레벨에서 큰 분포 차이를 보였다(Fig. 57). *Oxyria* sp.와 *Silene* sp. 지역에서는 자낭균문에 속하는 Dothideomycetes와 Eurotiomycetes가 60%이상 차지하였고, 이들 두 강(class)에는 지의류 형성 진균 속들이 우점함. *Salix arctica*, *Dryas* sp., *Carex* sp., *Cassiope tetragona*에서는 담자균문의 Agaricomycetes가 우점하였고, 동시에 이들 사이트에서는 Nematoda의 상대수도가 높게 나타났다. Agaricomycetes 내에는 *Tomentella*, *Cortinarius*와 같은 외생균 속, *Serendipita*와 같은 내생균 속이 우점한 것으로 나타났다. 이는 식생 타입 별 진균 군집의 생태적 길드(생태적 역할 혹은 지위) 분류 결과에서도 뒷받침 된다. Funguild 데이터베이스를 통해 생태적 길드를 살펴본 결과 식생 타입별로 외생균에서 가장 큰 상대수도 차이를 보였다(Fig. 58). 건조지역에 서식하는 *Oxyria* sp.와 *Silene* sp.과 *Salix oppositifolia*의 근권에는 외생균이 적은 반면, 다른 식생 타입들에서는 상대적으로 높은 상대수도를 나타낸다. 이러한 식생과 균군 간에 밀접한 공생 관계가 형성된 사실은 북위 80도의 고위도임에도 불구하고 이 곳에 식생이 특이적으로 번성한 이유 중 하나일 것으로 판단된다.

18S rRNA 유전자 기반 결과에서 식생 타입과 상관없이 Gregarinomorphea가 가장 우점하는 분류군으로 나타났다. 기존에 gregarines는 곤충 등의 무척추동물을 숙주로 하는 기생생물로 알려져 있음. 하지만 토양 생태계내에서 이 분류군의 생태적 기능에 대한 연구는 거의 없기에, 해당 사이트에서 왜 gregarine 유사 18S 유전자들이 우점하는지 추론하는 것에는 한계가 있다.

※ 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 가져왔다. 이를 실험적으로 확인하기 위해, 알래스카의 이른 봄(5월-6월)의 일 최고온도(7℃)와 최저온도(-10℃)를 12시간 간격으로 총 7회의 동결-융해 사이클을 모사한 배양기에서 토양 배양을 수행하였다. 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 확인하였다.

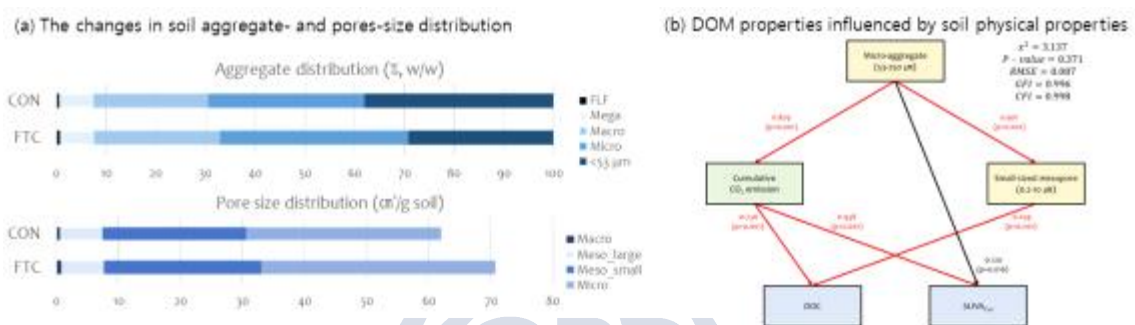


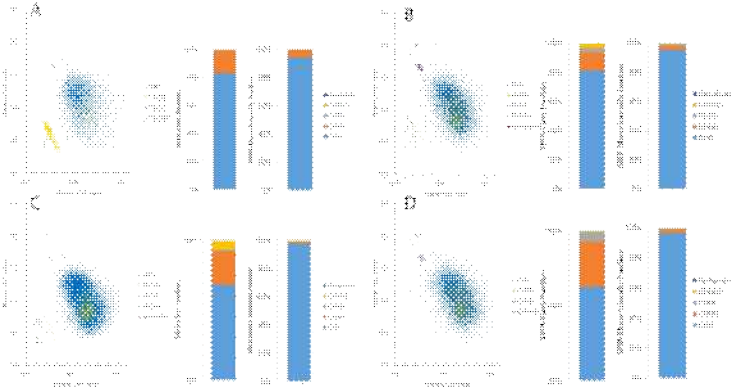
Fig. 59. Summary of the experimental results in the effects of Freeze-thaw cycles on soil biogeochemical properties

라. 위탁과제 수행 내용

(위탁과제 1-장경순) 기후변화에 따른 북극 동토층 환경변화 반응 물질 탐색

○ 1단계 1년차 목표: 북극 동토층 용존유기물 특성 정밀분석 플랫폼 구축 (100% 목표 달성)

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 확립하였다. 또한, 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 확립하였다.



○ 1단계 2년차 목표: 겨울철 적설증가로 인한 스발바르 동토층 용존유기물 변화 분석 (100% 목표 달성)

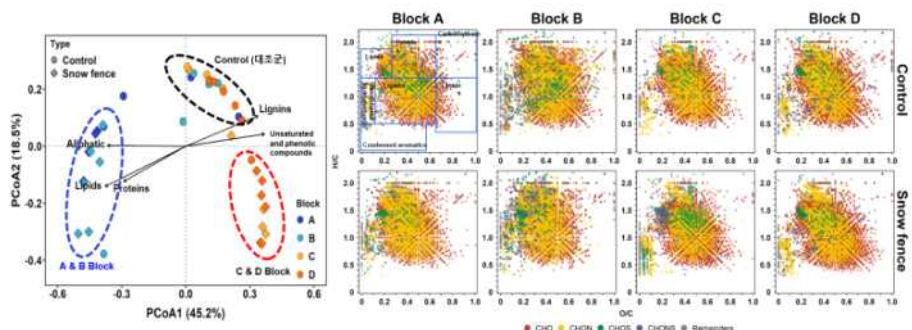
적설량 증가에 따른 토양 용존유기물의 변화를 확인하기 위해서, 스발바르 지역 Adventdalen의 적설량 모사 실험구 4곳 (10 사이트)의 스노우펜스 설치 지역에서 대조군과 스노우펜스 실험군 시료를 채취하여 특성분석을 수행하였다 (2반복, 총 40개 시료)



대조군 시료

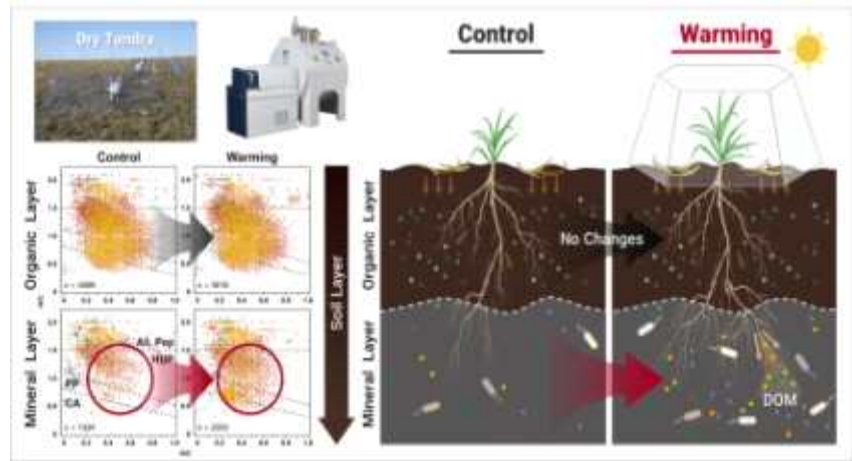
스노우펜스 시료

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



○ 2단계 1년차 목표: 건조 및 습윤 툰드라 동토층 용존유기물의 계절별 화학조성 변화 분석 (100% 목표 달성)

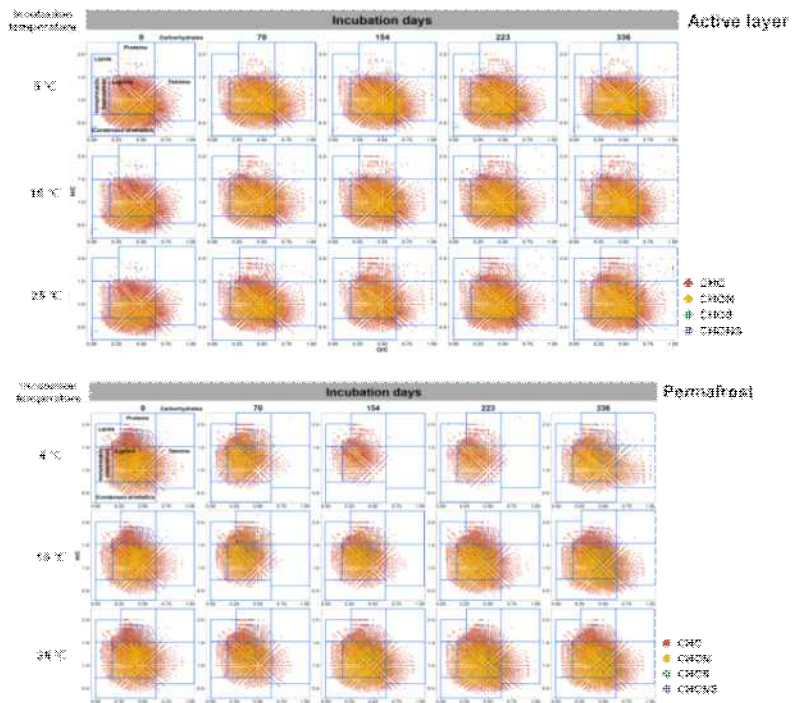
기후변화 모사실험에 따른 동토층 내 용존유기물 화학 특성 비교 분석 및 환경변화 인자 탐색: 기후변화 모사실험을 위해 온도상승모사 실험구를 설치하여 온실효과를 적용하고, 7년 이후 시료를 채집하여 토양 용존유기물 변화 화학정 조성 변화를 확인함. 그 결과, 유기물층에 비해 미네랄층에서 대조군과 온실효과 처리군의 차이가 유의하며, Peptide 계열 성분 비율의 증가와 유의미한 상관성 확인하였다.



○ 2단계 2년차 목표: 실내 기후변화 모사실험에 의한 동토층 토양 유기물 변화 분석 및 툰드라 지역 동토층 유기물 변화와 미생물 군집 간의 상관관계 규명 (100% 목표 달성)

온도 구배에 따른 알래스카 동토층 혐기 배양 후 용존유기물 변화 정밀분석: 활동층과 영구동토층 시료 모두 CHO와 CHON 성분이 주를 이루었으며, 혐기배양 시간에 따른 변화는 크게 확인되지 않아서, 분석된 용존유기물을 Labile ($H/C > 1.5$)와 Recalcitrant ($H/C < 1.5$) 및 Molecular transformation number를 기준으로 Active (≥ 25)와 Inactive (< 25)로 구분하여 특성을 살펴보았다.

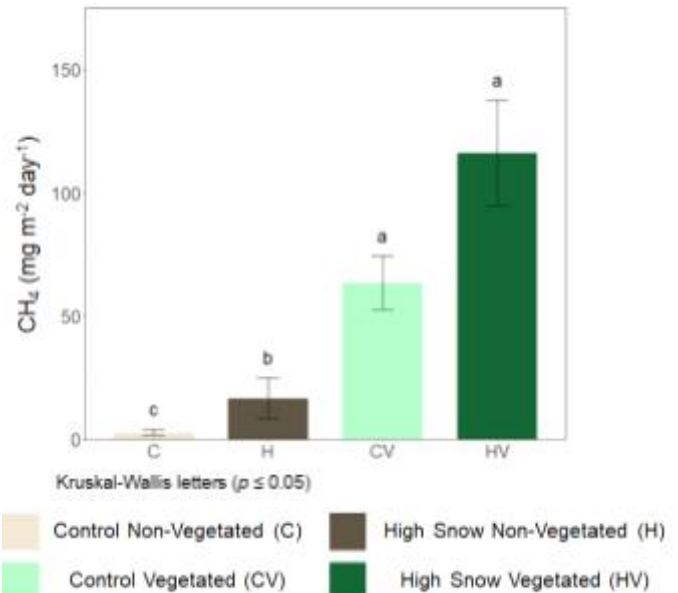
동토층 유기물 변화와 미생물 군집 간의 상관관계 분석: 실내 혐기배양 토양 30종에 대한 용존유기물 화학특성 분석을 통해 3~5000여 개의 유기성분 데이터를 도출하여 배양온도 및 시간에 따른 유기물 조성변화를 확인하였다. 본 실험에서 확보된 시료의 용존유기물 변화와 온실가스 플럭스결과 및 미생물 군집 결과와의 통합 상관성 분석을 통해서 활동층에 비해 동토층에서는 온도 상승 처리군에서 Methanobacteria의 유의성 있는 변화를 확인하였다.



(위탁과제 2-강호정) 기후변화에 의한 북극 동토 온실기체 플럭스 변화 규명

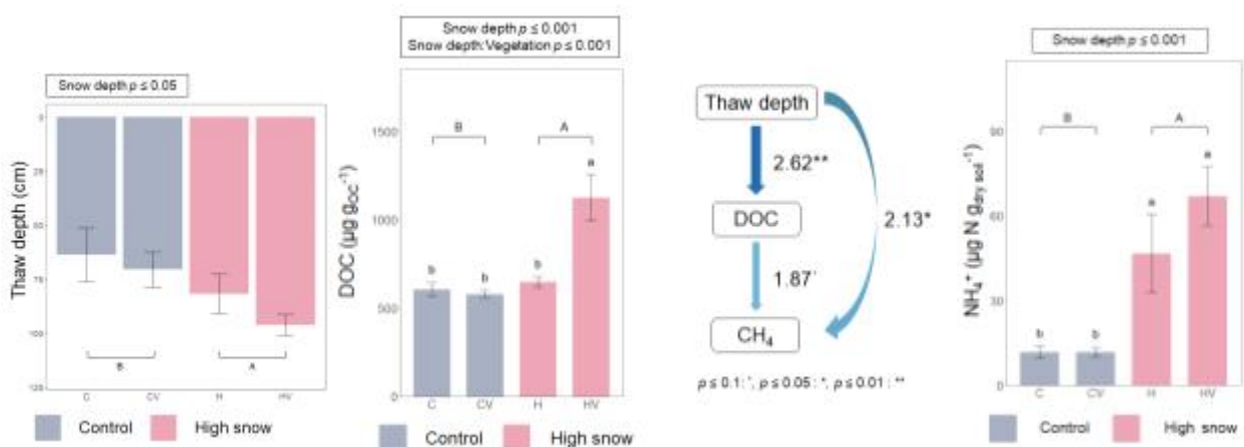
○ 2단계 1년차 목표: 습윤 툰드라 지역 적설량 변화가 온실기체 방출에 미치는 영향 연구 (100% 목표 달성)

알래스카 카운실 사이트에 설치되어있는 스노우펜스에서 대조군(Control)과 적설량이 증가한 곳(High Snow) 2지점 각각에서 식생이 없는 곳과 북극황새풀(*Eriophorum* species)이 우점하는 곳에서 메탄 플럭스를 모니터링했다. 메탄 발생은 적설량 증가구에서 대조군보다 더 높게 나타났다. 이는 깊어진 적설층으로 인한 토양 온도와 수분 함량이 증가된 환경 조건이 메탄 형성 및 배출에 유리해졌기 때문으로 예측된다. 북극황새풀 식생이 우점하는 곳에서 특히 메탄 발생이 더 높았다. 이는 식생의 통기조직을 통한 메탄 수송으로, 메탄이 토양 표층에서 이산화탄소로 산화되지 않고 기존 형태로 방출되었기 때문인 것으로 예측된다. 자세한 결과는 위탁과제 보고서에 기술되어 있다.



○ 2단계 2년차 목표: 습윤 툰드라 지역 적설량 변화에 의한 온실기체 변화 주요 조절 인자 연구 및 적설량 변화가 온실기체 플럭스에 미치는 영향 (100% 목표 달성)

북극 동토 지역에서의 적설량 변화 및 식생 변화에 따른 메탄 발생량의 토양 생지화학적 및 미생물적 원인에 대해 연구한 결과, 적설량이 높은 지점에서 토양이 녹은 층이 깊어지며 용존 유기 탄소 함량이 증가하여 메탄 발생량이 높아진 것으로 분석되었다. 적설량이 높은 지점에서 암모늄 농도가 증가하였고, 암모늄은 메탄과 분자 구조가 유사하여 메탄산화균의 활성도를 억제할 것으로 가설을 세우고 연구하였다. 기능 유전자를 대상으로 real time qPCR 분석을 수행하여 메탄관련 미생물의 활성도를 정량한 결과 적설량이 높은 지점에서 메탄산화균의 풍부도가 억제되고 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구는 기후변화에 따라 적설량이 증가할 경우, 토양 생지화학적 변화와 메탄 생성균 및 메탄산화균의 활성도 분석으로 인한 메탄 배출량이 증가할 수 있음을 시사한다.



마. 극지연구소 KPDC(Korea Polar Data Center) 환경인자 등재 목록

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	
10	[KOPRI-KPDC-00002460]	2024-05-07
	Carbon dioxide(CO2) flux measurement using manual chamber from climate change manipulation experiment in Council, Alaska in 2023	

연번	PN23012	등록일
1	[KOPRI-KPDC-00002415] Soil temperature and moisture data collected from winter climate manipulation plots in Cambridge Bay, Canada from 09/2022 to 08/2023	2023-11-29
2	[KOPRI-KPDC-00002429] Phospholipid Fatty Acid(PLFA) contents of soil in Cambridge Bay, Canada	2023-11-30
3	[KOPRI-KPDC-00002430] Phospholipid Fatty Acid(PLFA) contents of soil in Council, Alaska in USA	2023-11-30
4	[KOPRI-KPDC-00002431] NDVI data collected from climate manipulation plots in Council, Alaska, USA in 2023	2023-11-30
5	[KOPRI-KPDC-00002432] NDVI data collected from climate manipulation plots in Cambridge Bay, Canada in 2023	2023-11-30
6	[KOPRI-KPDC-00002433] Soil temperature and moisture data collected from winter climate manipulation plots in Council, Alaska, USA from 09/2022 to 08/2023	2024-05-07
7	[KOPRI-KPDC-00002461] Carbon dioxide(CO2) flux measurement using manual chamber from climate change manipulation experiment in Council, Alaska in 2023	2024-05-07
8	[KOPRI-KPDC-00002465] Data on soil methane flux, physicochemical and microbial properties during the 2023 growing season (July - September) in Council, Alaska wet tundra	2024-06-05

연번	PN24012	등록일
1	[KOPRI-KPDC-00002711] NDVI data collected from climate manipulation plots in Council, Alaska, USA in 2024	2024-12-27
2	[KOPRI-KPDC-00002712] Soil temperature and moisture data collected from winter climate manipulation plots in Council, Alaska, USA from 09/2023 to 08/2024	2024-12-27
3	[KOPRI-KPDC-00002713] Soil temperature and moisture data collected from winter climate manipulation plots in Cambridge Bay, Canada from 09/2023 to 08/2024	2024-12-27

바. 국제 북극 관련 기구 참여 내역

- 국제북극과학위원회(IASC)의 육상분과(Terrestrial working group) 대표: 정지영(정), 김민철(부)
(2023년 ~ 현재)

2. 목표 달성 수준 및 추진일정 실적

가. 대표적 연구성과

1) 진도관리, 자체평가 결과 등을 반영하여 성과가 우수한 3대 기술을 선정

- (① 장기축적 환경인자 DB 활용을 통한 북극 연구 네트워크 기여·협력 및 우수 논문 성과 창출) ITEX (International Tundra EXperiment) 연구 프로토콜에 따라 설치/운영된 온도상승 모사 실험구와 스노우펜스 실험구에서 획득한 자료를 북극 연구 네트워크에 제공. 북극지역은 다른 지역과 달리 반복 실험이 힘들고, 잦은 주기의 데이터 획득도 어려우며, 제한적 시기에만 데이터를 획득할 수 있는 한계점이 있음. 따라서 이러한 북극에서 데이터 획득의 어려움은 북극 연구자들 간 데이터 공유와 메타분석을 통해 현장연구의 제한성을 극복하고자 하였고, 다양하고 많은 데이터를 이용하여 사례 연구보다 일반화된 결론을 도출하고자 하였음. 이러한 노력을 통해 국제 공동 논문을 작성하였고, 우수저널인 Nature지 등에 논문 성과가 도출됨
- (② 기후변화에 의한 생태계 변화 분석) 2세부과제에서 궁극적으로 달성하고자 한 목표는 기후변화에 의한 북극 동토 생태계의 변화의 방향을 이해하고, 변화의 기작을 해석하고자 하였음. 연구 기간 동안 본 연구팀은 북극 툰드라 토양에서 기후변화로 인한 질소 이용도 증가와 메탄 방출 사이 상관성에 대한 연구를 수행하였고, 북극 토양의 동결-해동 반복에 의한 용존유기물 특성 변화에 대한 기작을 설명하였으며, 온도 상승 또는 적설량 증가시 이용가능한 질소 풀의 크기 변화 및 이에 대한 기작을 해석하였음. 또한, 온도 상승에 의한 건조 툰드라 내 용존 유기물 특성 변화를 분석하였고, 적설량 증가가 습윤툰드라 지역의 지중구조 및 생지화학적 변화에 미치는 영향 분석을 위한 현장 조사 및 실내 분석을 수행하여, 우수 논문 성과를 도출하고 있음.
- (③ 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. 또한 북극 툰드라 지역의 온난화가 토양 온도와 수분함량에 변화를 일으키게 되면, 미생물의 유기물 분해 활동에 영향을 미친다는 연구 수행. 알래스카 습윤 툰드라에서 적설량 증가에 의해 녹는 층의 깊이가 깊어지면, 용존유기탄소의 함량이 증가하고, 메탄 발생량이 증가하는데, 이는 메탄 산화균의 풍부도와 상관관계가 있음을 연구. 혐기 조건 모사를 통해 온도상승에 따른 동토층의 메탄 발생률 증가가 주로 아세트산 경로로 이루어짐을 확인함

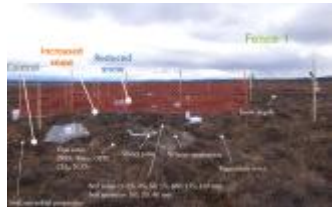
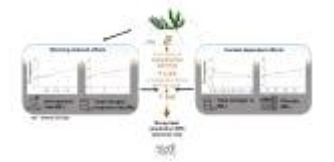
2) 성과별 내용

성과 1

장기 축적 환경인자 DB 활용을 통한 북극 연구 네트워크 기여 및 국제 공동 논문 성과

① 성과개요

연구자	극지연구소 정지영, 김민철, 남성진, 정수정								
과제명	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해								
기술성숙도 (TRL)	기본원리 파악	기본개념 정립	기능 및 개념검증	연구실험환경 테스트	유사 환경 테스트	파일럿 현장 테스트	상용모델 개발	실제 환경 최종 테스트	상용 운영
		O							
성과개요	• ITEX (International Tundra EXperiment) 기반 기후변화 모사 실험에서 시료 및 자료 획득 1) 적설모사 5년차 실험구에서 시료 획득 및 식물,								

	미생물, 기체플렉스, 토양 자료 획득 - 장기축적 환경인자 DB 활용을 통한 북극 연구 네트워크 자료 제공 및 공동 논문 작성 2) 캠브리지 베이 적설모사 실험구 내 온도 자료 공유를 통한 적설 실험에 대한 논문 출간(Arctic Science, ITEX 30년 특별기획, 2022.02) 3) 캠브리지 베이 온도상승 실험구에서 관측한 생태계 호흡과 환경인자 자료를 공유하여 ITEX 연구자 76명과 Nature에 논문 출간 (2024.05)	 
--	--	---

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
- 온도 상승시 생태계 호흡 증가 정도에 영향을 미칠 수 있는 토양 환경 인자 분석을 통해 기후변화시 더 민감하게 반응하는 지역제시

– 우수성

- 본 연구는 건조 툰드라와 습윤 툰드라 지역의 생태계 반응을 비교할 수 있도록 설계됨
- 기존 자료가 없는 북극 지역에 본 연구팀이 ITEX 프로토콜에 따라 실험구를 설치하고 데이터를 수집하여, 북극 연구 네트워크에 기여함

– 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 적설변화/온도 상승이 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

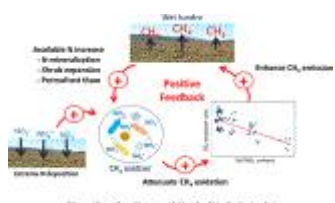
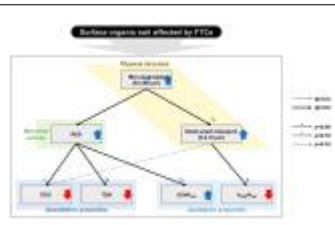
⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간		2								

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	50.5	24.05

성과 2	기후변화에 의한 생태계 변화 분석
------	--------------------

① 성과개요

연구자	극지연구소 정지영, 김민철, 김유진, 남성진, 정수정, 김진현, 김관수, 이주한, 연세대학교 강호정, 김정인, 기초기술연구원 장경순, 김민성								
과제명	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해								
기술성숙도 (TRL)	기본원리 파악	기본개념 정립	가능 및 개념검증	연구실험환경 테스트	유사 환경 테스트	파일럿 현장 테스트	상용모델 개발	실제 환경 최종 테스트	상용 운영
	O	O							
성과개요	- 토양 질소 이용도 증가와 메탄 산화 감소의 상호 작용 밝힘 1) 기후변화에 의한 무기태 질소 이용도 증가 2) 질소이용도는 메탄 산화 감소를 야기하여, 순메탄 방출 증가 - 북극 토양의 동결-해동 반복 1) 기후변화에 의한 북극 토양 동결-해동 반복모사 2) 동결-해동과정은 미생물 활성과 토양 구조 변화를 야기하여 용존유기탄소 양과 질적 변화 야기 - 북극의 건조 툰드라 지역의 온도 상승이 토양 미네랄층의 용존유기물 성분 변화를 야기함 - 북극 온도 상승 및 적설량 증가는 환경 조건에 따라 토양내 가용성 질소 풀(pool)의 변화 야기 - 습윤 툰드라 지역 하계 현장 조사를 통한 지중 구조 탐사 및 생지화학적 특성 분석 1) 알래스카 카운실 지역에서 온실기체플럭스 측정 2) 식물, 미생물 생물량, 체외효소 등 생물 인자 변화와 토양 깊이별 용존유기물 함량 변화 측정 3) 스노우펜스 설치 지역 비저항/레이다 탐사 수행하여 적설량 증가-지반 침하 상관관계 연구								
									
									

② 성과내용

– 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
높은 질소 및 형태에 따른 메탄 발생 영향	고질소 함량 처리구에서 메탄 산화 감소 및 순메탄 발생 증가, NO ₃ ⁻ 형태에서 세균과 메탄소비균에 영향을 주어 메탄 산화 감소

토양 동결-해동이 용존유기물 변화	동결-해동 반복은 미생물의 활성 증가, 입단구조 및 토양 공극구조 변화를 야기하여, 용존유기물 함량 감소 및 방향족 유기물 증가
토양 온도상승과 용존유기물 성분 변화	캐나다 캄브리지베이 거점 건조 툰드라지역의 토양 온도 상승은 식물 유래 및 생물 변환에 의한 용존유기물의 성분이 증가함을 보임
기후변화가 질소에 미치는 영향 메타분석	북극 자료들을 수집하여 온도 상승 및 적설량 증가가 토양 내 가용성 질소 풀에 미치는 영향과 변화에 영향을 미치는 주요 인자 파악
적설량 증가가 토양 생지화학 변화 야기	적설량 증가 실험구에서 활동층의 깊이가 깊어지고, 수분함량이 높고, 메탄 발생량 증가, 용존유기물의 총질소 함량이 증가함을 밝힘.

－ 혁신성 및 차별성(기존지식/기술 대비)

- 질소의 형태에 따른 메탄 산화에 미치는 영향 해석
- 동결-해동이 용존유기물 변화에 미치는 기작에 대한 해석 시도
- 오랜 현장 실험 데이터 기반으로 초고분해능 질량분석기를 이용한 결과 해석
- 적설량 증가로 인한 동토생태계 변화를 다학제적 관점에서 접근하여 분석 및 연관성 해석

－ 우수성

- 본연구에서는 북극의 기후변화에 의해 동토층에서 일어나는 변화들이 토양 생태계 내 생지
화학적 반응에 미치는 영향 및 기작을 밝혀 북극에서의 생태계 변화 예측에 기여할 수 있음

－ 사업/분야별 목표 달성에 대한 기여

구분	당초 계획된 목표	성과의 핵심성
사업 최종목표	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해	기후변화에 의한 동토생태계에서 일어나는 메탄 발생 및 유기물, 질소 변화 이해 증진
분야별 목표	기후변화에 의한 생태계 변화 논문 1편	기후변화에 의한 생태계 변화 논문 4편 게재

③ 연구성과의 활용 현황 및 계획

- － 산업화/산업현장 적용: 없음

④ 파급효과/기대효과

- － (학술적/기술적/인프라 측면): 동토생태계 생지화학적 모델 정확도 향상에 기여
- － (산업경제적 측면): 향후 메탄 저감기술 개발에 활용 가능한 자료로 제공
- － (사회적 측면): 북극이사회 옵서버 국가로서 북극 지역 협력 기반 구축 기여

⑤ 성과근거자료

구분	SCI 논문			특허출원			특허등록			기술이전
	국내	국외	소계	국내	국외	소계	국내	국외	소계	
사업 기간		4								

논문	논문명			학술지명		IF	게재년월
	Attenuation of Methane Oxidation by Nitrogen Availability in Arctic Tundra Soils			Environmental Science & Technology		11.3	23.02
	Responses of dissolved organic carbon to freeze-thaw cycles associated with the changes in microbial activity and soil			Cryosphere		5.2	23.07

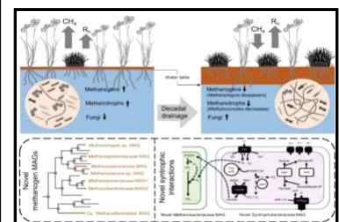
	structure			
	Key determinants of soil labile nitrogen changes under climate change in the Arctic: A meta-analysis of the responses of soil labile nitrogen pools to experimental warming and snow addition	Chemical Engineering Journal	13.4	24.06
	Determination of ground subsidence around snow fences in the Arctic Region: Application of joint geophysical survey	Lithosphere	1.8	게재 승인

- Deeper snow cover drives divergent biological responses and SOM vulnerability in Arctic tundra ecosystems (Global Change Biology, IF 10.8, mrnIF = 100, 논문 심사 중)
- Molecular insights into the warming-induced alterations of water-extractable organic matter (WEOM) in soil: Depth-dependent responses in Arctic terrestrial ecosystem (Chemical Engineering Journal, IF 13.4, mrnIF = 97.5, 투고 준비 중)

성과 3	동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명
------	---------------------------

① 성과개요

연구자	극지연구소 권민정, Binu M. Tripathi, 김민철, 명누리, 김정인, 강호정							
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
		O						
성과개요	• 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. • 북극 툰드라의 기온 상승으로 영구동토층 해빙과 토양 온도 및 수분 함량 변화가 가속화되고 있음. 본 연구에서는 다양한 수분 조건에서 미생물의 고분자 유기물 분해 활동을 분석함. 일정한 수분 조건에서는 미생물이 활발히 작용해 유기물을 분해했지만, 건조 스트레스를 받은 경우 분해 능력이 회복되지 않았음. 따라서, 기후 변화와 지형 변화로 토양 수분이 변하면, 미생물의 이산화탄소 배출에 영향을 미칠 수 있음을 보임 • 북극 습윤툰드라에서 적설량 변화 및 식생 변화에 따른 메탄 발생량은 적설량이 높은 지점에서 토양이 녹은 층이 깊어지며 용존 유기 탄소 함량이 증가하여 메탄 발생량이 높아짐. 이는 메탄 산화균의 풍부도가 억제됨과 상관관계가 있음.							



② 성과내용

- 주요 기능 및 사양

주요 기능/사양	내 용
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)

- 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		2								

논 문	논문명	학술지명	IF	게재년월
	Disproportionate microbial responses to decadal drainage on a Siberian floodplain	Global Change Biology	10.863	21.07
	Microbial metabolic responses and CO2	Journal of	3.3	22.11

	emissions differentiated by soil water content variation in subarctic tundra soils	Microbiology		
--	--	--------------	--	--

• 적설량 증가에 따른 탄소원 증가와 암모늄 농도의 변화가 메탄생성균 및 메탄산화균 활성도에 미치는 영향 (논문 투고 준비 중)

나. 추진 일정 실적

1차년도 (1단계 1차년도)														
개발내용	추진 일정												책임자 (소속 기관)	비고 (변경사유 등)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
온실기체 플럭스 측정장비 구축													정지영 (극지연)	완료
북극 현장조사: 측정 기반 마련													정지영 (극지연)	완료
스발바르 강설모사 실험구 시료 확보 및 미생물 분석													김민철 (극지연)	완료
실내 토양 배양실험 및 분석													김민철 (극지연)	완료
캐나다 IMA 수행연구 준비													정지영 (극지연)	완료
북극 동토층 용존유기물 특성 정밀분석 플랫폼 구축													장경순 (기초연)	완료

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 현장조사 및 데이터 분석													정지영 (극지연)	완료
실내 토양 배양실험 및 분석													김민철 (극지연)	완료
캐나다 IMA 현장조사 및 기초 특성 조사													정지영 (극지연)	완료
강설증가로 인한 알래스카 동토층 용존유기물 분석													장경순 (기초연)	완료
겨울철 강설증가와 관련된 용존유기물 지표특성 분석													장경순 (기초연)	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		
북극 현장조사 및 데이터 분석													정지영 (극지연)	완료
실내 토양 배양실험 및 분석													김민철 (극지연)	완료
캐나다 IMA 토양 분석													정지영 (극지연)	완료
그린란드 미답지 시료 분석													김민철 (극지연)	완료
동토층 용존유기물의 계절적 화학조성 변화 분석													장경순 (기초연)	완료
북극 온실기체 발생량 측정 및 자료 분석													강호정 (연세대)	완료

4차년도(최종) (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 현장 조사 및 데이터 분석																정지영 (극지연)	완료 예정
적설모사실험 데이터 종합분석																정지영 (극지연)	완료 예정
실내 토양 배양실험 및 분석																김민철 (극지연)	완료 예정
북극 미답지 구조 종합 분석																김민철 (극지연)	완료 예정
동토층유기물 변화와 미생물 군집 간 상관관계 규명																장경순 (기초연)	완료
북극 온실기체 발생량 측정 자료 및 발생 조절 인자 분석																강호정 (연세대)	완료



당초계획



실적

■ 예산집행 실적 ('25.01.16일 기준)

(단위: 천원)

비목	세목				2024년			비고 (잔액활용 계획)	
					예산	집행액	집행률(%)		
직접비	인건비	내부 인건비	미지급						
			지급 (A)	현금	124,008.000	124,008.000	100.0		
				현물					
		외부 인건비	미지급						
			지급 (B)	현금	48,036.023	32,923.653	68.5	'25.1~3월 인건비	
				현물					
		연구지원인력인건비(C)							
		학생 인건비(D)				58,372.673	51,032.230	87.4	'25.1~3월 인건비
		인건비 소계(E=A+B+C+D)				230,416.696	207,963.883	90.3	
	연구시설· 장비비(F)	현금	일반	2,500.000	0	0	실행예산 변경(1월 중) - 분석료, 재료비 등 집행 예정		
			통합관리						
		현물							
	연구활동비 (G)	현금		98,954.552	92,999.850	94.0	국내외 출장 및 회의비		
		현물							
	연구재료비 (H)	현금		29,599.379	18,125.711	61.2	북극 관측거점 확보 토양, 미생물 시료 분석 및 재료 구입 등		
		현물							
	연구수당(I)				10,000.000	5,000.000	50.0	'25.3월 집행	
	위탁연구개발비(J)				60,000.000	60,000.000	100		
	국제공동연구개발비(K)								
	직접비 소계(L=E+F+G+H+I+J+K)				431,470.627	384,089.444	89.0		
	간접비(M)				54,588.000	54,588.000	100		
	(간접비 중 연구실 안전관리비)								
	연구개발비 총액(N=M+L)				486,058.627	438,677.444	90.3		

연구개발비 총액 구조 : 2024년 예산 (457,000천원) + 2023년 잔액 이월금(29,058.627천원)

제 3 장
연구개발 결과의 활용 방안
(2세부과제-위탁과제 포함)



1. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여정도

- 툰드라 지역에서 온도 상승 모사 실험으로 획득한 생태계 호흡량 변화 데이터를 International Tundra Experiment(ITEEX)라는 연구 네트워크내 연구자들이 공유하여 메타 분석을 수행하여 Nature에 국제공동연구 논문 성과 창출. 대기 온도가 1.4도 상승하면, 생태계 호흡량이 평균 30% 증가되지만, 온도 상승에 대한 생태계 호흡량은 각 지역의 토양 환경 인자, 특히 토양 영양상태에 따라 그 영향의 정도가 달라질 수 있음을 밝힘. 본 연구는 북극 토양 환경 조건에 따라 기후변화에 대한 민감도가 달라질 수 있음을 보여줌으로써, 추후 어느 툰드라 지역의 온난화에 더 관심을 가져야 하고, 관리가 필요한 지역인지에 대한 가이드 라인을 제시할 때 근거 자료로 활용이 가능할 것임
- 북극 툰드라 지역에서 온도 상승과 적설량 증가에 의해 토양 내 가용성 질소 양의 변화에 대한 데이터를 수집하여, 질소 변화 방향성을 밝히고, 이러한 변화를 야기하는데 중요 인자는 무엇인지 밝히고, 기후변화에 따른 북극 지역의 질소 순환의 복잡성을 이해하는데 필요한 기초 데이터를 제공함. 또한, 기후변화 모사가 질소 순환에 미치는 영향을 평가함으로써, 향후 기후변화 연구와 생태계 관리에 중요한 참고자료로 제시될 수 있음
- 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
- 본 과제에서 축적된 장기 축적 데이터를 북극 연구 네트워크 그룹들과 자료 공유를 통해 논문 성과를 도출하였고, 북극 연구 네트워크에 기여하고 있음. 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 ITEEX 프로토콜에 따라 실험구를 설치하고 데이터를 수집하여, 북극 연구 네트워크에 꾸준히 기여할 수 있음

2. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 연구에서 획득한 데이터를 DB에 등록하고 관리함으로써, 학계, 정부, 연구 기관 및 관련 산업과 공유가 가능할 것임. 연구 데이터는 KPDC에 등재하였고, 일부 데이터는 *Scientific Data* 저널에 공개함으로써 연구자들의 접근성을 높이고 있음
- 기후 변화에 따른 극지 토양 생태계의 반응 및 생지화학적 순환 변화 기작을 구명함으로써, 앞으로의 동토 환경 변화의 정확한 평가를 통해 기후 변화 모델의 예측력 향상에 기여. 또한 미생물 대사 기작의 세부적인 메커니즘을 심층적으로 분석하는 심화 연구 수행 가능.
- 북극 툰드라 생태계의 탄소, 질소 동태, 유기물 변화에 대한 연구 성과는 기후 변화 정책 수립에 중요한 기초자료가 될 수 있음. 연구 결과를 바탕으로 북극 지역의 기후변화 대응 및 탄소 저장을 위한 정책적 제언을 제시하며, 생태계 보존 및 지속가능한 관리방안 수립에 기초자료로 활용 가능
- 영구동토지역의 탄소와 질소 동태 장기모니터링 결과를 관련 연구자들과 공유/종합/분석하여 시공간적 규모가 확장된 국제 공동 논문 성과 도출 가능
- 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, 북극 및 고위도 지역에서의 연구 범위를 확장하여, 북극권 생태계에 대한 글로벌 이해 증진

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)			연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE		매년 상위 20% 이내 논문 약 1.4편 게재
	비SCIE		계상하지 않음
	계		7편
국내논문	SCIE		계상하지 않음
	비SCIE		계상하지 않음
	계		계상하지 않음
특허출원	국내		N/A
	국외		N/A
	계		N/A
특허등록	국내		N/A
	국외		N/A
	계		N/A
인력양성	학사		N/A
	석사		N/A
	박사		N/A
	계		N/A
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			1
정성적 성과 주요 내용			• 북극이사회 정식옵서버 국가 과학활동 제공 (북극이사회 워킹그룹(WG)의 한국대표로 활동, 정식옵서버 국가 지위 유지의 근거자료 제시) • 장기축적 환경인자 DB의 국내·외 공유로 국제 공동 논문 성과 창출 • 확보한 실물 시료는 추후 관심있는 연구자들과 공유하여 북극 유래 생명자원 활용 등 타분야 연구에 기여 • 과학기술 대중화 및 outreach 활동을 통한 대국민 인식 제고

3. 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항 (해당시 작성)

- 장기축적 환경인자 DB 활용을 통한 북극 연구 네트워크 기여 및 협력: 캄브리지 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)
- 알래스카 카운실 지역에서 동토층 해빙에 따른 식물 병원성 세균의 잠재적 위험성 관련 논문 출판 (*Ecotoxicology and Environmental Safety*, IF6.2, 2025.01)

제 4 장
당초 연구계획 대비 주요 변경사항
(2세부과제-위탁과제 포함)



구분	변경 전	변경 후	변경 사유 및 조치사항	협약변경 승인일
연구목표 및 주요내용	동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 2편	동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 1편	1단계 2차년도 “동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 2편” 중 1편을 2021년 조기 달성하였으므로, 1차년도 1편, 2차년도 1편으로 조정	1 단계
	캐나다 IMA 미답지 온도상승챔버/스노우펜스 설치	캐나다 IMA 미답지 기후변화 모사 실험 전 T0 상태 파악	기후변화 모사 실험은 실험 시작 전 시료 확보, 분석을 통하여, 생태계 특성의 공간적 변이에 대한 이해가 우선시 되어야 함. 또한, 스노우 펜스 설치의 주방향 바람을 확인 후, 수직으로 설치해야 함. 기존 풍향 자료가 없음을 확인. 2022년 풍향 자료 수집 및 T0 조건에서 생태계 특성에 대한 이해	
	캐나다 IMA의 실험사이트에서 식물 군집 구조 조사, 토양(T0) 샘플링, 온도상승챔버 (open top chamber, OTC)와 스노우펜스 (snow fence, SF) 설치	캐나다 IMA의 실험사이트에서 식물 군집 구조 조사, 토양(T0) 샘플링, 풍향 자료 획득 등 생태계 기초 특성 파악	토양호흡을 통한 14C분석은 모암이 탄산염 기반일 경우, 기원 추적에 어려움이 있음. 따라서, 알래스카와 캐나다 두 사이트에서 오래된 탄소 분해 추적을 위해 양쪽 사이트에 동일하게 적용 가능한 방법으로 변경	
	카운실 거점에서 플렉스 측정, 14C를 이용한 토양 호흡 분석	카운실 거점에서 플렉스 측정, 토양 유기물 특성 분석	전체적인 연구목표 및 내용에 있어서 주요 변경사항은 없음. 당해연도(2단계 1차년도)부터는 신규위탁연구과제 1개를 추가하여 공동연구를 진행하여, 토양 기체 플렉스 데이터 처리를 통해 보다 강화된 목표달성을 모색함	
	2단계 1차년도부터 위탁연구 2(연세대)에 대한 연구추진 내용으로 “습윤토드라 적설량 증가가 온실기체 방출에 미치는 영향 연구”에 대한 내용으로 공동연구 계획함	위탁연구2(연세대) 추가	캐나다 공동연구 상대기관인 POLAR측의 생태연구자들의 퇴직과 이직 후, 동일 분야 연구자 미충원. 현장 연구 공동 셋업보다는 현재 확보한 토양 시료로 탄소, 질소 동태 추가 연구 협업 수행	2단계 1차년도 (23.03.28.)
	캐나다 IMA 미답지 지중탐사	캐나다 IMA 미답지 토양 유기물 집중 연구	러-우 전쟁으로 인한 러시아와의 공동연구 현재 중단	
	러시아 고위도 북극 미답지 토양 및 미생물 특성 조사	러시아 사이트 연구 잠정 중단	캐나다 IMA 토양 질소동위원소 측정목표 3차년도 조기 달성	
	캐나다 IMA 미답지 질소 동위원소 측정	그린란드 토양 시료 질소 동위원소 측정	연구비 삭감으로 인한 일부 목표 축소/변경으로 조정	2단계 2차년도 (24.03.22)
	적설량 증가가 오래된 탄소(old carbon) 분해에 미치는 영향 관련 논문 1편	적설량 증가가 오래된 탄소(old carbon) 변화에 미치는 영향 관련 논문 1편		
	적설량 모사실험 토양을 이용한 유기물 분해 관련 토양 인큐베이션 실험	적설량 모사 실험 토양 대신 다양한 알래스카 지역 토양을 사용하여 실험 진행		
	적설량 변화에 대한 습윤	적설량 변화에 대한 습윤		

	vs. 건조 툰드라 생태계 반응 비교	vs. 건조 툰드라 생태계 반응 비교 (비교 반응변수 인자 수, 현 목표 대비 80%로 축소)		
	유기물 분해 과정에서 미생물의 탄소 이용 효율 변화 연구	유기물 분해 대사과정 연구		
	유기물 분해 대사- 온실기체 발생 상관성 및 조절인자에 대한 종합 분석	유기물 분해 대사- 온실기체 발생 상관성 및 조절인자에 대한 종합 분석(분석시료 수를 현 목표 대비 70%로 축소)		
	적설량 모사 실험구에서 생태계 호흡 측정, 소다라임 실험을 통한 비생육기 플럭스 측정, 14C 측정 및 토양유기물 분해를 통한 오래된 탄소 변화 분석	적설량 모사 실험구에서 소다라임 실험을 통한 비생육기 플럭스 측정, 토양유기물 분해를 통한 오래된 탄소 변화 분석		
	적설량 모사실험 토양을 이용한 유기물 분해 관련 토양 인큐베이션 실험	적설량 모사 실험 토양 대신 다양한 알래스카 지역 토양을 사용하여 실험 진행		
	적설량 변화에 따른 식물 군집, 유기물 함량 및 특성, 질소 무기화 과정, 온실기체 플럭스, 미생물 특성 변화(생물량, 군집구조, 물질대사, 유기물 분해능 등) 종합 분석	적설량 변화에 따른 식물 군집, 유기물 함량 및 특성, 미생물 특성 변화(생물량, 군집구조, 물질대사, 유기물 분해능 등) 종합 분석		
	생태계 내 주요 구성인자인 식물, 미생물, 온실기체, 환경 인자 간의 상관관계 이해	생태계 내 주요 구성인자인 식물, 미생물 환경 인자 간의 상관관계 이해		
연구책임자				
주관기관				
연구비	900,000천원	457,000천원	정부 연구비 감액으로 인한 축소 (약 49.2% 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 현장 활동의 제한적 접근성 부분 해소와 현재 수행 중인 과제 에 참여하는 기관(극지연구소 및 외부 참여기관)에서의 북 극권 현장조사와 환경인자 확보, 자료 분석 등 연구활동 을 위한 마무리 기간 필요(3 개월 연장)	한국연구재단 (2024.11.14)

[첨부목록]

구분	목록	제출여부(Y/N)
첨부1	연구개발 목표의 달성도 증빙	Y
첨부2	연구개발결과 활용계획서	Y
첨부3	자체평가의견서	Y
첨부4	[해당 시] 연구개발성과 공개제한 요청사유서	N
첨부5	[해당 시] 청년 의무채용 관련 실적	N
첨부6	[해당 시] 참여기업의견서	N

첨부1

연구개발 목표의 달성도 증빙

평가항목	가중치 (%)	관련 세부목표	연차	연차별 목표 (조건/환경)	실적요약 (달성도 %)	관련증빙
(정성 및 정량) 적설량 변화에 의한 토양 생지화학적 변화 규명	50	1, 2, 3	1차년도 (1단계 1차년도)	- 현장연구 기반 마련, 플렉스 측정 장비 구축 - 스발바르 강설모사 실험구 토양 시료 확보 및 미생물 분석	- 거점별 사이트 방문 및 2차년도 연구 수행을 위한 점검 (100%) - 현장 연구용 플렉스 측정 장비(Picarro G4301) 구축 및 사전 테스트(100%) - 스발바르 강설모사 실험구 현장 조사, 채취된 토양 40점 대상 세균 및 진균 군집 분석 수행(100%)	- 현장 조사 및 셋업 상황 관련 내용 (1단계 보고서 p.4-5) - G4301 구매 내역 및 테스트 결과(1단계 보고서 p.5) - 현장조사 내용 및 토양 미생물 군집 분석 자료 (최종보고서 p. 17-30)
			2차년도 (1단계 2차년도)	- 습윤 툰드라 지역 적설량 증가에 의한 토양 유기물, 질소, 미생물 특성 변화 연구 - 건조 툰드라 지역 적설량 증가가 미생물 생장에 미치는 영향 연구	- 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(100%) - 캠브리지 베이 적설량 증가에 의해 식생지수가 높아졌으나, 뿌리 분포 비율은 차이없음	- 알래스카 카운실 적설량 모사 실험 결과 (1단계 보고서 p. 5-6, 최종보고서 p. 13-16) - 캠브리지 베이 적설량 모사 실험 결과 (1단계 보고서 p.6-7, 최종보고서 p. 13-16)
			3차년도 (2단계 1차년도)	- 건조 툰드라 지역 적설량 증가에 의한 토양 유기물, 질소, 미생물 특성 변화 연구 - 습윤 툰드라 적설량 증가가 온실기체 방출에 미치는 영향 연구	- 캐나다 캠브리지베이 거점 적설량 증가 실험구에서 미생물 군집 및 생지화학적 특성(토양 탄소, 질소, 동위원소, 무기태질소) 분석(100%) - 알래스카 카운실 거점 적설량 증가 실험구에서 CO₂, CH₄ 변화량 측정 (100%)	- 캠브리지 베이 적설량 모사 실험 결과(3차년도 보고서 p.4-5, 최종보고서 p. 13-16) - 카운실 적설량 모사 실험구 온실기체 측정 결과 (3차년도 보고서 p.7, 최종보고서 p. 13-16)
			4차년도 (2단계 2차년도)	- 적설량 증가가 오래된 탄소(old carbon) 변화에 미치는 영향 관련 논문 1편(RFP 충족, 상위 20% 이내, 정량성과) - 적설량 변화에 대한 습윤 vs. 건조 툰드라 생태계 반응 비교	- 카운실의 적설량 증가 실험구에서 오래된 (분해가 어려운) 탄소 분획이 감소함을 확인 - 알래스카 카운실과 캐나다 캠브리지 베이 거점에서 적설량 변화에 의한 식물, 미생물, 토양 변화 비교 결과 제시 및 논문 투고(100%)	- 최종보고서 p.16-17, Global Change Biology (mrnIF = 100) 논문 심사 중 - 적설량 변화에 의한 생태계 비교 결과(최종 보고서 p. 9-17)
(정성 및 정량) 북극권 동토 내 미생물 대사	30	2, 3,	1차년도 (1단계 1차년도)	배양 온도 및 시간 변화에 따른 혐기 조건에서의	- 환경발현유전체 기반 혐기 환경 유기물 분해 관련 대사 요약 - 인큐베이션 시료 대상	환경발현유전체 및 유기산 정성/정량 분석 결과

기작 및 생지화학적 특성 규명				- 유기물 분해 대사 및 유기물 특성 변화 연구 - 온실가스 연관 혐기성 미생물 5종 동정 - 동토-온실기체 군집-배출 상관관계 규명 논문 1편(RFP 충족 정량성과)	- 유기산, 아미노산 정성/정량 분석(100%) - 환경유전체 데이터로부터 메탄 생성균 4종 및 혐기호흡 관련 5종 유전체 동정(100%) - 시베리아 습지 대상 미생물-온실기체 관계 논문 발표(100%)	(최종보고서 p.31-33) 11. 온실가스 연관 혐기성 미생물 10종 유전체 정보(KPDC등록, 최종보고서 p. 34) 12. Global Change Biology 논문 발표
			2차년도 (1단계 2차년도)	- 배양 온도 및 시간 변화에 따른 호기 조건에서의 유기물 분해 대사-온실가스 발생 변화 연구 - 온실가스 연관 호기성 미생물 5종 동정(RFP 충족 정량성과) - 동토 미생물 군집-온실기체 배출 상관관계 규명 논문 1편(RFP 충족 정량성과)	- 인큐베이션 시료 대상 온실가스 발생 변화 분석(100%) - 단일세포 유전체 기반 호기성 호흡 관련 5종 유전체 동정(100%) - 알래스카 동토 대상 미생물-온실기체 관계 논문 발표(100%)	13. 온실가스 농도 분석 결과 (최종보고서 p.34) 14. 온실가스 연관 호기성 미생물 5종 유전체 정보(KPDC등록, 최종보고서 p. 35) 15. Journal of Microbiology 논문 발표
			3차년도 (2단계 1차년도)	양분의 농도 변화에 따른 유기물 분해 대사-온실가스 발생 변화 연구	표층 식생 차이 및 산물 발생 등에 의해 생태계에 유입되는 양분의 농도 변화(함량 및 조성)가 동토 활동층의 유기물 분해 및 온실가스 발생에 미치는 영향 규명(100%)	16. 알래스카 북극 툰드라&침엽수림 및 산물지역 동토 코어 분석 결과 (최종보고서 p. 41-49, 52-55)
			4차년도 (2단계 2차년도)	- 유기물 분해 대사과정 연구 - 유기물 분해 대사-온실기체 발생 상관성 및 조절인자에 대한 종합 분석	- 다중 오믹스 기반 동토 유기물 분해 대사과정 재구성(100%) - 온도/산물/식생 차이에 따른 유기물 분해 대사-메탄 발생 과정 상관성 및 주요 조절인자 도출(100%)	17. 동토 유기물 분해 대사과정 종합 분석 결과 (최종보고서 p. 38-39) 18. 온실기체 발생 조절인자 관련 실내 모사 실험 결과(최종보고서 p. 40, 50, 53)
(정성)미답지에서 동토 생태계 국제 공동 연구	20	1,3	1차년도 (1단계 1차년도)	- 환경인자 측정 센서 구비 - 미답지 탐사 예정지 문헌 조사 및 국제 협력 사전 협의	- 토양 온도 및 수분 측정 센서 구입 - 캐나다 IMA, 북그린란드, 러시아 문헌조사 완료, 보고서에 관련 내용 기입, 캐나다 POLAR와 협의 (100%)	19. 센서 구매내역 (1단계 보고서 p.11) 20. 문헌조사 내용 및 이메일 증빙(1단계 보고서 p.12)
			2차년도 (1단계 2차년도)	- 캐나다 IMA 미답지 기후변화 모사 실험 전 TO 상태 파악 - 캐나다 IMA 미답지 식물, 토양 및 미생물 특성 조사	IMA 미답지 풍향 자료 분석(겨울 주풍향: 북서풍) 및 4곳 식물군집 토양, 미생물 특성 분석 (100%)	21. IMA 미답지 환경 자료 및 탐사 결과 (최종보고서 p. 55-57,59)
			3차년도	캐나다 IMA	IMA미답지 토양 및 식물	22. 캐나다 IMA

			(2단계 1차년도)	- 미답지 토양 유기물 집중 연구 - 그린란드 고위도 북극 미답지 토양 및 미생물 특성 조사	- 탄소 및 질소 함량, 동위원소 분석 수행 (100%) - 그린란드 시리우스 파셋 지역 토양 및 미생물 군집구조 분석 수행 (100%)	토양, 식물 분석결과 (최종보고서 p.57-58) 23. 그린란드 토양 및 미생물 분석 결과(최종보고서 p.60-61)
			4차년도 (2단계 2차년도)	- 그린란드 토양 질소 동위원소 측정 - 북극 동토 미답지 생태계 구조 종합 분석	- 그린란드 토양 탄소 및 질소 안정동위원소 분석 수행(100%) - IMA와 그린란드 시리우스 파셋 지역 생태계 구조 통계 분석 수행(100%)	24. 그린란드 토양 안정동위원소 분석결과 (최종보고서 p. 60) 25. 두 지역 미답지 토양, 미생물 구조 종합 분석 결과 (최종보고서 p.62-64)
합계	100					



번호	관련증빙 명
----	--------

1	현장 셋업 상황 및 조사 관련 내용 (1단계 보고서 p.4-5)
---	-------------------------------------

알래스카 카운실 현장 연구기반 구축 현황 및 1차년도 국외출장 복명서

Map showing research site locations in Alaska. Key features include:

- Flux measurement stations: Eddy covariance (EC), Eddy

번호	관련증빙 명				
2	G4301 구매 내역 및 테스트 결과 (1단계 보고서 p.5)				
장비 구매 내역					
일련번호	구매처	지불기간	지불액	지불일	비고
PN21012180	PICARRO, INC	계단별의 한국연구재단	53,960,365	2021-09-13	(이동용)기체분석용기기Gas Concentration Spectrometer) 2021-060940_2021-1094-04103 이동용 기체분석용기기 구매 요청 / 물품대금지급
PN21012180	(주)고려국제교육	계단별의 한국연구재단	2,999,400	2021-09-15	(이동용)기체분석용기기Gas Concentration Spectrometer) 2021-060940_2021-1094-04103 이동용 기체분석용기기 구매 요청 / 과부가세 등 부대비용 지급
● 플릭스 장비 구축(Picarro G4301) 장비 테스트					
거동질 기후 변화 조사 플랫폼에 의해 적층탄의 변화가 영동올해, 여름철 토양과 대기 사이의 온실기체(이산화탄소, 메탄)의 교환량을 측정하기 위하여 이산화탄소의 배합 농도를 측정할 수 있는 장비를 2021년에 구축함. Picarro사에서 4대 G4301 모델은 백팩형으로 받고 (다나에서 이산화탄소와 메탄 기체의 농도를 측정할 수 있는 장비임 (Fig. 1.13))					
Fig. 1.13. The gas analyzer (Picarro G4301, left) and a man carrying the analyzer (right)					
2022년 현재 '환경' 조사 시 운영 중인 강원도에서 실험 구역에서 G4301를 이용하여, 이산화탄소와 메탄의 농도를 측정할 계획임. 새로 구축한 장비를 목적 종도라 현장에서 사용하기 전에 국내에서 중점적 테스트하여 장비 사용법 및 주의 사항 숙지 계획임. 11월					
(1년차 연차보고서, p. 14)					

Fig. 1.14. Testing G4301 and the screen showing the changes of gas concentration.	Fig. 1.15. Calculation of gas fluxes using the software linked with G4301.
(1년차 연차보고서, p. 15)	

Fig. 4. The gas analyzer (Picarro G4301) and the connected auto chamber (eosAC-LT)	(1단계 보고서, p. 5)
---	-----------------

번호	관련증빙 명
3	현장조사 사진 및 토양 미생물 군집 분석 자료 (최종보고서 p. 17-30)



Fig. 7. Map of the snow fences in the study site located in Advantdalen, Svalbard, Norway. Dotted circles indicate the block A, B, C, D and the letters show the location of the snow fences.

2015년 (9년차) 채취 토양 시료 분석 결과

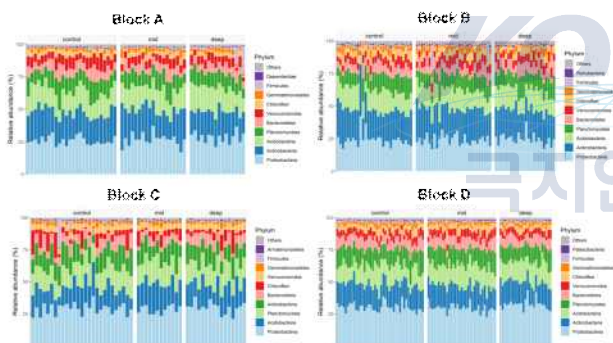


Fig. 9. Relative abundances of bacterial phylum in each blocks with enhanced snow depth (control<mid<deep).

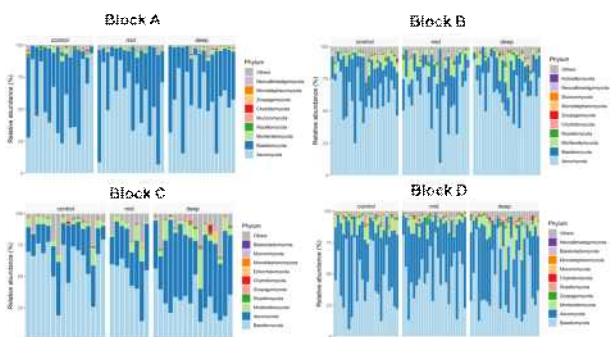


Fig. 13. Relative abundances of fungal phylum in each blocks with enhanced snow depth (control<mid<deep).

2021년 (15년차) 채취 토양 시료 분석 결과

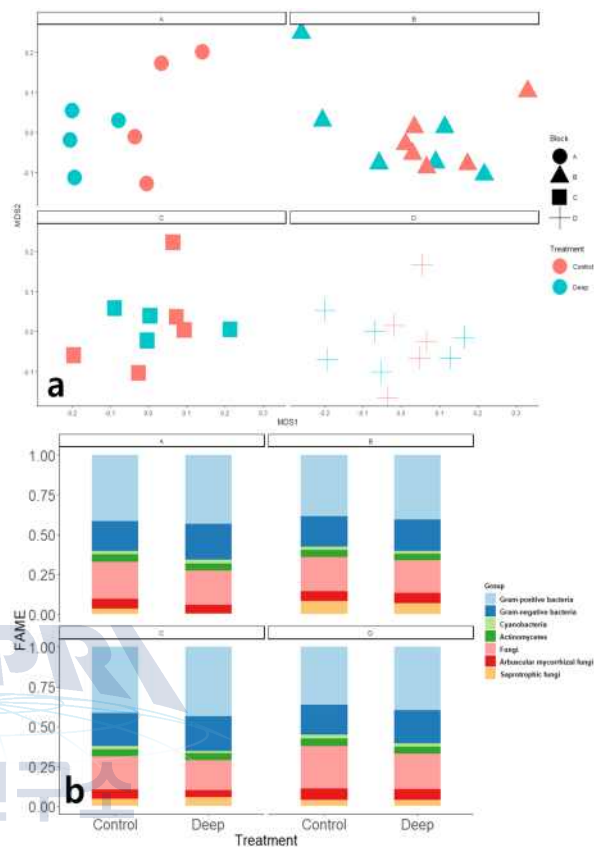


Fig. 19. Composition of microbial community revealed by FAMES obtained from PLFA analysis. (a) Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) ordination plot and (b) Relative abundance of microbial groups.

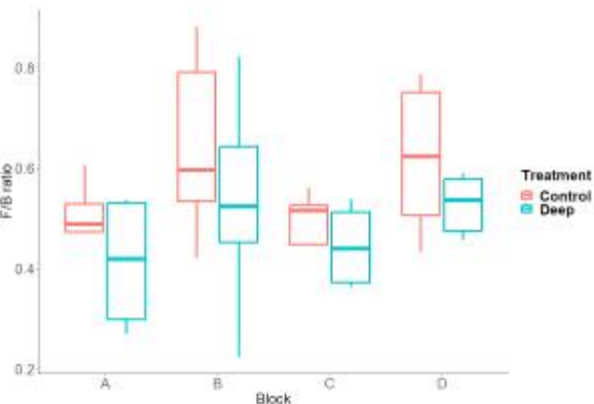
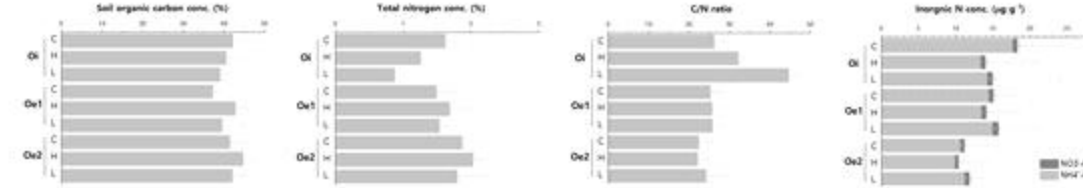
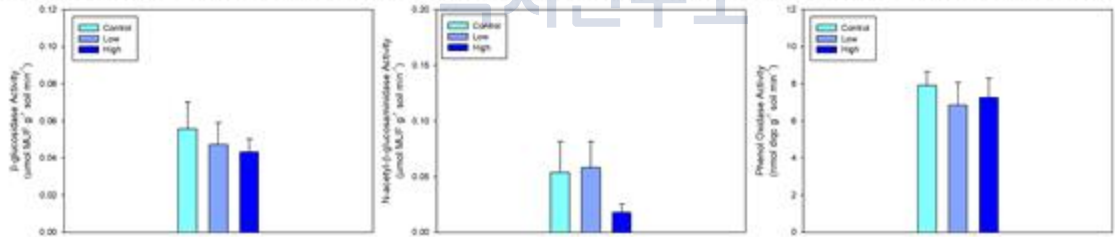
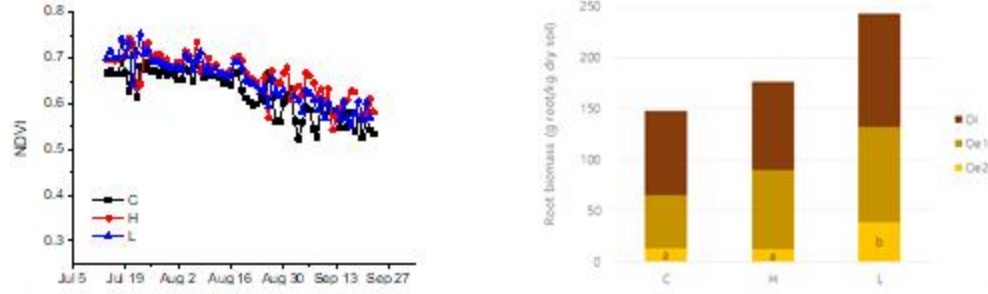


Fig. 20. Fungi to bacteria ratio calculated by using the results of PLFA analysis.

번호	관련증빙 명
4	알래스카 카운실 적설량 모사 실험 결과 (1단계 보고서 p. 5-6)
○ 습윤 툰드라 지역 강설량 증가에 의한 토양 유기물, 질소, 미생물 특성 변화 연구 카운실 지역에서는 스노우펜스에 의한 강설량 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, 강설량 증가는 체외효소 분석 결과 hydrolases activity를 감소시킴. 강설량 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. 4. The gas analyzer (Picarro G4301) and the connected auto chamber (eosAC-LT)	
 Fig. 5. Soil organic carbon, total nitrogen, C/N ratio and 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 처리구에서 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 토포라 감발량 증가가 식물 생장에 미치는 영향 연구

2022년 6월~8월 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 플랫폼 다 촬영한 데이터를 추후 자료 처리 예정임. 지하부 모니터링은 21년 가을에 설치한 아크릴 튜브 내에 mini-rhizotron을 이용하여 사진을 촬영하였으나, 유기물층 발달이 미약하고, 미사와 결토로 이루어진 미세합층이 아크릴 튜브 주위에서 많은 상태이어서 데이터 취득에 한계가 있었음.

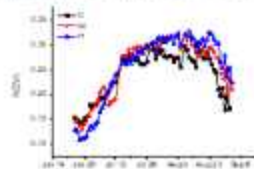


Fig. 8. Monitoring for the aboveground parameter (a) seasonal changes of NDVI in GFI in 2022 and the belowground parameter (b) root images and analysis using Mini-rhizotron and RootSpace program

2022년 7~8월 2달간 수분절변을 이용하여 생태계 호흡(Reco)과 순생태계 교환량(NEE)을 측정하였고, 이 차이를 이용하여 총일차생산량(GPP)을 계산함. 온도과 PAR 자료를 이용하여 플럭스가 측정되지 않았던 시간 동안 보간함. 블록(block)간 큰 차이와 작은 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 소다라인을 통해 관측한 비생물적 생태계 호흡의 경우, 대조구가 M, H보다 유의하게 높게 나타남. 강설 증가가 겨울철 토양 온도를 높여 겨울철 호흡량을 증가시킬 것이라는 예상과 다른 결과임. 식물피도와 함께 어느 시기에 C가 M, H보다 높은 값을 보이는지 추가 확인이 필요함.

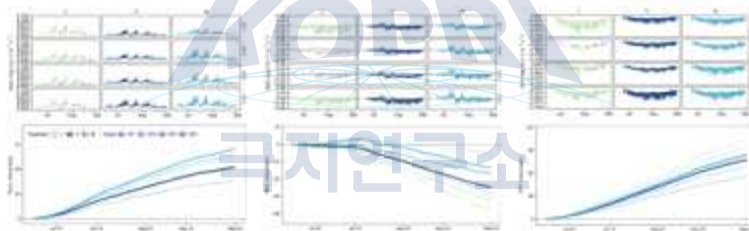


Fig. 9. Observed and interpolated Reco (left), NEE (middle), and GPP (right) (upper) and their cumulative values through the growing season (lower).

22년 하계 기간 동안 독일의 Max Planck Institute(MPI)의 Axel Steinhof 박사과 공동연구를 통해 강설량 모사 실험구에서 생태계 호흡량 측정 챔버에서 기체를 포집함 (Fig. 10a). 현장연구 종료시 기체 플라스코를 독일 MPI로 돌려보내, 현재 포집한 기체 내 14C를 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 2배 높게 측정됨 (Fig. 11). 22년 8월 초 채취한 토양 유기물층의 세포호소(β -glucosidase) 활성도는 H에서 C와 M보다 높은 경향을 나타냄 (Fig. 12).

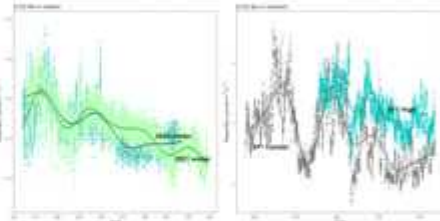


Fig. 10. Soil gas collection in a flask for old carbon (^{14}C) analysis, and CO_2 efflux measured via soda-line during non-growing season in Cambridge Bay, Canada

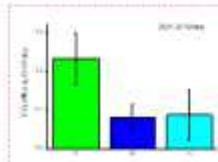


Fig. 11. CO_2 efflux (21/22) for different treatments

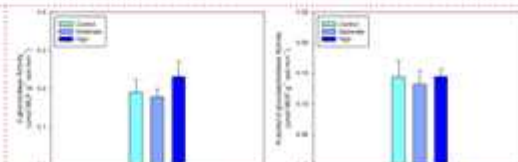
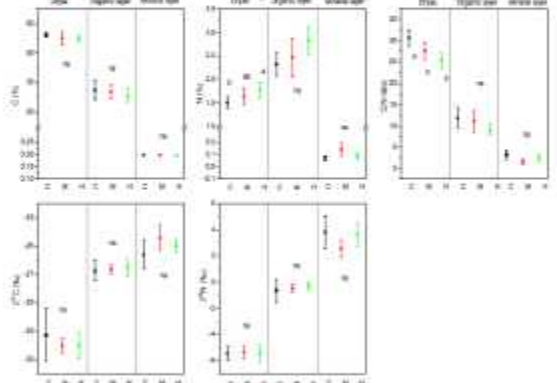
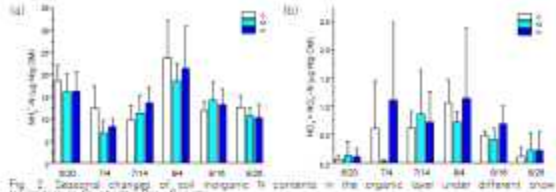
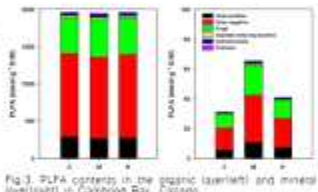
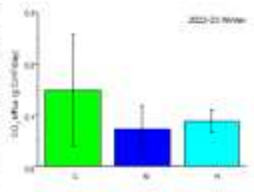


Fig. 12. Extracellular enzyme activities in the organic layer among snow and winter treatments in Cambridge Bay, Canada

번호	관련증빙 명
6	캠브리지베이 적설량 모사 실험 결과 (3차년도 보고서 p. 4-5)
가. 적설량 변화에 의한 토양·생지화학적 변화 규명 ○ 캄브리지베이 지역 적설량 증가에 의한 토양 유기물, 질소, 미생물 특성 변화 연구 ■ 캐나다 캠브리지베이 2022/23년 자료 1) 토양 유기물 2022년 채취한 토양시료의 주요 성분인 Organ Integratable, 식물 질과 C, N 함량과 C, N 동위원소비를 분석함 (Fig. 1). 유기탄소함량은 처리구별 차이가 나지 않았으나, 식물 질과 질소 함량은 처리구에서 대조구보다 유의하게 높았음. 따라서 C/N ratio 또한 대조구에서 가장 높고, 적설 증가 처리구(SA, HI)에서 유의하게 낮음. C, N 동위원소 분석 결과, 처리구별 차이는 나지 않았으나, 식물(유기물중 C/N 비율)의 순으로 값이 증가하여 탄소의 질소 함량 저장률 격차에 highlighted 되는 패턴을 나타냄.  Fig. 1. C and N contents, C/N ratio, and C and N isotope compositions of soil and plant leaves affected snow addition treatments in Cambridge Bay, Canada 2) 토양 미생물 분포 반지질지형학(PLFA)을 이용한 미생물 다양성 분석한 결과, 유기물층은 약 2 umol l⁻¹, 미네랄층은 30 - 60 nmol g⁻¹로, 유기물층은 Gram-negative, fungi, gram-positive 순으로 우점하였으며, 유기물층은 겨울철 적설량에 따른 미생물 분포군별 차이가 없었으나, 미네랄층은 겨울철 적설량이 높아질수록 미생물 다양성이 증가함. Gram-negative, -positive bacteria와 fungi의 증가가 뚜렷하였음.  Fig. 2. Seasonal changes of soil organic N contents in the organic layer under different snow treatments in Cambridge Bay, Canada  Fig. 3. PLFA contents in the organic (left) and mineral (right) horizons in Cambridge Bay, Canada 4) 플럭스 측정: 소다회입과 FD 측정 소다회입을 이용한 겨울철 이산화탄소 발생량 측정 결과, 대조구에서 Moderate, High 처리구보다 발생량이 높았으나, 관차가 커서 처리구간 유의한 차이가 나지 않음 (Fig. 4). FD 센서를 이용하여 호흡량을 측정할 결과, 관측은 처리구에서 높은 호흡량을 보였음. 이는 High 처리구에서 관차, 관차 폭이, 토양 온도가 낮게 유지되며, 호흡량도 낮은 것으로 사료됨. 다만 7월 초부터 FD 센서치가 오작동하여, 대조구와 High 처리구간 비교가 불가능 (Fig. 5a). 22-23년 겨울철 측정결과, 관측을 원년부터 5월 혹은 6월 CO₂ 측정값이 거의 0으로 유지됨 (Fig. 5b).  Fig. 4. CO₂ efflux during non-growing season measured by sodime	

번호	관련증빙 명
7	카운실 적설량 모사 실험구 온실기체 측정 결과 (3차년도 보고서 p.7)

○ 습윤 툰드라 적설량 증가가 온실기체 방출에 미치는 영향 연구

- 미국 알래스카 카운실

1) 토양 기체 플럭스

적설량 변화에 따른 온실기체 방출량을 정량하기 위해 2023년 7월 수동챔버 내 기체를 포집하여 이산화탄소와 메탄 변화량을 측정한 결과, 이산화탄소는 처리구간 차이가 나지 않았고, 메탄은 H지점에서 높게 측정되었으나, 지점별 변이가 커서, 통계적 유의성은 나타나지 않음. 7월 하계 현장 연구 기간 동안 Picarro G4301, multiplexer, autochamber의 시험운동을 실시하였음. 마지막으로 올해 겨울기간 동안 토양 호흡량을 측정하기 위해 소다라임을 현장에 설치함. 적설량 변화가 오래된 탄소의 분해에 미치는 영향을 이해하기 위해, 14C분석을 위한 토양 발생 기체, 기원을 확인하기 위한 식물 및 토양 배양 실험을 통한 기체 포집을 수행하였고, 독일 예나의 막스플랑크 연구소에 분석 의뢰를 한 상태임.

(a)

2023/07/18

Treatment	CO ₂ flux (g m ⁻² day ⁻¹)	CH ₄ flux (mg m ⁻² day ⁻¹)
C	~4.0	~2
H	~4.5	~25
L	~4.5	~2

(b)

(c)

Fig. 9: Soil gas flux measurement (a) CO₂ and CH₄ flux measured by a manual chamber, (b) autochamber and multiplexer connected to G4301, and (c) soil respired gas collection for 14C analysis

번호	관련증빙 명
4,5,6,7	알래스카 카운실 / 캠브리지베이 적설량 모사 실험 결과 종합 (최종보고서 p. 13-16)

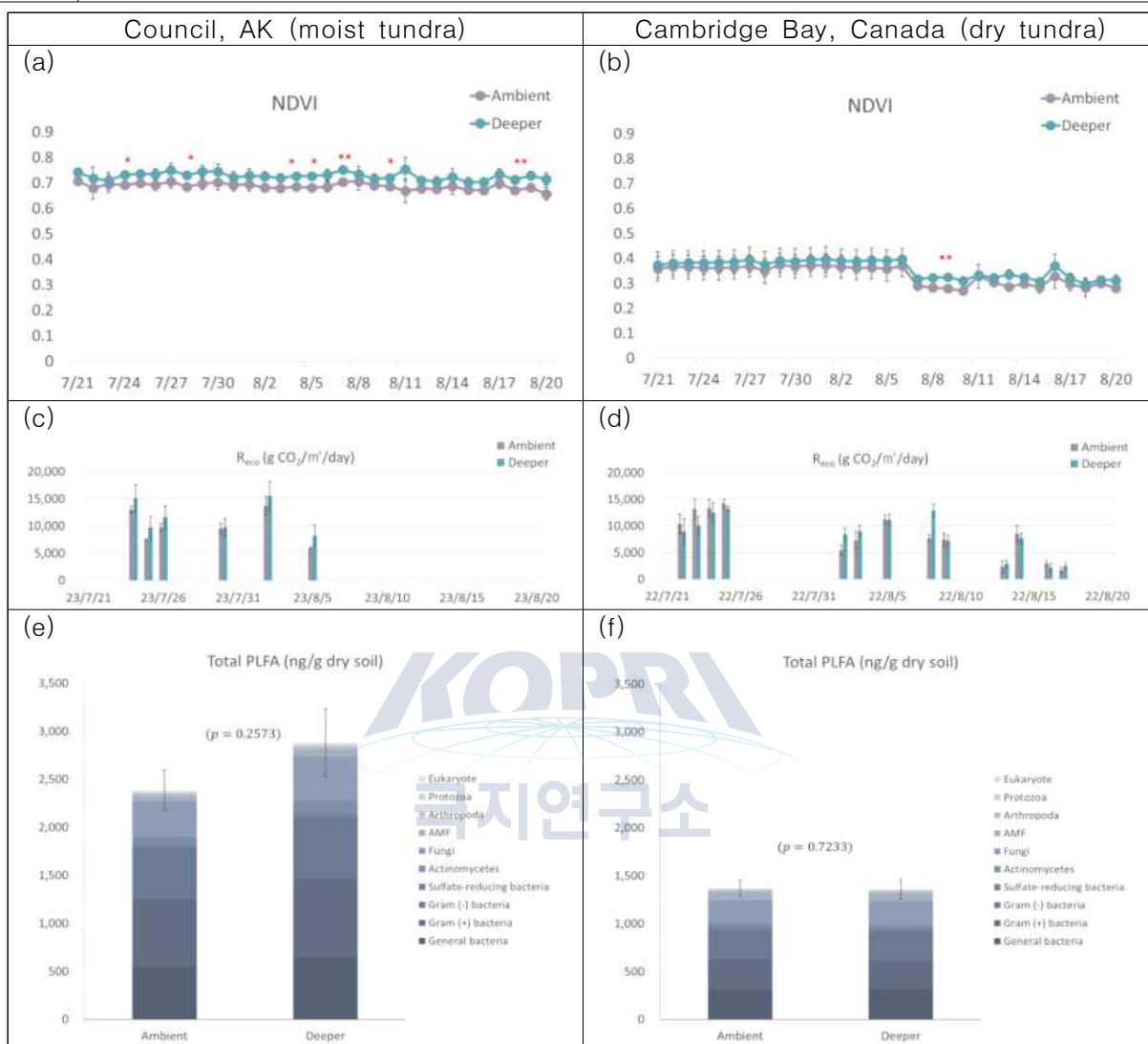


Fig. 4. Biological responses to deeper snow cover at moist (Council, AK) and dry tundra (Cambridge Bay) sites: (a) NDVI, (b) ecosystem respiration (R_{eco} ; b), and (c) total PLFA. 'Ambient' and 'Deeper' represent the control and high snow plots, respectively.

Table 6. Soil chemical properties affected by deeper snow cover at moist tussock tundra (MT) and dry tundra (DT) sites. 'Ambient' and 'Deeper' represent the ambient and deeper snow plots, respectively

Site	Council (MT)		Cambridge Bay (DT)	
Treatment	<i>Ambient</i>	<i>Deeper</i>	<i>Ambient</i>	<i>Deeper</i>
SOC (%)	7.5 (± 0.43)	8.5 (± 1.12)	0.7 (± 0.06)	0.8 (± 0.12)
TN (%)	0.3 (± 0.03)	0.3 (± 0.05)	<0.1	<0.1
DOC ($\mu g/g$)	139.3 (± 25.03)	235.4 (± 70.80)	21.7 (± 6.00)	21.1 (± 5.04)
TDN ($\mu g/g$)	7.02 (± 1.58)	12.55 (± 2.80)	1.25 (± 0.53)	1.76 (± 0.44)
Inorganic N ($\mu g/g$)	0.01 (<0.01)	0.02 (± 0.01)	1.45 (± 0.61)	1.45 (± 0.59)

번호	관련증빙 명
8	적설량 증가가 오래된 탄소 변화에 미치는 영향 (최종보고서 p.16-17) – 적설량 증가가 오래된 탄소(old carbon) 변화에 미치는 영향 토양 유기물 분획 실험을 통해 획득한 각 분획(fraction)의 양과 탄소 함량을 고려하여 계산한 각 분획에 저장된 탄소의 비율은 카운실 지역에서는 적설량 증가에 의해 fPOM에 저장된 탄소의 비율이 유의하게 증가하였고($p < 0.01$), MAOM에 저장된 탄소의 상대적 비율이 유의하게 감소하였다($p < 0.05$, Fig. 6). 반면, 캄브리지베이 지역은 실험 결과의 변이가 커서, 적설량 증가에 의해 각 분획에 저장된 탄소 비율의 차이가 유의하지 않았다 (Fig. 6). 카운실 지역에서는 적설량 증가 이후 늘어난 식물 생산이 fPOM 증가에 영향을 미쳤을 거라 판단이 된다. 카운실 지역에서 MAOM의 변화를 설명하기 위해, 이의 특성을 먼저 설명하자면, MAOM은 토양 내 여러 분획 중에서도 오래된 탄소이며 변화가 어려운 pool로서 이해되고 있다. 그럼에도, 카운실 지역에서의 감소는 MAOM의 화학적 특성, 즉 상대적으로 높은 C/N비와 낮은 15N값(Fig. 5a)을 보았을 때, 분해가 많이 진행되지 않았음을 알 수 있다. 또한, 일반적으로 MAOM은 미네랄 표면과 유기물의 상호작용에 의해 강하게 결합되어있어 변화가 잘 일어나지 않지만, 카운실 지역의 MAOM은 미네랄-유기물 이외에도 결합력이 더 약한 유기물-유기물간의 상호작용으로 축적이 되어있는 부분도 있을 것으로 판단되어, 이는 적설량 변화에 더 민감하게 반응을 했을 것으로 해석된다. 캄브리지베이 사이트는 MAOM이 화학적/물리적으로 모두 안정적인 것으로 나타났다. MAOM의 C/N비는 10-12 값으로 미생물 C/N비와 유사하여(Fig. 5b), 미생물에 의해 충분히 분해된 상태의 물질들이 MAOM으로 존재하는 것으로 판단된다. 15N 또한 다른 pool보다 높은 값을 나타내어, 유기물 변환 과정이 많이 이루어진 것으로 판단된다. Fig. 6. Carbon (C) distribution in each fraction influenced by increased snow cover at moist tussock tundra (Council, AK) and dry tundra (Cambridge Bay, Canada) sites. 'Ambient' and 'Deeper' represent the control and high snow plots, respectively. Double asterisks (**) indicated statistical significance at $P < 0.05$, while a single asterisk (*) indicates marginal significance at $P < 0.10$. ※ Deeper snow cover drives divergent biological responses and SOM vulnerability in Arctic eundra ecosystems (Global Change Biology, IF 10.8, mrnIF = 100, 논문 심사 중)

번호	관련증빙 명
9	적설량 변화에 의한 생태계 비교 결과 (최종보고서 p. 9-17)

– 알래스카 카운실 지중 탐사 결과

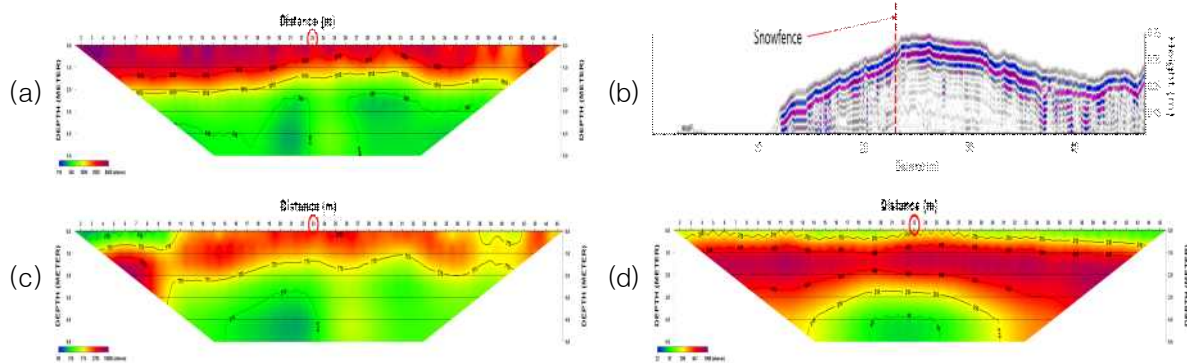


Fig. 2. (a) ERT section on 3rd June, (b) GPR result on 6th June, (c) ERT section on 21st June, and (d) ERT section on 21th June. Red circle is location of snow fence.

– 캄브리지베이 지중 탐사 결과

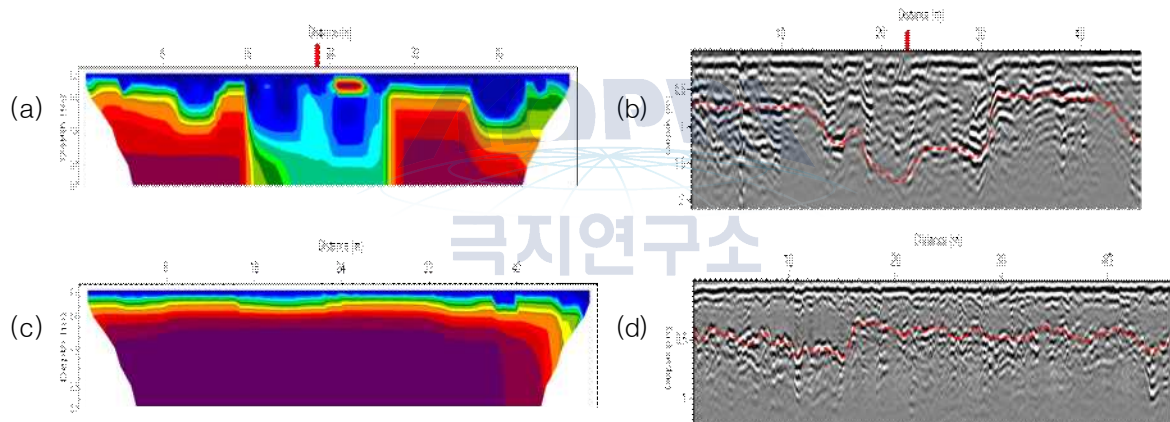


Fig. 3. (a) ERT, (b) GPR section at snow fence. (c) ERT, and (d) GPR section at bare ground. The red tick is location of snow fence. Red dotted line is boundary of active layer and permafrost.

– 식생 비교

Table 5. Changes in carbon (C) and nitrogen (N) contents in plant leaves in response to deeper snow

Site	Council (MT)						Cambridge Bay, (DT)	
Species	<i>Eriophorum angustifolia</i>		<i>Ledum palustre</i>		<i>Sphagnum</i> spp.		<i>Dryas integrifolia</i>	
Treatment	C	H	C	H	C	H	C	H
C (%)	46.5 (±0.17)	46.4 (±0.13)	52.5 (±0.06)	52.3 (±0.13)	43.2 (±0.16)	42.9 (±0.29)	46.2 (±0.41)	45.1 (±0.67)
N (%)	2.2 (±0.08)	2.2 (±0.09)	1.3 (±0.03)	1.4** (±0.03)	0.5 (±0.04)	0.5 (±0.03)	1.5 (±0.06)	1.8* (±0.89)
C/N	21.7 (±0.74)	20.9 (±0.93)	40.7 (±0.91)	37.2** (±0.90)	92.2 (±6.44)	80.3 (±4.56)	30.7 (±0.95)	25.5** (±0.89)

※ 다른 비교 인자는 관련증빙 4-8 참조

번호	관련증빙 명
10	환경발현유전체 및 유기산 정성/정량 분석 결과 (최종보고서 p. 31-33)

– 유기산과 아미노산 함량 분석

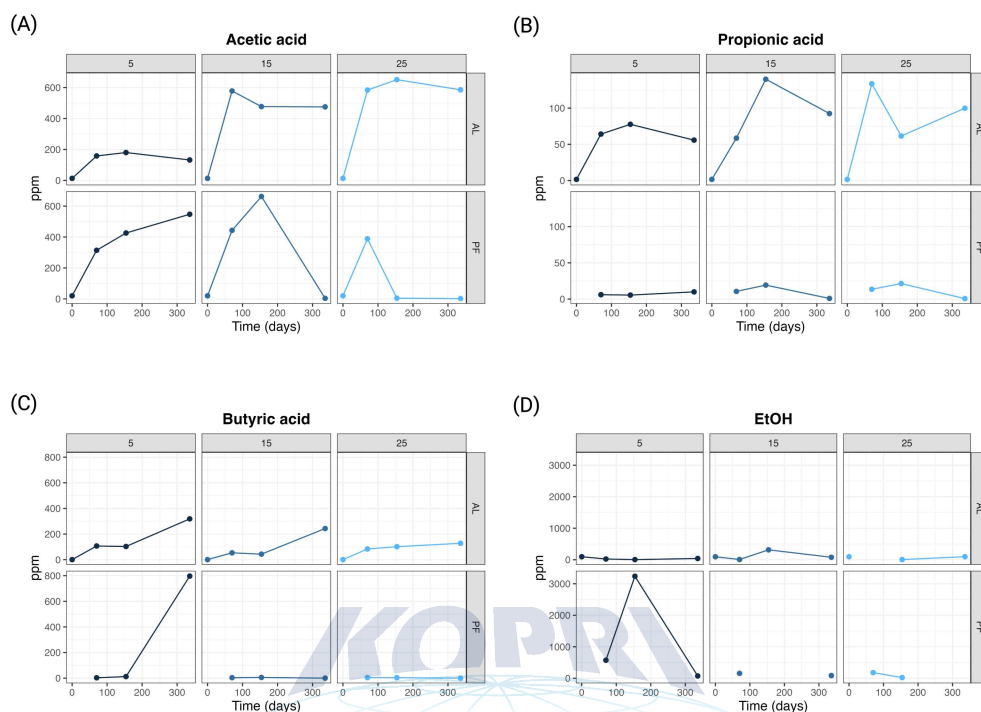


Fig. 26. Organic acid concentration across different incubation temperatures.

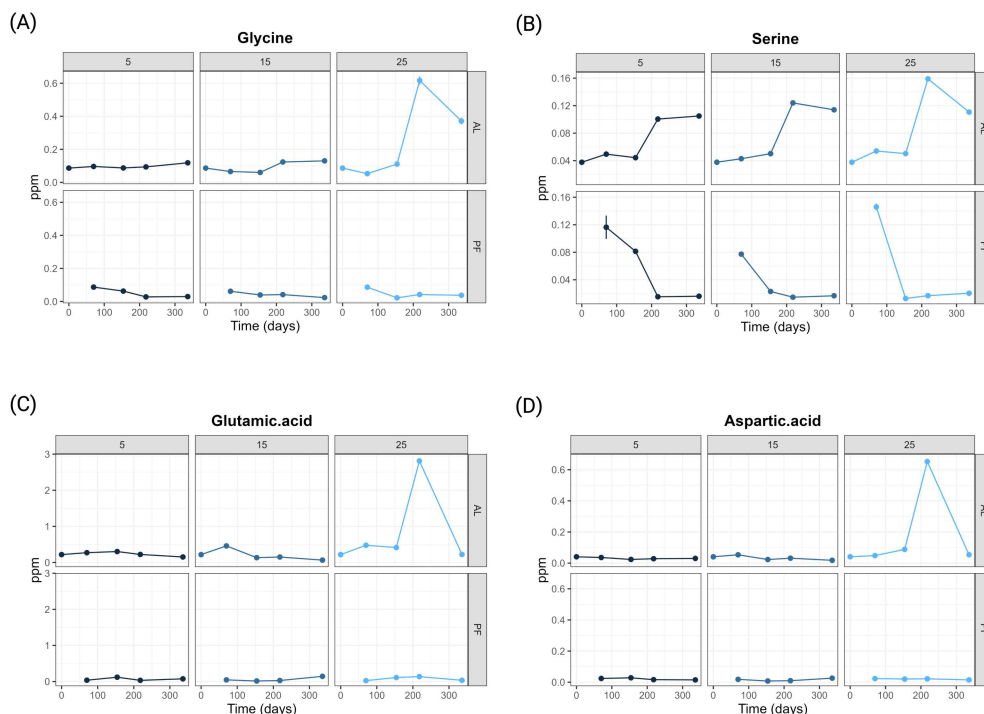


Fig. 27. Amino acid concentration across different incubation temperatures.

번호	관련증빙 명
11	온실가스 연관 혐기성 미생물 10종 유전체 정보 (KPDC등록, 최종보고서 p. 34)

- 온실가스 연관 미생물 중 동정(혐기성 10종, 호기성 5종) (RFP 총족 정량성과)

알래스카 카운실 토양 시료에서 온실가스 연관 혐기성 미생물 10종 (메탄생성균 4종, 혐기 초흡 및 syntrophic bacteria 5종), 호기성 미생물 5종 (유기물 분해 관련 미생물 3종, 질소 순환 관련 미생물 2종) 총 15종의 미생물을 동정 완료하였고, KPDC에 등록하였다 (Table 7, 8).

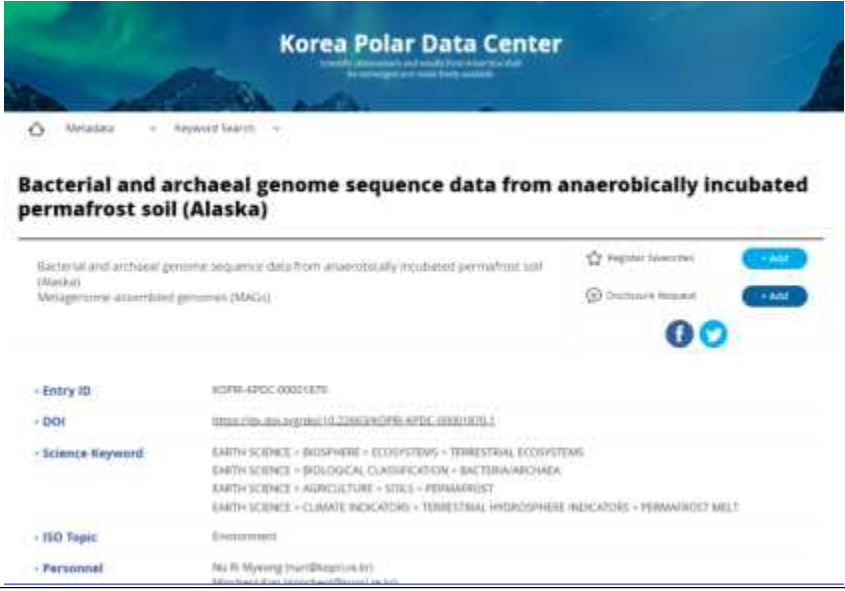
Table 7. Genome information of greenhouse gases-associated anaerobic microbial lineages

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_C5_bin.157	3690070	<i>Methanosarcina</i> sp001714685	Methane oxidation
Day0_PF_bin.18	2663356	<i>Methanobacterium</i>	Methane production
Day336_PF_C5_bin.168	3289153	Fen-1166	Sugar and organic acid degradation
Day336_PF_C5_bin.107	2556805	<i>Aerobacterium</i>	Sugar and organic acid degradation
Day336_AL_C5_bin.139	2718933	<i>Ethanoligenaceae</i>	Sugar and organic acid degradation
Day336_PF_C5_bin.24	2504280	<i>Syntrophomonas</i>	Sugar and organic acid degradation
Day336_PF_C5_bin.115	4930495	<i>Propionisporales</i>	Sugar and organic acid degradation
Day336_AL_C5_bin.4	2293704	<i>Paludibacter</i>	propionate-producing

Table 8. Genome information of greenhouse gases-associated aerobic microbial lineages

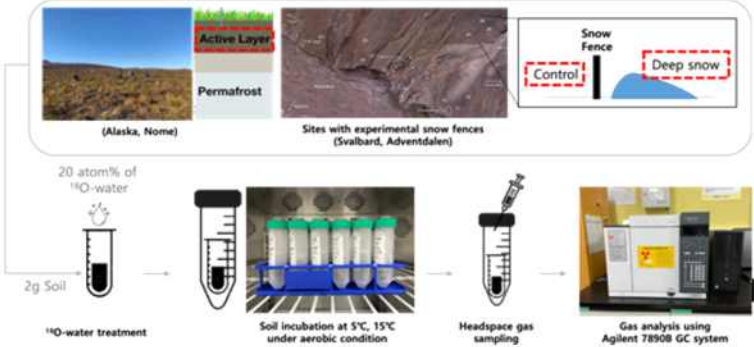
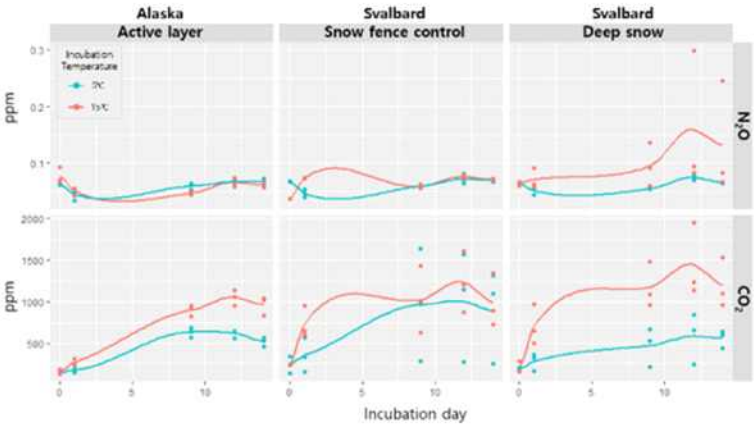
Cell ID	Genome size (bp)	Classification	Characteristic
AM-408-K21	516,351	<i>Candidatus Nitrososphaera gargensis</i>	Ammonia oxidizing archaea
AM-408-O11	3,392,265	<i>Candidatus Koribacter versatilis</i>	Sugar and organic acid degradation
AM-408-C03	612,366	<i>Gemmatimonas aurantiaca</i>	N ₂ O reduction
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

DOI: <https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001870.1>



The screenshot shows the Korea Polar Data Center (KPDC) website. The main header features the center's name and a tagline: "Scientific observation and model data for Arctic and Antarctic and their study results". Below the header, there is a navigation bar with "Metadata" and "Keyword Search" options. The main content area displays a dataset titled "Bacterial and archaeal genome sequence data from anaerobically incubated permafrost soil (Alaska)". The dataset description includes "Bacterial and archaeal genome sequence data from anaerobically incubated permafrost soil (Alaska)" and "Metagenome assembled genomes (MAGs)". There are buttons for "Register New Dataset" and "Dataset Request". Social media icons for Facebook and Twitter are also present. The dataset details section lists the Entry ID as KOPRI-KPDC-00001870, the DOI as <https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001870.1>, the Science Keyword as "EARTH SCIENCE > BIOSPHERE > ECOSYSTEMS > TERRESTRIAL ECOSYSTEMS > EARTH SCIENCE > BIOLOGICAL CLASSIFICATION > BACTERIA/ARCHAEA > EARTH SCIENCE > AGRICULTURE > SOILS > PERMAFROST > EARTH SCIENCE > CLIMATE INDICATORS > TERRESTRIAL HYDROSPHERE INDICATORS > PERMAFROST MELT", the ISO Topic as "Environment", and the Personnel as "Na Ri Myeong (nari@kopri.ac.kr)".

번호	관련증빙 명
12	Global Change Biology 논문 발표
Received: 20 May 2021 Accepted: 11 June 2021 DOI: 10.1111/gcb.15785 PRIMARY RESEARCH ARTICLE Global Change Biology WILEY Disproportionate microbial responses to decadal drainage on a Siberian floodplain Min Jung Kwon¹ Binu M. Tripathi¹ Mathias Göckede² Seung Chul Shin¹ Nu Ri Myeong¹ Yoo Kyung Lee¹ Mincheol Kim¹ KWON ET AL. Global Change Biology WILEY 5137 ACKNOWLEDGMENTS This work has been supported by the Ministry of Science and ICT and the National Research Foundation of Republic of Korea (no. NRF-2015H1D3A1066568 (KOPRI-PN19030)), and NRF-2021M1A5A1075508 (KOPRI-PN21012)), Korea Polar Research Institute (KOPRI, PE21140), the European Commission (PAGE21 project, FP7-ENV-2011, grant agreement no. 282700; PerCCOM project, FP7-PEOPLE-2012-CIG, grant agreement no. PCIG12-GA-2012-333796), the German Ministry of Education and Research (Carbo-Perm-Project, BMBF grant no. 03G0836G), the AXA Research Fund (PDOC_2012_W2 campaign, ARF fellowship M. Göckede), and the l'Agence Nationale de la Recherche (Make Our Planet Great Again; ANR-18-MPGA-0007). Avis, C. A., Weaver, A. J., & Meissner, K. J. (2011). Reduction in areal extent of high-latitude wetlands in response to permafrost thaw. <i>Nature Geoscience</i>, 4, 444–448. https://doi.org/10.1038/ngeo1160 Boiger, A. M., Lohse, M., & Usadel, B. (2014). Trimmomatic: A flexible trimmer for Illumina sequence data. <i>Bioinformatics</i>, 30(15), 2114–2120. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu170 Bond-Lamberty, B., & Thomson, A. (2010). Temperature-associated increases in the global soil respiration record. <i>Nature</i>, 464(7288), 579–582. https://doi.org/10.1038/nature08930 Boyd, J. A., Woodcroft, B. J., & Tyson, G. W. (2018). GraftM: A tool for scalable, phylogenetically informed classification of genes within metagenomes. <i>Nucleic Acids Research</i>, 46(10), e59. https://doi.org/10.1093/nar/gky174 Bradford, M. A. (2013). Thermal adaptation of decomposer communities in warming soils. <i>Frontiers in Microbiology</i>, 4. https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00333 Bräuer, S. L., Cadillo-Quiroz, H., Ward, R. J., Yavitt, J. B., & Zinder, S.	

번호	관련증빙 명
13	<u>온실가스 농도 분석 결과 (최종보고서 p.34)</u> 초기 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℃와 15℃ 두 가지 온도에서 14일간 초기 조건 배양을 수행하였다(Fig. 28). 알래스카 카운실 지역의 활동층과 스발바르 아드반트달랜에서 수행된 적설량 모사 실험구 토양을 대상으로 비교 분석을 진행하였다. 각 배양 조건별 일정 주기로 가스 시료를 포집하여 미생물 활성 및 온실가스 발생의 변화를 확인하였다.  Fig. 28. Aerobic incubation scheme of Alaska and Svalbard soil CO₂ 발생량을 통한 미생물 호흡량 비교 결과, 모든 토양 시료에서 5℃보다 15℃에서 많은 양의 CO₂가 발생하였다(Fig. 29). 초기 배양 단계에서 스발바르 15℃ 배양 시료는 알래스카 시료보다 CO₂ 발생이 더 빠르게 나타났다. 이는 지역별 토양 특성 차이가 미생물 활성도에 영향을 미치기 때문으로 사료된다. 또한 스발바르의 스노우 펜스를 이용한 적설량 증가 실험구에서는 배양 온도에 따른 CO₂ 발생량 차이가 상대적으로 크게 나타났다. 대표적인 온실가스 중 하나인 N₂O의 경우, 알래스카 활동층과 스발바르 적설량 증가 실험 대조구 토양에서는 배양 온도 따른 발생량 차이가 없었다. 그러나 15℃ 적설량 증가 실험구 토양에서 N₂O 발생량 증가가 배양 후기에 관찰되었다.  Fig. 29. Greenhouse gas conc. changes during aerobic incubation

번호	관련증빙 명
14	온실가스 연관 호기성 미생물 5종 유전체 정보 (KPDC등록, 최종보고서 p. 35)

• 온실가스 연관 미생물 종 동정(혐기성 10종, 호기성 5종) (RFP 총족 정량성과)

알래스카 카운실 토양 시료에서 온실가스 연관 혐기성 미생물 10종 (메탄생성균 4종, 혐기 초흡 및 syntrophic bacteria 5종), 호기성 미생물 5종 (유기물 분해 관련 미생물 3종, 질소 순환 관련 미생물 2종) 총 15종의 미생물을 동정 완료하였고, KPDC에 등록하였다 (Table 7, 8).

Table 8. Genome information of greenhouse gases-associated aerobic microbial lineages

Cell ID	Genome size (bp)	Classification	Characteristic
AM-408-K21	516,351	<i>Candidatus Nitrososphaera gargensis</i>	Ammonia oxidizing archaea
AM-408-O11	3,392,265	<i>Candidatus Koribacter versatilis</i>	Sugar and organic acid degradation
AM-408-C03	612,366	<i>Gemmatimonas aurantiaca</i>	N ₂ O 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

DOI: <https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002155.1>

Metadata

Keyword Search

극지연구소

Bacterial and archaeal genome sequence data from Alaska permafrost soil

Bacterial and archaeal genome sequence data from Alaska permafrost soil.
Genome sequence data were obtained through Single-cell genomics.

Register favorites

+ Add

Disclosure Request

+ Add

- Entry ID: KOPRI-KPDC-00002155
- DOI: <https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002155.1>
- Science Keyword: EARTH SCIENCE > BIOSPHERE > ECOSYSTEMS > TERRESTRIAL ECOSYSTEMS
EARTH SCIENCE > BIOLOGICAL CLASSIFICATION > BACTERIA/ARCHAEA
EARTH SCIENCE > AGRICULTURE > SOILS > PERMAFROST
- ISO Topic: Environment
Biota
- Personnel: Nu Ri Myeong (nur@kopri.re.kr)
Mincheol Kim (mincheol@kopri.re.kr)
Ji Young Jung (jyjung@kopri.re.kr)

- 104 -

Microbial metabolic responses and CO₂ emissions differentiated by soil water content variation in subarctic tundra soils[§]

Dockyu Kim^{1†*}, Namyi Chae^{2†}, Mincheol Kim¹,
Sungjin Nam¹, Tai Kyoung Kim¹, Ki-Tea Park³,
Bang Yong Lee³, Eungbin Kim⁴,
and Hyoungeek Lee¹

¹Division of Life Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

²Institutes of Life Sciences and Natural Resources, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

³Division of Atmospheric Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea

⁴Department of Systems Biology, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea

(Received Aug 18, 2022 / Revised Nov 11, 2022 / Accepted Nov 14, 2022)

Recent rapid air temperature increases across the northern-latitude tundra have prolonged permafrost thawing and snow melting periods, resulting in increased soil temperature (T_s) and volumetric soil water content (SWC). Under prolonged soil warming at 8°C, Alaskan tundra soils were incubated in a microcosm system and examined for the SWC differential influence on the microbial decomposition activity of large molecular weight (MW) humic substances (HS). When one microcosm soil (AKC1-1) was incubated at a constant SWC of 41% for 90 days ($T = 90$) and then SWC was gradually decreased from 41% to 29% for another $T = 90$, the initial HS was partly depolymerized. In contrast, in AKC1-2 incubated at a gradually decreasing SWC from the initial 32% to 10% for $T = 90$ and then increasing to 27% for another $T = 90$, HS depolymerization was undetected. Overall, the microbial communities in AKC1-1 could maintain metabolic activity at sufficient and constant SWC during the initial $T = 90$ incubation. In contrast, AKC1-2 microbes may have been damaged by drought stress during the drying SWC regimen, possibly resulting in the loss of HS decomposition activity, which did not recover even after re-wetting to an optimal SWC range (20–40%). After $T = 90$, the CO₂ production in both treatments was attributed to the increased decomposition of small-MW organic compounds (including aerobic HS-degradative products) within an optimal SWC range. We expect this study to provide new insights into the early effects of warming- and topography-induced SWC variations on the microbial contribution to CO₂ emissions via HS decomposition in northern-latitude tundra soil.

[†]These authors contributed equally to this work.

*For correspondence. E-mail: envmic@kopri.re.kr; Tel.: +82-32-760-5525; Fax: +82-32-760-5509

[§]Supplemental material for this article may be found at <https://doi.org/10.1007/s12275-022-2378-3>.

Copyright © 2022, Author(s) under the exclusive license with the Microbiological Society of Korea.

Keywords: Arctic tundra soil, CO₂ emission, global warming, microbial decomposition, soil organic matter

Introduction

Tundra soils in (sub)Arctic and maritime Antarctic harbor a large amount of soil organic matter (SOM) due to low microbial decomposition activity at low soil temperatures (T_s). The SOM in northern-latitude tundra soil accounts for approximately 50% of the global soil organic carbon reservoir and is highly susceptible to microbial decomposition due to rising global temperatures (Johnston *et al.*, 2019). In addition to T_s , soil water content (SWC) is a critical environmental factor that individually or interactively influences microbial community structure and function (Lupatini *et al.*, 2019). Recent global warming in bipolar regions is likely to lead to increased precipitation (maritime Antarctica, Horrocks *et al.*, 2020) and permafrost thawing (subarctic tundra soils, Johnston *et al.*, 2019), which increases SWC along with snow melting. However, SWC may differ significantly depending on the forms and features of land surfaces, which determine microbial SOM decomposition rates (Glanville *et al.*, 2012). Depending on the texture and composition of the soil (Seybold *et al.*, 2010; Wlostowski *et al.*, 2018), SWC can be optimal (e.g., 8–25%) or suboptimal (e.g., < 10% or > 35%) for microbial decomposition rates; higher and lower SWC decrease the rates because of low oxygen supply and low diffusion of soluble substrates, respectively (Stres *et al.*, 2008). Mielenick and Dugas (2000) reported that SWC in a tallgrass prairie in Texas, USA, was optimal in a range of 20–40% for CO₂ emission through SOM decomposition by soil microorganisms, demonstrating a relationship between CO₂ flux, T_s , and SWC.

Tundra SOM contains both small molecular weight (MW) compounds, which are easily degraded by diverse soil microbes, and large MW compounds [e.g., lignin and humic substances (HS)] that are more resistant to microbial decomposition. Heteropolymer HS, which mainly consists of humic acids (HA) and fulvic acids (FA), is formed by the spontaneous condensation of biomolecules derived from dead plants and other organisms. HS are the largest constituent (60–80%) of SOM (Gramss *et al.*, 1999) and have two main functions in tundra soil ecosystems: carbon storage and supply to the surrounding microbes and plants. Generally, soil bacteria and saprotrophic fungi play major roles in the initial breakdown of HS, and greenhouse gases such as CO₂ and CH₄ are released by the subsequent bacterial degradation of HS-derived small compounds (Lipczynska-Kochany, 2018; Kim *et al.*, 2019a). A laboratory study using Arctic tundra soil

humic substance degradation in maritime Antarctic region. *J. Basic Microbiol.* 58, 513–522.

Kim, D., Park, H.J., Kim, M., Lee, S., Hong, S.G., Kim, E., and Lee, H. 2022. Temperature sensitivity of Antarctic soil-humic substance degradation by cold-adapted bacteria. *Environ. Microbiol.* 24, 265–275.

Kim, D., Park, H.J., Nam, S., Kim, S.C., and Lee, H. 2019a. Humic substances degradation by a microbial consortium enriched from subarctic tundra soil. *Korean J. Microbiol.* 55, 367–376.

Kim, M., Lim, H.S., Hyun, C.U., Cho, A., Noh, H.J., Hong, S.G., and

Acknowledgements

This work was supported by Korea Polar Research Institute (KOPRI) grant funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (KOPRI PE22130) and National Research Foundation of Korea grant from the Korean government (MST, the Ministry of Science and ICT) (NRF-2021M1A5A1065679, NRF-2021M1A5A1075508, and NRF-2021R1I1A1A01053870).

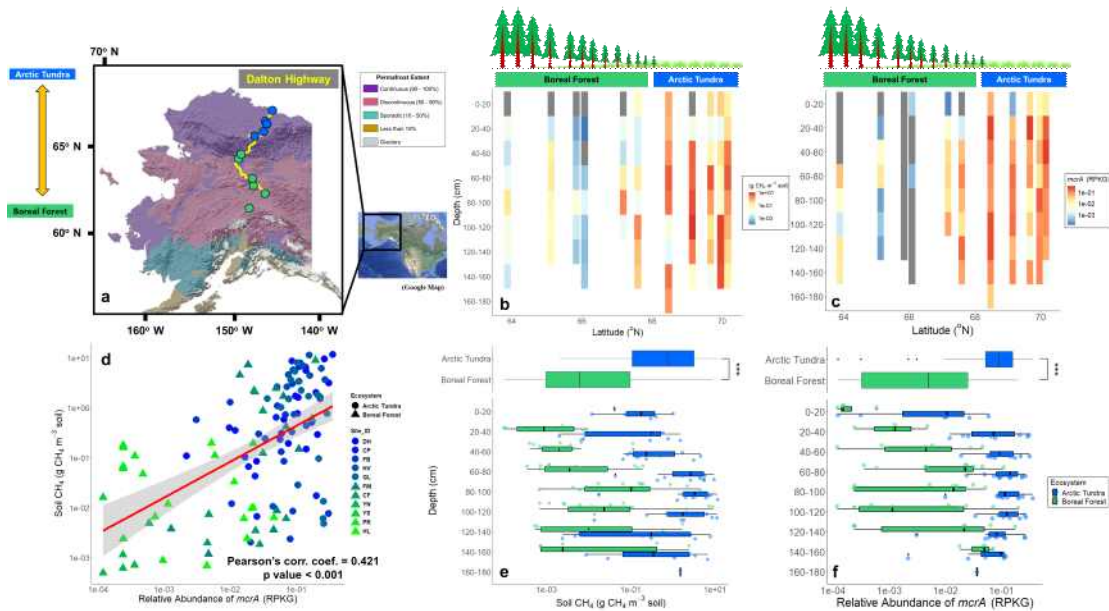


Fig. 37. Latitudinal distribution and depth profiles of soil CH₄ stock and relative abundance of methanogen in Alaskan permafrost. (a) Map of the study sites where the soil cores were collected, and ecosystem types and permafrost extent were displayed. The map was edited from the figures in published literatures. Latitudinal distribution of (b) soil CH₄ stock and (c) relative abundance of methanogen of each soil cores. Relative abundance of methanogen was obtained from abundance of metagenome-extracted *mcrA* functional genes and normalized by RPKG (reads per kb per genome equivalent) statistics. The depth was divided into 20 cm intervals, with red and blue indicating high and low values, respectively. (d) Relationship between soil CH₄ stock and relative abundance of methanogen (n=123). A linear mixed effect model was used and the error bands surrounding the red regression lines represent the 95% confidence interval of the correlation. The above box plot shows statistically significant differences between Arctic tundra and boreal forest (unpaired t-test, n=76 for Arctic tundra and n=70 for boreal forest, ***p<0.001). The thick central lines represent the median value, the boxed areas represent the interquartile range, and the whickers show the maximum and minimum values. Depth profiles of (e) soil CH₄ stock and (f) relative abundance of *mcrA* (RPKG).

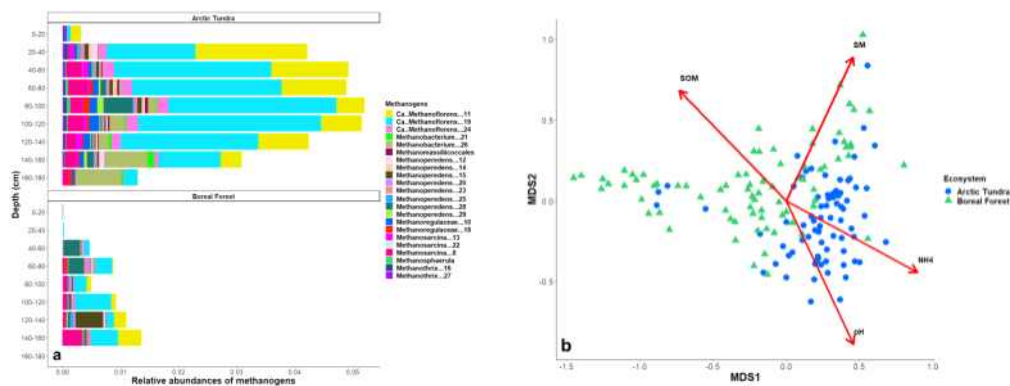


Fig. 39. Composition of methanogenic community. a Mean relative abundance of methanogenic MAGs according to ecosystem type and soil depth. b Nonmetric multidimensional scaling (NMDS) ordination plot depicting changes in the composition of methanogenic communities. Ordinations are based on Bray-Curtis dissimilarity.

번호	관련증빙 명
17	동토 유기물 분해 대사과정 종합 분석 결과 (최종보고서p. 38-39) • 유기물 분해 대사-온실기체 발생 상관성 종합 분석 토양 유기물은 유기물 분해 미생물에 의해 최종적으로 이산화탄소 혹은 유기산으로 분해된다. 온도 증가에 의한 미생물의 유기물 분해 활성 증가는 유기산 생성을 증가시킨다. 특히 다양한 유기산 중 아세트산의 경우 메탄 생성에 직접적으로 이용되는 기질로 아세트산 생성 미생물과 <u>메탄생성균과의 상호작용</u>이 매우 중요하다. 따라서, <u>메탄생성균과 아세트산 생성 미생물 간의 상관성 분석</u>을 수행하였다. 영구동토층의 고온 환경에서 관찰된 아세트산 분해 메탄 생성 기작 활성을 보유하고 있는 <u>메탄생성균 <i>Methanosarcina</i> (PF-MAG_7)</u>과 아세트산 생성 미생물로 확인되는 <u><i>JAFTV01</i> (PF-MAG_204)</u>의 상대 점유도를 비교한 결과, 강한 양의 상관관계가 나타났다(Fig. 34). 이를 통해, <u>메탄생성균과 아세트산 생성 미생물 간의 상호작용</u>이 있으며 이를 통해 메탄 생성 활성에 기여가 가능함을 유추할 수 있다. 또한, 온도 변화에 따른 기능 유전자 발현량 비교 결과 또한 고온의 환경에서 발현량이 증가하는 패턴이 <i>Methanosarcina</i> (PF-MAG_7)의 메탄 생성 유전자 <i>mcrA</i>와 <i>JAFTV01</i> (PF-MAG_204)의 아세트산 생성 유전자 중 하나인 피루브산 산화 유전자 <i>por</i>에서 동일하게 관찰되었다(Fig. 34). 이러한 결과는 유기물 분해 기작과 온실기체 발생 간의 밀접한 기능적 연관성을 시사한다. (A) Anaerolineaceae PF-MAG_204 JAFTV01 Relative abundance (%) $R^2 = 0.87$ $p < 0.001$ Relative abundance (%) PF-MAG_7 <i>Methanosarcina</i> (B) PF-MAG_7 (<i>mcrA</i>) PF-MAG_204 (<i>por</i>) TPM Temperature Incubation temperature ● Day0 ● 5°C ● 15°C ● 25°C (C) PF-MAG_7 PF-MAG_204 Metabolic pathways shown in (C): PF-MAG_7: Methanogenesis pathway converting $H_2 + CO_2$, Acetate, Methanol, and Methylamine to CH_4. PF-MAG_204: Glycolysis pathway starting from Glucose, converting to Pyruvate via EMP and PP, then to Acetyl-CoA via Pyruvate oxidation (releasing CO_2). Acetyl-CoA enters the TCA cycle, which is linked to the MC cycle and Beta-oxidation. Beta-oxidation converts Butanoate to Butanoyl-CoA, which then enters the TCA cycle. Serine is also shown as a metabolite. Fig. 34. Correlation of <i>Methanosarcina</i> (PF-MAG_7) and acetate-producing bacteria (PF-MAG_204) with methanogenesis activity and metabolic pathways.

– 식생이 다른 생태계에서 토양의 깊이별(온도) 메산 산화정도를 측정하기 위한 배양실험

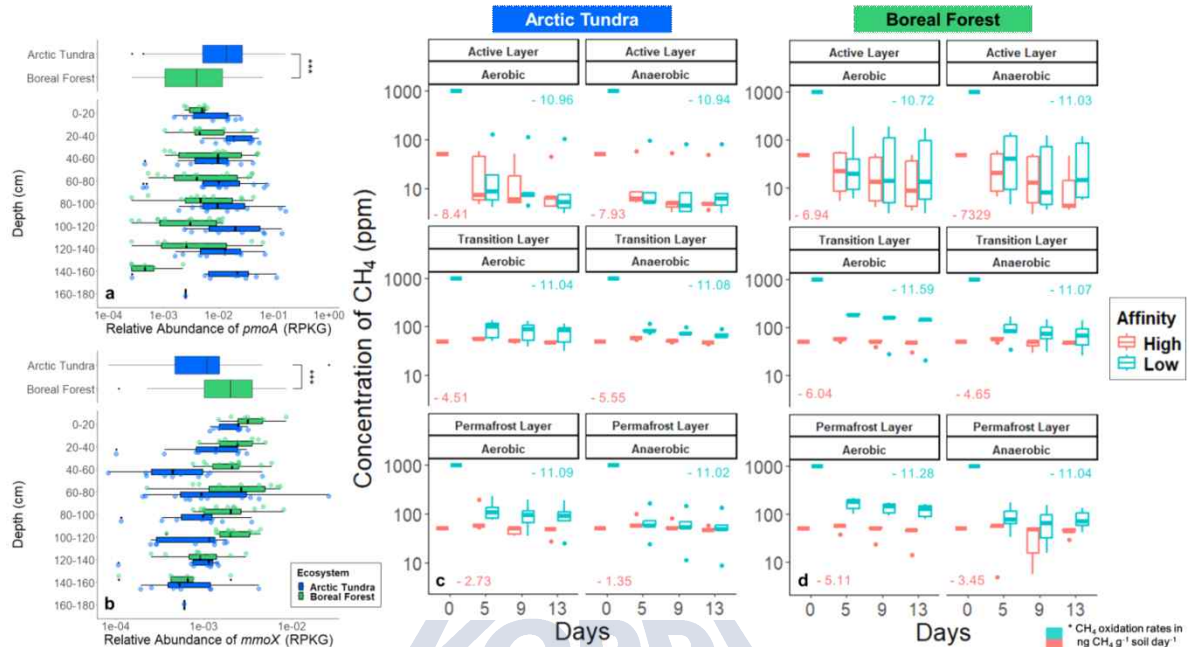


Fig. 40. Depth profiles of relative abundance of methane oxidizers and potential CH_4 oxidation rate. Different depth profiles of relative abundances of (a) *pmoA*, and (b) *mmoX* genes in Arctic tundra and boreal forest soils. The abundances of the genes were normalized using the RPKG (reads per kb per genome equivalent) statistics. The above box charts show statistically significant differences between Arctic tundra and boreal forest (unpaired t-test, $n=79$ for Arctic tundra and $n=78$ for boreal forest, $***p<0.001$). Results of the aerobic and anaerobic soil incubation experiment by layers under high (initial CH_4 conc. = 1000 ppm) and low (initial CH_4 conc. = 50 ppm) affinity CH_4 oxidation conditions using the soils of (c) Arctic tundra and (d) boreal forest. Numbers indicates potential CH_4 oxidation rate in $\text{ng CH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ soil day}^{-1}$ calculated from the changes in headspace CH_4 concentration ($n=5$ for Arctic tundra and $n=6$ for boreal forest).

– 산불 지역 토양의 유기물 분해 속도를 측정하기 위한 배양실험

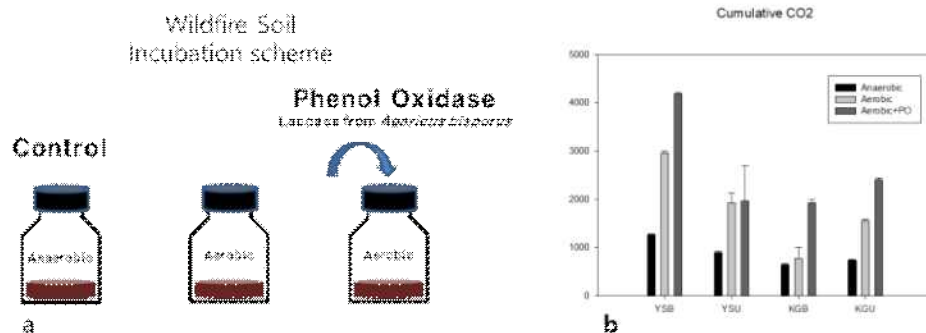


Fig. 44. The incubation experiment for determining enzymic latch mechanism. (a) Schematic diagram for the incubation and (b) results.

번호	관련증빙 명
19	센서 구매내역 (1단계 보고서 p. 11)

○ 환경인자 측정 센서 구비

캐나다 IMA지역에 설치할 토양 온도, 토양 수분 센서 구비 완료 (Fig. 1.31)



Fig. 1.31. Procheck handheld reader(left) and soil temperature and moisture sensors(right)

(1년차 연차보고서, p. 32)



다. 미단지에서 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

(1단계 보고서, p. 11)

회계코드	회계비목	사용자	거래처	지원기관	지급액	지출일	적요
PN21012171	재료비	명누리	주식회사 씨앤와이	재단법인 한국연구재단	1,584,000	2021-07-16	토양수분,온도,EC 센서 (TEROS12)/ 토양 온도 측정용 센서
PN21012171	재료비	정수정	씨앤에치아이엔씨(주)	재단법인 한국연구재단	1,991,000	2021-11-18	토양수분/온도센서 / 토양 환경인자 측정 위한 센서 구매

번호	관련증빙 명
20	문헌조사 내용 및 이메일 증빙 (1단계 보고서 p. 12)
▶ 캐나다 IMA (1년차 연차보고서 p. 32-41에 상세 작성되어 있음) ○ 베달라 탐사 예정지 문헌 조사 및 국제협력 사전 협의 ■ 캐나다 IMA 1) POLAR의 Chief scientist인 David Hik와 향후 협력을 위한 논의(2021. 09.24.) - KOPRI-POLAR 사이 agreement 검토 후 업데이트 진행 예정. KOPRI에서 운영하는 연구 사이트에 대해 관심이 높고, 지형 의사가 있을 확률. CHARS 기지 내 실험실에 의부인 접근 제한 문제 해결을 위해 노력하고 있는 IMA 사이트에서 공동연구 진행 논의 필요 - IMA 사이트 위치는 누나부트 준주 벤토리아 섬의 그리너(Greener) 호수 수역 (북위 69도). 캐나다 극지연구소(POLAR)와 고위도 북극 연구기지(Canadian High Arctic Research Station, CHARS)에서 육상 연구를 위해 설정한 intensive Monitoring Area 임. (Fig. 1.32) 	▶ 캐나다 IMA (이메일) Re: POLAR Linkages with KOPRI and Dr. Ji Young Jung David Hik <david.hik@polar-polaire.gc.ca> 2021-09-24 (수) 오전 7:40 안녕하세요. 김지영 박사와 연구원님들께 인사드립니다. (jyoung@kopri.re.kr) 안녕하세요. Ian Hogg <ian.hogg@polar-polaire.gc.ca>, Donald McLean <dona1@biochemresearch.com> Dear Ji Young I am looking forward to learning more about your work and possibilities for ongoing and future collaboration with POLAR. I will be relocating to Cambridge Bay in a couple of weeks. I have visited KOPRI several times over the past 15 years and would be delighted to reconnect with you and your colleagues. Best wishes, David Thank you / 감사 / 谢谢 / Merci David Hik (as of 12 September) Chief Scientist & Executive Director - Programs Polar Knowledge Canada / Government of Canada 1 Unusap Place, Cambridge Bay, NU X8B 0C8 david.hik@polar-polaire.gc.ca / Tel: +1 343 546 4734 
▶ 북그린란드 (1년차 연차보고서에 상세 내용) - 북그린란드 미립자 동태 생태계 조사를 위해 그동안 그린란드 동태에서 수행되었던 동향 조사를 통해 연구에 대한 사전 문헌 조사 수행 (Fig. 1.36) 가운데 그린란드 대륙 자체에서 수행한 동향 미생물 특성 연구는 10개가 채 되지 않음. 주로 그린란드 동부 해안에 위치한 Zackenberg에서 기후변화 조사실험과 연관된 미생물 특성 연구가 수행되었고 (Jung et al., 2019), 그밖에 서부 해안의 Qaanaaq Island (Vejrup et al., 2019), Store Koldewey Island (Gardner et al., 2014), 북그린란드 일대에서만 편파기 지진 Station Nord 주위에서 2건의 미생물 특성 연구가 수행됨. 최근 Station Nord에 과학자 William Staddon의 운영하면서 과학연구 활동의 결과로 2020년에 기후변화 조사에 따른 미생물 특성 변화 연구결과가 보고된 바 있음 (Adamson et al., 2020). 하지만 본 연구팀에서 조사 예정인 Sirius Passet 지역에서의 동향 및 미생물 특성 연구는 현재까지 보고된 바 없기에, 미립자로부터 연구 가치가 충분하다고 판단됨. 미립자 동태 생태계 조사 예정지인 Sirius Passet 지역에서의 조사는 대기 온도 범위는 -39.6 ~ 10.1℃ (현재 AWS 차폐)이며, 고위도 지역일수록 불규칙하고 북그린란드 일대에서 가장 식생이 풍부한 곳 중 하나인 조사지인 바 있음 (Fig. 1.37)  Fig. 1.36 Soil microbial community studies that have been conducted in Greenland	▶ 러시아 (1년차 연차보고서에 상세 내용) 2) 러시아의 식생 연구 현황 - 러시아 비라노바 기지가 위치한 몰레베키 섬의 식생 조사 결과 고위도 북극의 식생 특징 보임 (Fig. 1.38; Table 1.7)  Fig. 1.38 Vegetation survey area in Molokai Island, Russia where low Base Cape Baranov is located (from Malyukova 2006)

번호	관련증빙 명
21	IMA 미답지 환경자료 및 탐사 결과 (최종보고서 p.55-57, 59)

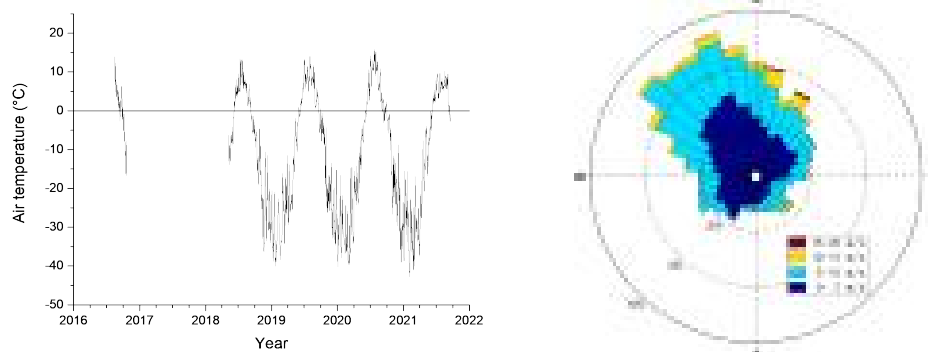


Fig. 48. Mean air temperature and wind speed and direction during winter (October–May) in IMA (data shared by POLAR).

– 식생 군집 조사

2022년 7-8월 캐나다 CHARS 연구지원을 받아 IMA 현장조사 수행하였다. CHARS에서 환경인자를 모니터링하는 영역 중, 주요 4곳 식생분포 지역인 *Dryas-Carex*, *Cassiope-Dryas* (snow bed), Shrub-sedge fen, Sedge fen에서 식생 피도 조사를 수행하였고(Table 11). *Dryas-Carex* 군집은 가장 건조한 지역으로서, 식생 피도가 가장 낮았다. *Cassiope-Dryas* 군집은 눈이 늦게까지 남아있는 움푹 패인 지역에 위치하지만, 수분함량이 높게 유지되지는 않아 *Dryas* 식물이 더 우점하였고, *Cassiope*의 피도



Fig. 49. Four vegetation groups in IMA

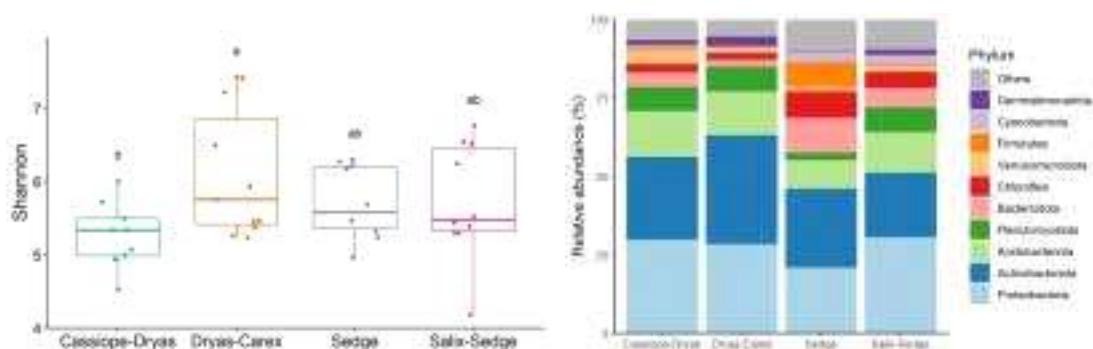


Fig. 51. Comparison of bacterial diversity and phylum composition between four different vegetation types in IMA site, Canada.

번호	관련증빙 명
22	캐나다 IMA 토양, 식물 분석결과 (최종보고서 p.57-58)

Table 12. 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>	
Soil Layer	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
TOC(mg/g)	0.36±0.113	0.03±0.015	0.33±0.038	0.15±0.080	0.51±0.104	0.04±0.017	0.69±0.046	0.16±0.070
TN(mg/g)	0.030±0.008	0.003±0.002	0.028±0.006	0.013±0.008	0.042±0.011	0.002±0.001	0.061±0.005	0.012±0.006
TOC/TN	11.7±1.02	11.9±4.54	12.1±1.49	11.5±0.82	12.5±1.24	25.3±6.74	11.3±1.19	13.6±1.23
Sand (%)	-	48.5±10.8	-	-	-	5.7±0.7	-	6.2±4.2
Silt (%)	-	41.7±5.9	-	-	-	71.0±5.2	-	77.5±2.1
Clay (%)	-	9.8±5.6	-	-	-	23.3±4.8	-	16.4±3.5

Table 13. C & N contents in plant species under different vegetation types in IMA, Canada

Community	Plant	#	C(%)	SD	N(%)	SD
CD	Cassiope	5	51.3	2.9	0.86	0.05
	Dryas	6	48.0	0.7	1.48	0.23
	Sedge	4	44.3	0.4	1.64	0.28
D	Dryas	6	46.9	0.7	1.33	0.18
	Sedge	3	43.1	0.8	1.26	0.40
Se	Moss	4	38.5	0.9	1.40	0.08
	Sedge	4	42.2	0.5	1.76	0.12
SS	Dryas	5	42.8	0.5	1.33	0.07
	Salix	3	40.6	0.5	1.83	0.10
	Sedge	5	40.1	0.5	1.57	0.11

Table 14. Soil organic C & total N contents under different vegetation types in IMA, Canada

Community	Layer	#	C (%)	SD	N (%)	SD
CD	Org	6	36.0	3.9	2.14	0.26
	Oa	2	23.5	13.0	1.54	0.78
	Min	1	0.8		0.08	
D	Org	5	33.7	4.6	2.22	0.37
	Min	4	1.2	0.5	0.09	0.03
Se	Org	5	44.4	0.6	2.84	0.12
	Min	5	8.6	3.1	0.58	0.20
SS	Org	5	40.5	2.8	2.72	0.26
	Min	5	2.6	1.5	0.19	0.11

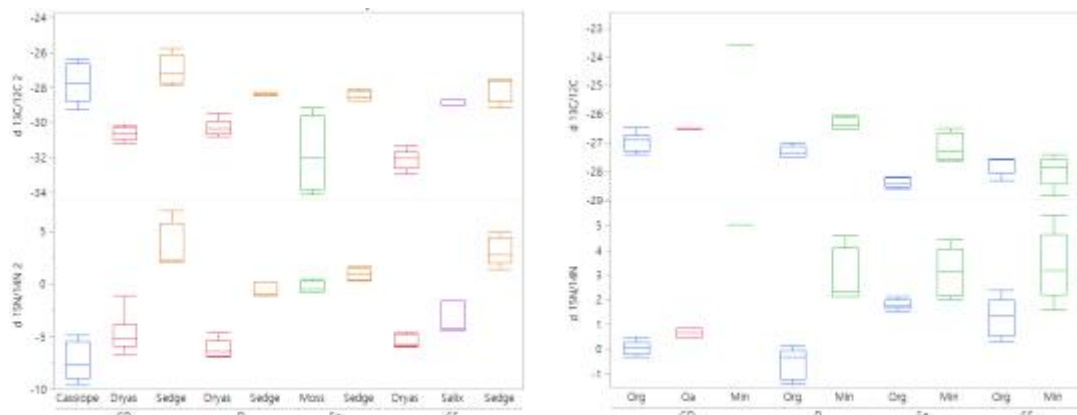


Fig. 50. C and N isotopes ratios in each plant species (left) and in soil layers (right) under different vegetation types.

번호	관련증빙 명
23	그린란드 토양 및 미생물 분석 결과 (최종보고서 p.60-61)

– 그린란드 고위도 북극 미답지에서 식생에 따른 토양 특성 비교 분석

Table 15. Soil physico-chemical properties under different vegetation groups in Sirius Passet, Greenland

	MC	pH	EC	TC	TIC	SOC	TN	C/N ratio	Sand	Silt	Clay
Carex	124.1 (83.9)	7.4 (0.5)	140.8 (22.4)	6.4 (2.8)	0.5 (0.3)	5.9 (3.1)	0.4 (0.2)	13.1 (1.3)	9.6 (13.0)	70.0 (9.3)	20.4 (8.8)
Cassiope	70.7 (32.3)	7.2 (0.1)	209.6 (44.1)	11.5 (3.7)	0.5 (0.1)	11.0 (3.6)	0.7 (0.2)	14.7 (0.7)	21.4 (7.2)	63.1 (2.7)	15.5 (5.6)
Dryas	54.4 (67.1)	7.8 (0.7)	178.9 (70.2)	7.7 (9.1)	1.3 (0.5)	6.4 (9.3)	0.5 (0.7)	8.8 (3.7)	24.8 (11.7)	62.8 (9.2)	12.4 (9.3)
Oxyria	9.6 (2.0)	8.7 (0.2)	245.5 (25.3)	2.1 (0.3)	1.2 (0.2)	0.9 (0.4)	0.1 (0)	7.5 (1.6)	32.9 (3.3)	57.2 (2.7)	9.9 (1.8)
Salix	20.8 (10.4)	8.2 (0.3)	185.2 (45.3)	3.4 (3.4)	1.4 (1.4)	2.0 (2.2)	0.2 (0.1)	9.3 (4.6)	28.4 (17.2)	61.7 (14.4)	9.9 (2.9)
Saxifraga	24.3 (13.2)	7.5 (0.6)	105.9 (22.2)	2.8 (1.1)	0.7 (0.4)	2.1 (1.5)	0.1 (0.1)	13.2 (2.1)	40.8 (28.4)	47.8 (21.8)	11.4 (6.8)
Silene	10.3 (3.1)	8.4 (0.1)	236.8 (64.2)	1.9 (0.8)	0.7 (0.4)	1.2 (0.7)	0.2 (0)	7.2 (2.7)	17 (5.9)	69.7 (4.5)	13.3 (1.8)

– 그린란드 고위도 북극 미답지에서 식생에 따른 토양 미생물의 군집 구조

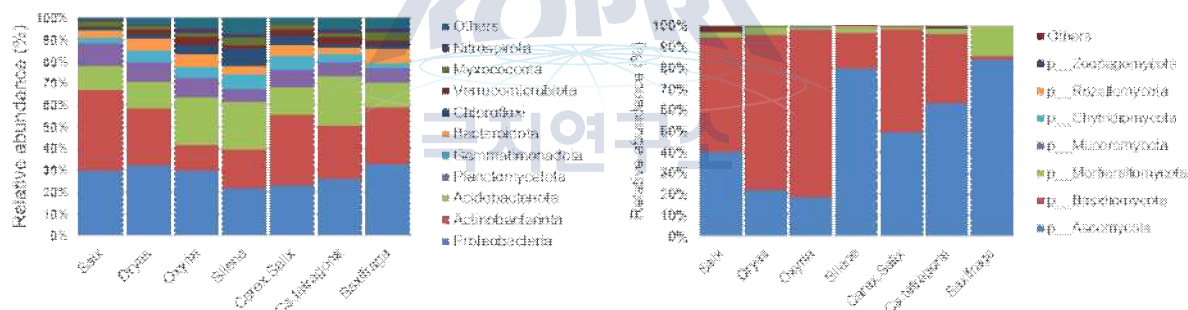


Fig. 54. Differences in relative abundances of bacterial (left) and fungal (right) phylum among cover vegetation types in the high Arctic soils of Sirius passet, Greenland.

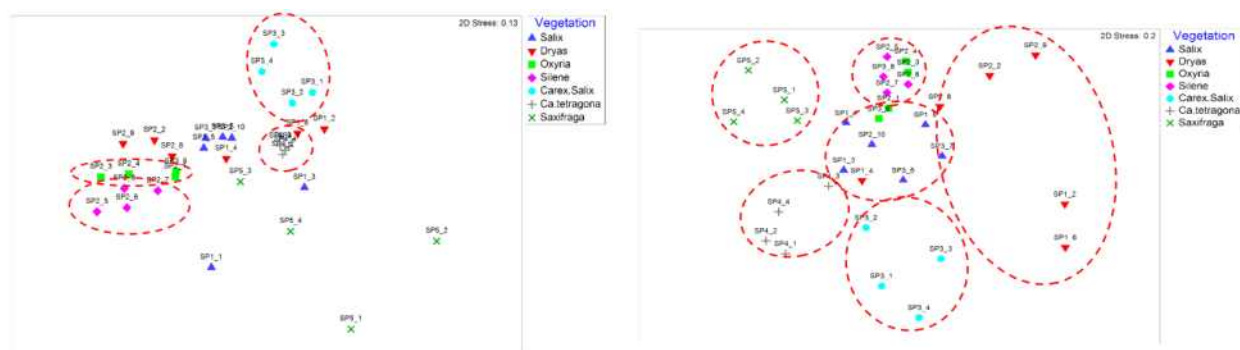


Fig. 55. Differences in community structure of bacterial (left) and fungal (right) phylum among cover vegetation types in the high Arctic soils of Sirius passet, Greenland.

번호	관련증빙 명
24	그린란드 토양 안정동위원소 분석결과 (최종보고서 p.60)

- 그린란드 토양 시료의 탄소·질소 동위원소 분석

그린란드 Sirius Passet지역의 토양 탄소 질소 안정동위원소 분석 결과(Fig. 53), 모든 식물군에서 -26~-28사이의 값을 나타내어 C3식물의 특성을 보였고, 식물 군집에 따른 특이성은 뚜렷하게 보이지 않았다. 질소 안정동위원소 또한 대부분 0 이상의 값을 보였다. Cassiope 군집 아래 토양의 경우 $\delta^{15}\text{N}$ 은 다른 식물군집 아래 토양보다 depleted되어 있는데, 캐나다 IMA 식물 동위원소 분석 결과 Cassiope식물의 잎이 다른 식물체들보다 특히 더 $\delta^{15}\text{N}$ 이 낮은 것을 볼 수 있다. 따라서, 토양 $\delta^{15}\text{N}$ 의 낮은 값은 식물체에서 유래된 특성이 토양에 반영된 것으로 여겨진다.

Vegetation Type	$\delta^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ (‰)
Carex	-27.5	1.8
Cassiope	-26.5	-0.5
Dryas	-27.5	1.5
Oxyria	-27.5	1.2
Salix	-27.0	1.8
Saxifraga	-26.0	2.0
Silene	-27.5	2.5

Fig. 53. C and N isotopes ratios in soil layers under different vegetation types.

번호	관련증빙 명
25	두 지역 미답지 토양, 미생물 구조 종합 분석 결과 (최종보고서 p.62-64)

– bacteria 군집 비교

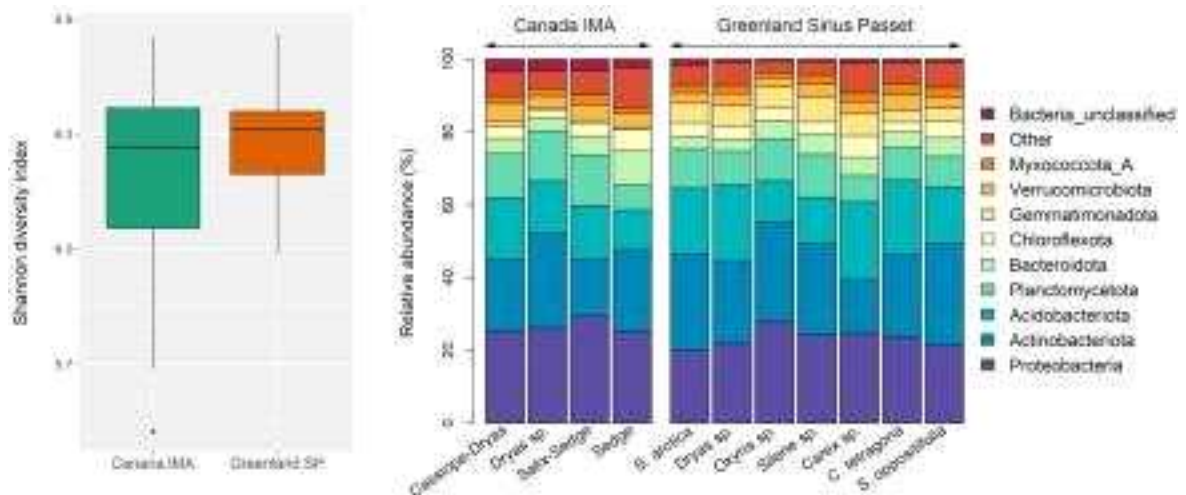


Fig. 55. Comparison of bacterial diversity (left), and bacterial phylum composition (right) between Canada IMA and Greenland Sirius Passet areas.

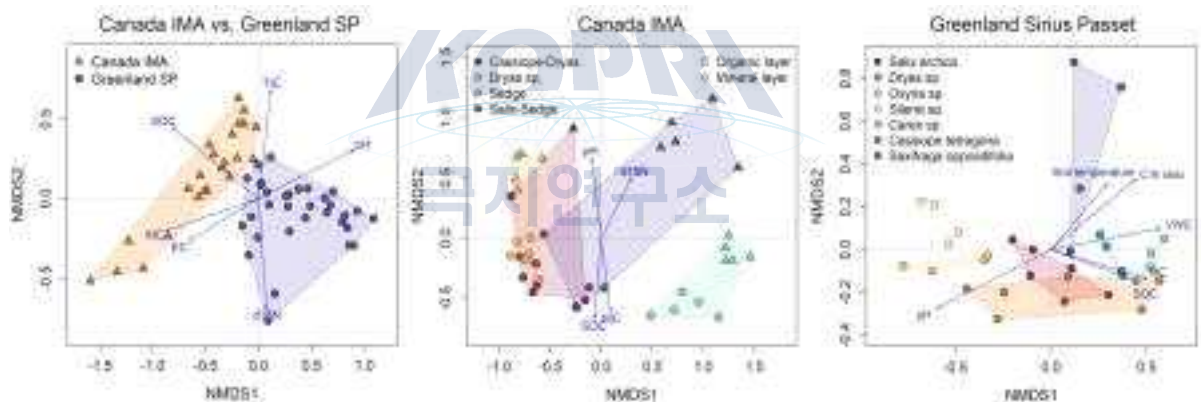


Fig. 56. NMDS plots displaying bacterial community structure and their association with vegetation type and edaphic factors in Canada IMA and Greenland Sirius Passet areas.

– Fungi 군집 비교

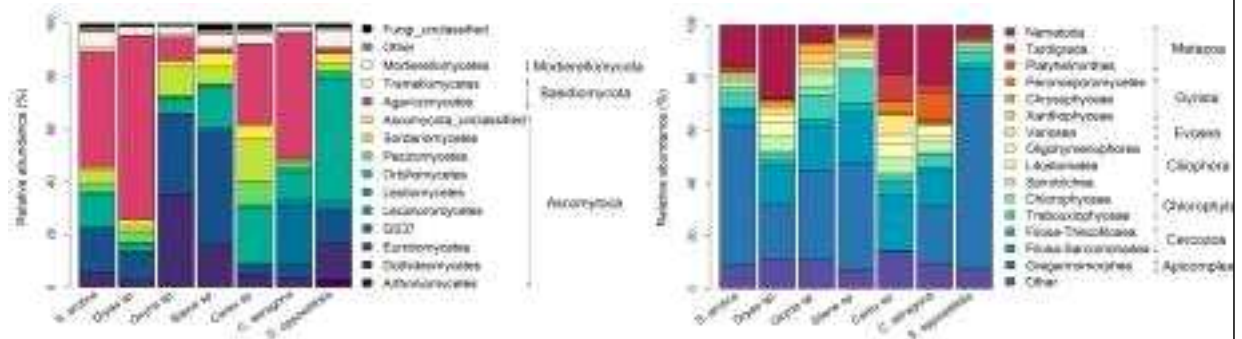


Fig. 57. Composition of fungal communities at the class level (left), and micro-eukaryotic communities at the phylum level (right) across different vegetation types in Sirius Passet, Greenland.

첨부2

연구개발결과 활용계획서

연구개발결과 활용계획서																		
사업명	① 부처사업명(대) 원천기술개발사업 - ② 사업명(중) 해양극저기초원천기술개발사업 - ③ 세부사업명(소) 해양극저기초원천기술개발사업																	
과제명	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해																	
주관연구기관명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소				주관연구책임자 성명				정지영									
총 연구기간	2021. 04. 27 ~ 2025. 03. 31 (48개월)				자체평가 해당 연구기간				2021. 04. 27 ~ 2025. 03. 31 (48개월)									
1. 연구성과 및 활용 현황																		
가. 과학기술/학술적 연구성과																		
사업명	해양극저기초원천기술개발사업				연구책임자	정지영		주관기관	한국해양과학기술원 부설 극지연구소									
과제번호	2021M1A5A1075508				과제명	기후변화에 의한 북극 동토 생태계 생지화학적 변화 이해												
※산학강좌,기술이전 및 기술평가는 현재 입력 받지 않는 항목입니다.																		
과학기술/학술적 연구성과(단위 : 건)																		
전문학술지 논문게재				초청 강연 실적	학술대회 논문발표		지식재산권				수상 실적	출판실적		표준		신기술 지정	기술 제품 인증	
국내논문		국외논문			국내	국제	출원		등록			저역 서	보고 서	국내	국제			
SCI	비SCI	SCI	비SCI				국내	국제	국내	국제								국내
0	0	17	0	0	7	24	0	0	0	0	7	1	0	0	0	0	0	
인력양성 및 연구시설(단위 : 명,건)																		
학위배출		국내외 연수지원										산학강좌		연구기자재				
박사	석사	장기				단기												
		국내		국외		국내		국외										
4	0	0		0		0		0		0		1						
국제협력(단위 :명,건)																		
과학자교류		국제협력기반								학술회의개최								
국내과학자 해외파견	외국과학자 국내유치	MOU체결		국제공동연구		국제사업참여		학술회의개최(국내,국제 통합)										
25	0	0		0		0		0										
산업지원 및 연구성과 활용(단위 : 건)																		
기술확산			연구성과활용(사업화 및 후속연구과제 등)															
기술실시계약	기술지도	기술무역	후속연구추진	사업화추진중	사업화완료	기타목적활용	기술마케팅	시험제품	사업화계획									

(기술이전 등)									
0	0	0	0	0	0	5	0	0	0

기타 성과(단위 : 건)

언론보도 성과	생명자원/신품종 /화합물	원자력연구개발사업실적(원자력연구개발사업에한함)				법령 반영	정책 활용 내용	설계 기준
		기술보고서	설계문서	장비구축 및 개발	분석방법개발			
5	0	0	0	0	0	0	0	0

나. 전문 학술지 논문게제 성과 정보

전문학술지 논문게제 성과정보

과제번호	게제연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2021M1 A5A1075 508	202110	Disproportionate microbial responses to decadal drainage on a Siberian floodplain	Kwon, Min Jung; Tripathi, Binu M.; Goeckede, Mathias; Shin, Seung Chul; Myeong, Nu Ri; Lee, Yoo Kyung; Kim, Mincheol;	SCI	GLOBAL CHANGE BIOLOGY	27(0)	국외	SCI등재	10.863	예	50
2021M1 A5A1075 508	202202	Chronological changes in soil biogeochemical properties of the glacier foreland of Midtre Lov acute accent enbreen, Svalbard, attributed to soil-forming factors	Kim, You Jin; Laffly, Dominique; Kim, Se-eun; Nilsen, Lennart; Chi, Junhwa; Nam, Sungjin; Lee, Yong Bok;	SCI	GEODE RMA	(0)	국외	SCI등재	7.422	예	50

			Jeong, Sujeong; Mishra, Umakant; Lee, Yoo Kyung; Jung, Ji Young;								
전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2021M1 A5A1075 508	202206	Microbial and environmental processes shape the link between organic matter functional traits and composition	Ang Hu;Kyoung Soon Jang;Fanfan Meng;James Stegen;Andrew J Tanentzap;Mira Choi;Jay T Lennon;Janne Soininen; Jianjun Wang	직접입력	Environmental Science and Technology	0(56)	국외	SCI등재	11.357	예	60
2021M1 A5A1075 508	202206	Ecological networks of dissolved organic matter and microorganisms under global change	Hu, Ang; Choi, Mira; Tanentzap, Andrew J.; Liu, Jinfu; Jang, Kyoung-Soon; Lennon, Jay T.; Liu, Yongqin; Soininen, Janne;	SCI	NATURE COMMUNICATIONS	()	국외	SCI등재	17.694	예	60

			Lu, Xiancai; Zhang, Yunlin; Shen, Ji; Wang, Jianjun;								
전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2021M1 A5A1075 508	202209	Winters are changing: snow effects on Arctic and alpine tundra ecosystems	Rixen, Christian; Hoye, Toke Thomas; Macek, Petr; Aerts, Rien; Alatalo, Juha M.; Anderson, Jill T.; Arnold, Pieter A.; Barrio, Isabel C.; Bjerke, Jarle W.; Bjorkman, Mats P.; Blok, Daan; Blume-W erry, Gesche; Boike, Julia; Bokhorst, Stef; Carbogna ni, Michele; Christians en, Casper T.;	SCI	ARCTIC SCIENC E	8(3)	국외	SCI등재	3.045	예	100

			Convey, Peter; Cooper, Elisabeth J.; Corneliss en, J. Hans C.; Coulson, Stephen J.; Dorrepaal , Ellen; Elberling, Bo; Elmendorf , Sarah C.; Elphinsto ne, Cassandr a; Forte, T'ai G. W.; Frei, Esther R.; Geange, Sonya R.; Gehrman n, Friederike ; Gibson, Casey; Grogan, Paul; Halbritter, Aud Helen; Harte, John; Henry, Gregory H. R.; Inouye, David W.; Irwin, Rebecca E.; Jespersen								
--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--

[illegible]

			Spasojevi c, Marko J.; Suding, Katharine; Sullivan, Patrick; Thompso n, Kimberly L.; Vaisanen, Maria; Vandvik, Vigdis; Venn, Susanna; Walz, Josefine; Way, Robert; Welker, Jeffrey M.; Wipf, Sonja; Zong, Shengwei ; 								
2021M1 A5A1075 508	202212	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, Hyoungse ok;	SCI	JOURNA L OF MICROBI OLOGY	(0)	국외	SCI등재	3	아니오	30

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2021M1 A5A1075 508	202301	Attenuation of Methane Oxidation by Nitrogen Availability in Arctic Tundra Soils	Lee, Jaehyun; Yun, Jeongeun; Yang, Yerang; Jung, Ji Young; Lee, Yoo Kyung; Yuan, Junji; Ding, Weixin; Freeman, Chris; Kang, Hojeong;	직접입 력	ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY	()	국외	SCI등재	11.4	예	14
2021M1 A5A1075 508	202307	Responses of dissolved organic carbon to freeze-thaw cycles associated with the changes in microbial activity and soil structure	Kim, You Jin; Kim, Jinhyun; Jung, Ji Young;	SCI	CRYOSPHERE	17(7)	국외	SCI등재	5.2	아니오	100
2021M1 A5A1075 508	202310	Effects of deglaciation on the succession of methanotrophic communities in inland and tidewater glaciers in the high Arctic, Svalbard	Yun, Jeongeun; Yang, Yerang; Zhou, Xue; Lee, Jaehyun; Choi, Jiwon; Kim, Mincheol; Gyeong, Hyeryeon; Laffly, Dominiqu	SCI	CATENA	231(0)	국외	SCI등재	6.2	예	14

			e; Kang, Hojeong;								
2021M1 A5A1075 508	202403	Fluorometric assay for phenol oxidase activity in soils and its controlling variables	Kim, Jung In; Yang, Yerang; Kang, Hojeong;	SCI	APPLIED SOIL ECOLOGY	195(0)	국외	SCI등재	4.8	아니오	17

전문학술지 논문게재 성과정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2021M1 A5A1075 508	202403	Environmental drivers of increased ecosystem respiration in a warming tundra	S L Maes; J Dietrich; G Midolo; S Schwieger; M Kumm; V Vandvik; R Aerts; J Y Jung; E Kaarlejrvi; M J Kwon	SCI	NATURE	629(0)	국외	SCI등재	50.5	예	100
2021M1 A5A1075 508	202405	Thinning enhances forest soil C storage by shifting the soil toward an oligotrophic condition	Lee, Jaehyun; Zhou, Xue; Lee, Sang Tae; Yang, Yerang; Yun, Jeongeun; Lee, Hyun Ho; Kang, Hojeong;	SCI	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	925(0)	국외	SCI등재	8.2	예	11
2021M1 A5A1075 508	202408	Key determinants of soil labile nitrogen	You Jin Kim;Jung e Hyun;And	SCI	Chemical Engineering	494(0)	국외	SCI등재	13.3	예	100

		changes under climate change in the Arctic: A meta-analysis of the responses of soil labile nitrogen pools to experimental warming and snow addition	ers Michelsen ;Eilhann E Kwon;Ji Young Jung		Journal						
--	--	--	---	--	---------	--	--	--	--	--	--

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2021M1 A5A1075 508	202501	Potential risks of bacterial plant pathogens from thawing permafrost in the Alaskan tundra	Dockyu Kim; Mincheol Kim; Sungho Woo; Sungjin Nam; Nu Ri Myeong; Eungbin Kim; Yung Mi Lee	SCI	Ecotoxicology and Environmental Safety	게재승인	국외	SCI등재	6.2	아니오	50
2021M1 A5A1075 508	202501	Determination of ground subsidence around snow fences in the Arctic region: Application of joint geophysical survey	Kwansoo Kim; Hyeontae Ju; Junwha Chi; Ji Young Jung; Sungjin Nam; Sang-Jong Park; Baptiste Dafflon; Joohan Lee; Won-Ki Kim	SCI	Lithosphere	게재승인	국외	SCI등재	1.8	예	66

2021M1 A5A1075 508	202501	Methane trapping in permafrost soils: a biogeochemical dataset across the Alaskan boreal-Arctic gradient	Jinhyun Kim; Yongwon Kim; Sungjin Nam; Ji Young Jung, You jin Kim; Jeong Ho Hwang; Mincheol Kim	SCI	Scientific Data	게재승인	국외	SCI등재	5.8	예	80
2021M1 A5A1075 508	202507	Modifying carbon feedback by transforming arctic soil into biochar	Taewoo Lee; Hyeon Cha; Jee Young Kim; Hyeeseung Choi, Jaewon Lee; Seungwan Yun; Yoo Kyung Lee; Jechan Lee; Ji Young Jung; Eilhann E. Kwon	SCI	Renewable and Sustainable Energy Reviews	게재승인	국외	SCI등재	16.3	아니오	50

다. 기타(학술대회 논문발표)

학술대회 논문발표 성과정보							
과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5 A1075508	202310	MSK2023	Jeongeun Yun; Inge Althuizen; Anja Greschkowiak; Hanna Lee; Hojeong Kang	Microbial Activities related with Methane Flux along the Thaw Gradient in a Landscape in the Northern Norway	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202311	한국기후변화학회 2023년 하반기 학술 대회	Jung In Kim; Jeongeun Yun; Ji Young	Increased snow depth and plant-mediated transport promote soil methane	국내학술대회	대한민국	Y

			Jung; Sung Jin Nam; Jaehyun Lee; Hojeong Kang	emissions in Arctic wet tundra			
2021M1A5 A1075508	202410	2024 제주 미생물학 회	소요한; 명누 리; 박태윤; 정지영; 정수 정; 김민철	Rhizosphere microbiome diversity in a vegetation hot spot of northernmost Greenland	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202410	2024년 한국토양비료 학회 제56차 총회 및 정기학술대회	김유진; 정수 정; Mats P. Bjorkman; Robert G. Bjork; 남성 진; 정지영	Soil Organic Carbon Responses to Warming in Northernmost Sweden	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202410	MSK2024 한국미생물 학회 학술대회	김진현; Yongwon Kim; 남성진; 정지영; 김유 진; 황정호; 김민철	Spatial Variability of Soil Trapped Methane and Controlling Factors in Permafrost Across Arctic and Boreal Ecosystems	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202410	제56차 한국토양비료 학회 정기학술대회	남성진; 김유 진; 김진현; 정수정; 권민 정; 정지영	Introduction of Ongoing Climate Manipulation Experiments in Arctic Tundra Ecosystem to understand soil biogeochemical changes in response to increased temperature or snow addition	국내학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202411	대한지질공학회 추계 학술대회	김관수; 김원 기; 주현태; 지준화; 정지 영; 이주한	지구물리탐사를 이용한 북극 지역 스노우 펜스 주변 침하 조사	국내학술대회	대한민국	

학술대회 논문발표 성과정보

과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5 A1075508	202112	AGU Fall Meeting 2021	You Jin Kim; Dominique Laffly; Se-eun Kim; Lennart Nilsen; Junhwa Chi; Yong Bok Lee; SuJeong Jung;	Factors affecting soil biogeochemical development in the glacier foreland of Midtre Løv̊nbreen, Svalbard	국제학술대회	미국	Y

			Umakant Mishra; Yoo Kyung Lee; Ji Young Jung				
2021M1A5 A1075508	202204	ASME 2022(The 12th Asian Symposium on Microbial Ecology)	Nu Ri Myeong, Woo Jun Sul, Mincheol Kim	Transcriptional response of methanogenic communities to permafrost thaw	국제 학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202206	SOM 2022 (8th International Symposium on Soil Organic Matter)	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	국제 학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202209	ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences)	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 Lov̄nbreen, Svalbard, attributed to soil-forming factors	국제 학술대회	대한민국	Y
2021M1A5 A1075508	202209	ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences)	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	국제 학술대회	대한민국	Y
학술대회 논문발표 성과정보							

과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5 A1075508	202209	ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences)	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	국제 학술대회	대한민국	Y
2021M1A5 A1075508	202209	ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences)	Nu Ri Myeong, Woo Jun Sul, Mincheol Kim	Transcriptional response of methanogenic communities to permafrost thaw	국제 학술대회	대한민국	Y
2021M1A5 A1075508	202209	ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences)	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	국제 학술대회	대한민국	Y
2021M1A5 A1075508	202209	ISPS 2022 (The 27th International Symposium on Polar Sciences)	정지영, 권민정, 장경순, 남성진, 지준화, 강호정, 정수정, 이유경	Long-term increased temperature & precipitation experiment in the high Arctic Canada	국제 학술대회	대한민국	Y
2021M1A5 A1075508	202212	AGU Fall Meeting 2022	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	국제 학술대회	미국	
2021M1A5 A1075508	202212	AGU Fall Meeting 2022	Jinhyun Kim, Ji Young Jung, Min Jung Kwon, Mincheol Kim, Sungjin Nam, Sujeong Jeong, Yoo	Intensified winter precipitation-induced enzymic latch mechanism in moist Arctic tundra may be impeded by an extreme summer drought	국제 학술대회	미국	

			Kyung Lee				
학술대회 논문발표 성과정보							
과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5 A1075508	202307	The 10th EAFES International Congress	Jeongeun Yun; Inge Althuizen; Anja Greschkowiak; Hanna Lee; Hojeong Kang	Microbial Activities related with Methane Flux along the Thaw Gradient in a Landscape in the Northern Norway	국제학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202307	The 10th East Asian Federation of Ecological Societies International Congress	Jinhyun Kim; Yongwon Kim; Ji Young Jung; Sungjin Nam; Mincheol Kim	Distribution of Belowground CH ₄ and CO ₂ Trapped in Soils of Arctic Tundra and Boreal Forest in Alaska, USA	국제학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202308	Asia–Oceania Mass Spectrometry Conference (AOMSC)	Min Sung Kim; Sujeong Jeong; Ji Young Jung; Kyoung–Soon Jang	Effect of climate warming on Arctic soil environments: Changes in mineral layer composition of the high Arctic soils	국제학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202310	2023 International Meeting of the Microbiological Society of Korea	Jinhyun Kim; Yongwon Kim; Ji Young Jung; Sungjin Nam; Mincheol Kim	Effects of Wildfire on the Decomposition of Soil Organic Carbon in Arctic Tundra and Boreal Forest	국제학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202310	2023 International Meeting of the Microbiological Society of Korea	Nu Ri Myeong; Woo Jun Sul; Mincheol Kim	Genome–resolved insight into the permafrost microbial community on Alaskan arctic tundra	국제학술대회	대한민국	
2021M1A5 A1075508	202311	The 13th Asian Symposium on Microbial Ecology	Jung In Kim; Hojeong Kang	Fluorometric Assay for Phenol Oxidase Activity in Soils and its Controlling Variables	국제학술대회	일본	
2021M1A5 A1075508	202311	The 13th Asian Symposium on Microbial Ecology	Jeongeun Yun; Inge Althuizen; Anja Greschkowiak; Hanna Lee; Hojeong Kang	CH ₄ Flux and Microbial Activities along the Thaw Gradient in a Changing Landscape of Northern Norway	국제학술대회	일본	
2021M1A5	202312	2023 American	You Jin Kim;	Comparisons of soil organic carbon	국제학술대회	미국	

A1075508		Geophysical Union Fall Meeting	Mats P. Björkman; Robert G. Björk; Sujeong Jeong; Ji Young Jung	characteristics in Alaskan and Swedish acidic tussock tundra			
2021M1A5 A1075508	202312	2023 American Geophysical Union Fall Meeting	Jinhyun Kim; Sungjin Nam; Yongwon Kim; Ji Young Jung; Mincheol Kim	Distribution of Belowground CH4 and CO2 Trapped in Soils of Arctic Tundra and Boreal Forest in Alaska, USA	국제학술대회	미국	

학술대회 논문발표 성과정보

과제번호	발표년월	학술대회명	저자	논문제목	학술대회구분	개최국	온라인개최
2021M1A5 A1075508	202404	EGU General Assembly 2024	Jung In Kim; Jeongeun Yun; Ji Young Jung; Sung Jin Nam; Jaehyun Lee; Hojeong Kang	Increased snow depth and vascular plant species promote Arctic soil methane emissions	국제학술대회	오스트리 아	Y
2021M1A5 A1075508	202404	International Tundra Experiment Meeting 2024	김유진,; Mats P. Bjorkman,; Robert G. Bjork,; 김민 성,; 장경순,; 남성진,; 정수 정,; 정지영	Changes in Soil Organic Matter Characteristics under Warming in Arctic Tundra	국제학술대회	캐나다	
2021M1A5 A1075508	202404	International Tundra Experiment Meeting 2024	김유진,; 현준 기,; Anders Michelsen,; 정 지영	Arctic soil labile nitrogen changes: A meta-analysis on the responses of soil labile nitrogen pools to experimental warming and snow addition	국제학술대회	캐나다	
2021M1A5 A1075508	202412	AGU2024 Fall meeting	김유진,; 남성 진,; 김진현,; 정수정,; Scott Williamson,; 이용복,; 유가 영,; 정지영	Changes in Mineral-Associated Organic Matter Stability with Deeper Snow in Two Different Arctic Tundra Soils	국제학술대회	미국	

라. 기타(우수 연구활동 수상)

수상실적 성과정보

과제번호	수상연월	수상명	수상자		시상기관	시상국가	수상사유
			성명	소속기관			
2021M1A5A 1075508	202209	Early Career Poster Award Winner	You Jin Kim	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	한국해양과학기술원 기술원 부설 극지연구소	대한민국	
2021M1A5A 1075508	202307	BEST ORAL PRESENTATION AWARD	윤정은	연세대학교	한국생태학회	대한민국	우수구두발표
2021M1A5A 1075508	202310	BEST ORAL PRESENTATION AWARD	윤정은	연세대학교	한국미생물학회	대한민국	우수구두발표
2021M1A5A 1075508	202312	KOPRI 우수논문상	김유진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	한국해양과학기술원 기술원 부설 극지연구소	대한민국	
2021M1A5A 1075508	202405	장려상	김정인	연세대학교	연세대학교 대학원 총학 생회	대한민국	2023-2 학술지 원프로그램
2021M1A5A 1075508	202412	KOPRI 우수논문상	정지영	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	한국해양과학기술원 기술원 부설 극지연구소	대한민국	KOPRI 우수논문 으로 수상
2021M1A5A 1075508	202412	KOPRI 우수논문상	김유진	경희대학교	한국해양과학기술원 기술원 부설 극지연구소	대한민국	KOPRI 우수논문 으로 수상

마. 기타(저역서 성과)

저역서 성과정보						
과제번호	발간년월	제목	국내외구분	발행처	단행본구분	저자명
2021M1A5A 1075508	202112	Soil Organic Matter and Feeding the Future - Chapter 2. Managing Soil Organic Carbon for Climate Change Mitigation and Food Security	국외	CRC Press	저서	김유진

바. 기타(학위배출인력)

학위배출인력 성과정보							
과제번호	학위취득연월	학위구분	학위취득자				진로
			성명	성별	대학	학과	
2021M1A5A 1075508	202208	박사	경혜련	여성	서울대학교	자연과학대학 생 명과학부	취업(박사후연 구원 포함)
2021M1A5A 1075508	202402	박사	윤정은	여성	연세대학교	건설환경공학과	취업(박사후연 구원 포함)
2021M1A5A	202502	박사	명누리	여성	중앙대학교	시스템생명공학과	취업(박사후연

1075508							구원 포함)
2021M1A5A 1075508	202502	박사	김민성	남성	연세대학교	환경공학과	취업(박사후 연구원 포함)

사. 기타(연구기자재 구입 성과)

연구기자재 구입 성과정보								
과제번호	구입연월	기자재명	규격	수량	제조국	구매금액	활용용도	설치장소
2021M1A5A 1075508	202109	이동용 기체분석분광기		1	미국	56,359,765	미국 알래스카와 캐나 다 북극 지역에서 수행 중인 겨울철 기후 변화 모사 실험 구 내 온실기체 (이산화탄소, 메탄) 플럭스를 측정	한국해양과학기술원 부설 극지연구소

아. 기타(국내외 과학자교류 성과)

국내외 과학자교류 성과정보									
과제번호	파견유치 기간	인력교류구분	파견유치 연구자					파견국가 유치자국적	파견유치 목적
			성명	소속기관	직위	최종학위	전공		
2021M1A5 A1075508	20210715 ~20210813	해외파견	김민철	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	선임연구원	박사	미생물생태학	노르웨이	기타
2021M1A5 A1075508	20210902 ~20210916	해외파견	남성진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	생태학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20210916 ~20210927	해외파견	정지영	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	선임연구원	박사	토양학	캐나다	기타
2021M1A5 A1075508	20220411 ~20220503	해외파견	김민철	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	책임연구원	박사	미생물생태학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20220411 ~20220503	해외파견	남성진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	생태학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20220531 ~20220612	해외파견	이주한	한국해양과학기술원 부설	책임연구원	박사	극지과학	캐나다	기타

				극지연구소					
2021M1A5 A1075508	20220531 ~20220625	해외파견	김관수	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	연수연구원	박사	지구물리	캐나다	기타
2021M1A5 A1075508	20220607 ~20220625	해외파견	정지영	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	선임연구원	박사	토양학	캐나다	기타
2021M1A5 A1075508	20220607 ~20220910	해외파견	정수정	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	학사	생명과학	캐나다	기타
2021M1A5 A1075508	20220629 ~20220721	해외파견	남성진	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	생태학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20220629 ~20220721	해외파견	김진현	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	연수연구원	박사	생태공학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20220807 ~20220910	해외파견	남성진	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	생태학	캐나다	기타

국내외 과학자교류 성과정보

과제번호	파견유치 기간	인력교류구분	파견유치 연구자					파견국가 유치자국적	파견유치 목적
			성명	소속기관	직위	최종학위	전공		
2021M1A5 A1075508	20220914 ~20220926	해외파견	김유진	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	연수연구원	박사	환경학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20230614 ~20230712	해외파견	남성진	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	생태학	캐나다	기타
2021M1A5 A1075508	20230706 ~20230713	해외파견	장경순	한국기초과학 지원연구원	책임연구원	박사	생물화학	노르웨이	기타
2021M1A5 A1075508	20230706 ~20230713	해외파견	김민성	한국기초과학 지원연구원	박사과정	석사	환경생태	노르웨이	기타
2021M1A5	20230715	해외파견	김관수	한국해양과학	연수연구원	박사	지구물리	미국	기타

A1075508	~20230808			기술원 부설 극지연구소					
2021M1A5 A1075508	20230715 ~20230808	해외파견	정지영	극지연구소	선임연구원	박사	토양학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20230715 ~20230808	해외파견	남성진	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	생태학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20230715 ~20230808	해외파견	김정인	연세대학교	학사과정	고졸이하	환경공학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20230831 ~20230920	해외파견	김진현	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	연수연구원	박사	환경공학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20230831 ~20230920	해외파견	남성진	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	생태학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20230902 ~20230909	해외파견	정지영	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	선임연구원	박사	토양학	캐나다	기타
2021M1A5 A1075508	20240611 ~20240622	해외파견	김진현	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	연수연구원	박사	환경공학	미국	기타
2021M1A5 A1075508	20240620 ~20240706	해외파견	남성진	한국해양과학 기술원 부설 극지연구소	기술원(무)	석사	생태학	캐나다	기타

자. 기타(기타목적 활용 성과)

기타목적활용 성과정보			
과제번호	활용연월	활용구분	활용내용
2021M1A5A1 075508	202112	교육자료	극지대의 토양과 툰드라 식물 이야기를 통한 토양의 미래 가치를 설명하기 위한 대중 강연 자료로 활용
2021M1A5A1 075508	202201	기타	국제북극과학위원회(IASC) 육상 워킹그룹 한국대표 활동(정지영)
2021M1A5A1 075508	202302	기타	국제북극과학위원회(IASC) 육상 워킹그룹 한국대표 활동(정지영: 정)
2021M1A5A1 075508	202304	교육자료	영구동토 연구결과를 <금요일에 과학터치 인천> 대중강연에 활용
2021M1A5A1 075508	202403	기타	국제북극과학위원회(IASC) 육상 워킹그룹 한국대표 활동(정지영: 정)

차. 기타(언론보도 성과)

언론보도성과			
과제번호	2021M1A5A1075508		
보도게재일자	20210826	보도맞게재처	한겨레
기사제목	메마른 동토층에선 메탄가스는 덜 나오고, CO ₂ 방출은 늘어나		
관련연구업적	Disproportionate microbial responses to decadal drainage on a Siberian floodplain		
과제번호	2021M1A5A1075508		
보도게재일자	20220214	보도맞게재처	노컷뉴스
기사제목	땅속 시간은 더 빨리 흐른다...동토연구자의 증언		
관련연구업적	Distinct Taxonomic and Functional Profiles of the Microbiome Associated With Different Soil Horizons of a Moist Tussock Tundra in Alaska		
과제번호	2021M1A5A1075508		
보도게재일자	20220823	보도맞게재처	KBS
기사제목	시사기획 창:고장난 심장, 북극의 경고		
관련연구업적	Disproportionate microbial responses to decadal drainage on a Siberian floodplain		
과제번호	2021M1A5A1075508		
보도게재일자	20240529	보도맞게재처	조선비즈
기사제목	'탄소 저장소' 툰드라 기온 1.4도 오르면 탄소 38% 더 배출		
관련연구업적	캠브리지베이 기후변화 모사 실험 결과, Nature 논문		
과제번호	2021M1A5A1075508		
보도게재일자	20240607	보도맞게재처	SBS 뉴스
기사제목	[취재파일] '육상 탄소 저장고' 깨어나면 기후변화 속도 견잡을 수 없어		
관련연구업적	캠브리지베이 기후변화 모사 실험 결과, Nature 논문		

2. 연구개발결과 활용 계획 (해당항목에 “○” 표시)

기술이전	기업화	후속연구 추진	타 사업 활용	그 밖의 목적 활용	연구결과 활용 중단
		○		○	

가. 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

• 후속연구 추진

북극 습윤/건조 툰드라 생태계에 구축한 기후변화 모사 실험구(온도 상승/적설량 모사)는 본 연구팀에서 약 10여 년 동안 실험구 운영 및 유지를 통해, 장기 환경 관측 데이터를 축적하고 있어, 국제 연구자들로부터 사이트 활

용 연구 및 데이터 공유 요청이 있음. 따라서, 장기생태모니터링 실험구에서 지속적 자료 획득을 통해 북극 국제 공동 연구 네트워크에 기여하고자 함. 또한, 생태계 변화를 빠르게 감지할 수 있는 비파괴적 환경/생물인자 모니터링을 추가로 수행하고자 함. 향후, 본 연구활동으로 교류하고 있는 북극 연구 네트워크에서 토양 시료 확보를 통해 유기물 특성에 대한 폭 넓은 자료 확보, 메타 분석 등을 통해 기후 변화에 대한 토양 생태계 취약성 분석 연구 등 수행 계획

- 그 밖의 목적 활용

연구에서 획득한 데이터는 KPDC에 등재하고 관리하고 있고, 일부 데이터는 Scientific Data 저널에 공개하여 획득 데이터에 대해 학계, 정부, 연구 기관 등의 접근성을 높이고 있음. 이를 기반으로 기후변화 연구 및 환경 모델링에 데이터가 활용될 수 있으며, 국제 연구자와 협력하여 북극 공동 연구 수행 및 글로벌 기후변화 대응에 기여할 수 있을 것으로 기대함.

나. 활용방법

- 데이터 관리 및 공유 (KPDC, Scientific Data 등)
- 기후변화 모델링: 북극 온도 상승 및 적설량 증가가 동토 생태계에 미치는 영향 예측, 생지화학 모델 성능 향상에 활용 가능
- 산업응용: 미생물 군집과 온실기체 배출간의 상관관계를 바탕으로 미생물의 유기물 대사 기작을 산업 기술에 응용 가능. 의약학, 에너지 산업 등에서 신규 대사물질 및 효소 후보군 발굴 가능
- 국제 공동연구 및 데이터 활용: ITEX 연구 네트워크 등과 협력하여, 북극 연구 및 기후변화 대응에 대한 기초 자료를 만들어내고 국제공동연구 논문 성과 창출 가능
- 대중 인식 제고 및 교육 자료 활용: 대중 강연과 교육자료로 활용하여, 정책입안자와 대중에게 북극 생태계와 기후변화의 중요성을 전달하는데 기여

3. 기대효과

본 연구는 기후변화 연구와 온실가스 저감기술 개발을 위한 기초과학 토대를 마련할 수 있고, 기후변화 대응 인식 및 정책 수립에 중요한 사회적 기여를 할 수 있음. 연구 성과를 산업에 응용할 경우, 에너지 산업, 의약학 등 다양한 산업 분야에서 경제적 가치를 창출할 수 있을 것으로 기대함. 대한민국의 북극 연구에 대한 기여는 정부의 기후변화 대응 정책에 중요한 기초적 자료를 제공할 수 있음. 마지막으로 북극이사회 소속 국가의 영토에서 수행하는 과학적 외교 성과를 만들어 낼 것으로 기대함.

4. 문제점 및 건의사항

※ 해당사항 없음

I. 연구개발 실적

※ 다음 각 평가 항목에 따라 자체 평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

1. 연구개발성과의 우수성/창의성

■ 등급: (아주 우수), 우수, 보통, 미흡, 불량)

본 연구는 장기축적 환경인자 DB로 북극 연구 네트워크에 기여하고, 국제공동 우수논문 성과를 창출함(*Nature*, *Arctic Science* 등). 온도상승 모사와 적설량 모사 실험구를 운영/유지하며 획득한 데이터를 메타분석에 활용하여 기후변화에 대한 툰드라 생태계의 변화에 대한 추이를 밝힘. 또한, 다학제적 관점에서 툰드라 생태계의 생지화학 변화에 대한 기작을 밝혀 여러 우수 논문 성과 창출

2. 연구개발성과의 파급 효과

■ 등급: (아주 우수), 우수, 보통, 미흡, 불량)

본 연구는 논문 게재 후 국내 언론매체, 대중 강연, 관련 분야 연구 세미나를 통해 널리 공유하여, 북극 기후변화의 심각성에 대한 대중과 과학자들의 관심을 고취하는 데 기여함. 특히, 2022년 *Arctic Science*에 게재된 논문은 현재까지 100회 이상 인용되며 중요한 연구 발전을 이끌어 냈고, 기후변화 모사 실험의 획득 자료는 극지 연구자들과 공유하여 *Nature*지에 국제공동연구논문으로 활용됨

3. 연구개발성과에 대한 활용 가능성

■ 등급: (아주 우수), (우수), 보통, 미흡, 불량)

관측거점의 장기 운영을 통해 북극의 기후변화에 대한 토양 내 생지화학적 순환 이외 다른 측면의 추가 후속 연구 가능. 장기모니터링 결과를 통해 보다 정확한 북극 생태계 변화 전망 가능. 또한, 사이트에서 획득한 데이터를 공유함으로써 메타 분석에 활용하고자 하는 해외 연구자들의 요청이 있음. 확보한 식물 시료와 미생물 배양체의 경우, 이미 잠재적 병원성 테스트 및 저온 분해효소 발굴에 활용된 바 있으며 추후 관심있는 연구자들과 공유하여 북극 유래 생명자원 활용 등 타분야 연구에 기여할 수 있음

4. 연구개발 수행의 성실도

■ 등급: (아주 우수), 우수, 보통, 미흡, 불량)

연구 목표를 달성하기 위해, 1년차 기반 구축, 2-3년차 북극 거점연구/토양 배양 실험, 4년차 종합 분석을 계획하여 일정 내 과제를 성실히 수행함. 4년차 연구비 삭감은 타세부과제와 공동 현장 연구를 통해 최소 인력으로 현장연구 수행/데이터 획득. 본 연구 수행시 참여 연구원들은 불편한 북극 현장 여건 속에서도 매년 몇주~3개월까지 북극 거점에 체류하며 현장 자료 수집 및 실험을 수행. 정리된 자료들은 KPDC에 메타데이터를 공개하였고, 학회 발표 및 논문 작성 등을 통해 성과 확산에 기여.

5. 공개 발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급: (아주 우수) 우수, 보통, 미흡, 불량)

4년의 연구 수행 기간 동안 총 14편의 논문 성과 달성. 이중 8편이 mrnIF 90이상의 값으로 매우 우수한 성과의 논문이 출간됨. 기후변화에 의한 동토 생태계에서 일어나는 변화들이 토양 생태계 내 생지화학적 반응에 미치는 영향 및 기작을 밝혔음. 미생물 군집과 온실기체의 상관성을 밝힘. Nature와 ITEX 30년 특별호에 게재된 Arctic Science 발표 논문은 우리나라의 북극 연구 기여도를 보여줌.

II. 연구 목표 달성도

세부 연구 목표 (연구계획서의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
적설량 변화에 의한 토양 생지화학적 변화 규명	50	100	현장연구를 통한 데이터 획득을 완료하였고, 습윤과 건조 툰드라 지역에서 적설량 변화에 의한 식물, 미생물, 토양 변화에 대한 비교 분석 완료
북극권 동토 내 미생물 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명	30	100	배양 온도, 시간, 양분 농도 변화에 따른 유기물 분해 대사-온실기체 발생 변화에 대한 연구 분석 완료
미답지에서 동토 생태계 국제 공동 연구	20	100	북극 기관들과 공동연구를 통해 캐나다와 그린란드 고위도 북극 미답지 생태계 구조 종합 분석
합계	100	100	

III. 종합 의견

1. 연구개발성과에 대한 종합의견

본 연구는 기후변화가 북극 동토생태계의 생지화학적 순환에 미치는 영향을 규명하였고, 장기 환경인자 DB를 축적하였으며, 국제 협력을 통해 툰드라 생태계 변화 추이를 밝혀 Nature와 Arctic Science 등에 국제 공동연구 논문 게재. 본 연구는 북극이라는 어려운 현장 여건 속에서도 성실히 수행되어, 4년 동안 16편(특히 10편은 높은 영향력 지수, mrnIF 90이상)의 매우 우수한 성과를 도출함

2. 평가 시 고려할 사항 또는 요구사항

본 연구과제는 여러 제한적인 조건 속에서도 성실히 수행되었으며, 예산 삭감으로 현장 연구가 어려운 상황에서도 최소한의 거점 유지와 연구를 지속하는 노력. 또한, 본 과제에서 획득한 장기생태모니터링 데이터는 국제 공동연구 논문(Nature 등)으로 도출되었고, 대한민국의 기여로 인정받고 있음. 이 자료는 후속 연구의 기초 자료로 활용 가능. 본 연구 성과는 북극이사회 소속 국가들에게 대한민국이 북극 기후변화와 생태계 연구에서 중요한 역할을 하는 국가로 인식되는 데 기여할 수 있음

3. 연구개발성과의 활용방안 및 향후 조치에 대한 의견

본 연구 성과는 기후변화, 생태계 변화, 환경 정책 등 다양한 분야에서 활용 가능. 확보 자료는 국제연구자들과의 협력에 기반한 공동연구 프로젝트에서 활용 가능하므로, 지속적으로 국제 공동 연구를 강화하고 지속적 협력 연구가 이루어지도록 해야함. 본 연구 성과를 적극적으로 활용하기 위해서 국제적 협력 강화, 후속 연구 추진, 대중 인식 제고를 위한 지속적인 노력 필요

Ⅳ. 보안성 검토 (※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성)

1. 연구책임자의 의견

해당사항 없음

2. 연구기관 자체의 검토 결과

보안성 과제 아님



첨부4

[해당 시] 연구개발성과 공개제한 요청사유서

첨부5

[해당 시] 청년 의무채용 관련 실적

첨부6

[해당 시] 참여기업 의견서



첨부7

[최종본 제출 시] 평가의견에 대한 수정 · 보완 대비표

점검의견 (수정 및 보완사항)	수정 및 보완 내용	해당 페이지	비고
○ 환경변화가 기후와 기상 측면에 집중되어 있음. 육상 환경(식생, 알베도, 적설기간 등)의 실측 자료와 분석이 보충되어야 함	○ 본 과제에서는 기후변화에 대한 북극 육상 생태계(환경/생물 포함) 반응을 이해하고자 하였음. 따라서, 적설의 최대 높이와 눈이 녹는 시기 등의 적설 변화 자료를 제시하였고(세부2 보고서 p.11~12), 적설 변화에 의한 식생 (NDVI), 미생물 군집과 생물량(PLFA), 다양한 토양 환경 변수 인자, 지중 구조 등을 실측 자료로 측정하고, 분석하여 자료로 제시함(세부2 보고서 p. 10~30). 또한 실험실에서 토양 배양실험을 통해 동토 내 미생물의 유기물 분해 대사 기작 및 생지화학적 특성 규명 연구 수행 내용을 작성함(세부2 보고서 p.31~55)	p.10-30 p.31-55	

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” 2세부과제의 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.