

BSPN24050-030-12
NRF-2022K2A9A2A12000286
RS-2022-NR066954

기후변화에 따른 북극 동토 생태계 변화 관측망 기반 조성을 위한 한국-스웨덴 협력연구

Korea-Sweden collaboration for establishing a network to
study Arctic ecosystem responses to climate change



2025. 11. 06.

한국해양과학기술원부설
극지연구소

과학기술정보통신부

한국연구재단 국제협력사업 최종보고서

① 부처사업명(대)	국제기관간 MOU지원사업			보안등급(보안, 일반)	일반			
② 사 업 명(중)	글로벌연구협력지원사업			공개가능여부(공개, 비공개)	공개			
③ 세부사업명(소)	한스웨덴연구교류							
④ 과제성격(기초, 응용, 개발)	기초	④-1 실용화 대상여부(실용화, 비실용화)			비실용화			
⑤ 과 제 명	국 문	기후변화에 따른 북극 동토 생태계 변화 관측망 기반 조성을 위한 한국-스웨덴 협력 연구						
	영 문	Korea-Sweden collaboration for establishing a network to study Arctic ecosystem responses to climate change						
⑥ 주관연구기관	한국해양과학기술원 부설 극지연구소							
⑦ 협동연구기관								
⑧ 주관연구책임자	성 명	정지영		직급(직위)	책임연구원			
	소속부서	생명과학연구본부		천 공	토양학			
⑨ 연구개발비 및 참여연구원수 (단위: 천원, 명)								
년 도	재단지원금 (A)	기업채부담금			기타 출연금 (B)	상대국 부담금 (F)	합계 G=(A+B+E)	참여 연구원수
		현금 (C)	현물 (D)	소계 E=(C+D)				
1차년도	30,000						30,000	5
2차년도	30,000						30,000	6
3차년도	30,000						30,000	5
4차년도								
⑩ 총연구기간	2022.04.01-2025.03.31 (36개월)							
⑪ 다년도협약연구기간	2022.04.01-2025.03.31 (36개월)							
⑫ 당해연도연구기간	2024.04.01-2025.03.31 (12개월)							
⑬ 참여기업	중소기업수	대기업수		기타	계			
⑭ 국제공동연구	상대국	상대 연구기관		상대국 연구비(천원)	상대국 연구책임자			
	스웨덴	University of Gothenburg		-	Mats P. Björkman			
관계 규정과 제반 지시사항을 준수하면서 수행한 연구과제의 최종보고서를 붙임과 같이 제출합니다. 2025년 05월 26 주관연구책임자 : 정 지 영 (인) 주관연구기관장 : 신 형 철 (인) 한국연구재단 이사장 귀하								

〈 목 차 〉

I. 연구결과 요약문

1. 국문 요약문	3
2. SUMMARY(영문 요약문)	4

II. 연구내용 및 결과

1. 과제 개요	5
2. 수행 내용 및 결과	6
3. 자체평가	9
4. 연구결과의 활용 계획	9
5. 연구과정에서 수집한 해외 정보	10
6. 참고문헌	10
7. 연구성과	10
8. 기타사항	12
[붙임] 대표성과	13

〈 연구결과 요약문 (국문) 〉

연구목적	· 한국-스웨덴 협력을 통하여 새로운 북극 생태계 장기 모니터링 연구거점 확보 · 북극 온난화 및 생태계 유형 변화에 따른 토양 생지화학적 특성 및 탄소 저장량 평가		
연구내용	· 본 연구 과제는 스웨덴측 연구팀과의 협력을 통하여 Abisko research station의 장기 기후변화 모니터링 시스템에서 수행. 특히, Latnjajaure Field Station(LFS)은 25년간 개방형 챔버를 이용하여 습윤 툰드라, 습지성 초지, 중성 초지, 건성 초지, 건조 관목 지대를 대상으로 온도 상승 실험을 진행하고 있음 · 극지연구소의 연구자들은 스웨덴 측 연구기관 및 장기 기후변화 모니터링 실험지를 직접 방문하여 현장 시스템 운영 및 기존 연구 데이터 공유 논의 · 현장 연구에 참여하여 식생별 토양 시료를 확보하여 토양 생지화학적 특성 분석 · 극지연구소에서 토양 이화학 분석법을 통해 토양 기초 특성 자료를 생산하고, 토양 내 탄소 저장량을 추정하고, 토양의 밀도-크기 분획법을 통해 변화를 측정 · 국제 공동 연구 기반 학술대회 공동 발표 및 논문 작성 계획		
연구결과	· 스웨덴 기후변화 모사 실험지를 대상으로 한-스웨덴 공동연구 수행 - 2022년 8월 스웨덴 LFS 연구 현장 방문을 통해 토양 및 식생 시료를 확보하고, Gothenburg 대학에서 토양 시료 전처리 및 공동연구 논의 수행 - 온난화에 대한 토양 탄소 저장량 변화가 식생 타입에 따라 다른 것을 확인함. - 토양 생지화학 분석 연구를 통해 온도 상승에 의해 토양 유기탄소 저장량이 증가할 수 있지만, 유기물 분획법 접근을 통해 온도 상승에 의해 쉽게 분해될 수도 있음을 밝힘 - 스웨덴 연구진의 온도 상승에 의한 메탄 배출량 감소 결과는 본연구진의 메탄 생성 및 산화 관련 미생물 군집 변화와 밀접한 연관이 있음을 밝힘 · 정기 연구 미팅, 전문가 초청 세미나 및 워크샵 개최 - 스웨덴 공동연구팀과의 정기 세미나 및 연구 미팅을 온라인으로 2회/년 진행하였으며, 이를 통하여 토양 탄소 및 미생물 분석 결과에 대해 의견 및 피드백을 주고 받음 - 3차년도에는 스웨덴 공동연구진 3명과 스웨덴 아비스코 기지에서 연구를 수행한 연구자의 한국 초청을 통해 전문가 초청 세미나 및 한-스웨덴 협력을 위한 워크샵을 진행하여, 공동 논문 작성과 향후 스웨덴 지역에서의 협력 연구 논의 · 국제 학술대회에서 연구결과 발표 (AGU, ITEX) - 연구 성과를 바탕으로 국제학술대회(AGU, ITEX)와 국내대회에서 총 6회 발표(구두2회, 포스터 4회) - 3차년도에는 스웨덴 측 연구자와 International Tundra Experiment (ITEX) Meeting 공동 참여		
연구결과와 활용계획	• 연구 결과 기반 국제 공동 논문 2편 투고 예정이며, 후속 기후변화·식생 구조 변화 연구로의 확장이 기대됨 • 탄소 저장 및 미생물 변화 분석은 북극 토양 생지화학 모델링 자료 활용 가능 • 식생 유형별 토양 탄소 민감도 및 미생물 반응 특성은 장기 생태 관측망 구축을 위한 기초자료로 활용 • 자료가 부족한 계절 자료 확보를 위한 후속 과제 진행 중이며, 북극 연구자 네트워크를 통한 데이터 공유 및 메타 분석에 기여 예정		
중심어	북극	기후변화	생태계 모니터링
	토양 탄소		

◀ SUMMARY ▶

Purpose	- Establishing a new long-term monitoring research base in the terrestrial Arctic ecosystem through Korea-Sweden collaboration - Assessment of soil biogeochemical properties and carbon storage in response to Arctic warming and ecosystem types		
Contents	- This research project was conducted in collaboration with a Swedish research team who has been conducting warming experiments for over 25 years using open-top chambers (OTCs) across various vegetation types at Latnjajaure Field Station (LFS) - Researchers from the KOPRI visited LFS site and Swedish institution to conduct field sampling and analyzed basic soil characteristics		
Results	- Joint research on Swedish experimental sites simulating climate change: the Korean team visited LFS in Sweden to collect soil and vegetation samples, conducted sample pretreatment at the University of Gothenburg in 2022. It was confirmed that the effect of warming on soil carbon storage varied depending on vegetation types. While warming could increase soil organic carbon (SOC), the SOC fractionation showed that this C may also be more prone to decomposition. Additionally, reduced methane emissions under warming conditions observed by Swedish scientists were shown to be closely related to changes in methane-related microbial communities identified by the Korean research team - Regular research meetings, invited expert seminars, and workshops were held: on-line seminars and meetings were conducted annually with the Swedish team to exchange feedback on KOPRI's results. Three Swedish researchers and one researcher who conducted fieldwork at Abisko were invited to Korea for the seminar at KOPRI and Korea-Sweden cooperation workshop. During the workshop, the joint manuscript writings and future collaborative studies in Sweden were discussed - Research outcomes presented at international academic conferences: Based on the results, a total of six presentations (2 oral, 4 poster) were delivered at international (AGU, ITEX) and domestic conferences. Korean and Swedish researchers jointly participated in the ITEX Meeting in the 3rd yr		
Expected Contribution	- Two international collaborative papers based on this research will be submitted. The study is expected to expand into future research on climate and vegetation structure change. Analyses of carbon storage and microbial dynamics can be used for Arctic soil biogeochemical modeling. - Findings on soil C and microbial responses will serve as foundational data for long-term ecological observation networks, and the data will contribute to meta-analyses and sharing through Arctic researcher networks - A follow-up project is underway to gather shoulder season data (currently scarce)		
Keywords	Arctic	Climate change	Ecosystem monitoring
	Soil carbon		

< 연구내용 및 결과 >

1. 과제 개요 (※ 국제협력의 목적, 필요성 및 범위 등)

◎ 북극의 기후변화 취약성

- 기후변화로 인하여 북극의 지표 대기는 10년에 0.3℃씩 (지구 평균 온도 상승의 2-3배) 따뜻해지고 있는데(1), 이는 북극 영구동토층에 저장되어 있던 다량의 탄소(1,500 Gt)가 이산화탄소 및 메탄으로 방출될 위험을 증가시킴(2, 3)
- 지구 온난화는 북극의 생태계 유형에도 영향을 주는 것으로 보고되었는데, 1985년 이후부터 최근까지 북극 툰드라의 38%가 초지 및 관목 지대로 급격하게 변화하고 있음(4)
- 기후변화로 인하여 북극 토양은 탄소 저장고로서의 역할을 하지 못하게 될 수 있으며, 생태계 유형 변화로 인하여 전혀 다른 탄소 순환 메커니즘을 형성할 수도 있음(5-7). 이러한 변화를 예측하고 대비하기 위해서는 장기 모니터링 연구를 통한 탄소 저장량 평가와 저장 메커니즘에 대한 이해가 필수적임

◎ 북극 생태계 장기 모니터링 연구 현황 및 제한점

- 북극권 국가인 스웨덴은 Abisko research station에서 1913년부터 지금까지 환경인자(기온, 강수, 적설량, 빙하 두께 및 지속기간)들을 포함하여, 영구동토층 소실 및 수목/관목의 확장과 같은 북극 환경 변화에 대한 장기모니터링 결과를 발표하고 있음(8). 하지만, 북극 기후 환경 및 생태계 변화에 따른 토양 탄소 저장량 및 변동성에 대한 연구는 미흡한 실정임.
- 국내 북극 연구를 선도하고 있는 극지연구소는 2011년부터 미국 알래스카 및 캐나다 캠브리지베일을 대상으로 핵심 연구 거점을 구축하고, 온도 상승 및 적설량 변화와 같은 기후인자에 따른 토양 생지화학적 순환, 탄소 저장 기작 및 미생물의 반응에 대해 장기 모니터링을 수행하고 있음(9, 10).
- 현재 당면한 과제는 북극권 전반의 토양 탄소 순환에 대한 포괄적 이해와 정확도 높은 미래 예측을 위해 더욱 다양한 기후조건 및 생태계 유형을 대상으로 한 새로운 연구거점 확보가 필요함

◎ 북극 연구활동 강화를 위한 협력 관계 확대 필요성

- 우리나라는 2013년 북극이사회 옵서버 지위를 획득하였으며, 이후 북극정책 및 활동에 대한 비전을 제시하였음. 국내 북극활동에서 두 가지 핵심 과제는 과학연구 활동 확대와 다양한 북극권 국가들과의 협력 강화인데, 이는 옵서버 국가로서의 지위 및 역할을 강화하는데 매우 중요한 요소임
- 북극 연구 분야에서 선도적인 위치를 차지하기 위해서는 북극권 전반을 아우르는 수준에서의 탄소 저장량 및 변동성에 대한 데이터 확보가 요구됨. 이를 위해서 극지연구소 기존 연구거점(미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드, 러시아, 아이슬란드)의 결과 외에도 스웨덴 연구지점 추가를 통해 새로운 북극 지역의 데이터 축적이 필요함

◎ 연구 목표

- 한국-스웨덴 협력을 통하여 북극 동토 생태계 변화 장기 모니터링을 위한 새로운 관측망 기반 조성
- 북극 온난화 및 생태계 유형 변화에 따른 토양 생지화학적 특성 및 탄소 저장량 평가

◎ 연구 내용

- 본 연구 과제는 스웨덴측 연구팀과의 협력을 통하여 Abisko research station의 장기 기후변화 모니터링 시스템을 활용할 계획임. 해당 연구시설은 25년간 개방형 온도 상승 챔버를 이용하여 습윤 툰드라, 습지성 초지, 중성 초지, 건성 초지, 건조 관목 지대를 대상으로 온도 상승 실험을 진행하고 있음
- 스웨덴측 연구팀은 2008, 2019년에 조사한 기초 토양 특성과 토양 탄소/질소 함량, 동위원소 자료를 보유하고 있으며, 2020년에 채취한 토양 시료를 보관하고 있음. 기존 데이터 및 시료 분석을 통해 토양 탄소 저장과 변화에 대한 정량적 평가를 수행
- 본 연구과제를 통하여 극지연구소의 다양한 토양 현장 조사 및 분석 시스템을 스웨덴측 연구팀과 공유하고, 향후 극지 연구 협력에 있어 상호보완적인 관계 형성의 토대 마련
- 극지연구소 신진연구자들은 스웨덴측 연구기관 및 장기 기후변화 모니터링 실험지를 직접 방문하여 현장시스템 운영에 대한 정보를 공유 받고, 현장연구에 참여하여 기후인자 및 토양 현장조사 수행
- 현장연구 참여를 통해 확보된 토양 시료는 극지연구소에서 보유한 다양한 토양 분석 장비 및 분석기법을 활용하여 토양 탄소 저장량 추정 및 변동성 기작 이해를 위한 실험 및 미생물 군집 구조 분석 수행

2. 수행내용 및 결과 (※ 협력내용, 연구결과 등)

◎ 스웨덴 기후변화 모사 실험지 방문 및 토양 유기물 변화에 대한 공동 연구 추진

(1) 기후변화 모사 실험지 운용 이해 및 실험 방법 계획 (1차년도)

- 스웨덴 Latnjajaure Field Station (LFS) 지역 기후변화 모사 실험지 기존 연구 내용 종합 분석: 스웨덴측 연구팀에서 Abisko research station의 의 한 거점인 LFS에서 운영하고 있는 장기 기후 변화 모사 연구지를 대상으로 국제학술지에 발표했던 6편의 논문을 검토하여 기존 연구 내용을 종합 분석하였음.

(2) 스웨덴측 실험지 방문을 통한 공동연구 및 토양 시료 확보 (1차년도)

- 스웨덴 LFS에 방문하여 실험지 운용과정 견학 및 식생/토양 현장 조사 참여:

2022년 8월 9일~16일, 참여연구원 2인(김유진, 최용희)은 스웨덴측 연구현장 방문 및 실험 시스템을 견학하였으며, 현장 조사, 식생/토양 시료를 확보함. 2022년 8월 17일~31일에 참여연구원 1인(김유진)은 스웨덴 Gothenburg 대학에서 토양 시료 전처리 및 pH 분석과 공동연구 진행에 관한 논의 진행



그림 2 스웨덴측 실험지 방문, 현장조사 및 Gothenburg 대학에서 시료 전처리 모습

(3) 토양 시료 분석 수행 (1-2차년도)

- 토양 생지화학적 특성 분석 수행으로 토양 탄소 저장량과 온도 상승 및 식생 변화에 따른 토양 탄소 격리 기작의 변화를 확인하고, 미생물 군집 및 활성 변화 실험 수행



그림 3 토양 생지화학적 분석

(4) 스웨덴 LFS의 기후변화 모사 실험지 연구 결과 분석 (2-3차년도)

- 토양 탄소 저장량을 산정하였고, 온난화에 대한 토양 탄소 저장량 변화가 식생 타입에 따라 다른 것을 확인함.

- 특히, 토양 미생물의 경우에 메탄 생성 및 산화와 관련한 군집이 온난화 및 식생 차이에 따라 달라짐

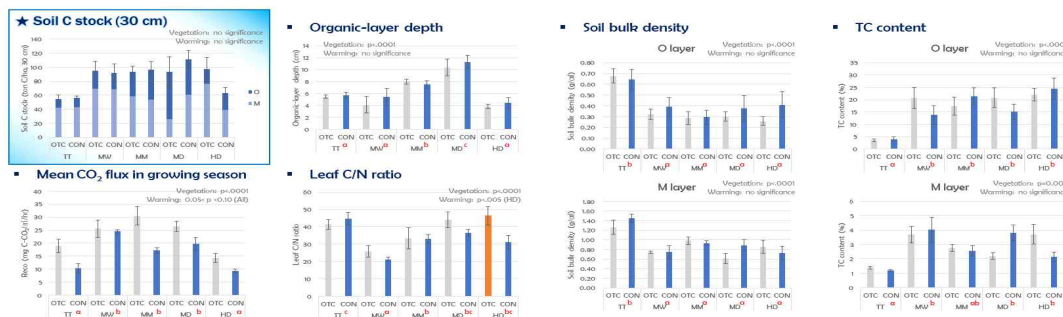


그림 4 토양 시료 분석 결과

(5) 토양 탄소 분석 결과 취합 및 논문화 작업

- 스웨덴 LFS 지역 토양유기물 분석 결과, 온도 상승 효과는 식생 종류에 따라 탄소 저장량 및 유기물 분획에 유의한 차이 있음. Meadow나 heath는 tussock tundra에 비해 온도 상승에 의해 탄소 저장량 증가, 안정화된 SOC도 증가하였지만 가벼운 분획(light fraction)이 매우 증가하여 유기물 취약성 또한 증가함. Dry heath 지역 또한 온도 상승으로 SOC 저장량과 안정화된 분획의 증가가 유의하였으나, 가벼운 분획(light fraction)이 증가하여 유기물 취약성이 증가함. 따라서 관목의 증가는 온도 상승에 의해 토양 유기물 분해가 더 취약한 환경이 만들어 질 수 있음을 밝힘
- OTC에 의한 온난화 조건에서 온도 상승 시 토양 메탄 방출 감소와 연관되는 토양 미생물 군집 연구를 수행함. 현장에서 측정한 메탈 플럭스는 메탄 생성 및 메탄 산화 미생물 군집 구성과 transcriptional dynamics와 연관되어 있었음. 특히 dry heath 유기물층의 USCα와 tussock tundra 미테랄층의 *methanobacterium*은 메탄 발생 감소에 중요한 역할을 하는 것으로 나타남
- 상기 결과에 대해 2개의 논문 원고를 작성 중이고, 스웨덴 연구진의 공유 데이터와 함께 분석하여 올해 논문 투고 예정

◎ 국제 학술대회에서 연구결과 발표

- 3년간 총 6회 성과 발표: 국외 학술대회 2건 구두발표, 4건 포스터 발표, 국내 학술대회 1건 포스터 발표
- 1차년도 2022년 12월 미국 지구물리학회 AGU Fall Meeting에서 포스터(*Changes in soil carbon stocks and fractions with warming under different tundra vegetation types in northern Sweden*) 발표
- 2차년도 2023년 12월 미국 지구물리학회 AGU Fall Meeting에서 구두(*Changes in Soil Organic Matter Characteristics under Warming in Arctic Tundra*) 발표와 포스터(*Vulnerability of Soil Carbon Dynamicsto Warming and Greening in Northern Sweden*) 발표 수행
- 3차년도 2024년 4월 캐나다 밴쿠버에서 International Tundra Experiment (ITEX) 학회 참여하여 구두(*Arctic soil labile nitrogen changes: A meta-analysis on the responses of soil labile nitrogen pools to experimental warming and snow addition*) 및 포스터(*Changes in Soil Organic Matter Characteristics under Warming in Arctic Tundra*) 발표
- 3차년도 2024년 12월 미국 지구물리학회 AGU Fall Meeting 학회에서 포스터(*Warming reduced methane emission due to changes in methanogens and methane oxidizers in tussock tundra and dry heath in Bjorkliden, Sweden*) 발표 수행
- 3차년도 2024년 10월 한국토양비료학회 제56차 총회 및 정기학술대회에서 포스터(*Soil Organic Carbon Responses to Warming in Northernmost Sweden*) 발표



그림 4 2024년 ITEX meeting (좌)과 2023년 AGU fall meeting (우) 구두 발표 진행 모습

◎ 정기 세미나 및 연구 미팅 진행

● 1차년도

- 정기 세미나를 통하여 실험 계획 수립: 온라인(이메일 및 Zoom)으로 정기적인 의견교류 및 회의를 진행하여 하계 현장조사 실험계획을 수립함



그림 5 스웨덴측 연구팀과 주고받은 이메일 및 연구현장 관련 자료

● 2차년도

- 스웨덴 공동연구팀과의 정기 세미나 및 연구 미팅을 온라인으로 2회 진행하였으며, 이를 통하여 토양 탄소 및 미생물 분석 결과에 대해 의견 및 피드백을 주고 받음
- 또한, 추가적인 토양 시료 확보 및 분석의 필요성에 대해 논의하였으며, 향후 연구 계획에 대하여 공유

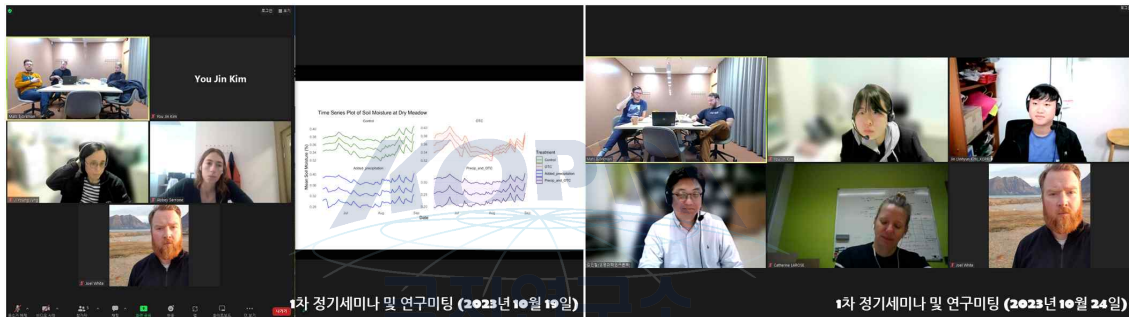


그림 6 정기 세미나 및 연구미팅 진행 (온라인 화면 캡처)

● 3차년도

- 2024. 04. 스웨덴측 연구자와 International Tundra Experiment (ITEX) Meeting에 공동 참여하여 토양 분석 결과와 데이터 공유에 대한 논의
- 스웨덴 공동연구팀 3인의 한국 극지연구소 방문, 연구소 내 세미나 및 한-스웨덴 협력 논의를 위한 워크샵 개최 (2025.03.10 - 03.14): 한-스 협력 과제 수행기간 동안 획득한 자료를 활용한 공동 논문 작성 논의: 2022년 4월에 과제를 시작하여, 극지연구소 소속 연구진이 스웨덴의 Latnjajaure Field Station을 방문하고 시료를 채취하고 분석하여, 얻은 성과들을 공유하며, 논문 작성 논의, 향후 연구 협력에 관한 구체적 논의(겨울철 현장 데이터 수집을
- 스웨덴 Abisko Research Station(ANS)에서 현장연구를 수행하여 박사학위를 받은 Emil Andersen박사를 초청하여, 극지연구소 내 세미나 발표, 한-스웨덴 협력 논의를 위한 워크샵 발표, 향후 스웨덴 ANS에서 수행할 연구 과제 내용 구상 및 현장 조사 계획 수립, 연구 프로토콜 정리
- 한-스웨덴 협력 논의를 위한 워크샵
 - 일시, 장소, 참석자: 2025년 3월 12(수), 강화도 스포빌, 총 9명

□ 개최 목적

- PN24050 '기후변화에 따른 북극 동토 생태계 변화 관측망 기반 조성을 위한 한국-스웨덴 협력연구' 사업의 3년간 연구 결과를 공유하고 추후 공동 연구 방향에 대한 논의

□ 워크샵 논의 내용

- 한-스웨덴 협력 연구 사업 소개 및 한국 연구진의 연구 결과 공유: 스웨덴 북극 LFS에서 채취한 토양 분석 결과 및 다른 북극 지역(미국 알래스카, 캐나다 캄브리지베이)에서 진행되는 연구 소개
- 스웨덴 협력 연구진의 연구 결과 공유: 스웨덴 북극 아비스코 연구지역에서 1년간의 질소 순환 연구 결과 공유, 스웨덴 LFS(Latnjajaure Field Station) 소개 및 진행되었던 연구 결과 공유

- 공동 논문 작성 논의 및 향후 스웨덴 지역에서 공동 연구 수행 및 사업화 추진 방안 논의

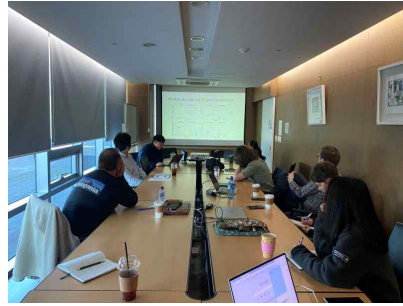


그림 7 스웨덴 공동연구팀의 KOPRI 방문, 소내 세미나, 연구 결과 발표, 한-스웨덴 협력 논의를 위한 워크숍

3. 자체평가 (※ 당초 목표 대비 달성도 또는 달성되지 못한 경우 협력과정 중심으로 기술)

● 목표 대비 달성도

본 과제는 1) 한국-스웨덴 협력을 통하여 북극 동토 생태계 변화 장기 모니터링을 위한 새로운 관측망 기반 조성과 2) 북극 온난화 및 생태계 유형 변화에 따른 토양 생지화학적 특성 및 탄소 저장량 평가라는 2가지 목표로 수행이 되었음. 연구 수행 결과, 스웨덴 북극권 기후변화 모사 실험지인 LFS에서 장기적으로 연구를 수행할 수 있는 기반을 조성하였고, 온도 상승 및 식물 군집별 토양 탄소 저장량 및 토양 미생물 군집 변화와 메탄 플럭스 데이터 간 상관관계를 도출하는 등 당초 목표를 100% 달성 완료

● 성과의 우수성

본 과제는 스웨덴 북극의 대표적 장기기후변화 모사 실험지(LFS)를 대상으로 제한된 시간 내에 효과적으로 시료를 확보하고, 다양한 생지화학적 분석을 수행하여, 식생 유형 및 온도 상승에 따른 토양 탄소 저장량 변화를 규명하였으며, 메탄 관련 미생물 군집 변화와 메탄 플럭스 간의 상관성을 밝힌 점에서 높은 학술적 기여도를 보임

● 국제 협력 강화 측면

과제 수행 기간 동안, 공동 현장조사, 자료 공유 및 온라인 미팅 등을 통해 스웨덴 연구진과의 협력 체계를 안정적으로 구축하였으며, 상호 양 기관 방문 및 공동 워크숍을 통해 논문 작성에 대한 많은 진전을 만들었고, 향후 지속적 협력 방안에 대한 상호 논의가 이루어짐

4. 연구결과의 활용 계획 (※ 장기적 기대효과, 후속지원의 필요성, 타 사업/연구에의 응용 등)

● 국제 공동 논문 출판 및 학술 기여 확대

- 연구 결과를 기반으로 국제 공동 논문 2편을 2025년 내 국제 학술지에 투고 예정이며, 기후변화로 인한 식생 구조 변화에 대한 확장 연구 등 후속 연구로 연계 가능성이 높음
- 탄소 저장 및 미생물 군집 변화 관련 연구를 통해 북극 토양 생지화학 모델링에 대한 학술적 근거 제공

● 북극권 기후변화 모니터링 체계 구축 기초자료로 활용

- 기후변화 모니터링을 위한 타 북극 지역 거점 구축 시 운영 참고
- 식생 유형별 탄소 저장 민감도 및 미생물 반응 특성을 기반으로 장기 생태 관측망 구축 기초 자료 활용

● 후속 연구 및 데이터 공유를 통한 국제 협력 연구 기여

- 겨울철 및 계절 변화 시기 데이터 확보를 위한 후속 연구 기획(중견 과제)
- 북극 연구자 네트워크 등에서 북극 지역 기후변화에 의한 토양 탄소 및 미생물 군집 변화 연구 데이터를 공유하여 메타데이터 분석 등을 통한 북극 동토 변화에 대한 종합적 분석 및 이해

5. 연구과정에서 수집한 해외 정보 (※ 해당 분야의 현지 동향, 석학 등 최신 정보)

N/A

6. 참고문헌 (※ 보고서 작성 시 인용된 모든 참고 문헌을 열거)

1. McBean, Gordon, and Idowu Ajibade. "Climate change, related hazards and human settlements." Current Opinion in Environmental Sustainability 1.2 (2009): 179-186.
2. McGuire, A. David, et al. "Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change." Ecological Monographs 79.4 (2009): 523-555.
3. Schuur, Edward AG, et al. "Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle." BioScience 58.8 (2008): 701-714.
4. Berner, L.T., Massey, R., Jantz, P. et al. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome. Nat Commun 11, 4621 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18479-5>
5. Christensen, Torben R., et al. "Thawing sub?arctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions." Geophysical research letters 31.4 (2004).
6. Schuur, Edward AG, et al. "The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra." Nature 459.7246 (2009): 556-559.
7. Mackelprang, Rachel, et al. "Metagenomic analysis of a permafrost microbial community reveals a rapid response to thaw." Nature 480.7377 (2011): 368-371.
8. Swedish Polar Research Secretariat (<https://www.polar.se/en/>)
9. Jung, Ji Young, et al. "Responses of surface SOC to long?term experimental warming vary between different heath types in the high Arctic tundra." European Journal of Soil Science 71.4 (2020): 752-767.
10. Nam, Sungjin, et al. "The relationships of present vegetation, bacteria, and soil properties with soil organic matter characteristics in moist acidic tundra in Alaska." Science of the Total Environment 772 (2021): 145386.

7. 연구성과

1) 정량적 성과

● 학술대회 논문 발표(구두발표 및 포스터 발표 포함)

발표 년월	학술 대회명	총저자 수(명)	논문저자명	발표논문제목	학술대회구분 (국내/국제)	개최국 가명	기여 도
2022 -12	AGU Fall Meeting	5	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	미국	50%
2023 -12	AGU Fall Meeting	8	김유진, Mats P Björkman, Robert G Bjork, 김민성, 장경순, 남성진, 정수정, 정지영	Changes in Soil Organic Matter Characteristics under Warming in Arctic Tundra	국제	미국	50%
2023 -12	AGU Fall Meeting	5	김유진, Mats P Björkman, Robert G Björk, 정수정, 정지영	Vulnerability of soil organic carbon to warming under different vegetation types in Northern Sweden	국제	미국	100 %

2024-04	International Tundra Experiment Meeting 2024	4	김유진, 현준기, Anders Michelsen, 정지영	Arctic soil labile nitrogen changes: A meta-analysis on the responses of soil labile nitrogen pools to experimental warming and snow addition	국제	캐나다	50%
2024-04	International Tundra Experiment Meeting 2024	8	김유진, Mats P Björkman, Robert G Björk, 김민성, 장경순, 남성진, 정수정, 정지영	Changes in Soil Organic Matter Characteristics under Warming in Arctic Tundra	국제	캐나다	50%
2024-10	한국토양비료학회	6	김유진, 정수정, Mats P Björkman, Robert G Björk, 남성진, 정지영	Soil Organic Carbon Responses to Warming in Northernmost Sweden	국내	대한민국	100%

● 국내외 과학자 교류 성과

(1) 해외파견

국내외 과학자교류 성과

파견시작일자(YYYY-MM-DD)	파견종료일자(YYYY-MM-DD)	파견대상자						
		성명	소속기관명	직위	최종학위	전공	파견국가명	파견목적구분
2022-08-07	2022-08-18	최용희	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수연구원 (Post doc.)	박사	미생물학	스웨덴	공동연구
2022-08-07	2022-09-01	김유진	한국해양과학기술원 부설 극지연구소	연수연구원 (Post doc.)	박사	환경학	스웨덴	공동연구

(2) 국내유치

유치시작일자(YYYY-MM-DD)	유치종료일자(YYYY-MM-DD)	유치대상자						
		성명	소속기관명	직위	최종학위	전공	소속국가명	유치목적구분
2025-03-05	2025-03-25	Emil Andersen	Umeå University	Researcher	박사	Arctic Terrestrial Ecology	한국	공동연구
2025-03-10	2025-03-14	Mats P Björkman	University of Gothenburg	Senior Lecturer	박사	Atmospheric Science	한국	공동연구
2025-03-10	2025-03-14	Joel White	University of Gothenburg	Post doc	박사	Arctic Biogeochemistry	한국	공동연구
2025-03-10	2025-03-14	Blandine Lyonnard	University of Gothenburg	PhD student	석사	Arctic Ecology	한국	공동연구

● 학술회의 개최(수행과제의 연구비를 활용하여 학술강좌, 심포지움, 워크숍, 세미나, 컨퍼런스 등의 학술회의를 개최한 경우)

개최시작일자(YYYY-MM-DD)	개최종료일자(YYYY-MM-DD)	학술회의명	참가국수 (국)	총참가인원수 (명)	내국인 발표자 수 (명)	외국인 발표자 수 (명)
2025-03-12	2025-03-12	한-스웨덴 협력 논의를 위한 워크숍	3	9	2	4
2025-03-13	2025-03-13	극지연구소 소내 전문가 초청 세미나	4	20	-	2

2) 정성적 성과

본 과제는 스웨덴의 기후변화 연구 지역에서 한-스웨덴 국제협력연구를 통해 실질적 연구 성과를 도출함. 스웨덴 Latnjajaure Field Station의 다양한 식생과 온도 상승 조건에서 토양 시료를 획득하여 분석하여 식생 유형 및 온도 상승에 따른 토양 유기물 특성 민감도와 메탄 발생 및 소비 미생물 군집과 메탄 플럭스 간 상관관계를 밝힘. 연구 결과를 바탕으로 총 6건의 국제학술대회 발표와 논문 원고 2편을 준비 중임.

더불어, 온라인 미팅과 세미나, 공동 워크숍, 공동 현장 연구 등 다양한 교류 활동을 통해 한국과 스웨덴 간 연구자 간 신뢰를 기반으로 한 협력 관계가 구축되었으며, 이는 향후 장기 관측 연구 및 후속 과제 추진을 위한 안정적인 국제 협력 기반이 될 것으로 기대함

8. 기타사항 (※ 과제 수행 시 중요 변경사항 등)

2차년도 추진목표 중에서 “스웨덴측 연구자의 극지연구소 방문연구”를 “스웨덴측 연구자와 International Tundra Experiment (ITEX) Meeting 공동 참여”로 변경하여 수행 완료하였으며, 3차년도 스웨덴측 연구자의 극지연구소 방문이 이루어져, 과제를 통해 획득한 자료의 공동 논문 작성 논의 및 향후 협력 연구 등에 대한 논의 등이 심도있게 이루어짐



[붙임]

〈 대표 성과 〉

※ 여러 건의 업적 유형을 한 개의 대표성과로 작성 가능

대표업적 요약문			
업적 제목	한-스웨덴 국제 공동연구 성과 확산 및 학술 교류 활성화		
업적 유형	국제 학술대회 초청 강연(Invited Talk)(), 학술대회 논문 발표(V), 국내외 과학자 교류(V), 국내외 연수지원(), 학술회의 개최(), MOU 체결(), 전문학술지 논문 게재(), 특허 등록(), 기타성과()		
주관연구책임자 또는 공동연구원 성명	정지영	참여자 수	6
본 과제는 스웨덴 북극권 Latnjajaure Field Station(LFS)에서 진행 중인 기후변화 모사 실험지를 기반으로, 한국-스웨덴 간 공동연구를 수행하여 북극 툰드라 생태계의 토양 유기탄소 저장 및 미생물 군집 변화 양상을 연구하였다. 특히 온도 상승 효과가 식생 유형에 따라 토양 유기탄소 저장량 및 유기물 분해 구성에 어떻게 영향을 미치는지를 정량적으로 분석하고, 메탄 생성 및 산화 미생물의 군집 구조 변화를 밝힘으로써, 기후변화가 기존 식생 유형에 따라 북극 토양 생태계에 어떤 영향을 미칠 수 있는지 분석하였다. 이러한 연구성과는 미국 지구물리학회(AGU Fall Meeting, 2022~2024), 캐나다 밴쿠버 ITEX meeting (2024)을 포함하여 총 6회의 국내외 학술대회에서 구두 및 포스터 발표를 통해 소개되었다. 발표 주제는 “북극 식생 유형별 온난화에 따른 토양 유기물 변화”, “탄소 분해의 민감도”, “북극 툰드라의 온도 상승에 따른 토양 유기물의 특성 변화” 등으로, 북극 기후변화 연구의 최신 동향을 반영하는 핵심 주제를 다루었다. 또한, 3년간의 과제 수행 기간 동안 스웨덴 연구진과의 긴밀한 협업 체계를 구축하였으며, 온라인 정기 미팅(연 2회 이상), 분석 자료 공유, 공동 논문 집필, 실험 프로토콜 공유 등을 통해 실질적인 연구 협력을 추진하였다. 2025년 3월에는 협력연구자인 스웨덴 예테보리 대학 연구진 3인과 스웨덴 Abisko Research Station에서 연구를 수행한 연구자를 한국 극지연구소로 초청하여 소내 연구 세미나 및 워크숍을 개최하였고, 이 자리에서 양국 연구진이 3년간의 성과를 공유하고 향후 공동 연구 협력 및 공동 논문 집필 등에 대한 계획을 구체적으로 논의하였다. 이와 같은 활발한 학술 교류와 성과 확산 노력은 단순한 시료, 자료 공유 및 분석을 넘어, 북극 기후변화 대응을 위한 국제 공동연구 네트워크와 북극 연구에 대한 한국의 기여를 보여주는 좋은 사례이다. 본 연구 성과는 향후 북극 자료 활용을 통한 메타 분석, 북극 육상 생태계의 탄소 순환 예측 모델 개선 및 장기 생태 관측망 구축 등의 과학적 기반 자료로 활용될 수도 있다.			

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 한-스웨덴 특별협력사업 “기후변화에 따른 북극 동토 생태계 변화 관측망 기반 조성을 위한 한국-스웨덴 협력연구”의 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 과학기술정보통신부(한국연구재단)에서 시행한 한-스웨덴 특별협력사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.