BSPN15080(15081, 15082, 15083, 서울대)-103-12

환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구

(Establishment of Circum Arctic Permafrost Environment Change Monitoring Network and Future Predicion Techniques: CAPEC Project)

KOPRI 극지연구소

2016.7.

한국해양과학기술원 부설
극지연구소

제 출 문

미래창조과학부 장관 귀하

이 보고서를 "환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구" 과제(세부과제 “북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발”, “북극권 동토층의 환경변화 특성 규명”, “급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현”, “북극권 동토층 생태계 특성 규명”)의 (2단계)보고서로 제출합니다.

2016년 7월 15일

주관연구기관명 : 한국해양과학기술원부설 극지연구소
주관(총괄)연구책임자 : 이 방 용
세부연구책임자 : 이방용,이유경,김백민
연 구 원 : 강효진,경기운,경혜련
" : 권혜영,김민철,김보경
" : 김선화,김성중,김세은
" : 김연태,김영환,김옥선
" : 김은영,김재석,김지원
" : 김주홍,김진석,김형준
" : 김혜림,김혜민,남성진
" : 남승일,노준우,박기태
" : 박근보,박기헌,백은혁
" : 박상종,방민영,성미경
" : 심태현,손정옥,옥 정
" : 양아련,오호림,우성호
" : 유재일,윤영준,윤주경
" : 이솔지,이제인,이주한
" : 이지영,이지혜,이현하
" : 이홍금,임채섭,장혜영
" : 정소망,정수정,정슬기
" : 정지영,조미현,지건화
" : 진광호,진동민,차정숙
" : 최용회,최진희,최태진
" : 최혜선,허유정
" : James Hopper

KOPRI 극지연구소

" : Binu Mani Tripathi
" : (이상 극지연구소),
" : 노승호,양희권,이찬길
" : (이상 한양대학교),
" : 김용원, Lally Hinzman
" : (이상 미국 알래스카주립대학교),
" : 정창훈
" : (이상 경인여자대학교),
" : 함석현
" : (이상 네오씨-텍),
" : 주현태
(이상 충북대학교)
위탁연구기관명 : 광주과학기술원
위탁연구책임자 : 박 기 홍
연 구 원 : 강민수,김기백,김도형
" : 맹현옥,서아롬,이희성
조희주,채호승,
Ka Yan Chong
(이상 광주과학기술원)
위탁연구기관명 : 서울대학교
위탁연구책임자 : 류 영 렬
연 구 원 : 김종민,이승준
" : (이상 서울대학교)
위탁연구기관명 : 숭실대학교
위탁연구책임자 : 김 윤 곤
" : (이상 숭실대학교)
위탁연구기관명 : 연세대학교
위탁연구책임자 : 강 호 정
연 구 원 : 김진현,서주영,채남이
" : (이상 연세대학교)
협동(세부)연구기관명 : 서울대학교
협동(세부)연구책임자 : 이 은 주
연 구 원 : 김의재,김종성,노희명
" : 문새로미,박정수,박지숙
" : 방정환,손덕주,신원협
" : 이 규,이민진,이서연
" : 이승경,이정현,이태규
" : 이효혜미,정재원,지윤미
" : (이상 서울대학교),

KOPRI 극지연구소

" : 강혜순
" : (이상 성신여자대학교),
" : 김지희,박상규,양동우
" : 정선아,주성배
" : (이상 아주대학교),
" :한동욱
" :(이상 국립해양생물자원관)
" : 황영심
" : (이상 지오북(고려대학교))
기타전문가참여 : 박항식,신상희,홍성민
" : 홍창희 등
" :(이상 을지대학교,가이아쓰리디,인하대학교,한국건설기술연구원)
(이상 성명 가나다순)

KOPRI
극지연구소

보고서 요약서(총괄)

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>2011-0021063</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2013.06. 23 -
2016. 06. 22
(36개월)</td><td>단 계 구 분</td><td>(2단계)/
(2단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">해양극지 기초·원천기술개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">해양극지 기초·원천기술개발사업</td></tr>
<tr><td rowspan="6">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">환북극 동토층 환경변화 관측시스템
원천기술 개발 및 변화 추이 연구</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및
관측기술 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">북극권 동토층의 환경변화 특성 규명</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">북극권 동토층 생태계 특성 규명</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">이 방 용</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 72 명
내부: 50 명
외부: 22 명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 : 6,000백만원
기업 : 0백만원
계 : 6,000백만원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 130 명
내부 : 77 명
외부 : 53 명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 9,000백만원
기업 : 0백만원
계 : 9,000백만원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국해양과학기술원부설 극지연구소
북극환경·자원연구센터</td><td colspan="2">참여기업명</td><td></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명: 미국/캐나다/노르웨이/그린란드</td><td colspan="2">상대국연구기관명:
UAF/CHARS/NPI/Aarhus Univ.</td><td></td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="2">연구기관명 : 광주과기원</td><td colspan="2">연구책임자 : 박기홍</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">연구기관명 : 서울대학교</td><td colspan="2">연구책임자 : 류영렬</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">연구기관명 : 연세대학교</td><td colspan="2">연구책임자 : 강호정</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">연구기관명 : 숭실대학교</td><td colspan="2">연구책임자 : 김윤곤</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>776</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 환북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 정밀 첨단 측정시스템/분석 원천기술 개발 등 인프라 구축
· 북극권 관측 거점 확보 및 네트워크 구축(거점별 연차 시행)
· 입체형 정밀종합관측시스템 및 첨단 유비쿼터스 센서 네트워크(USN), 기반 설계/개발/적용, cyber- infrastructure 운영기술 개발과 GPS 연구 기반구축
○ 북극권 동토층의 물리-화학-생물학적 특성과 이산화탄소 플럭스와의 상관관계 이해 및 온도 상승에 의한 변화 예측
· 동토층의 토양 온도변화와 표면 에너지균형 조절 등 물리·역학적 특성 파악 및 지표 순환 변화 분석
· 온실기체 변동의 생물학적 요인인 토양미생물과 식물의 기능 분석 및 연안 생태계 연구
○ 관측자료 분석과 모델 개발을 통해 급격히 진행되고 있는 북극권 동토층의 환경변화 현상의 수치적 재현
·영구동토층 사이트 관측에 기반한 영구동토층 국지 지면-생태 모델링 시스템 구축</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">북극권 환경변화, 동토층, 관측 거점, 물리-화학-생물학적 특성, 연구 유니트, 수치적 재현</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Arctic Environmental Change, Permafrost, Monitoring Node, Physical-chemical-biological characteristics, Arctic Research Unit, numerical simulation</td></tr>
</table>

보고서 요약서(세부과제 1)

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>2011-0021064</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2013.06. 23 -
2016. 06. 22
(36개월)</td><td>단 계 구 분</td><td>(2단계)/
(2단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">해양극지 기초·원천기술개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">해양극지 기초·원천기술개발사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">환 북 극 동 토 층 환 경 변 화 관 측 시 스 템
원 천 기 술 개 발 및 변 화 추 이 연 구</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및
관측기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">이 방 용</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 26 명
내부: 19 명
외부: 7 명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 : 2,670백만원
기업 : 0백만원
계 : 2,670백만원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 32 명
내부 : 20 명
외부 : 12 명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 3,990백만원
기업 : 0백만원
계 : 3,990백만원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국해양과학기술원부설 극지연구소
북극환경·자원연구센터</td><td colspan="2">참여기업명</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td rowspan="3">위 탁 연 구</td><td colspan="2">연구기관명 : 광주과학기술원</td><td colspan="2">연구책임자 : 박기홍</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구기관명 : 서울대학교</td><td colspan="2">연구책임자 : 류영렬</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="3">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>364</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 환북극권 동토층 환경변화 정밀 측정 관측 거점(Node) 확보 및 미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드 등 거점별 환경변화 자료 수집과 특성 분석
· 미국 알래스카 카운실 거점 동토-대기간 온실 기체 순환 이해
· 캐나다 누나붓 주 캠브리지 베이 거점 대기-동토 온실기체 교환 특성
· 노르웨이 스발바르 거점 북극 대기에서의 구름응결핵(CCN)의 계절별 특성, DMS 농도 변화 관측
· 그린란드 노르드 거점 복사, 에디 공분산 시스템 측정 구축 및 분석
·러시아 동토 기반 거점 구축을 위한 한-러 국제공동 추진
○ 극지환경 센서관측네트워크, 전송시스템 개발 및 현장적용(2011년 국내 최초시행)
· 국내 대학-중소 산업계와의 측정시스템 개발, HW/SW 개발, 현장 적용
· USN 기반 기술 개발 및 현장 적용
○ 국내·외 연구 유니트 조성</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">관측 거점, 온실 기체, 구름응결핵, 센서관측네트워크,
연구 유니트</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Permafrost Monitoring Node, Greenhouse gas, Cloud condensation nuclei, Ubiquitous Sensor Network, Arctic Research Unit</td></tr>
</table>

KOPRI 극지연구소

보고서 요약서(위탁과제-광주과기원)

과제고유번호	2011-0021066	해당단계 연구기간	2013. 06. 23 ~ 2016. 06. 22	단계구분	(2단계)/ (2단계)
위탁연구 과제명	북극해 에어로졸 특성 연구 및 동토자료 비교				
위탁연구 책임자	박 기 홍	해당단계 참여연구원 수	9명	해당단계 연구비	150,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	광주과학기술원/ 지구·환경공학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	40

- 쇄빙연구선 아라온호의 (ARAON) 11,937 km 연구항해 구간을 따라 북극해와 태평양상에서 에어로졸의 다양한 물리화학적 특성 연속 측정 및 비교 분석.
- 에어로졸 크기에 (nm) 따른 수농도 (#/cm^3) 분포 특성 (number size distribution), 흡습성 (hygroscopicity), 휘발성 (volatility), 혼합상태 (mixing state), 입자의 형태 (particle morphology) 및 원소성분 (elemental composition) 등 다양한 에어로졸 특성들을 종합적으로 분석.
- 활발한 Oceanic biological activity에 의한 Organic compounds가 새로운 입자 생성 및 성장에 중요한 역할을 하는 것을 규명.
- 에어로졸이 기후변화에 미치는 영향 파악.
- 에어로졸의 발생원과 생성기작 및 이동특성 분석.
- Air mass에 따른 에어로졸의 number size distribution 특성 변화 확인.
- Continental/anthropogenic source 영향에 의해 에어로졸의 질량 및 BC (black carbon) 농도 증가 확인.
- 북극해, 태평양, 그리고 동토층에서 획득한 에어로졸 물리화학적 특성 데이터 비교 분석.
- 계절적인 기온상승, 대기정체 경향, 태양 복사 등의 요소와 NPF (new particle formation) event의 상호관계 연구.
- 광범위 에어로졸 모니터링망 구축을 위한 기본 데이터 산출.

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극 에어로졸, 흡습성, 휘발성, 혼합상태, 입자생성, 입자성장, 이동경로, 기후변화.
	영 어	Arctic aerosol, hygroscopicity, volatility, mixing state, particle formation, particle growth, transport pathway, climate change.

보고서 요약서(위탁과제-서울대학교)

과제고유번호	2011-0021066	해당단계 연구기간	2013. 06. 23 ~ 2016. 06. 22	단계구분	(2단계)/ (2단계)
위탁연구 과제명	알래스카 카운실 사이트 식생의 구조와 기능 정량화에 관한 연구				
위탁연구 책임자	류 영 렬	해당단계 참여연구원 수	3명	해당단계 연구비	25,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		

요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)	보고서 면수	26

○ 해당 연구는 탄소 순환을 이해하기 위해 알래스카 카운실 사이트의 잎 특성, 식생군락의 구조와 기능을 정량화하기 위해 LED 센서를 이용해 정규화식생지수(NDVI)를 측정하고, MODIS 위성과 비교해 해당 년도 패턴을 보였다. LED센서를 이용하여 카운실 지역의 생물계절을 정량화 할 수 있었을 뿐만 아니라 눈이 녹는 시점을 계산할 수 있었다.

○ 2015년 7월 1일부터 10일까지 현장을 방문해 잎 특성, 식생 군락 구조를 측정하였다. 관측결과, 수종별 최대 광합성 량은 Betula nana의 Amax가 7.9 umol $m^{-2}s^{-1}$, Cloudberry는 7.7 umol $m^{-2}s^{-1}$, 그리고 Blueberry가5.2 umol $m^{-2}s^{-1}$이다. C:N ratio는 Blueberry가 31.41로 가장 높았으며 Betula nana는 26.99 그리고 Cloudberry는 17.07이다.

○ 현장 답사 결과 NDVI와 LAI의 상관관계가 낮았으며 (R^2=0.068; R^2=0.025; R^2=0.059) 정량화 하는데 어려움이 있었다. 그 이유는 식생 군락 속에 있는 이끼, 지의류 그리고 낙엽에 의해 형성되는 이질적인 배경 반사도가 군락 정규화 식생 지수 값에 영향을 미쳤다. 또한 다발식물체와 다각 구조체에 형성된 굴곡 지형 특징은 엽면적을 추정하는데 영향을 주었다.

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	광합성, 잎 특성, 엽면적, 군락구조, 정규화 식생지수
	영 어	Photosynthesis, Leaf Trait, Leaf Area Index, Canopy Structure, Normalized Difference Vegetation Index

보고서 요약서(세부과제 2)

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>2011-0021065</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2013.06. 23 -
2016. 06. 22
(36개월)</td><td>단 계 구 분</td><td>(2단계)/
(2단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">해양극지 기초·원천기술개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">해양극지 기초·원천기술개발사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">환 북 극 동 토 층 환 경 변 화 관 측 시 스 템
원 천 기 술 개 발 및 변 화 추 이 연 구</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">북극권 동토층의 환경변화 특성 규명</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">이 유 경</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 20 명
내부: 19 명
외부: 1 명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 : 1,920백만원
기업 : 0백만원
계 : 1,920백만원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 35 명
내부 : 34 명
외부 : 1 명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 2,720백만원
기업 : 0백만원
계 : 2,720백만원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="3">한국해양과학기술원부설 극지연구소
북극환경·자원연구센터</td><td>참여기업명</td><td></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td rowspan="2">위 탁 연 구</td><td colspan="3">연구기관명 : 연세대학교</td><td colspan="2">연구책임자 : 강호정</td></tr>
<tr><td colspan="3">연구기관명 : 숭실대학교</td><td colspan="2">연구책임자 : 김윤곤</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>142</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 알래스카 토양 코어 분석 결과, 전체적으로 산성토양이며 [NH_4^+]가 활동층과 동토층 경계로 매우 증가했고, 미생물 군집 조성이 토양 층위별로 확연히 구분되었음
○ 알래스카 토양 유기물은 상부 식생 피도와 상관성이 높았고, Py-GC/MS 분석 결과 3개 지역의 표층 시료들은 지역별로 묶이는 특성을 나타냄
○ 캐나다 캠브리지 베이에서는 2012년 7월 초부터 기후변화 모사(온도와 강수량 증가) 실험구를 운영하고 있으며, 온도상승챔버 설치로 표층 대기와 토양 온도가 각각 평균 약 0.5℃ 상승함
○ 캠브리지 베이의 기후변화 모사 1년과 3년 후 토양 특성의 변화가 뚜렷하지 않으며, 토양 미생물은 1년 후 변화가 나타났으나 3년 후에는 특성 변화가 사라짐
○ 캠브리지 베이의 기후변화 모사 1년 후, 온도 상승과 강수량 증가가 phenol oxidase 활성을 증가시키고, 온도 상승이 식생에 건조 스트레스를 유발
○ 그린란드 자켄버그의 기후변화 모사 8-9년 후 기후변화 모사에 의한 미생물 특성 변화가 나타나지 않음
○ 환북극 관측거점 4개 지역의 유기탄소 특성을 비교한 결과, 알래스카 지역이 유기탄소 저장량이 가장 높게 나타났고, 스발바르의 빙하 후퇴지역의 유기탄소 저장량이 가장 낮았음</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">동토층, 미생물 군집 구조, 토양 유기탄소, 체외 효소
기후변화 모사 실험, 지중구조</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Permafrost, Microbial community structure, Soil organic carbon, Extracelluar enzyme activity, Climate manipulation experiment, Substructure</td></tr>
</table>

보고서 요약서(위탁과제-연세대학교)

과제고유번호	2011-0021065	해당단계 연구기간	2013. 06. 23 ~ 2016. 06. 22	단계구분	(2단계)/ (2단계)
위탁연구 과제명	온도 상승에 따른 동토층 토양유기물 분해효소기작 연구				
위탁연구 책임자	강 호 정	해당단계 참여연구원 수	3명	해당단계 연구비	270,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	연세대학교		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		

요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내) — 보고서 면수: 26

○ 기후변화 조작실험이 수행되고 있는 캐나다 캠브리지베이 지역에서 효소활성도를 측정한 결과 기후변화 연차와 효소의 종류에 따라 다른 반응이 나타남
○ 가수분해효소 활성도의 경우 조작실험에 의한 차이보다 토양 깊이에 따른 차이만 보였으며 표토의 유기물 층에서 높은 경향을 보임
○ 페놀산화효소의 경우 조작실험 1년차에 온도상승 하에 활성도가 증가하였다가 3년차에는 다시 차이가 없는 것으로 나타남
○ 토양의 용존유기탄소 함량 역시 조작실험보다 토양 깊이에 따른 차이를 보였으나 3년차에 약간 증가하는 경향을 보임
○ 용존유기탄소 함량과 가수분해효소 활성도 간에 양의 상관관계를 보임
○ 온도 상승 하에 식물체의 동위원소 비가 바뀌어 건조효과가 있는 것으로 보임
○ 온실기체 발생량 및 관련 미생물량은 기후변화 처리구에 따른 유의한 차이를 보이지 않음

색인어 (각 5개 이상)	한 글	영구동토층, 기후변화, 탄소순환, 유기물분해, 난분해성물질, 온실기체
	영 어	permafrost, climate change, carbon cycle, organic matter decomposition, recalcitrant organic matter, greenhouse gas

보고서 요약서(위탁과제-숭실대학교)

과제고유번호	2011-0021065	해당단계 연구기간	2013. 06. 23 ~ 2016. 06. 22	단계구분	(2단계)/ (2단계)
위탁연구 과제명	캐나다 캠브리지 베이 기후변화 실험 모사구에서의 지방산 분석				
위탁연구 책임자	김 윤 곤	해당단계 참여연구원 수	1명	해당단계 연구비	25,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	숭실대학교		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		

요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)	보고서 면수	26

○ 캠브리지 베이 토양 샘플로부터 total lipid 추출 후 PLFA 분리 정제 방법에 대하여 최적화 연구 수행.

○ 기존 연구와 본 연구의 PLFA 통합 라이브러리 구축. 총 25종의 PLFA를 라이브러리 매칭을 통해 미생물 군집 분석 수행.

○ 구축의 선행 연구로써, 미확인 미생물의 LPS 추출 및 Lipid A 분리 정제 후 구조 분석을 수행.

○ 미확인 1종(Pseudomonas sp. psy2), Pseudomonas Moorei, Pseudomonas chicoli 총 3종에 대한 구조 분석 및 독성 평가 실시

KOPRI 극지연구소

색인어 (각 5개 이상)	한 글	캠브리지 베이, 토양, 매스스펙트로메트리, 토양 미세유기물, 기후변화
	영 어	Cambridge Bay, Soil, Mass spectrometry, Soil microorganism, Climate change

보고서 요약서(세부과제 3)

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>2011-0021066</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2013.06. 23 -
2016. 06. 22
(36개월)</td><td>단 계 구 분</td><td>(2단계)/
(2단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">해양극지 기초·원천기술개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">해양극지 기초·원천기술개발사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">환북극 동토층 환경변화 관측시스템
원천기술 개발 및 변화 추이 연구</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">김백민</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 9 명
내부 : 4 명
외부 : 5 명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 : 270,000 천원
기업 : 0 천원
계 : 270,000 천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 36명
내부 : 12명
외부 : 24명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 810,000 천원
기업 : 0 천원
계 : 810,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국해양과학기술원부설
극지연구소 기후변화연
구부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명 :</td><td colspan="3">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="2">연구기관명 :</td><td colspan="3">연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>66</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 탄소 순환 및 메탄 방출 모듈을 접합한 영구동토층 지면-식생-수문 통합모델을 완성하여 북극권 미래 환경 변화 시나리오 도출
○ 미래 온난화된 지구에서 북극권 영구동토 활동층의 변화, 정량적인 이산화탄소 및 메탄의 방출 전망
○ 북반구 영구동토층 고위도 식생 변화의 기후 피드백 효과가 얼마나 큰지 정략적으로 규명하고 미래 고위도 동토층 툰드라 식생 증가가 북극 온난화를 가속화한다는 결과 도출
○ 환북극 식생의 녹화가 열대 강수를 변화시키며, 이 영향이 계절적 변동성을 가짐을 규명</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">영구동토층, 북극권 미래환경변화, 기후-식생 상호작용,
지면-식생-수문 통합모델, 시나리오</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">permafrost, Arctic climate change, climate-ecosystem interaction, land-vegetation-hydrology model, scenario</td></tr>
</table>

보고서 요약서(세부과제 4)

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>2011-0021071</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2013.06.23
~ 2016.06.22
(36개월)</td><td>단 계 구 분</td><td>(2단계)/
(2단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">해양극지기초·원천기술개발사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">해양극지기초·원천기술개발사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">환북극 동토층 환경변화 관측시스템
원천기술 개발 및 변화 추이 연구</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">북극권 동토층 생태계 특성 규명</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">이 은 주</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 17 명
내부 : 8 명
외부 : 9 명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 :
200,000천원
기업 : 천원
계 : 천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 27 명
내부 : 11명
외부 : 16명</td><td>총연구비</td><td>정부 :
600,000천원
기업 : 천원
계 : 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">서울대학교 자연과학대학 생명과학부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="2">상대국명 :</td><td colspan="3">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="2">연구기관명 :</td><td colspan="3">연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>105</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 온도가 높아질수록 알래스카 토양의 이산화탄소 플럭스가 증가하였으며 특히 유기물층 (Oi, Oe)의 이산화탄소 플러스는 다른 토층에 비해 온도에 더 민감하게 반응함
○ 니알슨 지역의 지온과 C/N ratio가 높은 지점에서 종 다양도가 높음.
○ 북극 식물은 토양 온도 변화와 토양 수분 변화를 줄여주며 토양에 유기물 함량을 높임으로써 nurse effect를 보임
○ 유성번식과 무성번식의 겸비, 충매와 풍매의 겸비, 다년생 초본의 생활사 등을 통한 많은 식물의 bet-hedging 전략이 스발바르 식물의 유전적 다양성에 기여해 온 것으로 사료됨
○ 기후변화 모사 챔버를 통해 온도가 증가하면 민담자리 꽃나무의 근권 세균 군집에서 Pseudonacardia 속의 비율이 다른 속에 비해 크게 증가하는 것으로 나타남</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">영구동토 융해, 토양 탄소, 식물종 다양도, 식물 보호 효과, 식물 대사체, 식물 성 체제</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Thawing permafrost, Soil carbon, Plant species diversity, Nurse effect, Plant metabolomics, Plant sex study</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구
(세부과제 “북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발”, “북극권 동토층의 환경변화 특성 규명”, “급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현”, “북극권 동토층 생태계 특성 규명”)

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 연구목적 :

[연구 목적 개요]
북극권 연안 동토층 지역에서의 급변하는 주요한 환경변화에 대한 진단과 분석을 위해, 다학제적이며 국내외 공동연구 활성화를 추진하며, 입체형 무인 원격 정밀 측정시스템을 설치할 관측 거점을 확보하고 토양-표층-식생-대기 현상의 변화 관찰과 첨단의 유비쿼터스센서네트워크(USN)를 비롯한 위성자료송수신시스템, 제어시스템 등 cyber-infrastructure를 개발하며 적용하여, 북극권과 한반도의 미래 상관관계를 예측하고자 함

- 환북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 연구실 구축
- 정밀 첨단 측정시스템/분석 원천기술개발 등 인프라 구축
- 북극권 동토층 토양의 물리-화학-생물학적 특성 이해
- 온실기체 변동의 생물학적 요인인 동토층 토양 미생물과 식물의 기능 이해
- 동토층 생태계 환경변화 재현 및 미래 예측
- 북극 동토층 생태계에서의 토양층 변화, 토양 미생물의 기능, 생태계 구성인자간의 상호 유기적인 관계 파악

○ 필 요 성 :

- 인류의 지속적인 화석 연료 이용, 토양 이용 변경 등은 온실기체인 이산화탄소를 계속 방출하여 지구온난화가 가속됨
- 온도 상승 및 강수량 패턴 변화와 같은 기후변화는 극지역에서 변화 폭이 더욱 큼
- 최근 북극 바다얼음(海氷)의 급격한 감소가 보고되고 있음(지난 50여 년간 약 50% 감소). 북극권은 북반구 기후생산소 역할을 하며 기후 등 환경변화에 가장 민감한 지역으로

서, 전 지구적으로 해수면상승의 초래와 지구환경변화에 중대한 역할, 또한 북극 토양 및 육지생태계의 역할 증대

- 북극은 빙하와 토양의 해빙(解氷) 현상이 급격히 일어나고 이로 인해 생태계도 급변하고 있으나 이에 대한 정확한 모니터링과 예측은 미진한 상황이므로, 북극권에서 환경변화의 양상과 원인, 변화간의 상호연계성을 파악하기 위해서는 체계적 관측 필수
- 극지역 영구동토층의 붕괴로 오랫동안 저장되어있던 유기물의 분해, 이산화탄소, 메탄 방출과 같은 현상은 전 지구적 기후변화에 다시 영향을 끼칠 수 있을 것으로 예상되며, 극지역에서의 기후변화 정도, 기후변화에 의한 생태계의 반응 등을 예측하기 어려움
- 북극의 기온 상승은 북극 진동의 패턴을 변화시켜 우리나라의 기후에 결정적인 영향을 끼칠 것으로 예상되어 북극에 대한 지속적인 관측 및 미래의 변화에 대한 예측에 대한 심도 있는 연구 필요
- 따라서 북극 지역을 기반으로 한 관측 거점을 확보하고, 진행되고 있는 환경변화의 정확한 진단과 미래환경의 정확한 예측 및 실사용자에게 준실시간급 정보를 제공하기 위한 데이터 수집과 분석, 생태계의 반응과 이에 따른 환경변화 연구 시급
- 기후 변화가 급격히 진행되어 북극의 빙하와 토양의 해빙 속도가 점차 빨라지고 있음. 이로 인해 북극 생태계도 빠르게 변화되고 있으므로 북극 동식물의 지속적인 모니터링과 변화 양상 연구 필요
- 북극 동토생태계는 생물다양성과 생산력이 극히 낮으나 기후변화의 속도는 가장 빠른 곳임. 북극 동토층 생태계에 미치는 영향을 파악하기 위하여 북극 동토층의 생산·소비·분해 과정 및 토양 환경을 이해하고, 북극 동토층 생태계 연구를 위한 인프라를 구축하며, 범지구적 기후변화에 의한 생태계의 변화 예측 방법을 개발하여 다양한 분야에서 국제 경쟁력 확보 필요

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

(세부과제 1)

○ 연구개발의 내용 :

- 북극다산과학기지 및 환북극 동토층 관측 거점 정상 가동
  : 동토 활동층의 열적특성, 동토층 하부의 3차원 영상화 및 기하학적 분포 특성 연구, 토양의 공학적 특성 분석
  : 극지역 무인 원격 입체형 정밀종합관측시스템 및 첨단 유비쿼터스 센서 네트워크(USN), 기반 설계/개발/적용 등 융복합 기초원천기술 개발, cyber-infrastructure 운영기술 개발과 GPS 연구 기반구축(우리나라 최초로 북극권 거점 확보 및 첨단 측정시스템 설치, 운영)
  : 미국 알래스카(1거점), 캐나다 캠브리지베이(2거점), 노르웨이(3거점) 등 시스템

정상 운영
: 그린란드 Nord (4거점) 운영 시작(단, 러시아 (5거점) 거점 선정 추진 중)
- 동토-대기간 온실 기체순환 이해를 위한 시스템과 북극대기 황성분 및 블랙카본 관측 시스템 운영 및 거점 추가에 따른 시스템 추가 구축
- 동토층 장기 감시 기술 및 변화량 추적 기술개발

○ 연구개발의 범위 :
- 1,2,3,4 거점의 동토층 자료수집 및 분석, 거점별 특성화 분별 작업 : 전문가활용(언론 등) 연구활동 소개 등, 추가 거점 현장조사/자료수집/기술정립/분석
- 한-러시아 동토기반 공동연구 체계 구축
- 메탄/이산화탄소 플럭스 자료 생산 및 DB 구축
- 상세 자료 분석을 통한 거점간 에너지 및 온실가스 플럭스 비교
- 노르웨이(3거점) 제플린 관측소 북극대기 황성분(DMS) 관측 시스템 정상운영
- 환북극 연구 유니트(Arctic Environment Research Unit) 구성 체계 구축
: 다학제 산·학·연 연구진이 참여하는 영구동토층 연구 분야별 유니트 구성
: 주관연구기관의 자료센터와 연계한 DB 및 웹서비스 공유 기반구축

(광주과기원 위탁과제)
○ 쇄빙연구선 아라온의 항해구간을 따라 흡습성, 휘발성, 혼합상태 등 다양한 에어로졸의 물리화학적 특성 집중 측정
○ 에어로졸의 물리화학적 특성 데이터 비교 분석
○ 에어로졸의 물리화학적 특성 데이터 비교 분석

(서울대학교 위탁과제)
○ 현장 관측을 통해 다양한 수종별로 잎 특성들을 관측
- 광합성 파라미터 (Vcmax, Jmax)
- 잎의 탄소와 질소 비율
- 단위면적당 질량
- 분광 반사율, 투과율, 흡수율
○ 현장 관측을 통해 식생 군락의 구조와 기능 관측
- 엽면적 지수
- 군락 군집도 지수
- 분광 반사율
- 군락에 의해 흡수되는 PAR 비율

(세부과제 2)
○ 연구개발의 내용 :

- 지구물리탐사 기법을 이용하여 북극권 기후환경변화 예측의 중요한 지표인 동토층 토양의 물리적 특성(전기적 및 전자기적 가변성, 함수율) 파악
- 동토층에 저장되어 있는 유기탄소의 특성 파악을 통해 기후변화에 민감한 탄소량 추정
- 동토층 유기탄소와 토양미생물의 공간적 분포 특성 이해
- 온실 기체 발생 요인인 토양미생물과 온실 기체의 흡수원인 식물을 중심으로 동토층의 생물학적 특성과 이산화탄소 플럭스의 상관관계 파악
- 북극권 현장 관측을 통해 온도 및 강수량 변화가 동토층 토양의 특성과 생물 군집 구조 및 물질대사에 미치는 영향 분석

○ 연구개발의 범위 :
- 기후변화 모사 실험구 운영 및 환경 인자 자료, 기후변화 영향 받은 토양 시료 획득
- 동토 코어링을 통한 활동층과 영구동토층 토양 시료 확보
- 동토층 토양 특성 및 미생물 군집 분석

(연세대학교 위탁과제)

○ 기후변화 인자 조작 실험을 통한 영구동토층의 유기물 분해 관련 미생물 효소활성도 측정

○ 캠브리지베이 기후변화모사실험지에서 유기물 분해와 관련된 가수분해효소 및 난분해성 탄소 분해관련 산화효소의 활성도를 측정함

(숭실대학교 위탁과제)

○ 토양 시료로부터 효율적 지방 회수 방법 적용
- 토양 시료 내 지방산 표지 인자 분석을 위한 추출 조건 최적화
- 토양으로부터 지방산을 추출 및 분석을 수행하여 표지인자 탐색

○ PLFA 지방산 라이브러리 구축
- 토양 시료 내 PLFA의 정성 및 정량 분석을 위한 방법 구축
- microbial group별 분류를 통한 PLFA 지방산 library 구축 및 확대
- 토양 시료 내 미생물 군집 분석을 위한 여러 PLFA marker 분석

○ 캠브리지 베이로부터의 토양 시료 확보 및 분석
- 샘플링할 장소 별로 일정량의 토양을 회수하여 분석에 사용할 시료 확보
- 확보된 토양 시료의 PLFA 지방산 분석 및 순수 분리된 미생물들의 생장 특정 및 효소분비, 기직이용 특이성 등의 실험 수행

○ 캠브리지 베이 토양미생물 지질 대사체 분석
- 캠브리지 베이 토양 미생물의 추위대응 기작 및 탄소원 저장 형태를 알기 위한 다양한 미생물에서의 전체 대사체 분석을 수행
- 위의 분석 결과를 통한 여러 토양 미생물의 지질 대사체 라이브러리를 구축

KOPRI 극지연구소

(세부과제 3)

○ 연구개발의 내용 :

- 국지 지면-생권 모델 구동 및 검증
- 기후 변화 시나리오에 따른 영구동토층 내 식생 및 탄소순환 변화 예측
- 유라시아 눈 덮임 및 동토층 식생 변화가 동아시아 지역 기후에 미치는 영향
- 탄소 순환, 메탄 방출 모듈 검증 및 접합
- 영구동토층 지표-식생-수문 통합 모델 완성
- 유라시아 눈 덮임이 동토층 융해에 미치는 영향
- 빙권 기후변화 재현 및 미래기후 종합 모의
- 대기/식생/해빙/지면/수문 종합 모델링, 기후변화 시나리오 제시
- 유라시아 눈 덮임 변화의 미래예측 및 평가

○ 연구개발의 범위 :

- 환북극 영구동토층 관측 거점에서 확보된 실측자료에 기반을 둔 지역규모 지면-생권 모델링 시스템 구축
- 북극권 토양-식생-수문 통합 기후모델 개발
- 국가 기후변화 대응 전략 수립에 필요한 북극권 미래 환경변화 시나리오 도출

(세부과제 4)

○ 연구개발의 내용 :

- 알래스카 영구동토층 토양의 물질화학적 특성 분석
- 지구온난화에 따른 알래스카 토양 내 탄소/질소 동태 연구
- 스발바르의 식생 분포에 영향을 미치는 환경인자 분석
- 스발바르 식물의 nurse effect 연구
- 북극다람쥐꼬리의 생태 연구
- 스발바르 현화식물 번식 체제 연구
- 북극 동토층 주요 우점 식물종의 대사체 변화 분석 및 먹이관계 분석
- 북극 동토층 토양 생물 군집의 변화에 따른 주요 우점 식물종의 대사체 변화 이해

○ 연구개발의 범위 :

- 알래스카 토양의 분류, 층위분석 및 수리특성 실내 및 현장 실험
- 반복적인 동결-융해 환경에서 질소 유입에 의한 알래스카 토양 내 탄소 역학 규명
- 극한 환경에 적응한 식물들의 nurse effect 규명
- 스발바르 식물상의 계통과 생태적 특성에 대한 DB 구축
- 북극 동토층 우점 식물종 대사체와 먹이관계 분석

KOPRI 극지연구소

Ⅳ. 연구개발성과

(총괄)

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	생명자원		화합물
							생명정보	생명자원	
계획	19								
실적	26								
등록·기탁번호*									

(세부과제 1)

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	생명자원		화합물
							생명정보	생명자원	
계획	10								
실적	15								
등록·기탁번호*									

KOPRI 금지연구소

○ **환북극 환경변화 모니터링 관측 거점 구축**
- 미국 알래스카 거점 (64° N, 165° W)
- 캐나다 캠브리지 베이 거점 (69° N, 105° W)
- 그린란드 노르드 거점 (Nord, 81°36’ N, 16°40W)
- 노르웨이 스발바르 거점 (78.91° N, 11.89° E)

○ **노르웨이 스발바르**
- 노르웨이 거점(스발바르 Zeppelin)에서의 구름응결핵 자료 확보(2007～2013) 및 특성 분석
- Phytoplankton 성장기(2010, 2014, and 2015) 동안의 Dimethylsulfide (DMS) 분석을 통해, 지역적, 시간적 변화 특성 규명

○ **그린란드 노르드**
- 이산화탄소 교환과 에너지 플럭스에 대한 에디 공분산 측정 개시, 특성 분석
- 북극지역 온난화가 대기-동토층 간 교환과정에 미치는 영향 분석

○ **장기간 환경변화 모니터링을 위한 기술 개발**
- Ubiquitous Sensor Network (USN)에 기반한 cyber-infrastructure 응용 기술 개발

- 대기-토양-생물 간 통합 모니터링 기술 개발과 특성 분석
- 무인 3D 정밀원격자료 획득기술 개발과 적용

○ 북극연구유니트 구성과 가동, 지속가능한 연구 프레임 구축

- 북극이사회 국가 및 독일, 이태리 등과의 지속적 연구협력 체제 구축
- 국내・외 연구유니트 구성과 국제공동연구 체계화
- 미국,캐나다,노르웨이,그린란드,러시아 및 국내 산・학・연과의 협연관계 구축

(광주과기원 위탁과제)

○ 쇄빙연구선 아라온호의 (ARAON) 11,937 km 연구항해 구간을 따라 북극해와 태평양상에서 에어로졸의 다양한 물리화학적 특성 연속 측정 및 비교 분석.

○ 에어로졸 크기에 (nm) 따른 수농도 (#/cm^3) 분포 특성 (number size distribution), 흡습성 (hygroscopicity), 휘발성 (volatility), 혼합상태 (mixing state), 입자의 형태 (particle morphology) 및 원소성분 (elemental composition) 등 다양한 에어로졸 특성들을 종합적으로 분석.

○ 활발한 Oceanic biological activity에 의한 Organic compounds가 새로운 입자 생성 및 성장에 중요한 역할을 하는 것을 규명.

○ 에어로졸이 기후변화에 미치는 영향 파악.

○ 에어로졸의 발생원과 생성기작 및 이동특성 분석.

○ Air mass에 따른 에어로졸의 number size distribution 특성 변화 확인.

○ Continental/anthropogenic source 영향에 의해 에어로졸의 질량 및 BC (black carbon) 농도 증가 확인.

○ 북극해, 태평양, 그리고 동토층에서 획득한 에어로졸 물리화학적 특성 데이터 비교 분석.

○ 계절적인 기온상승, 대기정체 경향, 태양 복사 등의 요소와 NPF (new particle formation) event의 상호관계 연구.

○ 광범위 에어로졸 모니터링망 구축을 위한 기본 데이터 산출

(서울대학교 위탁과제)

○ 측정과 샘플링 방법 정립(잎 수준 관측, 군락 수준 관측)

- Transect 360m
- Transect A, B, C 결과

○ 배경 반사도

○ Near-Surface Remote Sensing

○ 위성 Remote Sensing - WorldView Ⅱ

(세부과제 2)

KOPRI 극지연구소

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	생명자원		화합물
							생명정보	생명자원	
계획	4								
실적	4								
등록·기탁번호*									

○ **알래스카 토양 및 미생물 특성 연구**

- 1m 깊이의 토양 코어 분석 결과, 유기물이 많은 토양에서는 토양 가밀도가 1.0 g cm^{-3} 이하임. 토양 pH는 산성이며, 깊이가 깊어질수록 pH 값이 높아짐. 무기태 질소(암모늄 이온) 농도는 활동층과 동토층을 경계로 값이 매우 증가함. 전체적으로 토양수분함량, 전기전도도, TC, TN 사이 서로 양의 상관관계 보임
- 토양 층위별 특성 비교 결과, 암모니아태 질소는 깊이가 깊은 A층에서 가장 높았고, 토양 pH는 Oi층에서 가장 낮고 전기전도도는 Oi층에서 매우 높음. TC와 TN 농도는 O층에서 다른 층보다 유의하게 높았음
- Pyrolysis-GC/MS를 통한 토양 유기물 특성 분석 결과, 상층 토양의 유기물은 이끼에서 유래하거나 관목식물에서 유래한 것으로 보이며, 표층의 식생피도와 상관성이 높게 나타남. 유기물의 특성은 pH, 수분함량, 탄질비와 상관관계가 보임
- 활동층과 영구동토층을 포함하는 1m 깊이의 토양 코어 미생물 분석결과 토양 층위별로 서로 다른 세균 및 고세균 군집이 분포하는 것으로 나타났으며, 활동층의 경우 pH, C/N ratio, 수분함량과 같은 다양한 토양 특성과 미생물 군집구조 간의 상관성이 검출된 반면 동토층에서는 이들 간의 관계가 적은 것으로 나타남

○ **캐나다 캠브리지 베이 기후변화 모사 실험**

- 기후변화 모사 실험은 2012년 7월초부터 시작되어 매년 식물 생육기에 운영었으며, 1, 3년 후 토양 시료 채취
- OTC 설치로 표층 대기와 토양 온도가 평균 약 0.5℃ 상승. 강수효과로 인한 토양 수분 변화는 뚜렷하지 않음
- 기후변화 모사 전 토양 유기탄소는 모니터링용 실험구와 샘플링용 실험구(0-5 cm 깊이)에서 각각 평균 20.3%와 24.8%. 토성은 사질양토이며 대부분의 측정값이 처리구와 상관없이 무작위로 분포함
- 온도 상승 1년 후 무기태 질소 중 NH4+ 이온 함량은 5~10 cm 깊이에서 증가
- 3년간의 기후변화 모사는 측정된 토양 특성에 영향을 미치지 않음
- 기후변화 모사 1년 후 강수량 증가에 의한 세균 생물량, 세균 군집 구조 변화가 검출되었으나 3년 후 결과에서는 처리구 간 미생물 특성 차이가 나타나지 않음
- 기후변화 모사 1년 후, 온도 상승과 강수량 증가가 phenol oxidase 활성을 증가시키고, 온도 상승은 식생에 건조 스트레스를 일으킴

○ **그린란드 자켄버그 지역 기후변화 모사 실험**

- 서로 다른 우점 식물 종의 존재와 토양 깊이의 차이가 세균 phylum 조성이라는 상위 레벨의 계통학적 차이를 유발할 정도의 영향을 끼침
- 온도상승과 shading 효과에 따른 처리구 간 차이가 세균 phylum 조성에 미치는 영향은 상대적으로 미미함

○ **환북극 관측거점 4개 지역 특성 비교**

- 알래스카 지역이 유기탄소 함량이 높아, 유기탄소 저장량이 가장 높게 나타났고, 스발바르 지역의 빙하 후퇴지역의 저장량이 가장 낮았음
- 알래스카 지역의 토양 pH가 가장 낮고, 캐나다 캠브리지 베이 지역의 토양 pH가 가장 높음
- Py-GC/MS 분석 결과 알래스카 지역의 유기물은 동일코어임에도 변이가 매우 크게 나타났고, 다른 3개 지역의 표층 시료들은 지역별로 묶이는 특성을 나타냄. 단 탄소농도가 낮은 시료들은 지역별로 구분되지 않음

○ **과학 대중화**

- 북극 동토 환경을 일반인들이 쉽게 이해할 수 있도록 <극지과학자가 들려주는 툰드라 이야기> 발간
- 북극 식물 108종의 사진과 특징을 소개하는 <북극 툰드라 식물> 발간
- 북극 생태계 특징과 연구 활동을 소개하는 사진전 3회 실시: 북극생태사진전 (2014. 4. 15 ~ 20, 서울메트로미술관), 북극생태사진전 (2014. 6. 10 ~ 8. 17, 국립생태원 에코리움), 북극생태사진전 (2016. 5. 1 ~ 6. 30, 센트럴파크역)

(연세대학교 위탁과제)

○ 기후변화 조작실험이 수행되고 있는 캐나다 캠브리지베이 지역에서 효소활성도를 측정한 결과 기후변화 연차와 효소의 종류에 따라 다른 반응이 나타남

○ 가수분해효소 활성도의 경우 조작실험에 의한 차이보다 토양 깊이에 따른 차이만 보였으며 표토의 유기물 층에서 높은 경향을 보임

○ 페놀산화효소의 경우 조작실험 1년차에 온도상승 하에 활성도가 증가하였다가 3년차에는 다시 차이가 없는 것으로 나타남

○ 토양의 용존유기탄소 함량 역시 조작실험보다 토양 깊이에 따른 차이를 보였으나 3년차에 약간 증가하는 경향을 보임

○ 용존유기탄소 함량과 가수분해효소 활성도 간에 양의 상관관계를 보임

○ 온도 상승 하에 식물체의 동위원소 비가 바뀌어 건조효과가 있는 것으로 보임

○ 온실기체 발생량 및 관련 미생물량은 기후변화 처리구에 따른 유의한 차이를 보이지 않음

(숭실대학교 위탁과제)

○ 캠브리지 베이 토양 샘플로부터 total lipid 추출 후 PLFA 분리 정제 방법에 대하

여 최적화 연구 수행.

○ 기존 연구와 본 연구의 PLFA 통합 라이브러리 구축. 총 25종의 PLFA를 라이브러리 매칭을 통해 미생물 군집 분석 수행.

○ 구축의 선행 연구로써, 미확인 미생물의 LPS 추출 및 Lipid A 분리 정제 후 구조 분석을 수행.

○ 미확인 1종(Pseudomonas sp. psy2), Pseudomonas Moorei, Pseudomonas chicoli 총 3종에 대한 구조 분석 및 독성 평가 실시

(세부과제 3)

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	생명자원		화합물
							생명정보	생명자원	
계획	2								
실적	4								
등록·기탁번호*									

○ **국지 지면-생권 모델링 시스템 구축**

- 관측 사이트의 자료를 수집 및 분석하고 이를 바탕으로 국지 모델 실험 구동 완료하여 계속 과제 “북극권 동토 관측 거점을 활용한 환경변화 감시와 예측” 연구에서 지역 모델링을 활용한 연구의 기반 마련
- 유라시아의 계절별 눈 덮임 변화 파악 및 겨울철 극진동과의 관련성 분석 완료: 동토층 지표면 온도 분포에 결정적으로 중요한 북극진동과 유라시아 적설 분포의 관련성 조사 완료
- 환북극 식생 녹화의 증가가 동아시아 지역 기후에 미치는 영향 파악: 수치모델링 실험을 통해 식생 녹화의 증가가 여름철 동아시아 몬순을 변화시킬 수 있음을 전망

○ **북극권 토양-식생-수문 통합 기후모델 개발**

- 탄소 순환 및 메탄 방출 모듈의 성공적인 접합 확인을 위한 모델 실험을 수행하고 이를 활용하여 지면-식생-수문이 결합된 통합모델을 극지연구소 내 시스템에 구축 완료
- 북반구 영구동토층 고위도 식생 변화의 피드백 효과를 정량적으로 규명하고 미래 환북극 툰드라의 식생의 녹화 증가가 북극 온난화를 가속화하고 북극해 해빙 융빙을 증가시킬 수 있음을 제시/논문화 완료
- 5개 이상의 위성자료 합성을 통해 유라시아 눈 덮임 분석 완료 및 동토층 융해에 중요한 기후인자 관련성 분석 완료

○ **빙권 기후변화 재현 및 미래기후 종합 모의**

- 지구시스템 모델을 활용하여 미래 기후변화 하에서 북극권 영구동토의 활동층의 변화, 정량적인 이산화탄소 및 메탄의 방출 전망: 21세기 말에 토양 속 미생물 활동의

증가로 토양 호흡량이 크게 증가하고 메탄의 방출은 습지의 생성과 관련성이 클 것으로 전망됨

- 극지 지면 특성의 변화 분석 완료
- 개발된 모델을 이용하여 북극권 식생의 변화가 열대 강수 및 지구 대순환을 변화시키며, 이것의 계절적 변동성을 제시 및 논문화 완료

(세부과제 4)

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	생명자원		화합물
							생명정보	생명자원	
계획	3								
실적	4								
등록·기탁번호*									

○ 알래스카 동토의 토양 탄소/질소 역학 및 토양 특성 연구

- 유기물층이 발달해 있고 지형의 열적 변화가 나타나고 있는 알래스카 카운실 거점은 영구동토층의 탄소 역학과 물리적 특성을 이해하는데 적합한 연구지임.
- 알래스카 카운실의 동토는 Histic Cryosols로 분류되고, 2 m 깊이 내에서 O층(유기물층)과 A층(무기물층)이 주를 이루고 있으며 유기물층의 두께가 매우 불균질한 층위분포를 보임.
- 유입된 질소는 높은 회수율을 보였고 대부분 암모니아태 질소로 잔존하였으며, 질소는 토양탄소의 양보다 질에 영향을 미치는 것으로 확인
- 일반 영구동토지역과 융해 영구동토지역의 유기물 분해 정도 차이는 물리특성에 영향을 미쳤고, 층위의 불균질성이 연구지점별 물리특성의 상이성에 영향을 미침.
- 동결-융해 환경에서 온도가 높아질수록 이산화탄소 플럭스가 증가하였으며, 특히 유기물층은 다른 토층에 비해 더 민감하게 반응함.

○ 동토층 식생 공간 분포와 지형·토양 환경 요인 분석

- 북극담자리꽃나무(DO)는 상대고도가 낮고 수분함량이 낮은 지점에서 발견 되었고, 북극콩버들(SP)은 수분함량이 많은 토양에서 발견됨.
- 토양 pH 값에 의해서도 식물종의 분포가 유의미하게 나누어짐. 자주범의귀(SO), 북극점나도나물(CA)는 pH가 높은 지점에서 발견되고 씨범꼬리(BV), 북극이끼장구채(SA)는 pH가 낮은 지점에서 발견됨.
- 토양에서 탄소의 함량이 높은 지역에서 종 다양도가 높았음. Na^+ 함량과 종 다양도는 음의 상관성을 가지고 있어 해풍의 영향을 받는 지역은 종 다양도가 낮아지는 것으로 예측됨.

○ **보육식물 (nurse plant)이 북극 생태계에 미치는 영향 분석**

- 북극의 보육식물은 토양의 온도 변화량과 수분 변화량을 감소시켜 안정된 토양환경을 만들어 줌. 또한 토양의 유기물 함량을 증가시켜줌.
- 특히 nurse effect를 가장 잘 나타내는 종은 북극종꽃나무인데, 이는 매트 두께가 두껍고 면적이 넓어서 토양 수분 증발을 효과적으로 막고, 온도 변화에 대해서도 완충 작용이 탁월함.

○ **북극다람쥐꼬리에 대한 생태 연구**

- 니알레슨의 북극다람쥐꼬리 서식처 두 곳의 토양 환경의 차이는 유의하지 않음.
- 북극다람쥐꼬리의 번식 방법은 무성아에 의한 영양번식과 포자에 의한 유성번식 두 가지인데, 북극다람쥐꼬리의 무성아는 저온 (8℃)에서 더 잘 자라고 고온 (13℃)에서는 생육이 제한됨.

○ **스발바르 현화식물의 번식 체제 연구**

- 스발바르 식물과 수분매개 곤충의 계통적 다양성은 매우 낮음.
- 매개곤충으로 작은 파리류가 우점하였으나, 이들의 수분매개 활동은 극히 미약하였음.
- 그러나 유성번식과 무성번식의 겸비, 충매와 풍매의 겸비, 다년생 초본의 생활사 등을 통한 많은 식물의 bet-hedging 전략이 스발바르 식물의 유전적 다양성에 기여해 온 것으로 사료됨.
- 기후변화에 처해 있는 스발바르 식물종의 1/3이 위기종이므로 생물다양성이 낮은 스발바르에서 식물과 매개곤충 간의 네트워크에 대한 이해는 매우 시급한 연구과제임.

○ **북극 동토층 주요 우점 식물종의 대사체 변화 분석 및 먹이관계 분석**

- 스발바르 순록 (*Rangifer tarandus platyrhynchus*)의 섭식에 따른 먹이 식물의 대사체 변화 연구
  : 스발바르 순록 먹이원으로 추정되는 관속식물 (32종), 선태류(2종), 버섯 및 지의류 (30종)에 대한 DNA 절편 길이 데이터베이스를 구축함
  : 스발바르 순록 배설물에 대한 DNA 분석을 통해 먹이원으로 북극콩버들 (*Salix polaris*), 자주범의귀 (*Saxifraga oppositifolia*) 등이 검출됨.
  : 펜스 안과 밖에 생육하는 북극 콩버들의 대사체 프로파일은 지역에 대한 차이가 크게 나타남.
  : 펜스실험, 인위섭식 실험을 통해 섭식에 의해 먹이 식물의 대사물질 중, epicatechin, chlorogenic acid 등의 물질이 영향 받는 것으로 나타남.
- 다산기지 주변 연못생태계의 먹이 관계 분석
  : 스발바르 순록 및 흰뺨기러기 (*Branta leucopsis*) 등 육상생물은 연못 생태계 먹이그물에 직, 간접적으로 영향을 줄 것으로 추정.

○ **북극 동토층 토양 생물 군집의 변화에 따른 주요 우점 식물종의 대사체 변화 이해**

- 기후변화 모사 챔버를 이용한 기후변화에 따른 북극권 식물의 대사체 변화 및 근권 미생물 군집 변화 연구

: 온도 증가 실험구의 민담자리 꽃나무 (*Dryas integrifolia*) 잎의 sucrose 함량이 다른 실험구에 비해 높은 것으로 나타남.

: 실험구 간에 민담자리 꽃나무 근권의 박테리아 군집의 차이를 나타내고 그 중, 온도 증가 실험구에서 *Pseudonacardia* 속의 비율이 상대적으로 높게 나타남.

- 빙하 퇴각에 따른 북극권 식물의 대사체 변화 및 근권 미생물 군집 변화 연구

: 빙하퇴각지에 생육하는 우점식물 (북극콩버들과 자주범의귀)의 대사체 프로파일과 근권 박테리아 군집은 빙하퇴각시기보다 식물 종간의 차이가 더 크게 나타남.

KOPRI
극지연구소

Ⅴ. 연구개발성과의 활용계획

○ 북극권 연안을 대상으로 한 북극권 기후연구 측정시스템 확보를 통한 활동영역 확대 및 관련 연구 분야(대기질, 동토층, 생물종다양성 연구, 전송기술 등) 확대
- Ny-Ålesund에서 자동실시간 연속 이산화탄소, 메탄 연속 관측장비를 구축함으로서 Zeppelin GAW 관측소와 비교관측 연구 수행의 능력 향상
- Ny-Ålesund에서 최초로 실시간 메탄플럭스 관측과 연구를 위한 한-이태리간 협력 체제 구축

○ 동토층의 융해로 인한 지중, 지표, 대기층의 교란 및 인간에게 미칠 수 있는 영향평가 자료 확보와 대응책 마련 정책 제시

○ 대기-동토-해양-모델링의 융합연구를 통하여 북극권 기후변화 관련연구에 대해 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, EU 그룹 등과 대등한 위치 또는 수월성 연구분야 역량 확보 및 북극활동의 위상 제고

○ 극지형 원격 환경변화 관측 시스템 IT 기술 및 장비 개발의 독자 기술 확보

○ 본 과제에서 생산된 환경, 토양, 생물 데이터는 KPDC(Korea Polar Data Center)에 기탁되어 데이터베이스화 되어 있으므로, 관심있는 연구자들에게 극지역 정보, 생물 또는 토양에 관한 정보를 제공하고 향후 공동연구 추진 가능

○ 연구지역 동토 특성과 미생물 정보를 활용하여, 기후변화 예측 모델에 근간이 되는 과학적 자료 제공

○ 본 과제를 통해 발간한 도서 <극지과학자가 들려주는 툰드라 이야기>와 <북극 툰드라 식물>을 활용하여 북극 동토층 연구 홍보 및 대국민 관심 유도

○ 본 연구과제에서 획득한 토양시료를 미국 Argonne National Laboratory와 연계하여, 북극권 토양 유기물 특성 분석에 활용할 예정

○ 북극이사회 <북극 모니터링 및 평가 프로그램, AMAP> 전문가 보고서에 데이터를 제공하는 등 국제기구 연구 성과로 기여

○ 향후 북극 전 해역 탐사 추진에 필요한 중·장기 국제공동연구시스템 구축에 활용자료 확보

○ 북극 기후변화 원인 규명 및 모델 개발을 통한 미래 온난화 하에서 전구 기후 예측에 활용

○ 한반도 및 동아시아의 중장기 기후 예측에서 극지의 역할 자료 제시에 활용

○ 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의/예측할 수 있는 통합 모형 개발을 통해 북극권의 기후 변화 뿐 아니라 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용

○ 지구시스템 모델링을 통해 극지 빙권 기후 시뮬레이션과 실측 환북극 영구동토층 관측 자료의 비교/검증을 통해 현재 빙권 기후변화 이해 수준을 정확히 진단하고, 정확한 미래 예측을 위해 어떠한 영구동토층 관측자료 획득에 집중해야 하는지에 대한 진단정보 제공

○ 극지 지역의 독특한 생태계 특성을 이해함으로서 지속가능한 극지생태계 보전을 위한 기초 지식 제공
○ 영구 동토층 온도 증가에 따른 미생물 활성 변화 및 온실 기체 발생에 관한 연구 결과는 향후 북극권 생태계를 예측하는데 중요한 기초 자료로 활용
○ 새로운 학문영역의 석박사 인력을 배출함으로서 극지 관련 연구를 수행할 전문 인력 양성에 기여
○ 북극 지역의 독특한 생태계 특성을 이해함으로써 지속가능한 극지 생태계 보전을 위한 기초 지식 제공
○ 극한 동토층에서 형성된 토양의 동결 융해 연구를 통해 탄소순환 기작을 이해하고 기후변화 모델에 기초자료 제공
○ 북극 식물다양성의 진화적 양상을 확인하기 위하여 스발바르 식물상의 계통과 생태적 특성에 대한 DB를 구축함. 기후변화와 서식지 파괴, 남벌 등 인간활동에 특히 취약한 자웅이주 식물의 보전에 기여할 수 있음.
○ 극지에서의 매개곤충과 식물의 공생관계에 대한 이해는 차후 우리나라 곤충상 보전에도 기여할 것임.

KOPRI
극지연구소

S U M M A R Y

I. Title

Establishment of Circum Arctic Permafrost Environment Change Monitoring Network and Future Prediction Techniques (CAPEC Project)

II. Objectives and Significance of the Study

○ Objectives of the study :

Arctic climate change is accelerating in this century and the demand for the accurate prediction of future climate change for Arctic region is increasing. However, current state-of-art climate models show the worst performance especially over Arctic region. To represent current Arctic warming more precisely and to conduct reliable future prediction, climate modelling studies based on construction of circum-polar observing network and understanding the physical processes in the Arctic permafrost are needed.

Many scientists predict that global warming lead to melting of the permafrost soil and structural and functional changes of ecosystem in the Arctic and Antarctic. But we don't have many result in this field. The purpose of this study is to construct the basic information to expect ecological changes - soil structure, decomposition of organic matters, microbe, vascular plants, habitats, and more - from melting permafrost soil layers. Future ecosystem change over Arctic permafrost is estimated and comprehensive future scenarios is provided based on combined Atmosphere-Ocean-Land-Ecosystem model. By this, we provide basic scientific inputs to help governments climate change policy.

So, In this study, there are some objectives as followings;

- Establishments of the Arctic environment change monitoring nodes and the state-of-the-art observation techniques for harsh environments of permafrost
- Assessments, numerical simulation and projection of the environmental change in the context of the rapid changes in the Arctic regions and their impacts on the mid-low latitude areas
- Determination of physical-chemical-biological properties in Arctic soil
- Understanding functions of soil microorganisms and plants which are the main

contributors for the emission of greenhouse gases
- Constructing the effective research infrastructure for studies about the Arctic ecosystems
- Development methods for predicting ecosystem change induced global climate changes
- Investigation on the physicochemical characteristics and soil carbon dynamics in the Arctic permafrost soils in response to recent climate change
- Analysis of arctic tundra vegetation distribution pattern
- Determination of important environmental factors on vegetation distribution and providing information about vegetation changes due to climate change
- Through plant metabolomics approach, elucidation of chemical interactions between dominant plant species and soil microbial communities in Svalbard, Norway

○ Significance of the study :

- Acceleration of global warming due to emission of carbon dioxide from fossil fuel consumption, land use change, etc.
- Greater magnitude and variation of climate change such as temperature increases and precipitation pattern in Arctic than further south
- Feedback effects of carbon dioxide and methane from decomposition of old soil organic matter in permafrost by enhanced microbial activity
- Not many studies in Arctic regions due to limited accessibility and lack of infrastructure
- Difficulties in prediction of ecosystem responses to climate change in Arctic regions

Ⅲ. Contents and Scope of the Study

(Sub-Title - 1)

○ Contents :

- **Development of the in-situ/cyber-infrastructure: (i) circum-arctic environment change monitoring nodes, (ii) state-of-the-art environment change monitoring and analysis techniques**
  : Establishment the Circum-arctic monitoring nodes: (i) Alaska, USA (ii) Cambridge Bay, Canada, (iii) Greenland, (iv) Greenland, and (v) Russia
  : Participate in the international arctic research programs (long term

atmosphere-permafrost-soil monitoring)

: Development and applying the integrated atmosphere-geosphere-biosphere monitoring system, 3D unmanned remote precision Ubiquitous Sensor Network (USN) and GPS monitoring

: Designing and running the '*Arctic Environment Research Unit*' frameworks to support sustainable research program in the targeting areas

○ Scope :

- Understanding the correlation between carbon dioxide (CO_2) fluxes with soil characteristics and predict the responses of soil properties to soil warming

: Analysing the physico-dynamical characteristics (soil temperature, surface energy balance, etc) of the permafrost using laser, optical technique, and remote/in-situ measurements

: Estimation the contribution of microbial respiration and plant photosynthesis and respiration to the CO_2 production from soil

: Understanding geophysical and mechanical behavior of frozen ground correlated with environmental change

- Soil organic carbon and microbial community structure in permafrost

: Properties of soil organic carbon and microbial community structure in Alaska permafrost

: Properties of soil organic carbon and microbial community structure in Korea Arctic Research Station, DASAN and Alaska

: Microbial community structure in Cambridge Bay, Canada and Zackenberg, Greenland

- Physical properties in permafrost

: Monitoring by resistivity survey on soil resistivity variation due to temperature changes

: Correlation between soil resistivity and moisture content

(Sub-Title - 1 - GIST)

Aerosols' number size distribution, hygroscopicity, volatility, mixing state, morphological property, elemental composition, etc. were extensively investigated on board the ARAON ice breaker ship over the Arctic Ocean, the Pacific Ocean and East sea (9/7/2013-10/13/2013). In addition, the measurements of number size distribution, morphology and elemental composition of aerosols were made at the Gruvebadet station that is located near Dasan Korean Arctic station (4/1/2015-8/31/2015). Aerosol measurement data obtained from the Arctic ocean

and Permafrost were compared. Research on climate change was conducted using hygroscopicity data measured in this study. The sources, formation mechanism, transport pathway of aerosols were examined. Based on the data, aerosol properties emitted from natural and anthropogenic sources were classified and then characterized. Basic data for construction of extensive aerosol monitoring network were produced.

(Sub-Title - 1 - SNU)

- Characterize leaf character of species in-situ measurements
  : Photosynthetic parameters (Vcmax, Jmax)
  : Leaf Carbon and Nitrogen ratio
  : Nitrogen per leaf area
  : Spectral reflectance, transmittance and absorbance
- Quantifying Canopy structure and function in-situ
  : Leaf Area Index (LAI)
  : Canopy Clumping Index
  : Spectral Reflectance
  : Fraction of absorbed PAR (Photosynthetically Active Radiation) in canopy

(Sub-Title - 2)

○ Contents :

- Understanding physical properties of permafrost soil, one of the most important parameters to predict the climate change in the Arctic by using geophysical survey
  : Determination of the vulnerability of soil organic carbon (SOC) in permafrost
  : Spatial distribution of SOC and soil microorganisms in permafrost regions
- Understanding the relationships between carbon dioxide fluxes and plants and microorganisms
  : Analysis of the effects of increased temperature and precipitation on soil properties and the community structure of microorganisms

○ Scope :

: Operation of climate manipulation plots and acquirement of environmental parameters and soils under climate change
: Soils of the active and permafrost layers through permafrost coring
: Analysis of soil properties and microbes in permafrost regions

KOPRI 극지연구소

(Sub-Title - 2 - YSU)

○ As a response of organic decomposition to climate change, extra-cellular enzyme activities were observed under climate change manipulation.

○ Activity of enzymes that is related to organic decomposition including hydrolases and phenol oxidase was measured in Cambridge Bay under climate change experiment.

(Sub-Title - 2 - SSU)

○ Application of lipid extraction method from soil

- Optimization of lipid extraction method from soli
- Analysis of soil lipids for searching lipid marker molecules

○ Development of PLFA library from soil

- Establishment of qualitative and quantitative analysis of PLFA from soil
- PLFA library fatty build and expand through microbial group-specific classification
- Several PLFA marker analysis for microbial community analysis in soil samples

○ Acquisition and analysis of soil samples from Cambridge Bay

- Collection of soil samples to analyze PLFA
- Analysis of PLFA and characterization of the isolated microorganisms

○ Analysis of total lipids in soil microbial from Cambridge Bay

- Perform a full analysis of metabolites in a variety of microorganisms to know the cold response mechanisms and carbon storage in the form of soil microbial Cambridge Bay
- Development of fatty acid metabolite library from soil microorganism

(Sub-Title - 3)

○ Contents :

- Numerical Simulation of Abrupt Environmental Change of Arctic Permafrost

: Regional land surface-biosphere modeling

: Prediction of changes in vegetation and carbon cycle over permafrost under global warming

: Impacts of the changes in Eurasian snow cover and vegetation in the Arctic permafrost region on East Asian climate

: Validation and coupling of carbon cycle and methane emission modules

: Investigation of impacts of Eurasian snow cover on permafrost thawing

○ Scope :

: Atmosphere-ocean-vegetation climate system model development and the production

of climate change scenario including the permafrost environment features

: Investigation of the changes in Eurasian snow cover in recent decades

(Sub-Title - 4)

○ Contents :

- Research on characteristics of the Arctic permafrost ecosystem

: Analysis of plants composition and their relations with diverse environmental factors in arctic permafrost area using geostatistics and data mining

: Nursing effect on the Artic ecosystem

: Reproductive ecology of flowering plants in Svalbard

- Elucidating metabolite changes of dominant plant species and understand food web

: Changes of plant metabolic profiles in primary succession stages: In Svalbard, investigation on metabolic profiles of early successional stage plants with soil microbial communities in different successional stages.

- Chemical interactions between dominant plant species and soil microbial communities in arctic permafrost

: Changes of plant metabolic profiles in primary succession stages: In Svalbard, investigation on metabolic profiles of early successional stage plants with soil microbial communities in different successional stages

: Investigation into forage plants of Svalbard reindeer using DNA analysis on fecal samples and effects of grazing activities on plant metabolites

- Characteristics of microbe and carbon cycle in the Arctic

: Establishment the foundation about microbial study, Methodology and investigation about characteristics of microbial community

: Characters of living organism concerned with the carbon cycle of the Arctic permafrost soil

Ⅳ. Results

(Sub-Title - 1)

○ Establishments of four circum-arctic monitoring nodes

- The first node: Counsil, Alaska, USA (64 ° N, 165 ° W)
- The second node: Cambridge Bay, Canada (69 ° N, 105 ° W)
- The third node: Zackenberg, Greenland (Nord, 81 ° 36’ N, 16 ° 40W)
- The fourth node: Svalvard, Norway (78.91° N, 11.89° E)

○ Svalbard, Norway

- From the Norway arctic site, Cloud Condensation Cuclei (CCN) concentration data collected during the period 2007～2013 at the Zeppelin observatory, Norway (78.91° N, 11.89° E, 474 msl), Svalbard, are analyzed.
- In addition, The Dimethylsulfide (DMS) from the same site during the phytoplankton growth periods in 2010, 2014, and 2015 were analysed, and found regionally and temporally varying relationships between the airborne DMS and the strength of the DMS source in the ocean surrounding the observation site

○ Nord, Greenland

- Eddy covariance measurements of carbon exchange and energy over permafrost at Station Nord, a High Arctic region has been made since early 2016.
- The flux data will be used to evaluate how the Arctic warming influence the exchange process between the atmosphere and permafrost, which has shallow active layer based on long term measurements.

○ Development of technology for long-term monitoring on changes

- Application of cyber-infrastructure technolgy based on Ubiquitous Sensor Network (USN)
- Development of integrated atmosphere-geosphere-biosphere monitoring system
- 3D unmanned remote precision, remote data retrieval and its analysis based on the USN
- Remote and realtime monitoring of large area permafrost environment based on ICT/USN

○ Designing and running the 'Arctic Environment Research Unit' frameworks to support sustainable research program in the targeting areas

- Collaborative research with Norway, Germany and Italy based on Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System
- Establishment of domestic research unit
- Collaboration for the analysis of data with University of Alaska, Fairbanks at the first node and CNR, Italy at Ny-Alesund

(Sub-Title - 1 - GIST)

○ Ship-borne measurements (ARAON ice breaker ship) of ambient aerosols were conducted during an 11,937 km cruise over the Arctic Ocean (cruise 1) and the Pacific Ocean (cruise 2).

○ A frequent nucleation event was observed during cruise 1 under marine

influence. The number size distribution varied according to air mass. Concentrations of particle mass and black carbon increased with increasing continental influence from polluted areas.

○ we concluded that biological organic compound can play an important role in the formation of new particles and their growth to a detectable size.

○ The fraction of submicrometer particles having an external mixing state was small. Most of them were internally mixed. On the basis of elemental composition and morphology, the submicrometer particles were classified into C-rich mixture, S-rich mixture, C/S-rich mixture, Na-rich mixture, C/P-rich mixture, and mineral-rich mixture.

○ Number size distribution of aerosols was measured at the Gruvebadet station and new particle formation event was observed. Data suggest that Several factors such as increased emissions of particle formation precursor due to temperature rise, air stagnation, solar radiation can affect new particle formation event.

(Sub-Title - 1 - SNU)

○ Observation and Sampling Method(Leaf-level Observations, Canopy-level Observation)
- Transect 360m
- Transect A, B, C

○ Background Reflectance

○ Near-Surface Remote Sensing

○ Satellite Remote Sensing - WorldView Ⅱ

(Sub-Title - 2)

○ Council, Alaska
- Low soil bulk density (less than 1.0 g cm^{-3}) in organic layers, acidic soil, sharp increases in NH4+ in a boundary of the active and permafrost layers, and positive correlations among soil moisture content, electrical conductivity, and TC and TN contents
- The highest concentration of NH4+ in A horizon, lowest soil pH in Oi layer, highest value of soil electrical conductivity in Oi layer, and highest TC and TN contents in O horizon
- Characterization of organic matter in the surface soil: derived from shrubs and moss, related to the surface vegetation cover, high correlation between organic matter characteristics and environmental parameters such as pH, soil moisture content, and C/N ratio

KOPRI 극지연구소

- Distinct depth profiles of bacterial and archaeal communities along the soil layers. Significant correlation between soil edaphic variables (e.g., pH, C/N ratio, moisture content, etc.) and microbial community structure in active layer but not in permafrost layer

○ Cambridge Bay, Canada

- Initiation of climate manipulation in early July, 2012, operation during plant growing seasons, two times of soil sampling after 1 and 3 years of manipulation
- About 0.5℃ increases of mean air and soil temperature due to Open Top Chambers. No distinct effects of increased precipitation on soil moisture content
- Soil properties before the climate manipulation: average SOC contents for 0∼5 cm depth in monitoring and destructive plots were 20.3% and 24.8%. Sandy loam. Fairly even distribution of measured parameter regardless of treatments
- Increased concentration of NH4+ for 5∼10 cm depth with increased temperature
- No significant differences in measured soil properties among treatments after 3 years of climate manipulation
- Shifts in bacterial biomass and community structure due to precipitation increase upon first year climate manipulation but no discernable alternation in microbial characteristics between treatments at third year experiment
- Increased phenol oxidase activity with warming and increased precipitation and induced drought stress in vegetation due to warming at the first year of climate manipulation

○ Zackenberg, Greenland

- No effect of warming and shading on bacterial biomass and community structure

○ Comparisions of four research sites established in CAPEC projects

- The highest SOC stock in Alaska and the lowest in the glacier foreland in Svalbard
- The lowest soil pH in Alaska and the highest soil pH in Cambridge Bay, Canada
- Great variation of SOM characteristics in Alaska, clustering of surface soils among regions, but no distinctions among regions for soils with low SOC contents

○ Outreach Activities

- Publish a public book <A Story Telling by Polar Scientist - Tundra> for better

understanding of the Arctic tundra

- Publish a public book <Arctic Tundra Plants> displaying 108 species of Arctic plants with many photo and simple description in English as well as Korean
- Photo Exhibitions on Arctic Tundra to introduce environmental characteristics, research activities, animal and plant living in Arctic ecosystem

(Sub-Title - 2 - YSU)

○ Response of extra-cellular enzyme activities to climate change experiment depended on time period and enzyme type

○ Hydrolases activity did not show differences among treatments, however, was higher at organic layer than mineral layer

○ Phenol oxidase activity was higher under warming after 1 year of experiment, however, did not show differences after 3 years of experiment

○ Dissolved organic carbon content was higher at organic layer than mineral layer

○ Dissolved organic carbon content and hydrolases activity showed positive correlation

○ Differences in carbon isotope ratio of plant body suggested drought effect by warming

○ Greenhouse gases and related microbial abundance did not show significant differences among treatments

KOPRI 극지연구소

(Sub-Title - 2 - SSU)

○ Cambridge soil microbial research platform has been utilized in a variety of soil microbial research to maximize the impact of industrial expansion and soil microbial research. The observation of changes in soil organic matter identify the factors influencing the growth of soil microbes and soil plants be a good material is the basis for predicting the effects of climate change being considered to have a significant impact on natural food resources and tourism-related industries.

(Sub-Title - 3)

○ Local land surface biosphere modeling system development

- Development of the regional land surface-biosphere modeling system using the polar WRF
- Investigation of the changes in Eurasian snow cover and relation with the Arctic Oscillation
- Impacts of the Arctic greening on the subtropics climate

○ Atmosphere-ocean-vegetaion climate system model development including the permafrost environment features

- Establishment of the earth system model to the KOPRI
- Validation and coupling of carbon cycle and methane emission modules
- Investigation of intensified Arctic warming under greenhouse warming by vegetation-atmosphere-sea ice interaction and publishing as a SCI
- Analyzing Eurasian snow cover using the satellite data composites

○ Production of climate change scenarios including the permafrost environment features

- Projection of the active layer thickness, carbon dioxide and methane emissions over the permafrost regions: increases in the active layer thickness, carbon dioxide and methan emission from the permafrost
- Analysis of the Arctic permafrost surface characteristics
- Investigation of seasonal dependence of the effect of Arctic greening on tropical precipitation and publishing as a SCI

(Sub-Title - 4)

○ Study on soil carbon and nitrogen dynamics and physical properties of permafrost soils in Council, Alaska

- The soil in Council, Alaska was classified as Histic Cryosols and its profile was composed of O (organic) and A (mineral) horizon within 2 m depth
- The recovery of nitrogen input in the retrieval soil core during 2 years was high and almost all of remaining nitrogen was formed by ammonium. Additional nitrogen affected on the soil carbon quality rather than its quantity
- In normal permafrost and thermal erosion permafrost region, it was different in the decomposition rate of organic layer which could cause the difference of physical properties
- The flux of Carbon dioxide under repeated freeze-thaw cycles increased with increasing temperature and its flux in organic layer was more sensitive than other soil layer

○ Determination of important environmental factors on vegetation distribution in the Arctic ecosystem

- *Dryas octopetala* (북극담자리꽃나무) was established in the low elevation and soil moisture contents sites. *Salix polaris* (북극콩버들) was found in the high soil moisture contents sites
- Soil pH is a key environmental factor. *Saxifraga oppositifolia* (자주범의귀), *Cerastium arcticum* (북극점나도나물) were found in the high pH sites. *Bistorta vivipara* (씨범꼬리) and *Silene acaulis* (북극이끼장구채) were found in

the low pH sites

- Plant diversity was high in the high C contents sites. Plant diversity was negatively correlated with sodium contents originated from sea breeze

○ Nursing effects on Arctic flora in Svalbard

- The nursing effects of Arctic plants are reducing temperature and soil moisture fluctuation and increasing soil nutrient
- We can find out nurse effect especially in *Cassiope tetragona*, due to their thick and dense layer and wide mat area

○ Bulbils reproduction study of *Huperzia arctica*

- There were no significant differences in soil characteristics of two study sites, Ny-Ålesund
- *Huperzia arctica* has main vegetative reproduction by bulbils.
- *Huperzia arctica* was established in the low temperature (8℃) and interrupted in the high temperature chamber (13℃).

○ Reproductive ecology of flowering plants in Svalbard

- Taxonomic diversities of the flora and insect fauna in Svalbard were very low.
- Small flies were dominant pollination vectors, but their activity level was also weak.
- However, bet-hedging strategies of plants such as either sexual or asexual reproduction, wind or insect pollination, and growth habit as perennial herbs may have contributed to the genetic diversity of flowering plants in Svalbard.
- About one third of Svalbard plants are redlisted. Understanding of networks between plants and insect pollinators is critical for the biodiversity conservation in Svalbard especially under climate change.

○ Analysis of plant metabolites from dominant species and trophic relations in arctic permafrost regions

- Effects of grazing activities of Svalbard reindeer (*Rangifer tarandus platyrhynchus*) on metabolites of forage plants.

: We developed a database of DNA fragment length information for preys of Svalbard reindeer such as vascular plants (32 species), a bryophyte (2 species), mushroom and lichen (30 species).

: Forage plants such as polar willow (*Salix polaris*) and purple saxifrage (*Saxifraga oppositifolia*) were detected from fecal samples of Svalbard reindeer using DNA analysis.

: Metabolite profiles of *S. polaris* were more distinguished among locations of

KOPRI 극지연구소

fences than between inside and outside of fences where samples were collected.

: Contents of epicatechin and chlorogenic acid appeared to be altered by grazing activities through fences and wounding experiments.

- Study of trophic relations in temporary ponds neat the Dasan station in Svalbard

: Svalbard reindeer and barnacle goose (*Branta leucopsis*) appeared to influence on food webs in aquatic ecosystems, directly and indirectly.

○ **Elucidation of alternation of plant metabolites on dominant species related with soil microbial communities in arctic permafrost regions**

- Changes of plant metabolic profiles by climate change: In the Cambridge Bay area, monitor metabolic profile changes of *Dryas integrifolia* with soil microbial communities in climate change simulating chambers

: Contents of sucrose in leaves of *D. integrifolia* in warming treatments were higher than other treatments and a control.

: Proportions of genus *Pseudonacardia* in rhizosphere in warming treatments were higher than non-warming plots.

- Investigations on metabolic profiles of dominant plants with soil microbial communities in glacier retreat area, Svalbard

: Plant metabolic profiles and bacterial communities in rhizosphere were more differed between plant species than among the collection sites which reflect chronosequence after glacier retreat

Ⅴ. Future Application of the Study

○ Understanding how high-latitude ecosystem changes under the global warming and how Arctic permafrost responds

○ Contribution to the participation in the international arctic research network via developing the Circum-Arctic monitoring nodes

○ Development of the logics and rationals to policy makers in the context of the permafrost change and its impacts on the human life

○ Further contribution to the climate impact assesment in the mid-latitude including the Korean peninsula through understanding the permafrost environment change and prediction

○ Contribution to construct national climate change policy for governments by presenting the distinguishable future climate change scenario

○ Providing basic knowledge for understanding of the polar ecosystem and

possible conservation method

○ Synthetic research base construction with existing infrastructure

○ Contribution to professional manpower training by producing masters and doctors of new academic field, the polar science

○ Sharing data acquired from this project through KPDC (Korea Polar Data Center)

○ Providing the basic scientific data of permafrost soil and microbes which can be used for climate modeling

○ Public sharing of the research activities and outstanding results in Arctic permafrost regions using books which were published on the basis this project

○ Use of soil samples to analyze Arctic SOC properties with Argonne National Laboratory in the USA

○ Contribution to Arctic council <Arctic Monitoring and Assessment Program, AMAP> by providing our research activities in the Arctic regions

○ Climate impact assesment in the mid-latitude including the Korean peninsula through by understanding the permafrost environment change and prediction

○ Production of accurate future climate change scenario using the information of polar environment features to apply for future climate change adaptation policy

○ Providing basic data through the understanding of changes in carbon and nitrogen in the permafrost affected soil in response to repeated freezing and thawing cycle

○ Understanding of the polar ecosystem and possible conservation method

○ Through study on the chemical interactions between polar plants and soil organisms, it may be possible to predict food web changes based on arctic plants mediated by soil community changes due to climate change

KOPRI 극지연구소

C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction to research development ····· 47

Chapter 2. Reviews on current technologies ····· 63

1. Domestic technological development ····· 65
2. International technological development ····· 66

Chapter 3. Methods and results ····· 73

Section 1. Establishment of multidisciplinary environmental change observation network and its technical development in the Arctic permafrost region ····· 117

Section 2. Understanding environmental changes in the Arctic permafrost region ····· 337

Section 3. Numerical simulation of abrupt environmental change of the Arctic permafrost region ····· 493

Section 4. Study on the ecological characteristics of the Arctic permafrost region ····· 538

Chapter 4. Research achievements and contribution to other fields ····· 629

Section 1. Establishment of multidisciplinary environmental change observation network and its technical development in the Arctic permafrost region ····· 631

Section 2. Understanding environmental changes in the Arctic permafrost region ····· 639

Section 3. Numerical simulation of abrupt environmental change of the Arctic permafrost region ····· 646

Section 4. Study on the ecological characteristics of the Arctic permafrost region ····· 648

KOPRI 극지연구소

Chapter 5. Application plan for research products ····· 653

Section 1. Establishment of multidisciplinary environmental change observation network and its technical development in the Arctic permafrost region ····· 655

Section 2. Understanding environmental changes in the Arctic permafrost region ····· 658

Section 3. Numerical simulation of abrupt environmental change of the Arctic permafrost region ····· 660

Section 4. Study on the ecological characteristics of the Arctic permafrost region ····· 661

Chapter 6. Foreign scientific informations achieved by research development ····· 663

Chapter 7. Research facilities and equipments ····· 679

Chapter 8. References ····· 689

KOPRI
극지연구소

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 47

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 63

1. 국내현황 ····· 65
2. 국외현황 ····· 66

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 73

1. 과제 수행 내용 및 결과 개요(총괄) ····· 75
2. 과제 수행 세부결과 ····· 78

제 1 절 북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발 117
제 2 절 북극권 동토층의 환경변화 특성 규명 ····· 337
제 3 절 급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현 ····· 493
제 4 절 북극권 동토층 생태계 특성 규명 ····· 538

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 629

제 1 절 북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발 631
제 2 절 북극권 동토층의 환경변화 특성 규명 ····· 639
제 3 절 급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현 ····· 646
제 4 절 북극권 동토층 생태계 특성 규명 ····· 648

제 5 장 연구개발성과의 활용계획 ····· 653

제 1 절 북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발 655
제 2 절 북극권 동토층의 환경변화 특성 규명 ····· 658
제 3 절 급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현 ····· 660
제 4 절 북극권 동토층 생태계 특성 규명 ····· 661

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 663

제 7 장 연구시설 · 장비 현황 ····· 679

KOPRI 극지연구소

제 8 장 참고문헌 ····· 689
연구개발결과 활용계획서(총괄) ····· 705
세부과제별 연구개발결과 활용계획서/자체평가 의견서/성과소개서 721

KOPRI
극지연구소

제 1 장
연구개발과제의 개요

KOPRI
극지연구소

KOPRI
극지연구소

총괄 개요

(북극권의 급격한 환경변화에 대한 동토층 지역 관측 거점 확보와 ICT 융·복합 관측기술 개발·적용을 통해 예측 기초연구의 선제적 착수 필요 (북극권 국가 빅데이터 확보와 진출 기득권 확보))

□ 북극권의 급속한 기후환경변화로 인한 **과학적, 정치·경제적, 외교적 변화 등 글로벌 이슈 대두** (Fig. 1)

○ 북극권 기온은 최근 30년간 지구 평균의 2배 이상 상승으로 **온난화 가속,** 해빙(海氷)면적의 감소(지난 40년간 약 40% 감소)로 북극권 환경변화 초래

○ 20세기 초에 비해 북극권 기온이 최근 3℃ 이상 급격히 상승

□ 북극권 연안국은 물론 비연안국 참여, 북극권의 온난화, 해빙(海氷) 면적 감소 및 동토층의 융해(融解) 현상에 대한 **국제공동연구를 통한 폭넓은 정밀 모니터링과 미래 예측 프로그램 확대 추진 중**

○ 북극권 5개 연안국(미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드, 러시아 등)을 비롯한 주변 **육상 동토층 지역에서의 국제공동연구 가속화**

○ 기후변화에 가장 민감한 스발바르 피오르드 지형 및 환경변화연구 추진을 위한 EU 중심 컨소시엄 구성 추진

□ **북극이사회('** 96년 창설된 북극이사회는 국가간 협의체)를 중심으로 **영향력 강화 추세** (연안국이 영해 및 EEZ에 주권적 권리 행사)

□ 최근 북극은 지구 이상기후에 따른 **자연환경적인 변화의 척도**이자 에너지와 자원·식량문제 해결을 위한 **개발 가능성 고조**

※ 북극과 같은 미개척 영역에서의 과학·공학 시장의 선점 측면에서의 **정밀 기후환경변화 진단과 예측, 미래 에너지 자원 개발 및 첨단원천기술의 확보와 실용화 등 국가차원의 연구개발 및 원천기술 확보**

※ **글로벌 이슈에 대응과 국제사회 동참** 및 우리나라의 **국익 확보와 과학발전에 기여**할 접근성 강화 필요

- 북극권의 급격한 환경변화에 대한 동토층 지역 관측 거점 확보와 ICT 융·복합 관측기술 개발·적용을 통해 예측 기초연구의 선제적 착수 필요(북극권 국가 빅데이터 확보와 진출 기득권 확보)

○ 북극권은, 영토권 주장이 유보된 남극권과는 달리, 연안국들의 주권행사가 강하게 주장되고 있는 지역이므로, 우선적으로 환경변화 연구 등 과학연구를 국제공동으로 수행하며 진출 기반 마련과 국제사회에 기여 필요

총괄 개요

○ 캐나다 오타와에서 회원국, 옵서버, 워킹그룹, 회의개최 방식, 의사규칙 제정 등 9개 조항을 담은 북극권 정부간 협의 및 북극이사회(정부간 포럼, Arctic Council) 설립선언문 채택('96. 9. 16), 우리나라의 북극권 활동영역 확대를 위한 북극이사회 참여 및 활동 필요성 대두(한국은 2009년부터 잠정옵서버 활동)

○ 또한, 우리나라는 북극해 지역내 북극권 국가들의 진출 노력 확대 및 북극권 국가들의 호응을 얻어 2012년 9월에 스발바르 조약 가입, 2013년 5월에 북극이사회의 정식옵서버에 가입함으로서, 보다 활발한 북극연구활동의 기반을 마련하고 있음

○ 북극권 육상과 대기 환경변화 자료를 기반으로 국가 차원의 대응방안 도출 및 북극권(동토층 등) 진출을 위한 전략 수립 마련 필요. 과거와 현재 진행되는 현상을 진단하고 미래 변화를 예측하고 향후 북극해 진출 시점을 위한 기초자료 확보 필수

○ 그럼에도 아직 우리나라에서 북극권의 환경변화에 대한 체계적이며 효과적인 관측망의 구성이나 온난화에 따른 영구동토층의 변화 관찰과 한반도로 파급될 수 있는 연구는 아직 미미한 실정이므로, 이에 대한 다각적이며, 체계적인 연구활동이 필요함에 따라, 본 사업 개발 및 수행

Fig. 1. Global Issue in the Arctic Region.

[추진 근거]

○ 2009~2011년 : 과학기술기본계획(577전략)과 국과위 안건과의 부합으로 추진

※ 극지연구 활성화를 위한 정부차원의 해양극지기초원천기술개발사업 시행계획('09.04) 수립(새로운 극지연구분야 개척 및 국가 차원에서 필수 대응기술 개발 등 포괄)

○ 2011년 정부(교육과학기술부) 기획보고서와의 연계성으로 추진

○ 2012년 극지전략 수립안 제시 및 VIP의 그린란드 현장 방문 지원(극지연구소-덴마크 Aarhus 대학과 MOU 체결)

○ 2012년 9월 우리나라는 스발바르 조약에 가입하여 군도와 주변 수역에 대한 자유로운 연구활동과 자원탐사 및 개발권 확보

○ 2013년 박근혜 정부 140대 국정과제 "극지에 대한 전략적 개발 및 활용 추진" 포함, 2013년 5월 우리나라 북극이사회 정식옵서버 가입에 따라 "북극정책 전반에 대해 범정부 차원의 협의를 통해 종합 청사진을 마련할 것"을 대통령 지시(5.20/수석비서관 회의)"

○ 2013년 12월 정부 7개 부처 합동「북극정책 기본계획」수립, 발표

○ 2014년 1월 미래창조과학부 발표,「국가중점과학기술전략로드맵」의 5대분야 30개 기술 '환경통합모니터링 및 관리기술', '기후변화 감시·예측·적응 기술', '유용유전자원이용 기술' 및 'ICT 융합 빅데이터기술' 등에 극지기초원천관련 기술개발 항목 추진(2014년 6월, 2단계 5개년 "극지기초원천기술개발사업기획연구" 시행)

○ 2014년 9월 박근혜 정부의 한-캐나다 북극연구 활성화 공동성명 발표

○ 2015년 11월 박근혜 정부의 한-아이슬란드 북극연구 활성화 협의

2013년 우리나라의 북극이사회 정식옵서버 가입으로 북극에서의 연구활동을 통한 국제사회 기여 요구가 증대되고 있다. 유엔 정부간기후변화패널(IPCC)이 2007년 발표한 기후변화 보고서는 온실 기체가 금세기 극지의 얼음을 녹이고 앞으로 기후시스템을 손상시킬 것이라고 예측하고 있는 실정이다. 또한 빙하와 토양의 해빙 현상이 급격히 일어나고 있고, 이로 인하여 생태계가 급변하고 있는 북극권에서 기후환경변화가 생태계에 미치는 영향과 생태계의 대응 파악이 필요하다.

북극권에서 주요 온실 기체인 이산화탄소의 연간 농도 증가율은 0.4%, 메탄은 0.9%에 이르며, 이중 생물학적 요인에 의한 방출량이 상당할 것으로 추정되고 있다. 빠르게 진행되는 기후변화 조건에서 국가의 선도적 기후변화대응 전략 수립에 필요한 과학적 데이터를 확보하는 것은 무엇보다 시급하다. 이에 따라 북극권 다른 국가들과 지속적으로 긴밀히 협력하여 북극환경을 보호함과 동시에 에너지 및 천연자원의 접근 및 개발

의 균형을 맞추기 위한 협력 기반이 필요한 시점이다.

따라서 본 과제에서는 총괄적으로 북극권 이사회 국가(미국, 캐나다, 그린란드(덴마크), 노르웨이(스발바르), 러시아 등)내 동토 지역에 관측 거점을 확보하고, 동토층에서의 대기-생태-식생 등 환경물리학적 특성과 북극권 온실 기체 변동 요인인 동토층 유기탄소 및 미생물의 특성을 이해하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 세부적으로 특성과제를 집중수행(세부과제 4개로 분리), 동토층에서의 온난화 기체 특성 관측 및 분석, 전자통신학적 자료 전송시스템 구축과 적용, 전기비저항 탐사를 통한 토양 내 함수율 변위를 이해하고, 동토층의 토양 특성 및 군집구조를 밝히고 상관관계를 분석하며, 기후변화에 의해 토양 및 생물 특성이 어떻게 변화하는지 이해하고자 하였다. 이를 위해 각 관측 거점 특성별로 적합한 연구 주제를 설정하여, 실험구를 직접 설치하거나 장기간 모사실험 결과를 확보하기 위해 국제 공동연구를 추진하여 연구를 수행하였고, 모델과 관측 자료에 기반한 예측연구를 수행하였다. 아래에 그동안의 추진경과를 초기에 수립한 본 사업의 철학(Fig. 2)을 근거로 작성한 로드맵(Fig. 3)에 의거하여 개략적으로 기술하였다. 한편, 본 사업의 특성상 접근하기 어렵고 북극권 국가들만의 주권행사 지역에서의 환경변화 연구 수행이라는 특수성을 최대한 감안하기 위하여, 과학적/정책적/국제적 접근 방향을 설정하고 충분한 사전종합분석-국제협력 추진-거점확보 및 시스템 구축-확보된 거점에서의 지속적 모니터링-양질의 자료 확보와 모델링을 통한 예측 등의 연구 흐름성을 유지 발전시키면서 계획된 연구의 성공적 달성을 위해 노력하였다. 아래 Fig. 4는 그러한 연구흐름도를 나타낸 것이고, Fig. 5-1,-2는 세부과제 간 상관관계와 연구 추진 개념을 각각 나타낸 것이다.

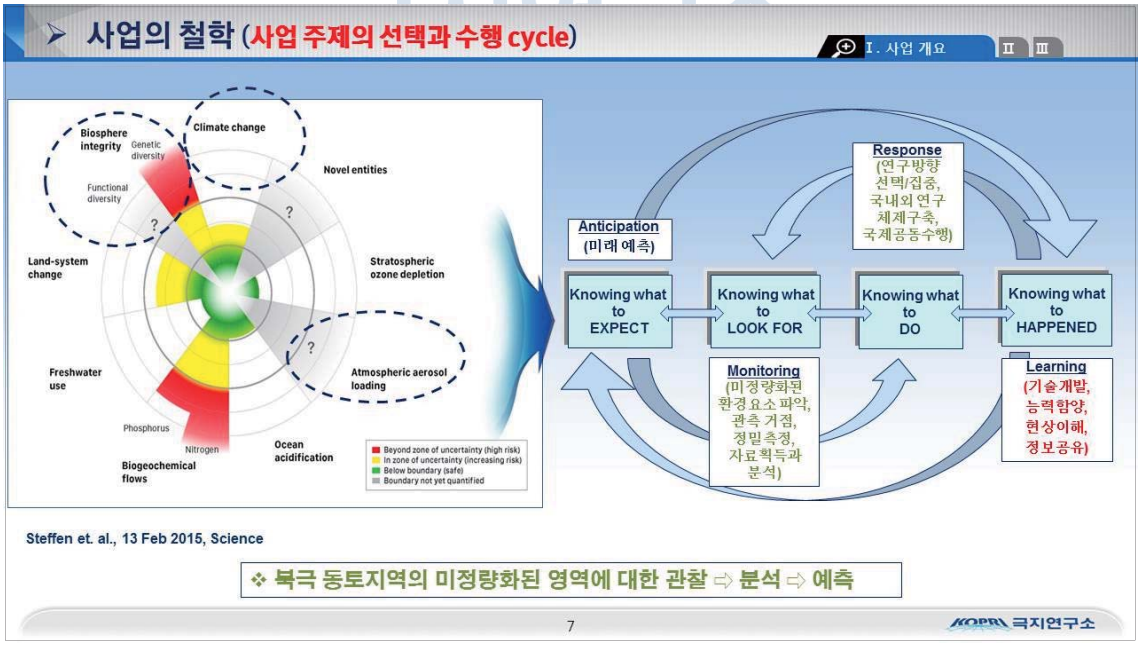


Fig. 2. Philosophy of CAPEC project.

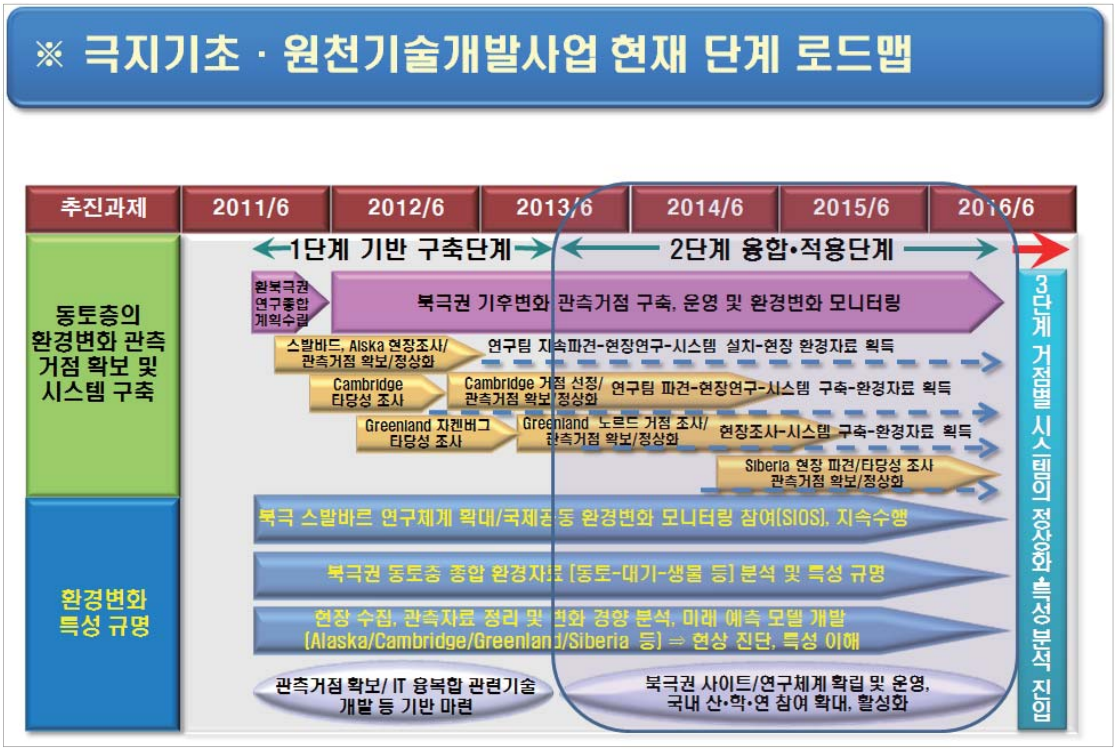


Fig. 3. Research Roadmap of CAPEC project.

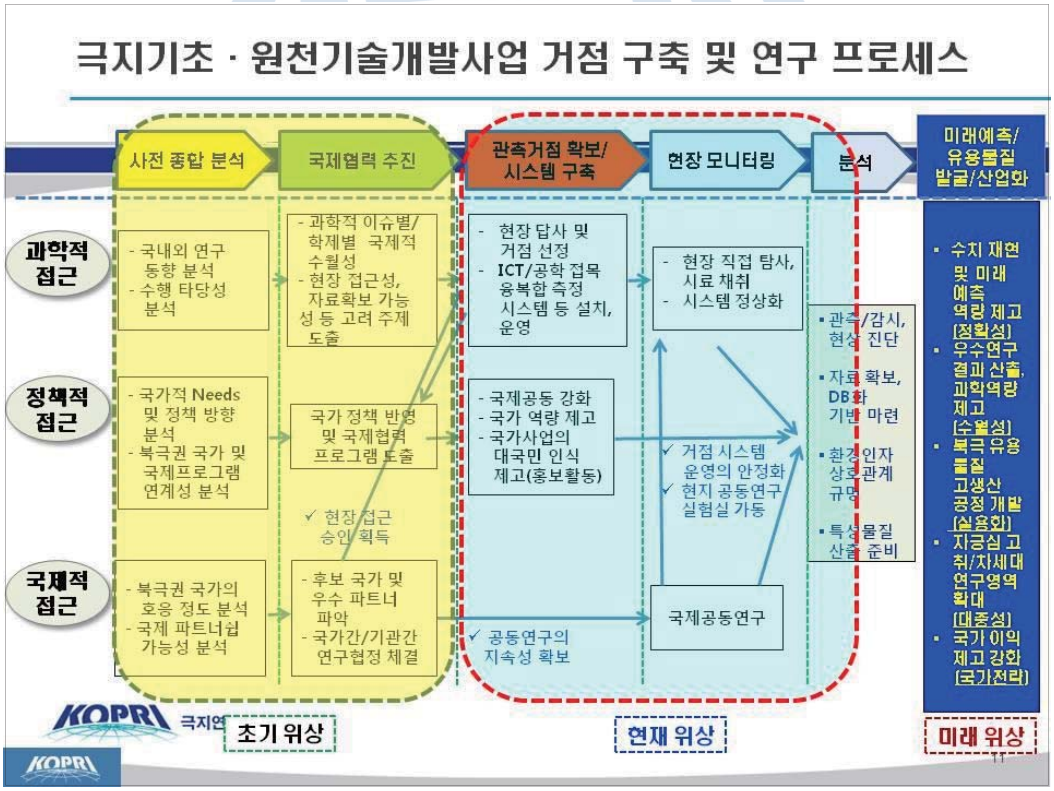


Fig. 4. Research processes of CAPEC project.

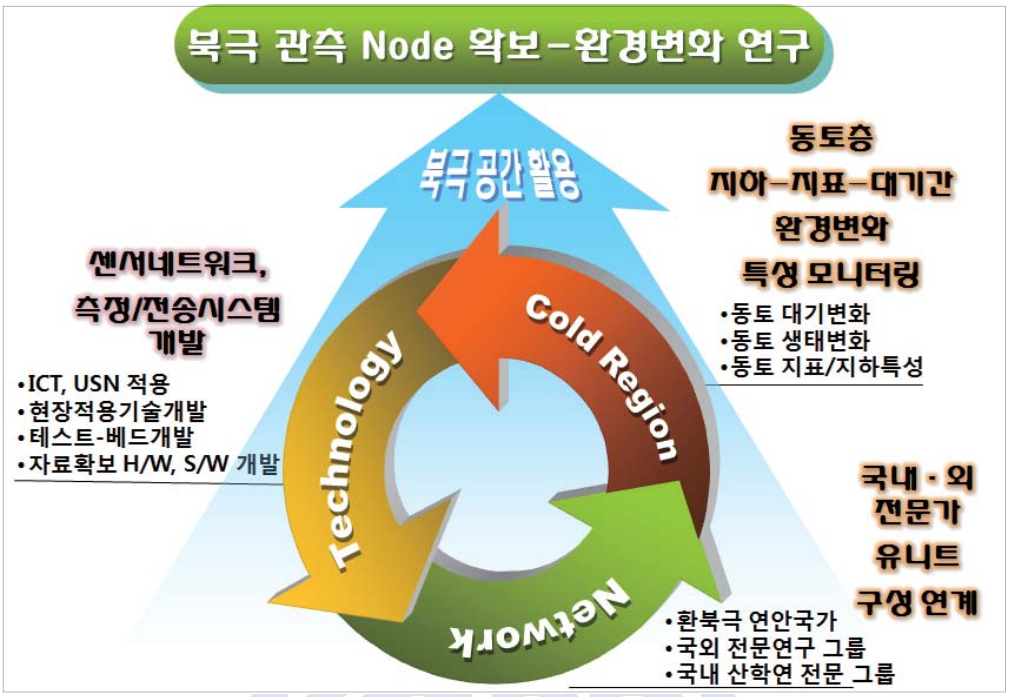


Fig. 5-1. Relationship diagram between each research parts in CAPEC project.

KOPRI
극지연구소

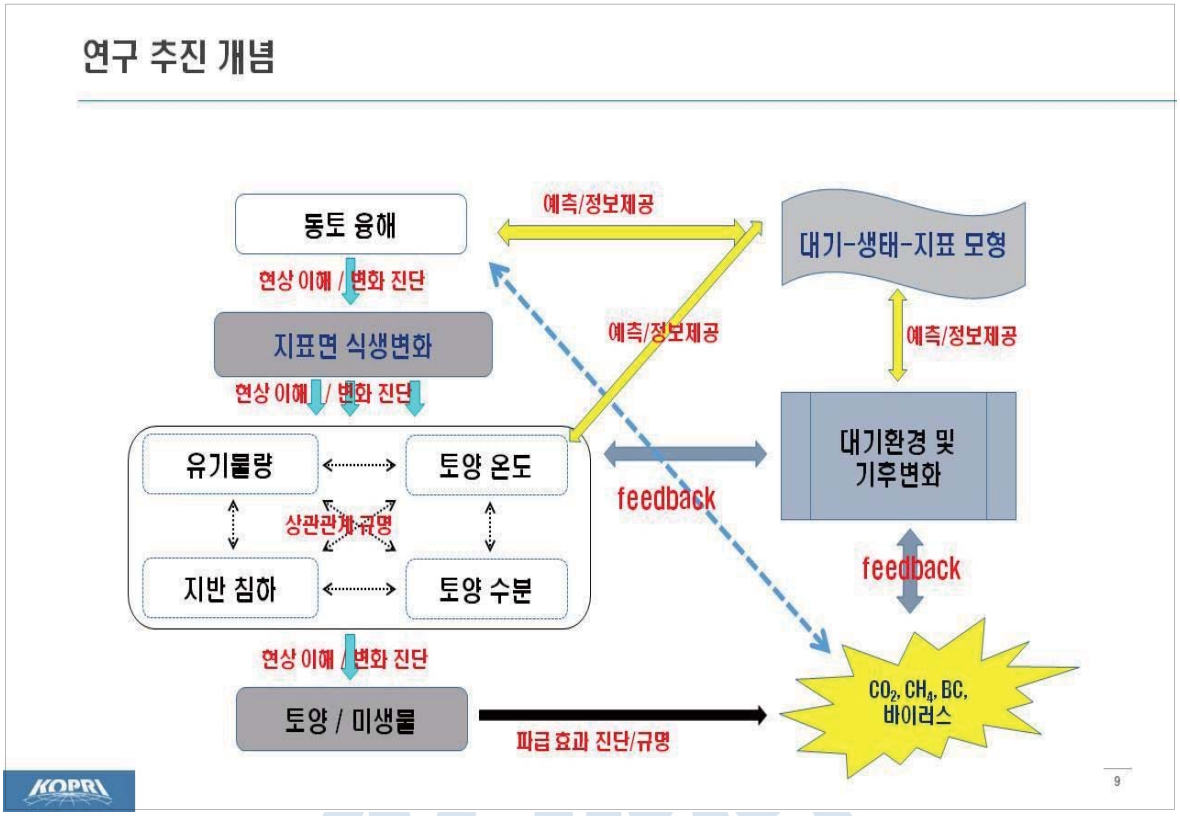


Fig. 5-2. Concept diagram of the research.

극지연구소

이 과제는 북극권 글로벌 이슈 대응과 정부추진 미션 수행을 위해, 2011년 6월 23일부터 시작하여 2016년 6월 22일까지 5개년 동안, 북극해를 둘러싼 미국, 캐나다, 그린란드(덴마크), 노르웨이, 러시아 등 북극이사회 국가를 대상으로 환북극권 동토층 지역(Circum-Arctic Permafrost Area) 환경변화 관측 거점을 확보하고, 관측 거점에 적용할 첨단 측정시스템/원천 요소기술을 국제 공동 및 산학연 공조 유니트 체제하에서 개발하여, 북극권 환경 변화 과정 이해 및 예측을 위한 정보 제공을 목표로 한다. 이를 위해, 1차년도와 2년도를 통해 환북극 동토층 관측 거점 즉, 제1거점으로 미국 알래스카 카운실, 제2거점으로 캐나다 누나타 준주의 캠브리지 베이, 제3거점으로 그린란드 자켄버그와 그 이북의 노르드 그리고 제4거점으로 노르웨이의 북극 스발바르(다산과학기지 주변) 관측지에 대해 조사하였고, 관측 시스템을 설치하였다(Fig. 6). 제1, 2, 3, 4 거점 관측지에는 관측 시스템이 설치 및 운영 중이며, 제5거점으로 계획된 러시아 관측거점에 대해서는 국내외 사정으로 인해 현재 러시아 측과 북극공동연구를 위한 협약 체결 작업을 진행중에 있다.

관측 거점은 북위 64도에서 79도에 이르며, 북극을 대표하는 지역에 위치한다. 기온은 제2거점인 캠브리지 베이의 기온이 가장 낮은 영하 33도에서부터 여름철에는 11도 이상이다(Table 1). 지역에 따른 강수량의 차이와 함께 관측지의 활동층의 깊이, 토양 수분 및 식생의 종류가 상이하다. 북극 지역의 온난화에 따른 주요 생태 지역의 반응은 향후 북극 지역 온난화에 대한 이해에 매우 중요하며, 이를 위해 본 과제의 1, 2 단계에서 기반 구축을 중심으로 환경변화 연구를 수행하였다. 한편, 북극 동토층 관측지로의 접근의 어려움, 전원 및 통신 인프라의 부족으로 인한 양질의 자료 생산 및 안정적인 자료의 확보의 어려움을 극복하고, 동토층 지하로부터 대기에 이르는 통합 환경 감시 시스템을 유비쿼터스센서네트워크(USN; Ubiquitous Sensor Network) 기술에 기반하여 개발하고 각 거점에 적용(Fig. 7, 8)하였고, 각 관측 거점은 미국, 캐나다, 그린란드, 이태리, 노르웨이, 독일, 프랑스 등 국제 협력 연구를 수행하는 국외 연구팀과 공조하여 연구 및 관측 시스템을 유지하고 있다.

한편, 극지역의 변화는 금세기들어 더욱 가속화하고 있으며, 이 지역의 기후 변화 메커니즘 규명 및 정확한 미래기후 예측의 중요성이 커지고 있으나, 현재의 기후 모형은 극지역에서 예측성이 가장 좋지 못하다. 북극 온난화의 현실적 모의 및 보다 정확한 전지구 미래 기후예측을 위하여 환북극 관측망 구축과 영구동토층 물리과정의 이해에 기반한 모델링 연구가 요청되어지고 있다. 본 연구에서는 북극권 대기-해양-토양-식생 통합 기후모델을 이용하여 영구동토층의 생태계 시스템의 변화를 예측하고 통합 모델을 이용한 시나리오를 작성함으로서 정부의 북극 온난화에 따른 한반도 기후변화 대응에 대한 과학적 근거자료를 제시코자 한다.

[추진 경과]

□ **북극권 동토층 환경변화 관측거점*** 확보 및 기초·원천기술 개발 연구** 수행

* **북극이사회 5개 국가 동토 지역**[미국(알래스카), 캐나다(캠브리지베이), 노르웨이(스발바르), 그린란드(자켄버그/노르드), 러시아] 지역에 대한 관측거점 확보 계획 수립 및 4개 지역에 관측 거점 확보(단, 러시아 지역은 국내외 사정에 의해 2016년 7월 현재 러시아 측과 한-러 북극공동연구를 위한 협의 중)

** 동토층의 대기/생물/토양 등 유비쿼터스센서네트워크(USN) 구축 및 입체형 무인 측정시스템/전송기술 개발(cyber-network), 적용

○ **북극이사회 참여 국가와 협력 강화**

※ 북극 연안 5개국 및 EU 북극 연구 국가와의 지속적 국제공동연구 체제 마련 및 가동

□ 북극이사회 정식옵서버 자격으로 **북극해 연안국(미국, 노르웨이, 캐나다, 그린란드, 러시아 등 5개국 등) 및 독일, 스웨덴 등 연구기지 운영국과의 국제공동연구 추진**

○ 노르웨이/독일/프랑스/이태리 등과 스발바르 국제공동 인프라 활용 및 환경변화 감시 시스템 운영**(한국 '12.9 스발바르조약 가입)**

○ 그린란드(덴마크) : 극지연구소-덴마크 Aarhus 대학과 MOU 체결
(2012년 VIP 그린란드 방문시 **한-덴마크 북극공동연구 협약, 2015년 10월 노르드 관측 거점 확보 및 측정시스템 설치 운영 중**)

※ **아이슬란드 북극공동연구 협의**('15.11.10 아이슬란드 대통령 한국 방문시 한-아이슬란드 정상회담 의제 및 극지연구소와 협의, 2017년 중 한-아 북극공동연구 협약 체결 추진 중)

○ **한-미, 한-캐 환경변화 공동연구** 수행 및 현지 실험실 설치 협의

※ 미국 알래스카패어뱅크스대학 NWC에 한-미 북극공동연구실 설치('15.7), 및 캐나다 현지 실험실 설치 협의(CHARS(Canadian High Arctic Research Station), '17년 완공)
- 2014년 VIP 캐나다 방문시 한-캐 공동성명 발표

※ 북극 5개 연안국 동토지역 대상 환북극 관측거점 확보 실적

- 미국 알래스카 거점 확보(2011년) : 100% 수준 운영
- 노르웨이 스발바르 거점 확보(2012년) : 100% 수준 운영
- 캐나다 캠브리지베이 거점 확보(2012년) : 100% 수준 운영
- 그린란드 노르드 거점 확보(2015년) : 50% 수준 운영(측정시스템 강화 계획)
- 러시아 거점(2016년 선정 작업 중) : 러시아 북극남극연구소(AARI)와 MOU 체결작업 중 (현재 AARI와 업무 조율 중이며, 2016년 내로 체결 예정)

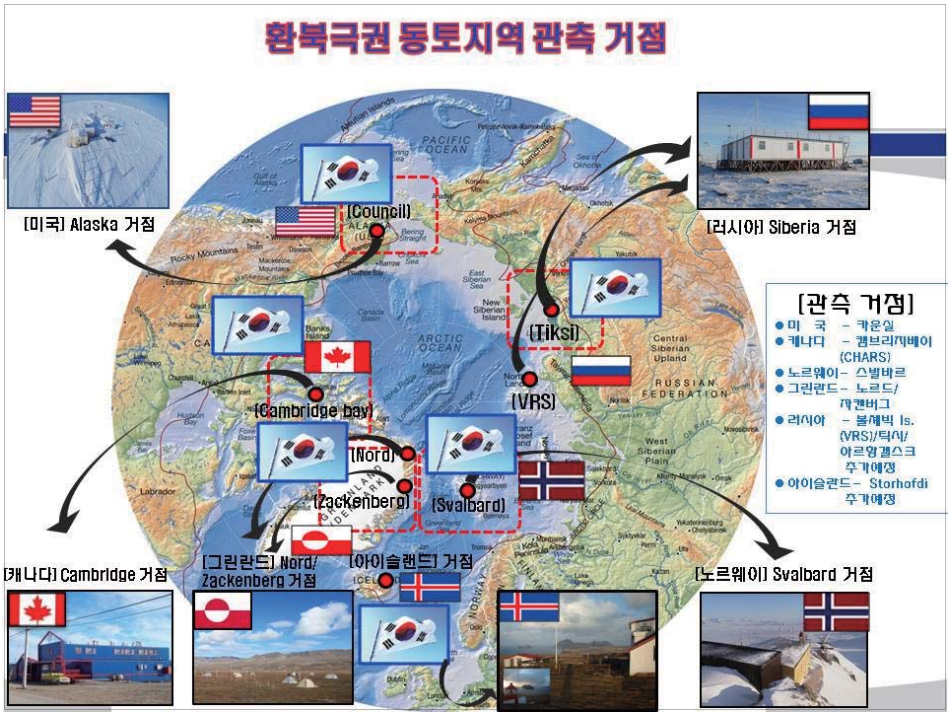


Fig. 6. Location map of each observation nodes in Circum-Arctic region.

Table 1. Environmental characteristics of each observation nodes

구분	제1거점 (알래스카 카운실) (64° N, 165° W)	제2거점 (캐나다 캠브리지 베이) (69° N, 105° W)	제3거점 (그린란드 자켄버그, 노르드) (74° N, 20° W)	제4거점 다산기지 (노르웨이 스발바르) (79° N, 12° E)
기온(℃)	-14.6 ~ 11.4	-33 ~ 8.2	-20 ~ 6	-14 ~ 5
연 강수량 (mm)	~ 420	~ 130	~ 220	300 ~ 400
활동층 깊이 (m)	< 0.7	> 1.0 (2012년 7월 측정)	< 1.0	~ 1.0
토양 수분	습함	건조	습함	반건조
식물	선태류, 지의류 초본류(<30 cm) 관목(<50cm)	선태류, 지의류, 초본류(<10 cm), 관목(<10 cm)	선태류 초본류(<10 cm)	선태류, 지의류 초본류(~ 10cm)

Table 2. Scientific and geopolitical characteristics of each observation nodes

관측 거점	거점 위치	거점 설치 년월	과학적/지정학적 등 특성과 필요성	비고
알래스카 카운실 (미국)	64° N, 165° W	2011년 8월 ~현재	- 유라시아 대륙과 아메리카 대륙의 경계 영역이며, **북태평양과 북극 척치해의 경계 영역**으로서 온난화 현상 규명에 대한 지정학적 특성 보유 - 미국의 유일한 불연속 동토지대로서 온난화에 따른 변화의 경계 지점이며, 유기물 함량이 매우 높은 이탄층 지역으로서, **동토층의 해리와 온실기체 방출 여부 감시 용이** (CO_2, CH_4 등 플럭스 측정) - 습윤동토환경의 수목한계선 지역으로서 기후변화에 따른 **식물상 변화 연구에 적합**(1999년부터 알래스카대학의 수문기상관측 수행, **장기간 환경변화 분석 유리** (한-미 국제공동연구 활발)	한-미 북극 공동 연구실 운영 (2015.7 ~현재)
캠브리지 베이 (캐나다)	69° N, 105° W	2012년 7월 ~현재	- 캐나다 북극 보퍼트해와 동토 지역간 환경변화에 대한 상호작용이 활발하게 일어나는 것으로 분석되고 있으나, 광활한 동토 면적에 비해 **CO_2, CH_4 및 N_2O 플럭스 등 온실기체에 대한 연구** 부족. - 이 지역은 북미 고위도 북극 지역 중 관측인프라가 비교적 잘 갖추어진 곳으로, 이 지역 **동토변화에 대한 연구 뿐만 아니라 향후 더 북쪽으로의 연구 확장성이 뛰어남** - 염분이 있는 영구동토층 지역이라서 기후변화에 의해 영구동토층이 더 민감하게 변할 수 있는 특성이 있으며, 식생 조건이 다른 **알래스카 카운실 지역과 상호비교 연구에 적합**	2017년 CHARS 개소 예정 (한-캐 북극 공동 연구실 운영 예정)
자켄버그/ 노르드 (그린란드)	74° N, 20° W / 81° N, 16° W	2012년 8월 ~현재	- 남극을 제외한 육지 중 최대의 빙상을 보유하고 있으며 동시에 빙권이 가장 급격히 감소하는 기후변화의 지표 지역임. 카라/바렌츠해의 급격한 해빙 감소에 대한 **육상 동토 반응의 공간 변동 평가 유리,** 동토 변화에 대한 식생의 역할이 미약하여 변화과정 이해가 상대적으로 단순함. 이를 활용하면 **식생이 있는 다른 지역에서의 변화과정과의 이해에 유용** - **(자켄버그)** 고위도 북극 생태계의 변화를 확인할 수 있는 기본 데이터(약 1,500개의 물리, 생물 요소 모니터링 자료) 풍부. 다양한 장기 기후변화 모사 실험구가 설치되어 있으며, 식물이 자라는 북방한계에 가까워 **생태계 연구에 적지** - **(노르드)** 그린란드의 최북단에 위치한 과학기지로서 **북극 기후변화 및 빙상 변화 연구의 최적지**	북극권 기후변화에 따른 **식생 및 지표 변화연구**, 노르드에서의 **온실기체 연구 적지**
스발바르 (노르웨이)	79° N, 12° E	2012년 9월 ~현재	- 해빙시기의 다양한 대륙-해양의 영향을 받는 등 **동토 대기 및 생태 분야, 유용생물의 고생산시스템 구축 등 다양한 연구테마의 국제공동연구 용이** - 대서양해류의 북극해 유입 길목에 위치한 동토지대로서 북극 환경변화 감시에 적합 - **제플린 관측소(세계기상기구의 지구급 지구대기관측소(GAW))를 활용한** 노르웨이-스웨덴 등과 에어로졸과 DMS 등 다양한 대기 물리·화학인자의 환경변화 관측프로그램과 협연하는 국제공동연구 용이, 북극 고유의 안정대기경계층 연구(30m 높이의 타워 등 연구 인프라 확보) 및 에어로졸-구름 과정 연구에 장점이 있어 **향후 극지역 모델 개선을 위한 유용한 자료 생산 가능**	**스발바르 조약 및 SIOS 국제프로그램 동참** 용이, **유용물질에 대한 고생산시스템화의 적지**

※ 환북극 동토층 관측거점별 입체형 측정시스템 구성도

- 각 관측거점별 지중/토양/대기층의 종합 환경 관측시스템 설치, 운영
- 무인 원격 자동자료전송시스템(USN, Iridium 전송시스템 등) 운영

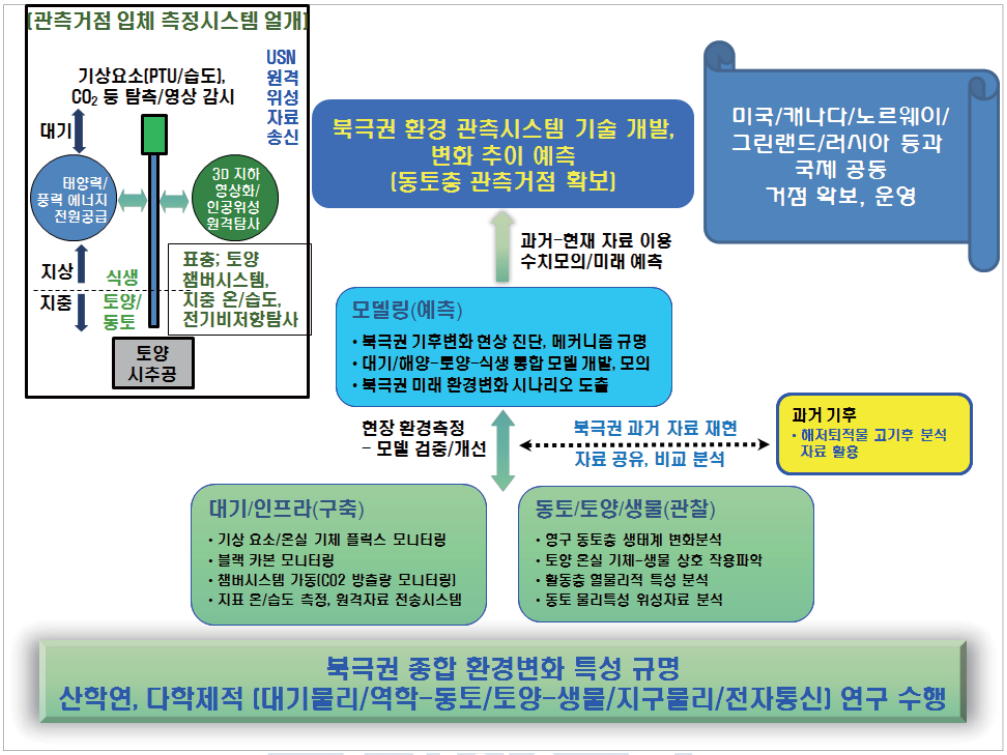


Fig. 7. Systematic diagram of this study and relationship between each themes.

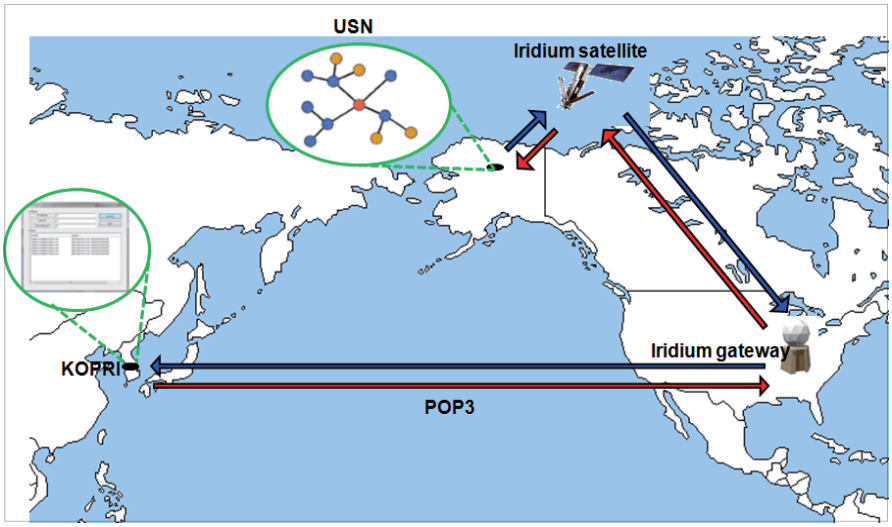


Fig. 8. USN* based data telecommunication system.

※ Ubiquitous Sensor Network(USN) operated at Council, Alaska.

[과제 수행 목표와 핵심 내용(요약)]

[과제 목표]

○ **연구거점 선정·운영** : 북극 5개 연안국* 동토지역에서의 관측 거점 확보 및 지속적 운영

- 북극 환경변화 연구를 위한 **안정적 관측 거점 확보와 정상 운영**

* **북극해 5개 연안국** : 노르웨이(스발바르)~미국(알래스카)~러시아(시베리아)~캐나다(캠브리지베이/CHARS)~그린란드(자켄버그/노르드) 등

○ **측정시스템 개발** : 입체형 무인 원격측정시스템(USN 등) 구축 및 cyber-infrastructure 구현 기술 등 **원천 요소 관측기술 개발**과 현장 적용(ICT 융·복합 기술 개발)

- **동토층** 환경 및 생태계 특성 연구를 통해 **신환경 조성 형태 파악 및 원천기술 확보 등**

○ **국제공동연구 및 자료획득** : 북극해 연안국과의 국제공동프로그램 참여 및 체제 확립을 통한 **동토층의 기후변화 현상 및 수치적 환경변화 재현 도출**, 다학제 **산·학·연 환북극 국제공동연구** 기반 확립

- 스발바르조약 가입과 북극이사회 정식옵서버 가입 및 '북극정책 기본계획' 수립에 따른 지속적 모니터링 및 후속 조치 일환으로서의 활성화 연구

※ 북극권 동토와 연안이 주권 행사지역이므로 국제공동연구 필수

[핵심 내용]

- **공간적 대상** : 극지역 동토층에서 지중-지표-생태계-대기 등 3차원적 공간을 대상으로, 미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드, 러시아 등 북극권 연안국들과의 국제공동연구 및 국내 산학연과의 협연 수행
- **학문적 대상 및 기술적 적용** : 대기과학/생명과학/전자통신공학/지질과학/동토공학 등 학문의 다학제적 입체무인측정시스템 개발과 적용, 시설물 유지관리, 빅데이터 전송 기술 등 적용
- **연구수행 개념** : 지중에서의 지열변화(공학적 개념), 미생물 거동 ⇒ 지표에 영향/생태계 등 지표 환경변화 측정(생물, 생명공학적 개념) ⇒ 대기환경 변화(대기과학, 기후학적 개념) 측정 : 자료생산(USN 적용, 전자통신 개념) ⇒ 자료전송(원격 빅데이터 전송기술 적용) ⇒ 자료 저장/분석/현상 진단과 미래 예측(시뮬레이션 개념 적용) 연구

전 문 용 어 해 설

전문 용어	주 요 내 용	비고
환 북극 (Circum-Arctic)	▪ 북극해와 이를 둘러싼 북극권 대륙의 북극해 연안 지역을 포괄하는 공간적인 개념	
동토층	▪ 동토층이란 땅속 온도가 연중 0℃이하를 유지하며, 항상 동결되어 있는 층으로 육지의 20~25%를 차지 ▪ 동토층으로부터 메탄을 비롯한 온실기체의 방출량 증가, 토양구조 변화, 대기-활성층-동토층간 환경변화 등 연구	
환 북극 환경변화 관측 거점	▪ 알래스카·캐나다·시베리아의 동토층에 설치할 연구 사이트, 관측기법 등의 종합 패키지 ▪ 대기-표층-동토층 등의 종합적 연구대상을 특성화하여 북극권 환경변화에 따른 물질이동 중점 연구 수행	
북극권 급속 환경변화	▪ 북극해 해빙(海氷)의 면적이 북반구의 여름철에 평년값의 50~60% 수준으로 북극해 중심 환경변화 급속화 ▪ 북극지역의 급격한 환경변화는 해수에 의한 열에너지 순환, 동토 온실기체 방출 등으로 한반도 환경변화에 영향을 줌	
수치 모델링	▪ 환경변화에 관한 지식을 컴퓨터로 모델링하여 재현하고, 과거-현재-미래의 예측 시나리오를 생산하는 연구 방법 ▪ 과거 환경변화의 이해, 현재 진행 중인 환경변화 관측, 환경변화 인자-현상들 간 상호 작용 축적 등	미래 예측의 필수 수단
세계기상기구 (WMO)	▪ 1873년 결성된 국제기상기구(IMO)의 후신으로 1951년부터 활동을 시작한 국제연합의 특별기구 ▪ 세계적인 기상관측체제의 수립, 관측표준화, 국제적인 교환, 국가간 기상 서비스의 개발 등을 추진	
세계대기감시 프로그램 (GAW)	▪ 세계기상기구 대기조성의 연속관측 및 잠재적 영향을 줄 변화 영향에 관한 연구 프로그램 * Global Atmosphere Watch	
북극 환경 관측 네트워크 (SAON)	▪ '10년부터 북극연안국 주도의 대기/동토층/생태계 등 환경 변화에 대한 지속적 북극 관측 프로그램 * Sustaining Arctic Observing Networks	
스발바르 종합 북극관측시스템 (SIOS)	▪ 북극이사회 및 WMO 제15차 총회에서 승인된 SAON의 시범사업 ▪ 스발바르지역은 12개 국가가 과학기지를 통해 북극연구 활동 수행 * Svalbard Integrated Arctic Observing System	북극권 국제공 동연구 창구 일환
환북극 연구 유니트	▪ 주관연구기관 주도하에 관측 거점 종합 설계 및 기술개발과 미래 예측을 효율적으로 수행할 수 있는 사업 체제 * Arctic Environment Research and Forecasting Unit	연구 수행의 효율성 제고
입체형 관측 기술개발	▪ 극지 동토층 지역에서 지하로부터 대기까지(동토층-표층-식생-대기)의 환경변화에 대한 극지용 관측기술개발 ▪ 관측과 자료집록, 자료전송이 가능한 연직형 관측구조	집약적 측정 기술
유비쿼터스 센서 네트워크 (USN)	▪ 무인 물리현상 파악, 조절, 현상 및 자료수집, 시공적 환경변화 인자의 지속적인 감지 기능성 네트워크 * Ubiquitous Sensor Network	극지용 전용 기술 개발

제 2 장

국내외 기술개발 현황

KOPRI
극지연구소

KOPRI
극지연구소

1. 국내현황

○ 극지연구소를 중심으로 북극다산과학기지에서 지중온도와 이산화탄소 플럭스 측정, 정상기상 관측, 구름입자 관측, 고층대기 현상연구 등을 수행하고 있으나, 지역적으로 북극권중 노르웨이의 스발바르 군도에 한정되어 있고, 미국-캐나다-러시아-그린란드 등 광범위한 동토층 지역에서의 환경변화 연구를 위한 관측 거점 확보는 전무함(이 사업의 주제는 국내에서 최초 시도되는 unique한 내용임)

○ 더불어서, 극지 연구소를 중심으로 극진동 등의 극지 기후 변화 이해를 위한 연구가 진행되고 있으나, 미래 기후 예측을 위한 모델 개선보다는 관측 자료 분석을 통한 현상 규명에만 한정되어 있다. 미래 기후 변화 예측을 위한 모델링 분야는 서울대에서 역학적 식생모형과 대기대순환 모형과의 접합을 시도하여, 좋은 성과를 낸 바 있으나 기후변화를 예측하기 위해 필요한 대기-지표-식생 결합 모델을 수행한 연구 집단은 아직 국내에서 전무한 상태이다. 또한, 한반도 가뭄수지 분석 산출에 활용하기 위하여, 연세대학교에서는 가용 수자원 산출을 위한 한반도 지면자료 동화 시스템을 개발 중에 있으며, 수리과학연구소에서는 상세 격자 식생변화 모의 및 예측을 위하여 한반도 실측자료에 기반한 시생 모델링 연구를 수행 중에 있다.

○ 극지연구소는 2011년 6월부터 한국연구재단(미래창조과학부)에서 지원을 받아 북극권 동토층을 대상으로 토양-미생물-대기를 종합적으로 관측할 수 있는 북극권 동토 모니터링 거점을 구축 중에 있으며, 미국 알래스카 카운실과 캐나다 캠브리지 베이, 노르웨이 스발바르, 그린란드 노르드 거점을 확보하여 운영중임

○ 남극세종과학기지 주변에서 생태계 분석과 온도 모니터링이 수행된 바 있으나, 북극권에서 생태계나 동토 활동층에 대한 연구는 미진함

○ 종합적으로, 우리나라에서 북극권의 환경변화에 대한 체계적이며 효과적인 관측망의 구성이나 온난화에 따른 영구동토층의 변화 관찰과 한반도로 파급될 수 있는 연구는 아직 미미한 실정임

○ USN(Ubiquitous Sensor Network) 기술의 활용은 국가적으로 매우 중요하며 사회적 파급효과가 큰 에너지, 원자력, 우주항공, 해양, 자원, 철도, 표준, 과학기술정보, 극지분야 등의 공공기술 분야에 IT/USN 기술의 접목이 요구되고 있으며 국내외적으로 현재 활발하게 연구가 진행되고 있다. 하지만 현재, 국내외적으로 USN 기술을 극지환경 관측에 적용한 사례는 없음

○ IT/USN 기술은 인간의 개입 없이도 물리적인 현상을 파악하거나 조절, 사람이 접근할 수 없는 영역에서의 현상 수집, 과학적 연구 활동에 원천이 되는 중요한 데이터의 수집, 시공간으로 변하는 환경 인장의 지속적인 감지 등을 가능하게 한

다. 이런 장점을 갖는 IT/USN 기술을 활용한 본 연구개발 사업은 산업체에서 독자적으로 수행하기 어려운 공공기술을 실제 개발하여 극지에 적용한 사업으로 국가 기반산업의 효율성 제고 및 과학기술 활동에 파급효과가 매우 큰 최초의 사례임

○ 남극세종과학기지 주변 생태계 모니터링과 다산기지 주변 식물상(flora) 조사가 수행된 바 있으나 아직까지 기후변화에 의해 극지 생태계가 받는 영향에 대한 연구는 국내에서 시도된 바 없음

○ 북극다산과학기지 주변 토양 및 해양 미생물이 분리되고 신종이 발표된 바 있으나 식물이나 미생물 군집 분석은 수행된 바 없음

○ 국내 연구진에 의해 극지역에서 발생되는 이산화탄소에 대한 모니터링은 실시되고 있으나, 극지 현장에서의 온도 상승 모사 실험은 전무함

○ 온실 기체인 이산화탄소나 메탄 발생 기작을 설명할 수 있는 생물권과 토양 유기탄소 특성에 대한 연구는 전무함

○ 원격탐사 기술을 이용한 북극 동토층의 표면 물성(온도, 전자기 특성 등)이나 동토층의 표면 및 내부의 물리적 특성(전기적 및 전자기적 가변성 등) 연구도 본 과제 이전에는 수행된 바 없음

2. 국외현황

○ 극지역에서의 현상의 강한 증폭(amplification)으로 보다 강력한 되먹임(feedback) 과정에 의해 적도와 중위도보다 극지역이 훨씬 빨리 더워지고 있음이 보고되었다. 이에 '최근 급변하는 북극권 환경이 우리나라는 물론, 전 지구에 미치는 파급영향은 어떠하며 미래는 과연 어떻게 될 것인가?' 하는 글로벌 이슈에 대응하는 북극권 환경변화 연구가 국제적으로 강화되고 있음

○ 2011년 10월부터 2020년 9월까지 미국 Department of Energy(DOE)에서 "Next-Generation Ecosystem Experiments (NGEE Arctic) 진행중: Oak Ridge National Lab (ORNL), Los Alamos National Lab (LANL), Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Brookhaven National Lab (BNL), University of Alaska Fairbanks (UAF)가 참여하는 대형 프로젝트. 영구동토층의 붕괴와 이와 관련된 과정(지형, 수문학, 토양 생지화학적 반응, 식물 군집의 천이 등)이 되먹임 작용으로 기후에 미치는 영향을 연구

○ BigLink 프로젝트(Biosphere-Geosphere interactions: Linking climate change, weathering, soil formation and ecosystem evolution)는 다학제적인 접근으로 스위

스의 Damma Glacier 후퇴지역에서 생물권-수권-토양권에서 일어나는 과정연구, 2011년 Vadose Zone Journal에 프로젝트 성과 중 처음으로 다학제적인 연구 결과 보고

○ 미래 기후변화는 온도 뿐 만 아니라 강수량 변화도 예측되고 있음. 대부분의 실험은 온도 또는 강수량 개개의 영향을 조절하는 시도. 그러나 온도와 강수량의 상호작용에 대한 연구가 부족하다는 견해가 제시됨(Wu, 2011)

○ 기존에는 지구온난화의 영향에 더 취약한 북극 동토의 탄소저장량, 이산화탄소 및 메탄 발생량 등탄소 중심의 연구 중심이었으나, 최근에는 질소 강하물의 증가, 유기물의 분해에 따른 가용질소량 증가 등에 의한 아산화질소(N_2O) 발생에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있음(Repo *et al.*, 2009; Elberling *et al.*, 2010; Kolb *et al.*, 2012)

○ 토양의 동결-융해로 인해 생지화학적인 특성의 변화에 관한 연구가 전세계적으로 진행되고 있으나, 농경지와 산림에 초점이 맞춰져 있는 경우가 많음(Philips and Newlands, 2011)

○ 토양의 동결과정에서 수반되는 건조현상에 의해 토양입단의 안정도에 대한 연구가 있음(Dagesse, 2011). 이 연구에서 더 나아가 본 연구진에서는 실제 북극지역에서 반복되는 동결-융해 과정에서 토양입단의 안정도의 변화, 반복되는 동결에 의한 수분 소실 정도에 대한 연구를 진행할 계획임. 이 결과를 토대로 동결-융해가 토양의 구조에 미치는 영향을 구체적으로 파악할 수 있을 것이라 생각됨.

○ 극지역의 온도 상승경향은 전 지구 온도 상승에 비해 약 두배 정도 큰 것으로 밝혀졌다(ACIA, 2004). 이렇듯 극지역의 강한 온난화는 해빙, 육빙, 동토층 등의 기후 요소들에 변화로 확인할 수 있으며(Serreze *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2005; Hinzman *et al.*, 2005), 최근 50년간의 극지 강수량도 증가한 것으로 나타남(Min *et al.*, 2008). 여러 기후 요소들의 변화는 해빙과 강설 면적을 감소시키며, 이러한 변화는 일베도를 감소시므로 되먹힘 현상을 통해 점점 더 극지역은 온난화가 일어남

○ Gillett *et al.*(2008)은 앞으로 100년간 극지역 온도는 4~7℃ 가량 증가할 것으로 예측하고 있으며, 극지역 온난화는 식생에 큰 영향을 미칠수 있다고 함. 또한, 많은 관측 자료들에서도 유사한 경향을 보됨. 가장 큰 예로써, 그린란드의 식생들의 개화시기가 점점 빨라지고 있으며 이는 식생의 생장시기의 시작이 빨라짐을 의미(Post *et al.*, 2009; Matthes *et al.*, 2009). 또한 낙엽수(shrub)의 확장이 알래스카 북쪽의 툰드라 지역에서 보고되고 있으며, 서쪽의 툰드라 지역은 가문비나무종의 확장(Sturm *et al.*, 2001; Thorpe *et al.*, 2002). 이러한 알래스카와 극지

역에서의 식생 확장은 위성관측 식생지수에서도 보고되고 있음(Zhou *et al.*,2001; Tucker *et al.*, 2001; Hinzman *et al.* 2005; Jia *et al.*, 2009)

○ 또한, 최근 시베리아 고기압의 장기 변동이 고위도 유라시아 지역의 눈덮임과 관련성이 있음을 관측자료의 분석을 통해 밝혀짐(Jeong *et al.*, 2011). 이를 확인하기 위하여 미국 국립기상연구소(NCAR)에서 개발한 지표과정 모델인 CLM (Community Land Model)과 대기모형 CAM3, 해빙-해양모형인 SOM(Slab Ocean Model), 식생 역학 모의 가능한 DGVM(Dynamic Vegetation Model)을 이용하여, IPCC 기후 시나리오에 따른 기후와 식생 피드백 모의 및 장기 예측하고 이를 통해 식생의 변화가 기후에 큰 영향을 미친다는 것을 규명하고자 함.

○ 본 연구집단은 관측자료 분석을 통해 환북극 대규모 대기순환이 동아시아 겨울 기후와 역학적으로 연관되어 있다는 것을 밝힌바 있으며(Jeong *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2008), 지구 온난화에 따른 환북극 지역 식생증가가 극지역의 온난화를 가중시키고 있음을 기후모형 실험결과를 통해 밝힘(Jeong *et al.* 2010a, Jeong *et al.* 2010b).

○ 이와 같은 연구들을 기반으로 지면과정이 기후변동에 미치는 영향에 대한 기후모형 실험을 실시하고, 이를 통해 본 연구과제에서 수행될 snow feedback과정 규명하기 위한 climate modeling technique을 확보함

○ 북반구 육지 면적의 24%를 차지하고 있는 동토층은 지난 30여 년간 꾸준히 기온 상승하고 있으며, 기온의 상승에 따른 유기물 분해속도가 증가함으로써 동토층에서의 CO_2 방출 속도 또한 빠르게 진행(Koven *et al.*, 2011)

○ 동토층은 과거 지구의 지질학적 시간 동안 식물의 사체, 동물의 사체 배설물, 미생물 등이 분해되지 않고 유기물의 형태로 보존되고 있어 유기탄소의 저장창고임

○ 북극 동토층에 저장된 유기탄소의 양은 ~1300 Pg (1300 $\times 10^{15}$g)으로 추정되며, 동토층에 저장된 유기물은 상대적으로 쉽게 분해될 수 있는 형태임(Hugelius *et al.*, 2013; 2014)

○ 북극 동토층 연구는 미국 알래스카, 러시아 시베리아, 그린란드, 북유럽과 스발바드를 중심으로 지난 10~30년간 지속적으로 수행되어 왔는데, 주로 지질 관측과 동토 코어링, 대기중 CO_2 농도 장기 모니터링, 식생 연구에 집중되어 왔고 미생물에 대한 연구는 아직까지 미진함

○ 동토층 관련 국제기구인 International Permafrost Association (IPA)가 1983년에 설립되어 연구정보 공유 및 국제 자문 역할을 담당하고 있으며, 우리나라는 극지연구소에서 위원회를 구성하여 2011년 5월 가입함

○ 환북극권에 형성되어 있는 영구동토의 생지화학적 반응의 연구는 장기생태모니

터링 지역(LTER)을 중심으로 활발하게 진행 중에 있음. 특히, 영구동토의 토양과 수생태계의 변화를 관찰하기 위해 알래스카 북부에 위치한 Toolik lake(Toolik Field Station)를 선정하여 1970년대부터 현재까지 다양한 연구(RATE, Research on Arctic Tundra Environments)가 진행 중임.

○ 북극권 동토층은 전지구적인 탄소의 저장고이나, 다른 지역보다 기후변화에 취약하고 이는 온실기체 발생 증가와 직결된다는 다수의 연구 결과를 바탕으로 여러 국가에서 북극권 동토층의 중장기적인 탄소 모니터링 필요성을 높게 평가하여 연구가 이뤄지는데, 특히 영구동토층을 확보하고 있는 국가들(러시아, 북유럽, 미국, 캐나다 등)이 그 중심에 있음. 우리나라는 북극권 영구동토의 연구에 후발주자이나 최근 북극이사회 옵서버 국가 자격을 얻어 앞으로 활발한 연구활동을 기대하고 있음.

○ 지구온난화의 영향으로 영구동토의 융해가 가속화되어 활동층(active layer)의 두께가 깊어지고 불연속 영구동토가 확대되고 있음. 이러한 영구동토의 융해는 지형의 변화를 야기하여 그 결과 다양하고 독특한 지형이 형성되는데, 대표적으로 thermokarst, active layer detachments, thaw slump 등이 있음(Rowland et al., 2010). 이러한 지형의 변화는 국소적으로 일어나기도 하지만, 광범위한 면적에 걸쳐 일어나기 때문에 원격탐사(remote sensing)를 통해 연구가 진행됨(Morgenstern *et al.*, 2011).

○ 계절의 변화에 의해 영구동토층 토양은 반복적인 동결-융해를 거치게 됨. 이러한 토양의 동결-융해는 토양의 생성작용 뿐만 아니라 토양의 구조, 안정도, 수리특성, 토양 내 양분의 동태 등에 큰 영향을 미침(Grogan *et al.*, 2004, Sjursen *et al.*, 2005).

○ 특히, 영구동토 지형의 불안정화는 이산화탄소 및 메탄 등의 온실가스 방출을 가속화시킴. 또한 영구동토 융해에 의한 습지의 확대는 메탄 생성에 좋은 환경이 되고, 최근 융해된 영구동토에서 새로운 메탄생성균이 발견됨에 따라 습지화된 영구동토에서의 온실가스 방출에 관한 연구가 진행되고 있음(Paytan *et al.*, 2015).

○ 다산기지가 위치한 스발바르 지역에서 식물 171종이 보고되었고 식생 천이 연구도 진행되고 있음. 기후변화가 진행될수록 관목의 피도와 우점도가 증가하므로 극지 지역의 식생 천이를 관찰하기 위해 장기간 식생 모니터링이 필요함(Sturm *et al.*, 2001).

○ 극지식물은 저온, 약광, 짧은 생육기간 등 극한환경에서 생존하여 왔기 때문에 온대와 열대의 식물과는 상당히 다른 분류적 구성과 생태적 특성을 보임. 이들의

적응 양상을 이해하기 위해 선행 연구에서 스발바르 자생 관속식물 165종의 분류적, 형태적 특성에 대한 일차 DB를 구축하였음.

○ 그러나 꽃의 유무와 크기 및 형태, 암수술의 수, 수분매개자와 종자분산매개자, 개화기와 결실기, 무성번식 가능성 등 번식적 특성이 적응도를 결정지음에도 불구하고 이들 특성에 대한 자료는 대체로 부족함. 특히 생물다양성의 핵심인 성체제의 다양성과 그 진화기작은 아직도 상당히 모호한 상태임.

○ 이에 성체제 분야의 전문가들이 모여 “The Tree of Sex Consortium”을 구성하였고 그 일차적 결과가 2014년 Nature에 실린 바 있음. 그러나 아직까지 북극식물의 성체제와 번식특성을 확인한 조사는 매우 부족한 실정임.

○ 극지식물의 생태적 특성을 다른 생물군계에 속하는 식물의 특성과 비교한다면 기후변화에 따른 식물군의 변화, 공생 매개자에 대한 이해, 침입종의 전파에 대한 전략 설정에 기반 정보를 제공할 수 있음.

○ 북극다람쥐꼬리(Huperzia arctica)는 니알슨 지역에서 2개 군락지에서만 분포하고 북극다람쥐꼬리가 속해 있는 석송류는 오랜 기간 동안 균류와 공생함. 대다수의 극지 식물이 균근과 공생관계를 맺고 있으나, 기후변화에 따른 이러한 관계 변화에 대한 연구는 부족한 실정임(Cairney, 2000).

○ 기후변화로 고위도 지역의 툰드라 생태계는 4-7 ℃의 기온 상승이 예상되어 다른 저위도 지역보다 기온 변화가 더 급격하게 일어날 것으로 예상됨(ACIA, 2004). 기온상승과 강수량 증가는 토양 미생물군집의 기능과 종 조성에 영향을 주는 것으로 알려져 있음.

○ 기온상승은 토양 호흡을 직접 증가시키며, 토양미생물 군집의 종 조성을 변화시킴(Singh *et al.,* 2010). 고위도 지역의 한 연구는 기온상승으로 인해 세균과 진균류의 생물량이 50% 감소하였고 종 조성도 진균류 우점으로 변화하였음을 보고하였음(Allison and Treseder, 2008). 강수량 영향을 받는 토양 수분함량은 토양미생물 구조를 결정하는 또 다른 중요 요인이므로 강수량 증가는 토양미생물 구조의 변화를 가져올 것으로 예상됨(Singh *et al.*, 2010). 토양생물군집의 변화는 다시 식물의 대사체 변화를 가져올 것이라는 점이 본 연구의 중심 가설임.

○ 최근 들어 식물의 지상부와 지하부 방어의 연관성이 주목받고 있음(Bezemer and van Dam, 2005; Rasmann and Agrawal, 2008). 지상부에 비해서 지하부 초식자의 종류는 상대적으로 적지만 식물에 주는 영향은 상당히 큼(Rasmann and Agrawal, 2008). 기후변화로 인한 토양생물군집의 변화는 식물지하부 대사체의 변화를 일으키고 이는 식물 지상부 대사체의 변화를 가져올 수 있음(Bezemer and van Dam, 2005).

○ 스발바르 지역 내에 서식하는 담자리꽃나무(Dryas octopetala), 씨범꼬리(Bistorta vivipara)와 공생하는 균근 곰팡이에 대하여 분자생물학적 방식을 이용한 군집 구조 연구가 진행되었으나(Bjorbaekmo *et al.*, 2010; Blaalid *et al.,* 2014) Sterol 분석을 이용한 군집구조 변화 연구는 아직 진행되지 않음.

○ 식물은 토양 생물 군집의 영향으로 대사물질의 변화를 겪게 되지만 역으로 휘발성 유기화합물(VOCs)을 생산함으로써 토양 생물군집 구조에 영향을 줄 수 있음(Weete *et al,* 2010). 토양 속에서는 식물의 뿌리뿐만 아니라, 세균, 진균류 등 다양한 토양 미생물이 VOCs을 생산하기에 토양 속 VOCs는 토양 내 생물 간의 신호물질 및 화학적 상호작용의 도구로 작용함(Insam and Seewald, 2010; Weete *et al.*, 2010; Effmert *et al,* 2012).

○ 기후변화가 가장 급격하게 일어날 것으로 예상되는 고위도 지역의 영구동토대에서 이러한 기후변화 및 천이단계에 따른 토양 미생물의 군집 변화와 연관된 식물의 지상부 및 지하부 대사체의 변화, 그리고 이들 토양 생물군집과 식물 뿌리와의 상호작용을 모니터링하여 장차 기후변화와 천이 진행에 의해 일어나는 고위도 지역 생태계의 변화를 예측하기 위한 기본 자료를 생성하는 것이 이 연구의 주목적임.

KOPRI 극지연구소

KOPRI
극지연구소

제 3 장
연구개발수행 내용 및 결과

KOPRI
극지연구소

KOPRI
극지연구소

1. 과제 수행 내용 및 결과 개요(총괄)

□ **북극권 동토층 환경변화 관측거점*** 확보 및 기초·원천기술 개발 연구** 수행(국내 최초로 국제공동 북극권 동토층 연구 진행)

* **북극이사회 5개 국가 동토 지역**[미국(알래스카), 캐나다(캠브리지베이), 노르웨이(스발바르), 그린란드(자켄버그/노르드), 러시아(볼셰비키섬 등)] 지역에 대한 관측거점 확보

** 동토층의 대기/생물/토양 등 유비쿼터스 센서 네트워크(USN) 구축 및 입체형 무인측정시스템/전송기술 개발(cyber-network), 적용

□ **북극이사회 참여 국가와 국제공동연구협력 강화**

※ 북극이사회 정식옵서버 자격으로 북극 연안 5개국**(미국, 노르웨이, 캐나다, 그린란드, 러시아 등 5개국 등)** 및 **독일, 스웨덴 등** EU 북극 연구 국가와의 지속적 국제공동연구 체제 마련 및 가동

이사국	연구내용	연구 거점	비고
미국 관측 거점	동토-대기간 온실기체 교환연구	알래스카 Council	2011년 시작
캐나다 관측 거점	대기-생태 연구	Cambridge Bay	2012년 시작
덴마크 관측 거점	그린란드 빙권-대기 에너지 교환 연구	그린랜드 Nord	2015년 하반기 1차 현장 연구 수행 예정
노르웨이 관측 거점	스발바르 동토 지표- 대기간 에너지 교환 및 에어로졸, DMS 등 대기 냉각기체연구	스발바르	2012년 시작
러시아 관측 거점	시베리아 동토지역 메탄 플럭스 연구	후보지 선정중 (2016년 상반기 예정)	2016년 하반기 현장연구 시작 예정
스웨덴 국제 협력	스발바르 에어로졸 특성 공동 관측	스발바르	2011년 시작

구 분	내 용	의 의	비 고
과학적 성과	○ 환북극 동토층 관측 거점에서의 원활한 자료 수집 및 획득위한 GPS/USN 기반 /cyber-infrastructure 기술 개발 ○ 세계 최초 실시간 북극 대기 황성분 (DMS) 장기간 연속 관측 성공(약 1~2시간 주기 정밀 관측) ○ 동토층 토양 미생물의 분포와 토양 깊이 및 pH와의 상관관계 규명 ○ 북극 동토층 식생변화가 대기순환에 미치는 영향을 세계 최초 로 수치적 재현 ○ 영구 동토층 지면-식생-수문 통합모델 완성	○ 영구동토층 변화가 대류권 대기순환 변화 가능성 정량적(수치적) 재현 ○ 세계 최초 북극 대기 황성분과 인근 지역 일차생산량 변화와의 시공간적 관계 규명(자체 개발 시스템 현장 설치) ○ 다른 지역에 비해 상대적으로 연구가 덜 이루어진 북극 동토층을 대상으로 한 미생물 분포와 환경 인자간 상관관계 도출 ○ “미래 고위도 동토층 툰드라 식생 증가가 북극 온난화를 가속화 한다“라는 명제 도출 (2014. 10월 Nature지 하이라이트 선정) ※ (Jeong *et al.*, 2014, Environmental Research Letter) ○ 미래 예측도 향상에 기여 (북극의 환경변화가 한반도에 미치는 영향에 대한 차별화된 미래기후 시나리오 제시) ※ (Jeong *et al.* 2010, Climate Change Letters) ○ 스발바르 및 북극 대기 입자 특성 연구 논문 발표	세계 극지연구 네트워크의 접점(Node)으로서의 위상 확립과 북극권 환경연구 중점 추진 (상위 10% 이내 9건; 상위 5% 4건 포함)
정치·외교·사회적 성과	○ 북극권의 급속한 기후환경변화로 인한 과학적, 정치·경제적, 외교적 변화 등 글로벌 이슈의 국가적 대응(한-캐나다, 한-덴마크, 한-미 북극공동연구 아젠다 도출 성명발표) ○ 북극이사회 정식옵서버 국가 지위확보의 공헌 및 의무 시행과 국가 정책적 미션 실행 ○ 사진전 개최, 메스컴 등 활동 국가연구개발사업 홍보	○ 글로벌 이슈에 대응과 국제사회 동참 및 우리나라의 국익 확보와 과학발전에 기여할 접근성 강화 ○ 북극이사회 국가(미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드(덴마크), 러시아 등)와의 연구 협정 체결 및 국제 공동연구 활성화 주도 ○ 대국민 홍보로 국민 자긍심 고취 및 알권리 제공	세계 최초로 단일 국가연구개발사업에서 북극이사회 국가와의 양자 또는 다자협력 체결

구 분	내 용	의 의	비 고
기술적 (인프라) 성과	○ 북극이사회 국가의 환북극 동토 지역 내 환경변화 관측 거점 확보 ○ 내한성 입체형 무인정밀 첨단 시스템 설치와 ICT 융복합 자료획득 및 전송시스템 개발 ○ 알래스카 놈 캠퍼스(NWC) 내 한-미 국제공동 KOPRI-Lab 설치	○ 북극지역에서의 국제공동연구 기반 마련 ○ 극한지 내한성 입체형 무인정밀 첨단시스템(대기-토양-생물/생태계 등 종합적 환경변화 특성 관찰) 및 ICT 융복합 자료획득 및 전송 시스템 개발 ○ 현장 채취 시료의 빠른 전처리 작업으로 자료의 신뢰성과 정확도 제고	국내 산·학·연 기술 능력 제고 및 기술확산
기타 성과	○ 북극권 활동영역 확대와 글로벌 이슈 대응 전략 수립 및 국제사회 기여 ○ 국제기구, 국제협력 활동 강화 및 국제사회 기여	○ 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, 그린란드 등과 대등한 위치 또는 수월성 연구 분야 역량 확보 및 북극활동의 위상 제고 ○ 국제북극과학위원회(IASC) 워킹그룹, NySMAC 회의 한국대표 등으로 활동	국제적 동등성 확보

KOPRI 극지연구소

2. 과제 수행 세부결과

가. 핵심내용 : 관측 거점 확보 및 극지형 정밀 무인첨단측정시스템 개발과 관련한 원천 요소기술 개발, 적용, 환경변화 특성 분석

1) 목표의 도전성과 혁신성

- 세계 최초로 북극이사회 국가(미국,캐나다,노르웨이,덴마크(그린란드),러시아 등)와의 양자, 다자협력 체결을 통한 4개 관측 거점❶ 확보 및 정밀측정시스템 개발· 운영
  - •현재까지 1개 국가가 북극권 국가내에 다각적인 환경변화 관측 거점을 확보하고 국제공동연구를 수행하는 국가는 우리나라 이외에 전무함

- 가혹한 북극 기후환경에서의 내한성 입체형 무인정밀첨단시스템❷ 설치와 ICT 융복합 자료획득 및 전송시스템 개발(대기-토양-생물/생태계 등 종합적 환경변화 특성 관찰)
  - •북극지역에서의 내한성 종합적, 입체적 관찰 시스템은 본 과제에서 수행하는 것이 독보적이며 혁신적인 것으로 국제사회에서 인정받고 있음("CAPEC"은 본 과제가 국제사회에서 인정받아 명명된 북극연구 프로그램 명칭임)

2) 달성 과정의 적절성

- (북극이사회 국가와의 국제협력 수행) 관측 거점의 성공적인 확보를 위해 긴밀한 국제협력(MOU, LOA 등 4개 국가와의 협정 체결)❸ 체제 구축
  - •북극은 남극과 달리, 북극해를 둘러싼 북극권 국가의 영유권이 주장되고 있어, 원활한 연구수행을 위해서는 과학적·외교적 국제협력이 필수적임

- (국제협력 강화) 국제북극연구활동(AMAP, ICARP III)에서 제시한 연구 주제 설정(참고자료 별첨) 및 세계기상기구 GAW(Global Atmosphere Watch) 프로그램 중심으로 국제공동연구 수행
  - •공동연구 기관 : 미국 알래스카페어뱅크스대학/국제북극연구센터, 노르웨이 극지연구소, 캐나다 극지지식청, 그린란드(덴마크) Aarhus 대학 ☞ 국제공동연구 수행을 통해 본 과제의 역량 강화 및 국제적인 선도 연구프로그램으로 육성

- (거점 확보 추진) 환북극권 동토 지역 내에 환경변화 관측 거점 확보❹ 및 안정적 자료 생산과 전송 체제 구축
  - •미국 알래스카 놈 소재 UAF-NWC 현지에 한-미 북극공동연구실 개소(2015. 7. 29)를 통한 연구 기반 확장
  - •한-노르웨이 제플린관측소 동토대기 구름응결핵 연속관측 DB 기반 구축
  - •각 관측 거점에서의 원활한 자료 수집 및 획득을 위한 GPS/USN기반/cyber-infrastructure 기술 개발과 현장 적용
  - •메탄/이산화탄소 플럭스, 에어로졸, 북극대기 황성분 (DMS), 블랙카본 등 자료 생산 및 DB 구축

- (외부 환경 변화 극복) 북극권 국가의 연구 동향이나 정책 변화 반영에 따른 공동연구의 방향성 조정
  - •북극권 이사회 국가(미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드(덴마크), 러시아, 아이슬란드 등)들의 북극권 환경변화에 대한 연구 동향과 정책 분석, 본 과제 수행 진행 방향에 접목
    - ※ 단, 아이슬란드는, 본 평가기간 내 사항은 아니지만, 2016년 이후의 거점 확보 목표로 추진 중. 2015년 11. 10 아이슬란드 대통령의 극지연구소 방문시 동토층 공동연구 제안, 향후 협력체계 구축 등 한국의 합류 기대

(기타 연구과정상 타 기관 모범사례) 정부 정책(북극연구의 활성화 등 '북극정책 기본계획' 등)에 대한 자발적, 선제적 업무 수행

•국제협력의 다변화 또는 양자협력을 통해 정부 정책(북극연구의 활성화 등 '북극정책 기본계획' 등)의 효과적 이행

3) 성과의 질적 우수성 (2013.1. ~ 2016.6.)

북극권 5개 국가들과의 공동연구 협력 체결❺을 통해 환북극 동토 지역 내 환경변화 관측 거점 확보

•미국 알래스카 카운실 제1거점, 캐나다 캠브리지베이 제2거점, 현장 조사, 노르웨이 스발바르 제3거점, 그린란드 제4거점 확보(러시아 거점은 2016년에, 아이슬란드 거점은 2017년에 확보 예정)

•알래스카 놈 캠퍼스내 KOPRI-Lab 설치❻를 통해 채취 시료의 빠른 전처리 작업으로 자료의 신뢰성과 정확도 제고

내한성 입체형 무인원격 정밀측정시스템 설치·운영 및 환경변화 특성 규명 기반 구축

•동토층 장기 감시 기술 및 변화량 추적 기술 개발

- USN 기반, cyber- infrastructure 기술 개발 및 적용
- 동토-대기간 온실 기체 순환 이해를 위한 에어로졸 관측 시스템 등 운영을 통해 북극권 온난화의 변화특성의 지속적인 모니터링 시스템 구축❼

❖ 연구 내용 및 방법 : ET/IT/BT 기술 등 활용 환경관측 시스템 구축

저농도 북극대기 황성분 연속 관측 성공

•자체 개발한 시스템을 현장에 설치하여 실시간 북극 대기 황성분 (DMS) 장기간 연속 관측 성공(약 1~2시간 주기 정밀 관측)❽

•공기괴 기원에 따른 대기 황성분 (DMS)과 일차생산력(Source Strength)과의 상관관계 규명

관측 거점 확보, 입체형 무인원격 첨단측정시스템과 북극공동현장연구실 설치 등으로 이산화탄소, 메탄 플럭스, 에어로졸 등 관측요소의 연속성 유지

☞ 환경변화 특성 분석 기반 강화 및 동토 공학적 분석 시행

•국내 산학연 공동연구 유니트 체제를 유지하고 북극권 국가와의 데이터 공유 및 공동 분석을 통해 우수 성과 창출을 위한 연구수월성 강화

기후냉각물질 연속관측 체계 구축을 통한 극지방 기후변화 피드백 기작 규명

•세계 최초 북극 대기 황성분과 인근 지역 일차생산량 변화와의 시공간적 관계 규명

나. 핵심내용 : 북극권 동토층의 환경변화 특성 규명

1) 목표의 도전성과 혁신성

- 기존 연구와의 차별적 수월성을 획득할 수 있는 최신의 분석기술을 활용하는 도전적 목표 설정
  - •최신 분석 기술(열분해-기체크로마토그래피-질량분석기 다각적 활용)을 이용하여 대용량의 유기물 특성 데이터 분석
  - •유기물의 특성과 식생 및 다양한 토양 환경인자와의 상관관계가 규명❶을 목표로 설정
- 동토층 연구에 유용한 자료 획득 및 분석을 통한 연구 성과 도출을 목표로 설정
  - •기후변화에 취약한 고위도 북극 유기물의 특성을 분석한 자료와 결과 매우 희소
    - 접근성 및 기술적 한계로 인해 그간 연구 수행이 어려웠던 북극권 영구동토층에서 코어시료 확보 및 물리화학/생물학적 특성 규명

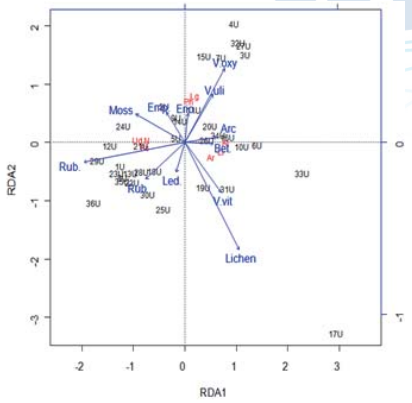
2) 달성 과정의 적절성

- (국제협력 강화) 접근성과 신뢰성 확보를 위한 덴마크 코펜하겐 대학의 미켈슨 교수 연구팀이 2004년에 설치한 장기기후변화모사 실험구에서 국제공동 연구 시행
  - •기후변화 모사 실험구 내 토양 환경인자 데이터 제공, 토양 유기물 특성 분석
- (현장 샘플링과 공동분석 단계 추진) '11/'12년 : 공동연구 논의 및 토양 샘플링 ⇨ '13~'14년 : 토양 분석 실시 ⇨ '14~'15년: 자료 분석 및 논문 작성
  - •기후변화 모사 실험구 50개 지점 토양 샘플링, 13C NMR 이용 토양 유기물 특성 분석
  - •지형 및 토양 환경의 공학적 공간 분석(상대고도, 경사도, 전기전도도, 유기물 함량 등)
- (탐사간 장애 극복) 혹한의 기후 속에서 현장 탐사 장비의 장기간 운영·유지
  - •기후변화 모사 실험구의 장기간 유지와 지속적 환경변화 모니터링 이행을 위해 매년 현장 방문을 통한 지속적 유지보수와 측정 센서 검교정 등 이행
- (기타 연구과정상 타 기관 모범사례) 연구 시료 확보를 위한 동토 코어링 국내 최초 수행
  - •미국 공동연구팀으로부터 기술 이전 받아 독자적으로 1~2m 길이의 동토 코어 24개 확보

3) 성과의 질적 우수성 (2013.1. ~ 2016.6.)

- 알래스카 36개 지점에서 샘플링 한 토양으로부터 세균 군집 연구를 수행하여, 토양 미생물 분포와 토양 깊이 및 pH와의 상관관계 규명❸ (2014. 8월 FEMS Microbiology Ecology 지 게재/ 교신저자)
- 알래스카 36개 지점에서 샘플링한 토양으로부터 토양 유기물 특성 분석
  - •유기물 특성이 수분함량, pH, 토양 C/N비와 상관관계가 있음을 규명
- 알래스카 동토 활동층 깊이별 미생물 군집 및 토양 특성 분석
  - •알래스카 50 cm 코어 시료❹로부터 미생물 군집 구조 및 활동층의 토양 특성 분석❺
- 그린란드 자켄버그 지역의 기후변화 모사 실험구에서 장기간 온도 상승이 유기물의 양뿐만 아니라 질적 변화를 야기할 수 있음을 규명 (현재 논문 작성 중)

- 그린란드 자켄버그 지역의 장기간 기후변화 모사 실험 결과 획득
  - •유기물 특성 분석(13C NMR)을 통해 장기간에 걸친 기후변화에 의한 토양 유기물의 질적 변화 확인❻
- 알래스카 동토 층위별, 영구동토층 깊이별 미생물 군집구조 및 토양 특성 분석
  - •동토층 깊이별 미생물 군집구조와 토양 특성 간의 상관관계 도출
- 캐나다 캠브리지 베이 기후변화 모사 실험구 운영 및 모사실험 1년 후 토양 환경 특성 조사
  - •온도상승챔버❼, 온습도 센서, NDVI 센서의 성공적 운영 및 자료회수를 통한, 기후변화 모사 실험 1년 후 토양 미생물 군집 및 유기탄소 함량 분석 완료
- 기후변화에 따른 동토층 유기물 분해기작 규명
  - •기후변화 모사 1년 후 실험구를 대상으로 온실기체 발생량, 체외효소 활성도, 미생물 생체량 분석 완료
  - •기후변화 모사에 따른 토양 내 체외 효소 활성도 변화 확인
- 관측 거점에서의 기후 변화 모사에 의한 대기·식물·토양·미생물 변화 이해를 통한 환경변화 특성 규명
  - •기후변화 모사 3년 후 유기물층과 미네랄층 토양의 물리·화학적 특성 변화 이해❽
  - •RNA기반 염기서열 분석을 통한 기후변화에 따른 활성 미생물 군집 변화 이해
  - •인지질 지방산 분석(PLFA)을 통한 토양 미생물 군집의 생리적 특성 및 생물량 변화 이해
- 알래스카 지역의 토양 층위별 미생물–토양 환경 상관관계 규명과 환경 인자 간 역할 이해
  - •영구동토층과 활동층에서 층위별 미생물 군집구조와 토양 환경 인자 사이 상관관계 도출



– 알래스카 거점에서의 다변량 (SOM) 분석
: 1축을 기준으로 왼쪽, PCA 결과 1축 왼쪽에 있는 샘플들; Ps 우점하고 moss biomarker가 있는 지점,과 Moss와 진들딸기가 높은 조성을 갖고 있음을 분석함으로써, 새로운 현상 규명 기회 확보

- •토양 메타지놈 분석을 통한 동토층 층위별 생물구성–생화학적 기능–환경 인자 간 상호관계 제시
- 종합적 기기 활용을 통한 북극 지역 토양 유기탄소 및 미생물 특성에 대한 정밀 분석 기반 마련❾
  - •유기물량이 차이가 많은 지역을 대상으로 열분해–기체크로마토그래피–질량분석기를 이용한 유기탄소 특성 분석 활용 기반 제공
  - •환북극권 4개 지역에 걸친 토양 미생물 특성 분석 가능성 제고
- 온실기체 발생량, 체외효소 활성도, 토양 내 메탄 생성·소멸 미생물 생체량 변화 분석을 통해 기후변화에 따른 동토층 유기물 분해기작 이해

다. 핵심내용 : 북극권 동토 환경 변화의 수치적 재현과 미래 예측

1) 목표의 도전성과 혁신성

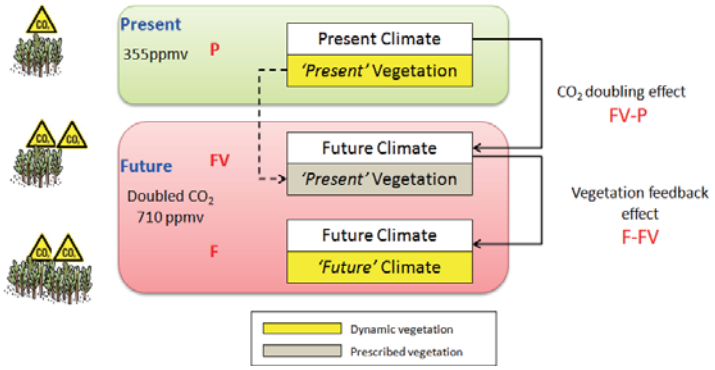
- 극지역 영구동토층이 유도하는 기후변화 피드백 메커니즘 이해 및 동아시아 대기 대순환에 미치는 영향의 파악
  - •북극 동토층 식생변화가 대기순환에 미치는 영향을 세계 최초로 수치적 재현 목표❶ 설정
    - 영구동토층에서의 지표 조건 변화가 중위도 기후에 영향을 준다는 가설을 개선된 수치모델을 통해 근거를 제시함으로써 기후예측 기술 향상에 기여할 수 있는 혁신적 방안 도출
- 영구동토층 변화가 대류권 대기순환에 영향을 미칠 수 있음을 정량적(수치적)으로 재현하는 세계최고 수준의 연구성과 창출을 목표로 설정(국내 최초)

2) 달성 과정의 적절성

- (환경변화 정량화 및 정밀 분석 추진) ~ '15년: 북반구 영구동토층 고위도 식생변화의 기후피드백 효과 정량적 규명, '14~'15년: 영구동토층 식생변화 재현
  - •영구동토층 기후변화에 대한 피드백 정량화, 그 결과를 활용하여 변화를 재현하는 최적의 과정으로 수행되었으며, 획득한 결과에 대해 우수한 저널에 논문 출판 완료
- (연구간 장애 극복) 국내 학·연 공동연구(전남대학교 해양학과 기후분석연구실)를 통해 컴퓨팅 리소스 공동활용 ☞ 수치 모델링 성공
  - ※ 빅데이터와 다변량 자료를 활용한 수치모의 과정에서 국내 컴퓨터 리소스 한계로 인한 영구동토층 모의, 중위도 연계성 수치적 재현 극복
- (기타 연구과정상 타기관 모범사례) 학·연 공동연구 모범 제시 : 희소성 있는 영구동토층 연구 수행을 통해 새로운 과학적 사실 규명(우수성과 창출)

3) 성과의 질적 우수성 (2013.1. ~ 2016.6.)

- 북반구 영구동토층 고위도 식생변화의 기후피드백 효과가 얼마나 큰지 정량적으로 규명
  - •"미래 고위도 동토층 툰드라 식생 증가가 북극 온난화를 가속화한다"라는 연구 결과가 2014.10월 Nature지 게재 (주저자 / 연구동향 소개에서 Research Highlight로 선정)❷



- 동토층 표층 식생의 녹색도를 나타내는 NDVI 자료와 기온, 강수량, 토양 수분, 강설량 등의 기후 자료 통계 분석, 지구 온난화에 따른 식생과 기후요소의 상호 작용 규명❸

- 영구동토층 사이트 관측에 기반한 국지 지면-생권 모델링 시스템 구축
  - NCAR 개발 CESM_V1.2 활용 영구동토층의 식생 모의 성능 검증 및 식생-탄소 순환 모의 능력 검증 (극지(연) 내 서버에 시스템 구축, 자료 분석에 활용)
- 유라시아 동토층 식생변화가 동아시아 지역 기후에 미치는 영향 분석 ☞ 북극권과 중위도 지역의 대기변화 관계 규명
  - 식생의 변화로 인한 알베도 효과로 인해 북극권의 지표기온과 강수량 뿐 아니라 중위도의 대기 파동 특징 및 기후 변화 야기 사실 규명(한반도 겨울철 한파 관련 예보 등에 활용)
- 지구형 모델과 동토층 모델과의 성공적 탑재(탄소순환, 메탄 방출 모듈 검증 및 접합)
  - 지구시스템모델인 CESM(Community Earth System Model)의 탄소순환 모듈 장착 버전인 CNDV 코드 동토층 기후 시뮬레이터에 성공적 탑재(120개 CPU core 활용, 자료 생산)
- 영구 동토층 지면-식생-수문 통합모델 완성❹ ☞ 영구동토층 식생 모의 성능 검증 및 식생-탄소 순환 모의 능력 검증에 활용(미래 예측도 향상에 기여)
  - 미래 영구동토층 식생변화가 북극 해빙 감소 가속화 및 온난화 증폭을 수치적으로 입증
  - 빙권 기후변화 모의 및 대기/식생/해빙/지면/수문 종합 모델링의 도전적 방법 수행

  – 가을철 해빙면적. 현재 기후에서의 해빙면적(녹색 P), 툰드라 식생 변화 없이 이산화 탄소만을 2배 증시 미래 해빙면적(노란색 FV), 툰드라 식생 변화를 고려하고 이산화 탄소를 2배 증시 미래 해빙면적(붉은색 F).❺

  – 북반구 영구동토층 고위도 식생변화의 기후피드백 효과를 정량적으로 입증

  – 영구동토층 내 식생 피드백의 고려가 미래 기후 모의에 중요함을 입증

  – 이러한 식생 피드백은 북반구 겨울철 지표온도증가 뿐만 아니라 가을철 북극해빙 면적에도 큰 영향을 줌을 밝힘❻

- 기후변화에 따른 북미 동토층 지역의 기상/기후 변동성 탐지 및 분석
  - 동토층 지표면 온도 분포에 결정적 역할을 하는 북극진동과 유라시아 적설분포의 관련성 조사
- 유라시아 눈덮임 변화 분석을 통한 가을철 유라시아 적설과 겨울철 북극진동의 높은 상관성 확인
- 북극 동토층 관측 거점에서의 측정시스템을 통해 생산되는 동토 생권/빙권 자료를 예측에 활용, 수월성 있는 모델링 연구 성과 도출
  - 현재의 북극 동토 기후변화 관측 시그널이 유의미한 수준인지에 대해 대기 플럭스 자료로 구동된 지면모델 10개 이상의 앙상블을 이용한 실험으로 검증
  - 기존 영구동토 관측연구 성과를 검증하는 중요한 자료로서 활용
- 탄소순환 및 빙권 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 대한 차별화된 미래기후 시나리오 제시
  - 극지역에서 개선된 물리과정이 탑재된 모델 사용, 기존 연구들과 차별화된 고위도 및 중위도 기후변화 시나리오 제시와 예측 정확도 향상
  - 유럽 및 아시아 국가가 중심이 된 빙권 예측 프로그램에 한국을 대표하여 참여, 고위도 미래 기후 변화 연구 주도권 지속 확보

극지연구소

[북극해 연안 5개국 주요 동토 거점 연구시스템 구축 현황]

○ 미국 2012년 구축 완료

- 미국 국제북극권연구센터(IARC)와 MOU를 기반으로 2011년 현장 답사, 에디 공분산 플럭스 시스템 설치
- 2012년 USN 지중온습도/지표온습도/영상 원격관측시스템 개발 설치로 거점 구축 완료
- 2013년 이후 매년 식생카메라와 NDVI 센서 등 추가 장비 설치와 영구동토층 코어링, 전기비저항탐사 등 연구활동 수행 중

○ 캐나다 2013년 구축 완료

- 국립천연자원부(NRCan)와 MOU를 기반으로 2011년 현장 답사
- 2012년 온도상승 챔버와 에디 공분산 플럭스 시스템 설치
- 2013년 토양 온도, 수분 센서, 대기 온습도 센서, Black carbon 관측 장비 설치로 거점 구축 완료
- 2014년 이후 매년 NDVI 센서, 메탄 센서 등 추가 장비 설치와 토양 시료 확보 등 연구활동 수행 중

○ 노르웨이 2014년 구축 완료

- 노르웨이극지연구소(NPI)와 MOU를 기반으로 2012년 현장 답사
- 이태리 국립연구회(NRC) 지구환경부(DEE)와 MOU를 기반으로 2013년 에디 공분산 플럭스 시스템 설치
- 2014년 CRDS방식 CO_2/CH_4 측정기 설치로 거점 구축 완료

○ 그린란드 2015년 구축 완료

- 2011년 그린란드 자켄버그 현장 답사 시행
- 2012년 덴마크 Aarhus대학교와 MOU를 기반으로 자켄버그 장기 기후변화 모사 실험구에서 토양 시료 확보
- 2013년 새로 신설되는 노르드* 기지로 거점 변경 결정
  * 세계에서 최북단에 위치한 육상기지(북위 81도)
- 2014년 설치할 연구장비 논의, 장비 구입 및 사전 테스트
- 2015년 노르드 기지에 기상 및 플럭스 시스템, 토양 온도/열 플럭스 센서 설치로 거점 구축 완료

[참고] 환북극 동토층 관측거점별 개요-1(`16.6월 현재)

관측 거점	1 거점	2 거점	3 거점	4 거점	5 거점
관측지명 (국 가)	알래스카 카운실 (미국)	캠브리지베이 (캐나다)	스발바르 (노르웨이)	자켄버그, 노르드※ (그린란드)	러시아
위 경 도	64˚ N, 165˚ W	69˚ N, 105˚ W	79˚ N, 12˚ E	74˚ N, 20˚ W (81˚ N, 16˚ W)	(미정)
협약체결연도	2012년	2012년	2012년	2012년	2010년
구축완료연도	2012년	2013년	2014년	2015년	2016년 (예정)
조사 기간	2011년 8월~현재	2012년 7월~현재	2012년 9월~현재	2012년 8월~현재	(2016년 예정)
관측거점 선정시기	‘11.8월	‘12.7월	‘12.9월	‘12.8월(자켄버그) ‘15.10월(노르드)※	(선정 예정)
상대 연구 기관과 협약 체결 (연월일)	미국 국제북극권연구센터 (IARC) MOU (2007.05.17) (2012.06.02) 5년단위 갱신	캐나다 국립천연자원부 (NRCan) MOU (2010.02.02) (2015.02.13) 5년단위 갱신	노르웨이 극지연구소(NPI) MOU (2012.09.20) 5년단위 자동연장	덴마크 Aarhus대학교 MOU (2012.09.09) 만료기간 없음	러시아 호소학 연구소(LIN) MOU (2008.09. 29) 5년단위 자동연장
	미국 알래스카 페어뱅크스대학 (UAF-NWC) MOA 교환 (2012.05.09)	캐나다 누나부트연구소(NRI) Scientific Research License 교환 (2012.06.11) 5년단위 갱신	이태리 국립연구회(CNR) 지구환경부(DTA) MOU (2012.02.22) 만료기간 없음		러시아 러시아학술원 극동지부 토양과학/ 생물학 연구소(IBSS) MOU (2010.07. 05) 5년단위 자동연장
	국제영구동토층협회 (IPA) 가입 (2011.05.05)	캐나다 ADAPT, CAPEC 간 LOU (2014.12.22)	노르웨이 극지연구소(NPI) LOA (2014.04.03)		
	KOPRI-IARC/UAF 북극공동연구실 개소 (2015.07.29)	※한-캐나다 정상회담 (북극공동연구) 후속 조치로 지속 수행 중	독일 극지연구소(AWI) LOU CAPEC-PAGE21 (2014.03.02)		

[참고] 환북극 동토층 관측거점별 개요-2(`16.6월 현재)

1 미국(알래스카 카운실)

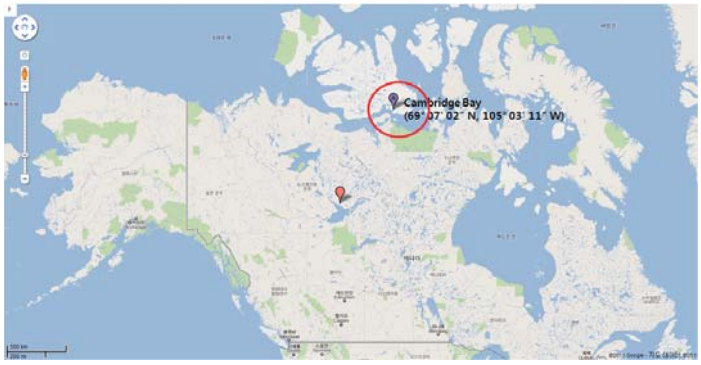
[미국 알래스카 Nome* 및 Council** 위치도]
* 숙소지 및 알래스카대학교 NWC 소재
** 관측거점

[대기환경 측정시스템]

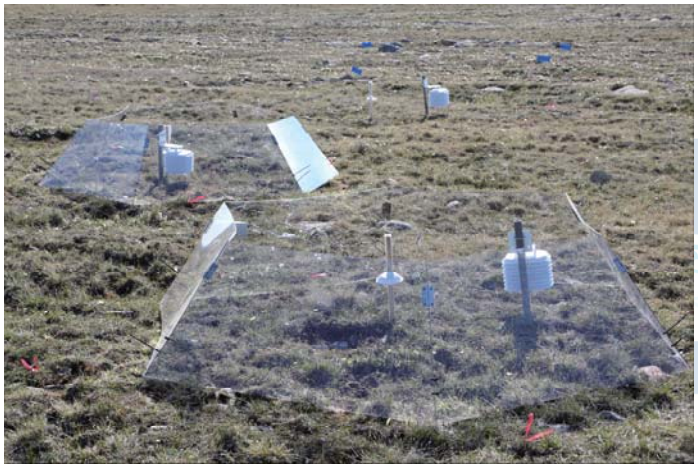
[토양환경 측정시스템 모습]

[알래스카 NWC 한-미
북극공동연구실 설치('15.7월)]

2 캐나다(캠브리지베이)



[캐나다 캠브리지베이 관측 거점 위치도]



[거점 내 온도/강수량 증가 실험을 위해 설치된 챔버]

[에디공분산 장비]

3 노르웨이(스발바르)

[제플린 대기 관측 기지]
(한-노르웨이-스웨덴 북극공동 관측 거점)

[한-이태리 공동연구 거점]
(Gruvebadet 관측기지)

[생태 모니터링 거점 폿말]

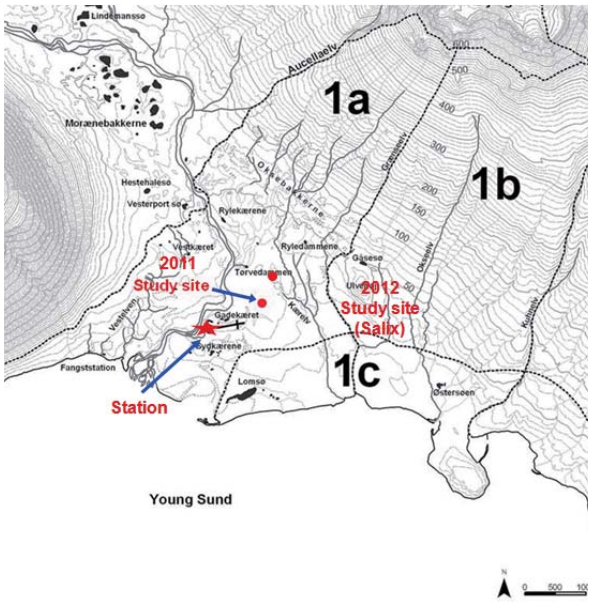
[기체 샘플링 및 식물조사 포인팅 활동]

극지연구소

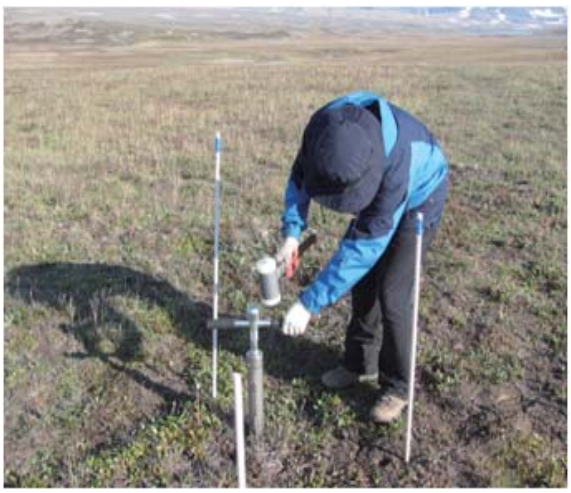
4 그린란드(자켄버그)

[그린란드 자켄버그와 노르드 관측 거점 위치도]

[극지연구소-그린란드(덴마크) Aarhus 대학과 기관간 MOU 체결]
(이명박 대통령과 덴마크 총리 배석)



[그린란드 자켄버그 샘플링 포인트]



[그린란드 자켄버그 토양 샘플링]

KOPRI 극지연구소

※ 국제 협력 주요 성과

LETTER OF UNDERSTANDING

between

Korea Polar Research Institute

and

The Department of Earth and Environment – National Research Council of Italy

on

Co-operative studies of processes in the low atmosphere and at the air-snow-land interface in the Arctic.

The present Memorandum of Understanding (hereafter MoU) has been concluded by the Korea Polar Research Institute (hereafter referred to as "KOPRI"), having its headquarter in Get-Pearl Tower, 12 Gaelbeol-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Korea and the National Research Council of Italy – Department of Earth and Environment (hereafter referred to as CNR-DTA), having its headquarter in Piazzale Aldo Moro 7, 00185 Roma, Italy.

General Statement

The KOPRI and CNR-DTA, both hereafter referred to as "Party" or "the Parties" hereby confirm their interest to jointly start co-operative studies on climate and climatic changes in the Arctic, with particular focus on aerosols, permafrost and air-surface interactions, including collaborative field activities at Ny-Ålesund (Svalbard). The effectiveness of the MoU begins as Parties have signed it. The Signatory Parties are free at any time to discontinue their participation to common activities.

Preamble

The Parties, considering the role of the processes occurring in the lower layers of the atmosphere in the climate system and climatic change at high latitude while recognizing the paucity of data available for this kind of high-impact studies, and desiring to strengthen scientific and technological cooperation on such topics between Italy and Korea, on the basis of mutual interests,

AGREE TO ESTABLISH

Co-operation activities – hereafter called "programme" – that in a cost-effective way could advance our understanding of atmospheric processes driving Arctic climate and determining climate changes at northern high latitudes, as outlined in the following articles:

Article I - Scope

I. Through the programme CNR-DTA and KOPRI aim at better assess the production, accumulation and dispersion processes of minor constituents (BC, NOx, aerosols, etc.) in the Arctic atmosphere, characterizing physical and chemical properties, as well relative impact of local sources vs. long-range transport, also quantifying direct and indirect effects.

II. CNR-DTA and KOPRI will maintain joint measurement activities at Ny-Ålesund in Svalbard Islands to collect data useful to this assessment.

III. As a general principle, co-operative activities will be carried out on the basis of mutual benefit and will be subject to effective funds availability.

Article II - Implementation of cooperation activities

In the frame of the respective monitoring programmes established at Ny-Ålesund, KOPRI will join activities at *Climatic Change Tower* – CCT, contributing to upgrade the scientific infrastructure. Moreover, CNR and KOPRI will coordinate respective activities at Gruvebadet lab and Zeppelin station, with the aim to better address the characterisation of stratification of aerosols in the ABL. In such a way, the unique opportunity offered by local orography will be gathered.

Guidelines for such measurements as well as a list of instruments are enclosed in the technical-scientific addendum to this document to be considered part of this MoU and which will be revised yearly during monitoring meetings of the cooperation.

Measuring activities at CCT as well as other joint field activities at Ny-Ålesund will be discussed and defined on yearly base during such meetings. If necessary, plans could be modified while in progress through mutual agreements of the Parties.

To carry out joint activities, CNR-DTA and KOPRI will provide qualified personnel. Modalities will be discussed to reach in a cost-effective way the goal of year-round operations at Ny Alesund with personnel on field.

To implement and maintain on-field activities at Ny-Ålesund, particularly during winter season, CNR-DTA and KOPRI may indeed, by mutual agreement, discuss with other parties their involvement in the programme.

All personnel taking part to the joint activities could be hosted at Ny-Ålesund Italian and Korean station facilities or possibly at third party facilities if needed by the programme or to run common projects.

Article III - Role of the Parties

The Parties should perform the following tasks:

a) to jointly identify priorities for cooperation, taking into account technical and financial feasibility
b) to establish the cooperation framework: field and research activities, key persons, financing
c) to review on-going activities with mutual consultation about developments and updates; this review will be carried out yearly by the contact points and delegations of experts previously identified, during the periodic monitoring meetings
d) to closely maintain an exchange of information.

Article IV - Costs of cooperative activities

The programme will be undertaken within the scientific remits and budgetary appropriation of both Parties. Funding of each single activity as well as questions arising by possible costs' increase of running activities will be discussed during the meetings dedicated to the assets verification, and are in any case subject to effective funds availability. Programme updates will be undertaken by the Parties on the basis of mutual agreements on financial issues. The following criteria apply as general guidelines:

a) with respect to the activities at CCT and at other facilities, each Party will contribute to the functioning, calibration and maintenance of its own instruments and related measurements.
b) expenses and costs charged by Kings Bay AS[1] for routine annual testing as well as testing following extreme events, will be reasonably balanced by the two Parties as specified in the Addendum to this MoU
c) on field personnel will be shared in a way to be defined each year during periodical verification meetings
d) any other extra-cost, arising by joint activities in the frame of this MoU, will be discussed and agreed by the Parties following the criteria of a reasonable balance
e) possible agreements with third parties that may contribute to support the activities through funds, instruments and personnel on field, will be made, submitted to CNR-DTA and KOPRI joint approval.

Article V - Intellectual properties

Each Party retains the property rights over the results of their scientific and technological research patented or otherwise acquired prior to the signing of this MoU or lying outside the scope of application.

[1] Kings Bay AS is the Norwegian non-profit organization in charge of Svalbard activities logistic and management.

Knowledge deriving from the execution of this programme will be shared by the Parties and possibly by other bodies involved in research projects, particularly for results of on-field activities at Ny-Ålesund. Technical procedures to share data and results will be identified in periodic verification meetings by contact points and experts' delegation.

The Parties recognize the free transmission principle, to the scientific bodies both of their own countries and/or of participating third countries, of scientific data obtained in and through research activities under the programme, providing that intellectual property rights of the Parties and of their associated research bodies are always explicitly mentioned.

Any publication, report or conference talk about a scientific or technological research result carried out in the framework of this MoU must explicit mention the scientific co-operation between CNR-DTA and KOPRI on the themes indicated above.

Complete scientific courtesy will be observed, and any use of data will be discussed directly with the responsible for production and collection of the data. As general criteria, co-authorship will be offered to other parties if their measurements and results are utilized for the scope of scientific publications, unless different and mutual agreement.

Article VI - Damages - Liability

None of the Parties can be considered liable for the consequences of an inapt use made by the other Party of information or knowledge received or originated in the context of this MoU.

The Parties expressly agree to exonerate each other from any liability for damages to their own personnel or equipment due to reasons attributable to the other Party, without prejudice to malicious or grossly negligent behaviour of their own personnel or personnel that collaborates with one of the Parties. The principle just outlined is applicable for activities carried out at Ny-Ålesund and on the premises of one of the Parties.

Personnel have to obey behavioural and safety rules, both of stations and facilities/laboratories, established by the hosting part. In particular, in Ny-Ålesund, personnel of KOPRI hosted at the Italian station *Dirigibile Italia* or operating on the *Amundsen-Nobile Climate Change Tower* (CCT) will follow safety rules and plans that CNR-DTA developed for these facilities. Personnel of CNR-DTA hosted in the Korean station will follow safety rules active there. Documents illustrating these rules will be formally exchanged by the Parties. Moreover the whole programme will agree with Ny-Ålesund regulation for the safety of personnel hosted in each station/facility.

Article VII - Periodical verification of cooperation

The Parties will delegate a person as contact point, in charge to coordinate and implement scientific tasks indicated in Article I, as well as tasks indicated in Article III.

To monitor the progress of research cooperation, delegation of no more than 5 experts of each Party will meet at least once per year. Persons in charge of station/facilities at Ny-Ålesund (no more than two per Party) will join the meetings to coordinate logistic and technical aspects of on-field research activities.
Meetings shall be held, following tasks indicate in Article III, when agreed by both Parties.

Article VIII - Additional Activities

Nothing in this MoU will be construed as limiting collaboration on items and tasks not included in this agreement.
Information will be shared between the Parties on planned participation in multinational coordination activities and consideration will be given to the use of these opportunities for future joint activities.

Article IX - Validity of the Memorandum

This Memorandum is valid from the day it is signed and will remain in force for a period of five years. This Memorandum will be automatically extended thereafter for successive periods of five years each, unless revoked through an official communication by one of the Parties, at least six months before the MoU expiration date.

This Memorandum can be amended by mutual agreements of the Parties.
IN WITNESS WHEREOF, the Parties have designed two original copies of this Agreement to be signed by their duly authorized officers of representatives at the date stated above.

Dr. Hong Kum Lee	Prof. Enrico Brugnoli
President	Director
Korea Polar Research Institute	Department of Earth and Environment National Research Council
Korea	Italy
Signature	Signature
DATE Feb. 22. 2012	DATE February 22, 2012

MEMORANDUM OF AGREEMENT

The Korea Polar Research Institute (hereafter refered to as KOPRI) and the University of Alaska Fairbanks Northwest Campus (hereafter refered to as UAF-NWC), are committed to jointly developing a close relationship in order to cooperate in research in environmental and polar sciences by coordinating logistics and sharing knowledge and understanding. Both Parties agree:

1. UAF-NWC will allow KOPRI to store a shipping container inside a secured perimeter at the UAF-NWC campus. UAF-NWC will cooperate with the receipt of freight related with the research program. KOPRI will assume responsibility for costs associated with installing the storage container and logistics. After this research program is complete, the shipping container will become the property of NWC-UAF.

2. KOPRI will be fully responsible for all materials held in the shipping container prior to its transfer to UAF-NWC. This responsibility shall include, but is not limited to safe and proper: ventilation, battery storage, fuel storage.

3. KOPRI shall remain responsible for all harm arising from their storage on the UAF-NWC without regard to future ownership of the shipping container.

4. When the shipping container's ownership transfers to UAF-NWC, all remaining contents shall become the property of UAF-NWC.

5. UAF-NWC will use the same care to protect the storage container and its contents that UAF-NWC uses to protect its own property.

6. Both parties to strive to cooperate in a appropriate and cost-effective way.

7. Both parties to promote and facilitate capacity building and the exchange of information and understanding of the local community and environment. KOPRI will inform NWC-UAF and the Nome community of their discoveries and findings.

8. Project Principal Investigators (PI) nominated:
   Dr. Bang Yong Lee (KOPRI) and Dr. Larry Hinzman (International Arctic Research Center, University of Fairbanks)

9. KOPRI and NWC-UAF to collaborate for the further research activities in the Alaska with each resources, as per requested by the PI's. Sharing of the outcome from future collaborations shall follow the PI's coordination.

In witness whereof, the parties have designed two original copies of this Memorandum of Agreement to be signed by their duly authorized officers of representative at the date stated below.

Bang Yong Lee

Dr. Bang Yong Lee

Director
Division of Polar Logistics
Korea Polar Research Institute

Date: 02 May 2012

Mr. Bob Metcalf

Interim Director
Northwest Campus
University of Alaska Fairbanks

Date: 5/9/12

Korea Polar Research Institute

AARHUS UNIVERSITY

LETTER OF INTENT

Between

Korea Polar Research Institute (KOPRI)

Get-pearl Tower, 12 Gaetbeol-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-840,

Republic of Korea

And

Aarhus University

Nordre Ringgade 1, 8000 Aarhus C

Denmark

The Korea Polar Research Institute and Aarhus University;

RECOGNISING the importance of international co-operation in the field of science, technology, and higher education that was also stated in the "Memorandum of Understanding between The Ministry of Science, Innovation and Higher Education of The Kingdom of Denmark and The Ministry and The Ministry of Education, Science and Technology of the Republic of Korea on bilateral co-operation in the fields of science, technology, innovation and higher education", signed in Seoul on May 15, 2012;

RECOGNISING the need to provide high quality Polar research, and education in order to address global issues for the benefit of mankind;

RECOGNISING the mutual benefits from working together on the basis of equality and reciprocity;

hereby express a common interest to explore the opportunities for pursuing joint activities in the fields of Polar research, and education.

The exploration of the potential for cooperation may eventually lead to activities like:

- Providing mutual access to field stations, office space, laboratories, field equipment and research ships, where feasible and appropriate.
- Providing office space and logistical and administrative support at each other centers when conducting collaborative research according to local institutional standards for use of facilities.

- Developing joint research projects.
- Offering opportunities for the exchange and training of science personnel and graduate students.

Leadership of the Korean Polar Research Institute and Aarhus University will endeavor to materialize the intentions of this document.

Details of the implementation of any particular collaborative activity shall be developed further by consulting between the Parties, acting in good faith, as such specific case may arise, and will be outlined in a Supplementary Agreement between the parties. Supplementary Agreements are subject always to availability of sufficient funds at the respective institutions.

This document will be in place so long as mutually agreeable to both Parties.

On 9 September 2012

Dr. Hong Kum Lee	Dr. Brian Bech Nielsen
President	Dean
On behalf of Korea Polar Research Institute	On behalf of Aarhus University

Korea Polar Research Institute

MEMORANDUM OF UNDERSTANDING

BETWEEN

THE KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE (KOPRI)

AND

THE NORWEGIAN POLAR INSTITUTE (NPI)

THE KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE (hereinafter "KOPRI") and **THE NORWEGIAN POLAR INSTITUTE (hereinafter "NPI")** as lead research agencies for national polar programs of their respective countries,

CONFIRMING their mutual interest in developing and strengthening their cooperation in polar research and operation on the basis of this Memorandum of Understanding (hereinafter "MOU");

RECOGNIZING that this MOU establishes a framework for this cooperation in joint research and exchanges on the subjects of mutual interest;

NOTING that KOPRI and NPI are full partners of Svalbard Integrated Arctic Earth Observing System - PP (SIOS) consortium;

HAVE COME to the following understanding:

ARTICLE 1

PURPOSE

KOPRI and NPI are committed to jointly developing a close working relationship in order to achieve the following aims:

1. Cooperate in Arctic and Antarctic research by coordinating and sharing resources and data.
2. Coordinate and integrate mutual activities to enable more efficient operations and better utilization of resources.

ARTICLE 2

FORMS OF COOPERATION

Cooperation under this MOU may include the following forms:

1. Collaboration on polar research based on mutual interest, which includes, but is not limited to ;

Environmental monitoring

Climate change and its impact on ecosystems

Biodiversity and adaptation of polar organisms

Past climate reconstructions from marine and ice cores

2. Share of facilities, equipment, and logistical support services in collaborative projects where appropriate;

3. Exchange of personnel to work on collaborative projects and to facilitate capacity building in research, education and outreach programs;

4. Exchange of scientific and technical information and joint organization of workshops and seminars;

5. Other forms of cooperation as may be mutually decided upon by the Parties.

ARTICLE 3

FURTHER DEVELOPMENT OF AGREEMENTS

To further the commitments outlined in this overarching MOU, it is proposed to develop, within the scope of this memorandum, individual agreements relating to specific research ventures or logistic cooperation. Such agreements will be implemented following approval by both Parties.

ARTICLE 4

DESIGNATED REPRESENTATIVES

In order to implement cooperation under this MOU, the parties will designate appropriate representatives to identify activities for joint cooperation, and details of their implementation.

ARTICLE 5

SHARING OF INFORMATION

The spirit of this MOU is to promote sharing of information and ideas to stimulate mutual scientific development with openness, trust and respect of intellectual property. The scientific and technical results of cooperative projects conducted under this MOU will be shared and published in accordance with the data policy of each Party and specific agreements between the Parties.

ARTICLE 6

ADMINISTRATIVE ARRANGEMENTS

1. Both Parties agree to the establishment of appropriate mechanisms to advance these commitments.

ARTICLE 7

VALIDITY OF THE MEMORANDUM

This MOU will enter into force upon signature by both Parties and remain effective for five (5) years unless extended or terminated by the Parties.

The Parties agree to review this MOU every fifth year to ensure it remains relevant. Revision of the MOU can be requested by either Party at any time.

Two copies of this MOU are issued in English and each Party shall retain one signed copy.

On October 2012

Dr. Hong Kum Lee	Dr. Jan-Gunnar Winther
President	Director

Korea Polar Research Institute

Polar Knowledge Canada | Savoir polaire Canada

Memorandum of Understanding
between
Korea Polar Research Institute (KOPRI)
Republic of Korea
and
Polar Knowledge Canada (POLAR)
Canada

The Korea Polar Research Institute and the Polar Knowledge Canada (hereinafter referred to as the Parties);

CONSIDERING the importance of science and technology for their economic and social development;

CONSIDERING the ongoing scientific and technological cooperation between the Republic of Korea and Canada;

CONSIDERING the shared interest in creating and sharing new knowledge in both the Arctic and Antarctic Polar regions that will lead to new understandings at the global scale;

and

RECOGNIZING each Party's responsibility to encourage and coordinate the conduct of polar research in their respective country;

RECOGNIZING the mutual benefits from working together on the basis of equality and reciprocity;

RECOGNIZING the importance of maximizing efficiency and effectiveness through shared access to infrastructure resources and complementary expertise;

and

DESIRING to establish a framework for cooperation in scientific and technological research, which will extend and strengthen the conduct of cooperative activities in areas of common interest and encourage the application of the results of such cooperation to their economic and social benefit;

HAVE AGREED to seek and pursue opportunities that will lead to the creation of mutually beneficial collaborative projects in various and multiple disciplines of Polar research.

Such projects may include the participation of additional appropriate entities from the Republic of Korean and Canada (academic institutions, northern-based organizations, agencies of government, and the private sector) include opportunities for the exchange and training of scientific and technical personnel and graduate students.

Details of the implementation of any particular collaborative project shall be developed in consultation between the Parties, and any additional appropriate entities that wish to participate, acting in good faith, as such specific case may arise, and will be outlined in separate supplementary agreements between the Parties or additional appropriate entities.

This document will be in place so long as mutually agreeable to both Parties.

On behalf of Korea Polar Research Institute

Dr. Yeadong Kim
President

Date : 25 September, 2015

On behalf of Polar Knowledge Canada

Dr. David J. Scott
President

Date : 26 October, 2015

Korea Polar Research Institute
26, Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 21990, Rep. of KOREA
Phone : +82-32-770-8400 Fax : +82-32-770-8709

CONFIRMATION OF THE ESTABLISHMENT OF ENVIRONMENTAL CHANGE OBSERVATION SITE BY KOPRI AT COUNCIL, ALASKA

1 December 2015

Dear to whom it may concern,

The purpose of this letter is to confirm issues regarding the establishment of observation site and research activities at Council, Alaska.

Korea Polar Research Institute (KOPRI) research team has been carrying out scientific activities in Council, Alaska to establish Circum-Arctic Permafrost Observation Network to meet the needs related to the global issue and national agenda. Below information shows the details of KOPRI's research project supported by the Basic Core Technology Development Program for the Oceans and the Polar Regions of the National Research Foundation (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning.

Research Project description & Research Activities

- Project title: Circum-Arctic Permafrost Environmental Change (CAPEC) project
- Principle Investigator: Dr. Bang Yong Lee (KOPRI)
- Key Participants: Sang-Jong Park, Namyi Chae, Ji-Young Jung, Yoo-Kyung Lee
- Major research activities and facilities established at Council, Alaska

1) **Greenhouse gas exchange at permafrost site:** Based on the Memorandum of Understanding (MOU) between KOPRI and the International Arctic Research Center, University of Alaska, Fairbanks (IARC/UAF), KOPRI team established research program regarding permafrost change and related greenhouse gas (GHG) flux studies. Automatic chambers had been installed in 2011 and have been operated following summers to measure CO2 exchange of dominant tundra vegetation types at Council site. In addition, eddy-covariance system and net radiometer have been in operation since 2012 to measure GHG flux and energy budget over Alaska permafrost.

2) **Underground structure and microbial activity under changing climate:** KOPRI research team and other university-teams have carried out under-ground resistivity survey and soil coring at Council site several times since 2011. Those studies aim to understand a) seasonal/inter-annual variation of permafrost layer, b) soil characteristics, and c) microbial structure and their possible role in climate change.

Korea Polar Research Institute
26, Songdomirae-ro, Yeonsu-gu, Incheon, 21990, Rep. of KOREA
Phone : +82-32-770-8400 Fax : +82-32-770-8709

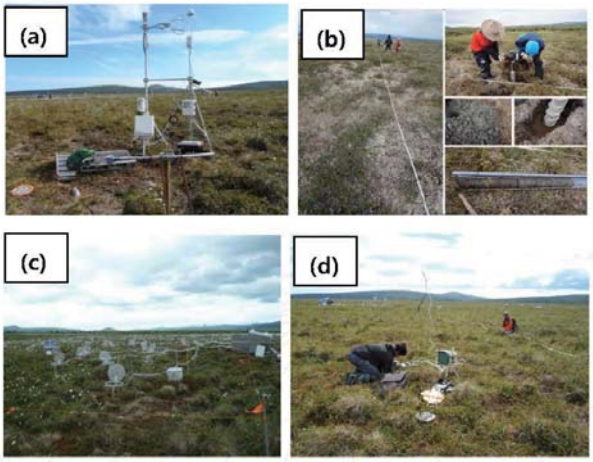


Figure 1. (a) Eddy-covariance system for GHG (CO_2, H_2O, CH_4) flux measurement at Council, Alaska. (b) Soil coring activity (c) Automatic chamber system to measure CO2 exchanges over tussock, lichen, moss at Council (d) In-situ survey of photosynthetic activity of permafrost vegetation at Council

On behalf of University of Alaska, Fairbanks, I hereto confirm the establishment of environmental change observation site led by KOPRI at Council, Alaska has been duly authorized by University of Alaska, Fairbanks.

Signature

Prof. Larry Hinzman

Interim Vice Chancellor for Research
Professor of Civil and Environmental Engineering
University of Alaska Fairbanks
PO Box 757270
909 Koyukuk Drive
Fairbanks, AK 99775-7270
Phone: +1-907-474-6000 **Fax:** +1-907-474-6725
E-mail: ldhinzman@alaska.edu

Polar Knowledge Canada Savoir polaire Canada

360 Albert Street/rue Albert
Suite 1710/pièce 1710
Ottawa, ON K1R 7X7
Canada
Tel/Tél. : 613-943-8605
mail@polar.gc.ca

December 3, 2015

LETTER OF CONFIRMATION ON THE ESTABLISHMENT OF ENVIRONMENTAL CHANGE OBSERVATION SITE LED BY KOPRI AT CAMBRIDGE BAY, CANADA

To Whom It May Concern,

The purpose of this letter is to confirm the establishment and the operation of research facilities and observation sites at Cambridge Bay, Canada. A research team from Korea Polar Research Institute (KOPRI) has established Circum-Arctic Permafrost Observation Network at Cambridge Bay to carry out scientific research activities in an effort to engage with both the needs of Korea's national agenda and the global concern. The information below explains the details of KOPRI's research project, which is supported by the Basic Core Technology Development Program for the Oceans and the Polar Regions of the National Research Foundation (NRF), and funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (MSIP) of Korea.

Research Project description & Research Activities

- Project title: Circum-Arctic Permafrost Environmental Change (CAPEC) project
- Principle Investigator: Dr. Bang Yong Lee (KOPRI)
- Key Participants: Dr. Yoo Kyung Lee, Dr. Taejin Choi, Dr. Young Jun Yoon, et al.
- Major research activities and facilities established at Cambridge Bay

  Based on the Scientific Research License issued from Nunavut Research Institute in June 2012 and Memorandum of Understanding between Korea Polar Research Institute (KOPRI) and Polar Knowledge Canada (POLAR) signed on October 2015, KOPRI research team established a research program to study the changes in the high Arctic ecosystem in Cambridge Bay, Canada (69° 7′ 47.7" N, 105° 3' 35.3" W). Currently two research programs are being carried out.

Canada

1) The exchanges between the atmosphere and tundra ecosystem, and air quality: Research activities include continuous measurement of fluxes of CO_2 and energy flux since 2012, flux of CH_4 in 2015 using eddy covariance system and black carbon since 2013 using aethalometer. While measurement systems are maintained by KOPRI research team during the field excursions KOPRI makes once or twice a year, they are also regularly maintained by the POLAR personnel in Cambridge Bay. The figures below present a more detailed picture of the research activities described:

Figure 1. (a) Field activities for the installation of fast response CH_4 analyzer for CH4 flux measurement on July, 2015. (b) Eddy covariance system in summer. (c) Eddy covariance system after it snows. (d) Aethalometer for black carbon concentration measurement

2) Climate manipulation experiment:

In this experiment, KOPRI research team increased temperature through hexagonal 2m-diameter open top chambers and precipitation by weekly addition of water during plants' growing period with the help of natives.

The experimental site was decided on after electrical resistance survey, and sensors for temperature and humidity in the air, and soil temperature and moisture content have been installed and operated since 2012. More detailed research activities are described in below figures.

(a) (b)

(c) (d)

Figure 2. (a) Overview of the climate manipulation site operated since 2012, (b) an open top chamber (OTC), installed sensors (soil temperature, moisture content, air temperature, humidity, and NDVI) inside the OTC, and collars for gas sampling, (c) ground penetration radar (GPR) survey, and (d) field measurements and gas sampling.

On behalf of Polar Knowledge Canada (POLAR), I hereto confirm that the establishment of environmental change observation site led by KOPRI at Cambridge Bay, Canada has been duly authorized by POLAR.

Signature :

David J. Scott, Ph.D.
President of Polar Knowledge Canada (POLAR)
2464 Sheffield Road Ottawa, ON, K1B 4E5, Canada
Tel. (613) 990-5821, e-mail: DavidJ.Scott@polar.gc.ca

ACKNOWLEDGEMENT OF KOPRI'S RESEARCH ACTIVITIES AT NY-ÅLESUND, SVALBARD

14 Decenber 2015

Dear, whom it may concern

The purpose of this letter is to acknowledge the research activities of Korea Polar Research Institute (KOPRI) at Ny-Ålesund, Svalbard. A research team from KOPRI has established Circum-Arctic Permafrost Observation Network at Ny-Ålesund to carry out scientific research activities in an effort to engage with both the needs of Korea's national agenda and the global concern. The information below explains the details of KOPRI's research project, which is supported by the Basic Core Technology Development Program for the Oceans and the Polar Regions of the National Research Foundation (NRF), and funded by the Ministry of Science, ICT & Future Planning (MSIP) of Korea.

Research Project description & Research Activities

- Project title: Circum-Arctic Permafrost Environmental Change (CAPEC) project
- Principle Investigator: Dr. Bang Yong Lee (KOPRI)
- Key Participants: Young Jun Yoon, Taejin Choi, Ki-Tae Park, et al.
- Major research activities and facilities established at [Ny-Ålesund, Svalbard]

  1) Based on the Memorandum of Understanding (MOU) between KOPRI and the Department of Earth and Environment, National Research Council of Italy (CNR-DTA), KOPRI research team established research program regarding the exchanges of energy and greenhouse gases between the atmosphere and tundra ecosystem. In the frame of the respective research program established at Ny-Ålesund, KOPRI research team join activities at Climate Change Tower (CCT) and coordinate respective activities at Gruvebadet laboratory. The research activities include continuous measurement of fluxes of CO_2 and energy flux since 2011, flux of CH_4 since 2012 using open-path and closed-path eddy covariance system at CCT. In-situ measurement of nano-size particle and collection of air-borne particles for the analysis of chemical composition has been carried out at Gruvebadet laboratory since 2015. More detailed research activities are described in below figures.

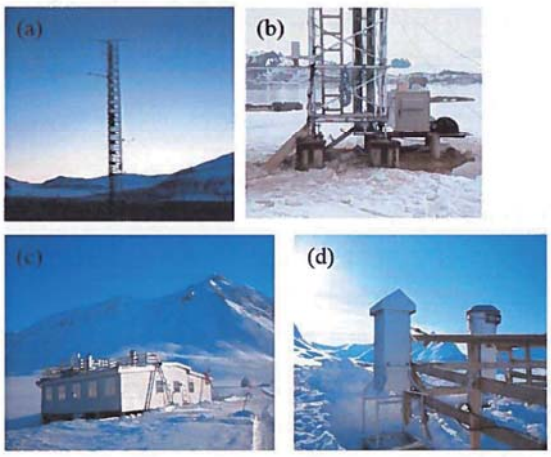


Figure 1. (a) Climate Change Tower located in Ny-Ålesund, Svalbard. (B) Cavity Ring-Down Spectroscopy (CRDS) installed in Climate Change Tower. The CRDS analyzer was installed in 2012 to achieve in-situ flux measurement of greenhouse gas including CH_4 and CO_2. (c) Gruvebadet laboratory located in Ny-Ålesund, Svalbard, (d) High volume sampler for the collection of airborne particle in Arctic environment. The sampler was installed on the roof of Gruvebadet laboratory in April 2015.

2) **Aerosol physics studies:** Based on the Memorandum of Understanding (MOU) between Korea Polar Research Institute (KOPRI) and Norwegian Polar Institute (NPI) signed in October 2012, KOPRI research team established research program regarding aerosol studies in Arctic environment. KOPRI research team has been carrying out measurement of cloud condensation nuclei at Zeppelin observatory since 2007. In addition, the measurement of atmospheric dimethyl sulfide has been performed since 2010. More detailed research activities are described in below figures.

Figure 2. (a) Zeppelin observatory located in Zeppelin Mountain, close to Ny-Ålesund (b)

Laboratory for Aerosol physics study in Zeppelin observatory. Cloud condensation nuclei counter has been operated since 2007, (c) DMS analytical system installed in Zeppelin observatory. KOPRI-POSTECH research team installed the analytical system in 2010, then newly modified DMS analytical system was re-installed at the same observatory in 2014.

On behalf of Norwegian Polar Institute, I hereto acknowledge the research activities of KOPRI (regarding environmental change studies in Arctic) at Ny-Ålesund, Svalbard.

Signature _____

Name: **Kim Holmén**

Title: **International Director**

Institute: **Norwegian Polar Institute**

Address: **Postboks 505, 9171 Longyearbyen, Norway**

Tel: **+47 79022612**

E-mail: **kim.holmen@npolar.no**

※ 사업수행 업무 관련 홍보 주요 성과

북극에 피는 꽃은 어떤 향기가 날까

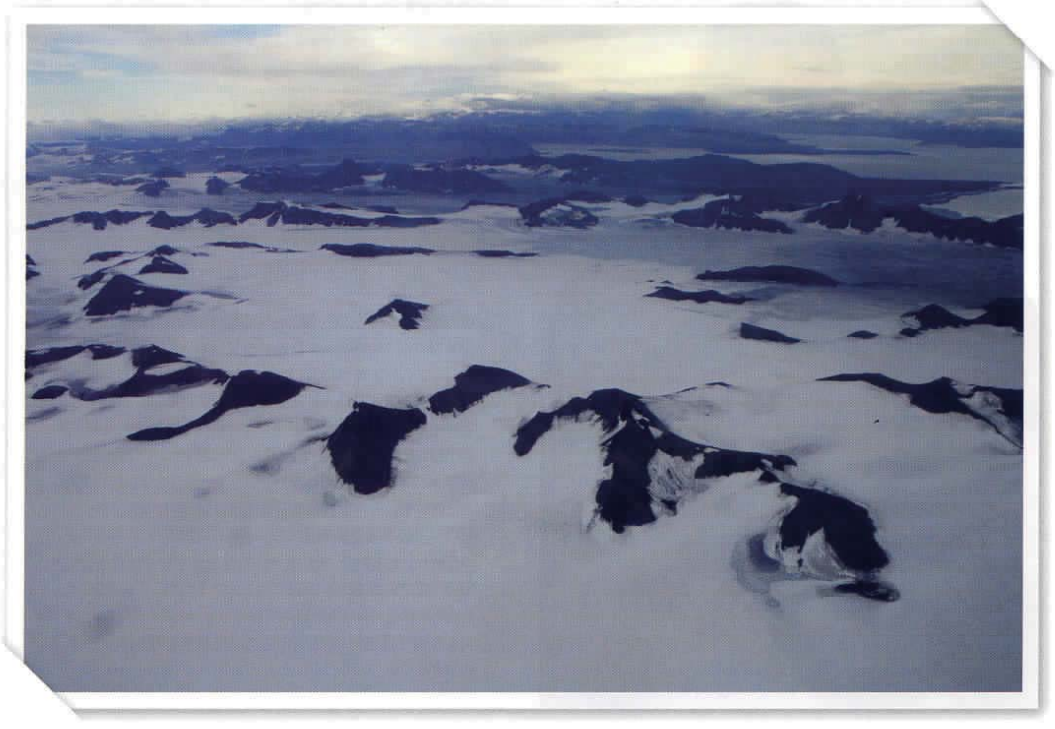
극지연, 4월 15~20일 '북극생태사진전' 개최

우리나라 북극다산기지가 있는 노르웨이 스발바르제도에 가면 '북극이끼장구채'라는 분홍색 작은 꽃들이 한자리에 모여 피어 있는 모습을 자주 볼 수 있다. 영구동토 지역의 알록달록 예쁜 꽃들을 담은 사진전이 서울에서 열린다.

극지연구소는 4월 15일부터 20일까지 6일 동안 서울시 종로구 서울메트로미술관 1관(지하철 3호선 경복궁역)에서 '북극생태사진전'을 연다. 북위 70도 인근 환북극 지역에서 연구하는 과학자들이 직접 찍은 100여 장의 사진을 전시한다. 이들은 2011년부터 지난해까지 미래창조과학부와 한국연구재단의 지원을 받은 '극지기초원천기술개발사업'에 참여했다. 김예동 극지연구소장은 "청소년과 어린이들이 동토층의 생생한 현장 사진들을 보며 가능성이 무한한 북극에서 자신의 미래를 열어가는 꿈을 꾸게 되기를 기대한다"고 말했다. (032)770-8631 ○ 김상연 기자

극지연구소 제공 | 극지연구소

왼쪽부터 북극버들, 북극이끼장구채, 북극다람쥐꼬리, 북극황새풀의 모습



연합뉴스
알래스카에서도 북극 땅 연구한다

송고시간 ¦ 2015/07/30 12:00페이스북

극지연구소, 미국 알래스카에 '북극공동연구실' 개소
환북극권 국가 동토층 연구 참여 길 열어

(서울=연합뉴스) 양정우 기자 = 미래창조과학부는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소(KOPRI)와 미국 알래스카 페어뱅크스 소재 알래스카대학 국제 북극연구센터가 알래스카 도시인 놈(Nome)에서 '북극공동연구실'을 열었다고 30일 밝혔다.

한국은 이번 연구실 개소로 노르웨이 스발바르의 다산과학기지와 함께 북미권에서도 환북극권 국가의 동토(凍土)층 연구에 참여할 수 있는 발판을 마련했다.

미래부에 따르면 북극공동연구실은 약 330㎡ 규모로, 연구용장비 테스트용 실험실과 동토생태 연구실 등으로 구성된다.

이곳에서는 알래스카 동토에서 획득한 현지 미생물과 식물, 토양 등에 대한 시료 전처리작업과 각종 측정자료 검증, 보관 등을 안전하고 효과적으로 할 수 있다.

또 놈은 미국 정부가 알래스카대학을 중심으로 북극권 동토층 연구 프로젝트를 시작하는 곳으로, 미국 동토층 연구그룹과 공동 연구 수행, 극지과학 정보교환 및 인력교류 등을 한결 수월하게 할 수 있을 것으로 전망된다.

미래부는 "북극공동연구실 개소는 한국의 극지분야 연구 수준을 한 단계 끌어올릴 수 있는 계기를 마련했다는 점에서 의미가 크다"고 밝혔다.

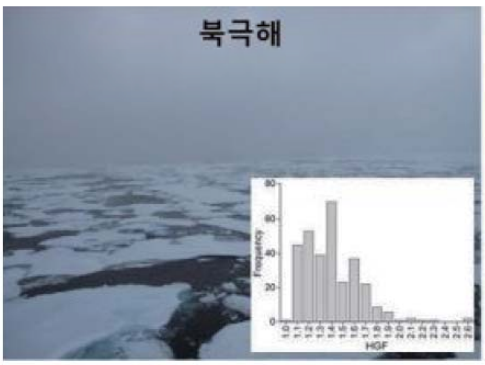
eddie@yna.co.kr

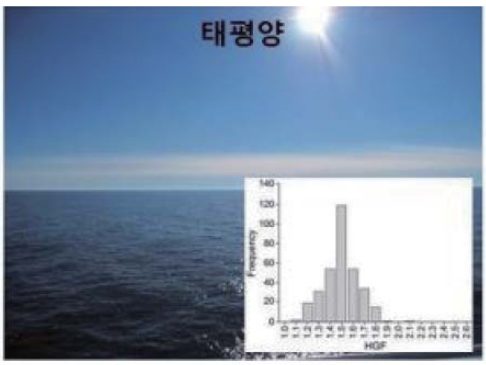
인쇄 취소

국민일보
www.kmib.co.kr

해상 초미세먼지 생성 원리 밝혔다…쇄빙선 아라온 타고 1만2000km 항해하며

입력 2015-10-26 14:00





국내 연구진이 북극해에서 발생하는 초미세먼지의 생성 원리를 규명했다. 연구에는 우리나라 최초 쇄빙 연구선인 '아라온호'가 활용됐다.

광주과학기술원(GIST) 환경공학부 박기홍 교수와 한국해양과학기술원 부설 극지연구소 윤영준 박사팀은 아라온호를 타고 북극해~태평양~동북아시아 근해~한반도 동해에 이르는 1만2000km를 항해하며 초미세먼지를 실시간 관측해 해상에서 초미세먼지가 생성되는 메커니즘을 밝혀냈다고 26일 밝혔다.

초미세먼지는 공기중에 떠다니는 2.5 마이크로미터 미만의 에어로졸 입자다. 구름 형성에 영향을 주며 지구에 도달하는 태양 복사의 열평형에 미치는 역할을 이해하는 데 가장 기본적 요소다.

연구팀이 관측한 초미세먼지의 물리화학적 특성을 비교 분석한 결과, 북극해에서는 바다 속 엽록소a의 활동이 해양 초미세먼지 생성에 중요한 역할을 하고 있다는 사실을 처음으로 밝혀냈다. 엽록소a는 식물이 광합성 하는데 빛을 흡수하는 색소다. 바닷속 식물 플랑크톤 세포에 가장 많이 분포한다.

주간조선

커버스토리 | 정치 | 경제 | 사회 | 문화 | 스포츠 | 연예

홈 › 문화 [2303호] 2014.04.21

[인물] "북극 다산과학기지 척박한 땅에도 108종이 넘는 꽃·식물이 자란다"

'북극 툰드라에 피는 꽃' 펴낸 이유경 극지연구소 책임연구원

트윗 좋아요 0 가- +가

홍근혜 인턴기자·연세대 국어국문학과 3년 필자의 다른 기사보기

▲ photo 이경호 영상미디어 차장

"스발바르제도의 다산과학기지 주변에 가장 많은 꽃은 이끼장구채"라고 이유경 극지연구소 책임연구원은 말했다. 이 책임연구원은 북극 지역의 식생·토양 연구를 위해 다니면서 이곳의 식물 도감을 펴냈다. '북극 툰드라에 피는 꽃'(지오북). 이 책임연구원 외 5명의 공동 저자는 극지연구소의 동료 정지영 박사와 이은주 서울대 교수(생명과학부), 이규·한동욱 국립생태원 연구원, 황영심 지오북 대표 등 관련 전문가들이다. 필자들은 책 표지 사진으로 분홍빛 꽃잎의 이끼장구채를 골랐다.

지난 4월 14일 서울 광화문의 주간조선 사무실에서 만난 이유경 책임연구원은 "노르웨이에서 출장을 마치고 지난 주말에 귀국했다"고 했다. 극지연구소는 남극에서는 일반에 널리 알려진 세종기지와 장보고기지를 운영하고, 북극에는 다산과학기지를 두고 있다. 해양수산부 산하기관이다.

이 책임연구원은 2003년부터 북극에 다닌다. "2011년 환북극 동토층 연구를 위해 이번 책 저자들이 노르웨이 스발바르제도의 다산과학기지로 향하던 중 마지막 경유지인 롱이어비엔에서 비행기가 하루 연착됐어요. 다음날까지 시간이 남아서 롱이어비엔 주변의 식생을 관찰했지요. 연구팀에 있던 양치식물 연구자인 황영심 대표가 사진을 찍었는데 그것이 이 책의 시작이었습니다." 롱이어비엔에서 뜻밖의 시간을 갖지 않았더라면, 다산기지가 있는 뉘올레순에 바로 갔을 것이고, 다산기지에서는 짧은 기간에 정해진 임무를 수행하느라 주변 식물에 두루 관심을 가질 기회가 없었을 것.

'북극 툰드라에 피는 꽃'에는 얼음과 추위를 이겨낸 108종 식물의 사진 600장과 설명이 실려 있다. 노르웨이령 스발바르제도의 다산과학기지 외에도 캐나다 케임브리지베이, 미국 알래스카의 카운실, 덴마크령 그린란드 자켄버그에서 자라는 식물들이다. 저자들은 2011년부터 미래창조과학부의 극지기초 원천 기술개발 사업의 일부인 환(環)북극 동토층 연구를 5년 일정으로 하고 있다. "노르웨이 스발바르제도는 2003년, 2011년, 2012년 세 차례 방문했어요. 그린란드 자켄버그도 두 번 다녀왔고 캐나다, 알래스카는 한 번씩 다녀왔어요."

▲ 북극 이끼장구채 photo 지오북

다산기지는 2002년 설립됐다. 스발바르제도의 스피츠베르겐섬은 노르웨이 최북단이다. 노르웨이 북단해안에서 북쪽으로 약 650㎞ 떨어졌고, 북위 74~81도다. 우리는 북극에 기지를 설치한 12번째 국가다. 다산과학기지는 북극의 기후변화와 빙하, 생물종, 해류, 자원 연구를 한다. 다산과학기지에는 봄에는 대기팀, 여름에는 생태계 생물 연구팀, 가을·겨울에는 고층대기 연구팀이 때에 맞춰 방문한다. 우리나라는 북극권 국가가 아니기 때문에 아직까지는 북극 연구를 선도하지는 않으며 다른 나라에 비해 연구자 수도 적다. 중국의 경우 30여명이 상주한다. 우리나라는 상주하는 연구자는 없고 한 번에 10명 정도의 연구자들이 찾는다. "중국은 체류기간도 6개월 정도예요. 우리는 두 달 정도죠. 우리는 연구과제가 있어야만 다산기지에 갈 수 있어요. 밥값만 하루에 10만원이라 출장비가 부담스러워요. 그래도 우리나라는 최근 북극이사회나 북극과학위원회와 같은 조직에서 핵심적인 일을 맡고 있고 미국, 일본, 러시아, 노르웨이 등의 북극 연구 선진국들과 공동 연구를 진행하기도 합니다. 북극이사회 회원국으로서의 위상과 역할을 해내고 있어요."

뉘올레손의 국제과학기지촌은 탄광사업을 하던 킹스베이라는 회사가 기지 건물들을 소유하고 관리한다. "1920년 체결된 스발바르조약으로 노르웨이 국민이 아니더라도 스발바르의 영토를 자국민처럼 자유롭게 사용할 수 있어요. 상업활동도 할 수 있죠. 북극 연구활동을 하기에도 편해 노르웨이의 스발바르를 가장 많이 찾습니다."

이 책임연구원은 "북극의 기후가 우리나라의 기후에 영향을 줍니다. 북극이 변하고 있어서 우리의 여름·겨울 기후가 변하고 있는 거죠. 우리의 미래 기후변화를 알기 위해서는 북극에 대한 이해가 필요합니다"며 북극 연구의 중요성을 강조했다.

북극 연구에는 환경적인 어려움이 많다. "소유자가 없는 남극과는 달리 북극의 경우 소유권을 갖고 있는 나라가 있습니다. 연구를 위해서는 이 나라들의 협조를 받는 것이 우선이에요." 북극 방문을 위해서는 3~4개월 전부터 원주민 단체나 해당 국가기관에 방문 목적, 활동 내용을 상세히 제출하고 허가를 받아야 한다.

제 1 절
북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발(세부과제 1)

1. 미국 알래스카 카운실 (제1거점)

가. 동토-대기간 온실 기체 순환 이해

(1) 카운실 사이트 특성

○ 지리적 특성 및 과학적 의의

본 연구과제의 환북극권 관측망 제 1 거점인 알래스카 카운실 사이트는 북위 64도 50.6분, 서경 163도 42.32분에 위치(Fig. 1)하고 있으며 여름철에는 표층이 녹아 활성층(active layer)이 약 60-70cm 두께로 존재하는 불연속 동토층 지대이다. 이 지역은 수목(tree)의 북방한계선에 해당하여 장기적인 모니터링을 수행 시 향후 북반구 고위도 지역에서 식생분포 변화를 보여줄 수 있는 매우 좋은 입지조건을 갖추었다. 또한 알래스카대학 국제북극연구센터(International Arctic Research Center)에서 물수지 연구를 진행해오던 사이트여서 1998년부터 일부 기상관측자료가 획득되어 기후변화 모니터링 관점에서 유리하다. 또한 지표에 미분해 유기물층이 풍부하게 존재하여 메탄 발생과 관련한 연구에도 적합하다.

카운실 사이트에는 1단계 2개년도 과제 수행을 통해 이산화탄소 교환량 측정을 위한 자동챔버시스템(자체제작)과 대기복사계, 에디공분산시스템 및 태양광발전시스템이 설치되어 목표로 했던 관측시스템 구축이 완료되었다. 관측지 주변 식생분포조사에 의하여 대표 식생을 분류하고 각 식생 종류별 이산화탄소 교환량 측정을 위하여 자동챔버 시스템을 설치하여 하계기간동안 연속적인 관측 및 자료전송이 이루어지고 있다.

Fig. 1. Location of the Council site, Alaska.

○ 로지스틱스

알래스카 카운실 사이트에 접근하기 위해서는 우선 항공편을 이용해 놈(Nome)까지 이동해야 한다. 항공편은 인천-하와이-앵커리지-놈 또는 인천-시애틀-앵커리지-놈 경로를 이용할 수 있다. 놈(Nome)에서부터 카운실 사이트까지는 차량으로 약 110 km 거리이며 도로가 비포장상태이고 중간지점부터는 굴곡이 많은 산악도로인 관계로 편도기준 약 2시간 가량이 소요된다. 이 도로는 겨울철 적설기에 폐쇄되고 눈이 녹아 없어지는 5월중에 개방되기 때문에 보통 6월부터 10월까지의 제한된 기간 동안 접근이 가능하다.

현장연구에 필요한 소형장비의 경우 항공운송을 이용할 수 있으나 중대형의 경우 해운을 이용해야 한다. 한국에서 발송하는 경우 시애틀과 앵커리지를 거쳐 놈에 도착하는데 겨울철에는 베링해가 해빙으로 덮혀 화물선 운항이 불가하고 5월부터 9월까지 대략 4-5회 화물선이 놈에 입항한다. 항공운송에 비해 기간이 많이 소요되므로 약 2개월의 기간을 두고 발송해야 하고 화물선의 선적량이 조기에 마감될 수 있으므로 사전에 발송가능성 등을 확인할 필요가 있다. 연구장비는 수신자를 놈 현지에 소재한 University of Alaska, Fairbanks 산하의 Northwest Campus (Director: Mr. Bob Metcalf)로 지정하면 된다. 매년 여름철 북극해 연구를 수행하는 쇄빙연구선 아라온호를 이용한 보급도 가능하다. 아라온호는 여름 북극해 연구항해를 수행하고 있으며 북극해 항차의 시작과 종료시에 놈 항구에 정박한다. 따라서 한국에서 출발할 때 연구장비와 물품을

선적하여 놈 항구에서 받을 수 있다.

놈이나 카운실 사이트에는 실험실 등 연구시설이 없는 관계로 1단계 2차년도에 알래스카 현지에서 구입한 20피크 컨테이너를 알래스카 대학 캠퍼스 부지 내에 설치해서 연구장비와 현장연구용 물품의 보관에 활용하고 있다. 이후 연구장비 점검과 토양시료 현지 실험 등 보다 원활한 연구활동 수행을 위해 알래스카대학과 협력하여 2015년 7월 KOPRI-UAF 공동연구실을 개소(Fig. 2, 3)하였다. 본 연구과제와 관련하여 카운실 사이트에서 연구활동을 수행하는 연구팀은 극지연구소의 주관하에 공동연구실 시설을 사용할 수 있게 되었으며 향후 국내 대학 등 외부 연구팀의 북극 연구활동 증진에 교두보가 될 것으로 기대된다.

Fig. 2. Opening of KOPRI-IARC/UAF Lab. (2015.7).

Fig. 3. Sign of KOPRI-IARC/UAF Lab.

(2) 현장활동

온실기체 플럭스와 관련해 대기과학 분야 연구팀은 크게 극지연구소, 연세대, 알래스카대학, 서울대 연구원으로 구성되었다. 식생 성장 주기와 현지 접근성을 고려해 현장활동은 대부분 6월부터 9월 중에 수행되었으며 극지연구소 팀은 일반적으로 두 차례 (6월말과 9월말) 방문하여 자동챔버시스템과 에디공분산시스템을 이용한 하계 관측을 시작했다가 종료하였다. 알래스카대학 김용원 교수는 6월부터 9월까지 매월 한 차례씩 약 10여일간 체류하며 격자상 수동챔버에서 이산화탄소 배출량을 측정하였다.

(가) 1차년도 (2013년 6월 ~ 2014년 6월)

○ 1차 현장활동: 2013년 6월 18일~25일

- 목적: 수동챔버 6월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
  · 수동챔버 25개 지점 이산화탄소 배출량 측정
  · 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 2차 현장활동: 2013년 7월 7일～19일
- 목적: 자료 회수 및 하계 관측 수행
- 인원: 총 2인 (유재일, 남성진 (극지연))
- 주요활동
  · 에디공분산시스템 자료회수, 장비점검 및 보정
  · 전력시스템 점검
  · thaw depth 측정

○ 3차 현장활동: 2013년 7월 22일～29일
- 목적: 수동챔버 6월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
  · 수동챔버 25개 지점 이산화탄소 배출량 측정
  · 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 4차 현장활동: 2013년 8월 12일～19일 및 9월 10일～14일
- 목적: 장비수리 및 하계 관측 수행
- 인원: 총 2인 (박상종, 김형준 및 박상종, 박병권)
- 주요활동
  · 에디공분산시스템 기체분석기 수리 및 보정
  · 자료회수
  · thaw depth 측정

○ 5차 현장활동: 2013년 9월 9일～14일
- 목적: 수동챔버 6월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
  · 수동챔버 25개 지점 이산화탄소 배출량 측정
  · 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 6차 현장활동: 2013년 9월 22일～29일
- 목적: 수동챔버 6월 관측 수행

- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
  · 수동챔버 25개 지점 이산화탄소 배출량 측정
  · 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

Fig. 4. Maintenance of eddy-covariance system.

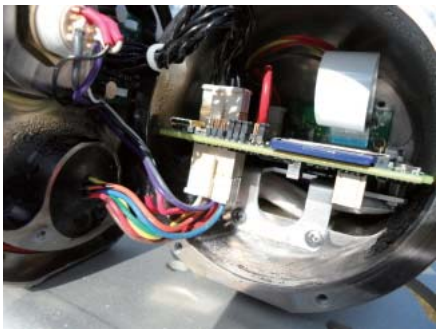


Fig. 5. Maintenance of phenocam.

Fig. 6. Water table monitoring.

Fig. 7. Soil sampling neat the site.

(나) 2차년도 (2014년 6월 ~ 2015년 6월)

○ 1차 현장활동: 2014년 6월 19일~29일
- 목적: 수동챔버 6월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
  · 수동챔버 81개 지점 이산화탄소 배출량 측정
  · 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 2차 현장활동: 2013년 6월 23일~7월 21일
- 목적: 자료 회수 및 하계 집중관측 수행

- 인원: 총 3인 (박상종, 유재일 (이상 극지연), 채남이 (연세대))
- 주요활동
  · 자동챔버 재설치 및 관측 개시
  · 에디공분산시스템 자료회수, 장비 보정 및 관측 수행
  · 전력시스템 점검
  · thaw depth 측정
  · 알래스카대학 기상센서 비교관측
  · 메탄 플럭스 집중 관측
  · 주변 thermokarst lake 답사 및 물/토양 시료 채취

Fig. 8. Calibration of CO_2/H_2O analyzer

Fig. 9. Calibration of CH_4 analyzer.

Fig. 10. Eddy-covariance system with CH_4 analyzer.

Fig. 11. Comparison of AWSs between UAF and KOPRI.

○ 3차 현장활동: 2014년 7월 12일～21일

- 목적: 수동챔버 7월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
  · 수동챔버 81개 지점 이산화탄소 배출량 측정
  · 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 4차 현장활동: 2014년 8월 15일～22일

- 목적: 수동챔버 8월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
  · 수동챔버 81개 지점 이산화탄소 배출량 측정
  · 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 5차 현장활동: 2014년 9월 13일～19일

- 목적: 수동챔버 9월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
  · 수동챔버 81개 지점 이산화탄소 배출량 측정
  · 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 6차 현장활동: 2014년 9월 17일～28일

- 목적: 자료 회수 및 동계 대비 조치
- 인원: 총 2인 (박상종 (극지연), 채남이 (연세대))
- 주요활동
  · 자동챔버 자료 회수 및 장비 회수
  · 에디공분산시스템 자료회수, 장비점검 및 기체분석기 회수
  · 전력시스템 점검
  · thaw depth 측정
  · 놈 현지 KOPRI-Lab 설치 관련 협의

(다) 3차년도 (2015년 6월 ～ 2016년 6월)

○ 1차 현장활동: 2015년 6월 15일～26일

- 목적: 수동챔버 6월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동

KOPRI 극지연구소

· 수동챔버 81개 지점 이산화탄소 배출량 측정
· 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 2차 현장활동: 2015년 7월 7일～17일
- 목적: 수동챔버 7월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
· 수동챔버 81개 지점 이산화탄소 배출량 측정
· 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 3차 현장활동: 2015년 7월 1일～10일
- 목적: 자료 회수 및 하계 관측 수행
- 인원: 총 5인 (박상종, 이제인 (이상 극지연), 채남이 (연세대), 류영렬, 김종민 (서울대))
- 주요활동
· 자동챔버 재설치 및 관측 개시
· 에디공분산시스템 자료회수, 장비점검 및 보정, 전력시스템 점검
· thaw depth 측정
· 식생 광합성 변수 및 잎면적지수 측정 (360미터 transect)
· 놈 현지 KOPRI-Lab 개소

○ 4차 현장활동: 2015년 8월 5일～13일
- 목적: 수동챔버 8월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
· 수동챔버 81개 지점 이산화탄소 배출량 측정
· 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 5차 현장활동: 2015년 9월 14일～23일
- 목적: 수동챔버 9월 관측 수행
- 인원: 총 1인 (김용원 교수 (알래스카대학))
- 주요활동
· 수동챔버 81개 지점 이산화탄소 배출량 측정
· 동 지점 토양온도, 토양수분, thaw depth 측정

○ 6차 현장활동: 2015년 9월 30일～10월 8일
- 목적: 자료 회수 및 동계 대비 조치
- 인원: 총 2인 (진광호 (극지연), 채남이 (연세대))

KOPRI 극지연구소

- 주요활동
  · 자동챔버 자료 회수 및 장비 회수
  · 에디공분산시스템 자료회수, 장비점검 및 회수
  · 전력시스템 점검
  · thaw depth 측정

○ 7차 현장활동: 2016년 4월 17일~25일
- 목적: 자료 회수 및 봄철 관측 개시
- 인원: 총 2인 (박상종 (극지연), 김용원 (알래스카대학))
- 주요활동
  · 에디공분산시스템 보정 및 봄철 관측 개시 (최초로 적설기부터 관측 개시 사례)
  · 전력시스템 점검
  · 신규 NDVI 센서 설치
  · 카운실 원주민단체와 향후 연구허가 관련 협의

Fig. 12. Solar panels before cleanup.

Fig. 13. Solar panels after cleanup.

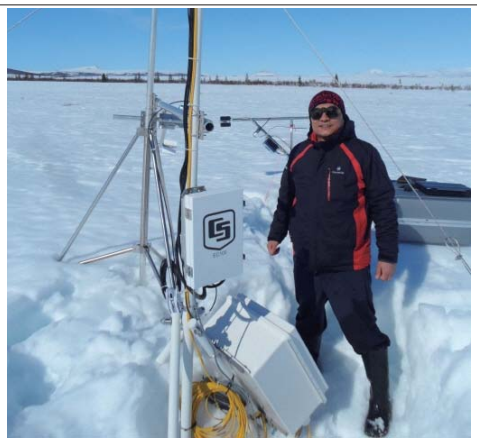


Fig. 14. Installation of eddy-covariance system.

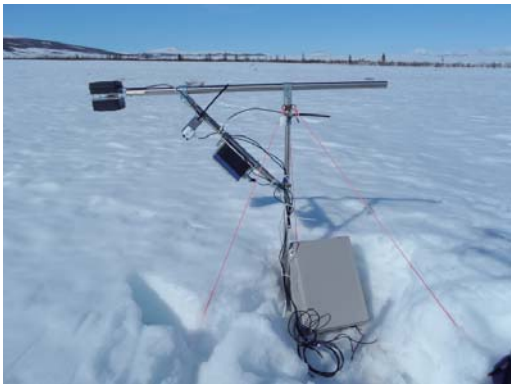


Fig. 15. Phenology camera and NDVI sensor.

(3) 관측시스템 구축 및 현장관측

(가) 자동챔버시스템

자동챔버시스템(Fig. 16)은 자체 제작한 15개의 투명한 챔버(직경 400mm, 높이 300mm)와 이산화탄소 측정을 위한 적외선 분석기(모델명: LI-840, 제작사: LI-COR), 그리고 정해진 시간(225초) 동안 챔버 뚜껑의 자동 개폐와 챔버의 순차적 작동을 제어하는 제어부, 자료를 저장하는 집록기로 구성되어 있다. 관측시 순차적으로 15개의 챔버 뚜껑이 닫히면서 일정 시간동안 (105초) 안정된 이후 밀폐된 상태에서 일정 기간 동안 (120초) 챔버 내 이산화탄소 농도의 변화를 측정하게 된다. 아울러 비교 및 상호 검증을 위한 대기 중의 이산화탄소 농도가 관측된다. 이 외에 환경 인자인 챔버 내 토양 온도, 깊이별 토양 온도, 토양 수분 및 광합성 유효 복사량을 측정한다(Fig. 17). 챔버의 자동 개폐와 환경 인자 관측 센서들의 전원은 태양 전지판 및 충전 배터리로부터 공급받게 된다. 아울러 동토 연구에서 매우 중요한 해빙의 깊이(thaw depth) 측정이 주기적으로 이루어져야 하고, 해빙시 토양 내 수분의 이동과 증발을 확인할 수 있도록 수위(water table)를 모니터링할 필요가 있다. 따라서 6월 장비 가동 시 그리고 9월 장비 점검 시에 thaw depth를 조사하고, 챔버 시스템 주변 두 곳에 수위를 알 수 있도록 구멍(hole)을 설치하였다.

KOPRI

Fig. 16. Automatic chamber system for species-specific CO2 flux.

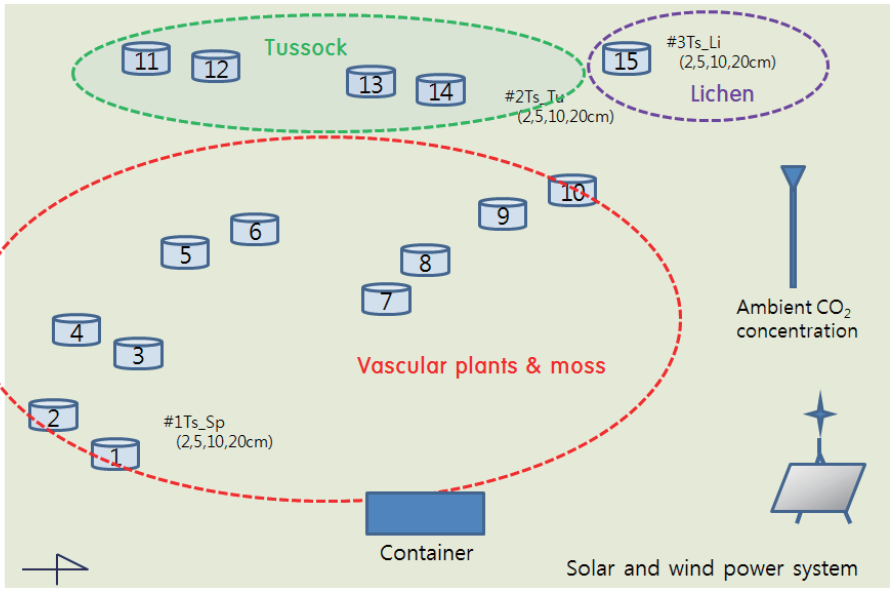


Fig. 17. Overview of the automatic chamber system distribution at the Council site.

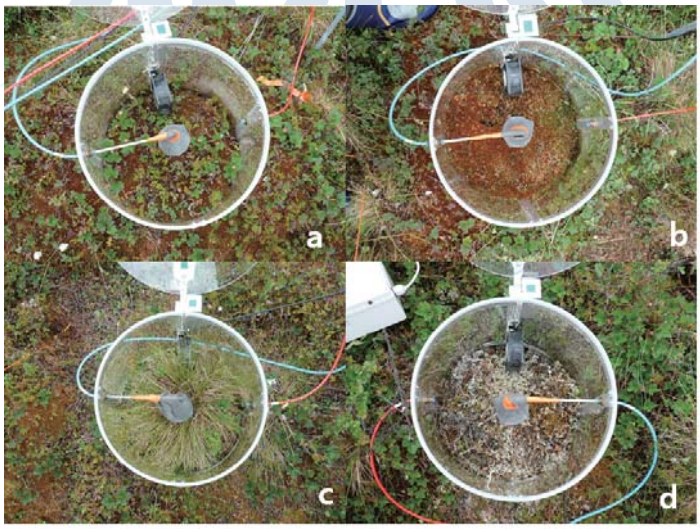


Fig. 18. Chambers for dominant species (a; vascular plant and moss, b; moss, c; vascular plant, d; lichen).

(나) 에디공분산시스템

알래스카 대학의 기존 기상관측자료에 근거하여 여름철에 주로 남풍 계열 바람이 불어옴에

따라 자동챔버시스템의 풍하측인 북쪽 약 50미터 지점에 3미터 높이의 플럭스 관측타워를 설치하였다. 동 타워에는 태양복사 및 장파복사를 상향 및 하향에서 각각 관측하는 복사계(모델명: CNR4, 제조사: Kipp & Zonen)와 대기난류, 기온, 이산화탄소 및 수증기 농도를 초당 10회 주기로 고속관측하는 개회로 에디공분산시스템(모델명: CSAT3A 및 EC150, 제조사: Campbell Scientific Inc.)을 설치하였다. 이 관측장비들을 통해 지표에너지수지의 근원이 되는 복사에너지 크기와 변동성을 정확히 파악하고 동토층 지표의 알베도(반사도)를 알 수 있으며 대기-동토층 지표 간 이루어지는 에너지, 수분, 그리고 이산화탄소의 교환량을 연속 측정할 수 있다.

에디공분산시스템은 지상으로부터 약 3미터 높이에 설치되었으며 초당 10회에 이르는 빠른 간격으로 3차원 바람성분(u, v, w), 기온(sonic temperature), 이산화탄소(CO_2) 농도, 수증기(H_2O) 농도를 측정하여 대기-동토층 간에 발생하는 운동량, 현열, 잠열, 이산화탄소의 플럭스를 관측한다 (Fig. 19). 측정되는 자료는 3미터 타워 하부 인클로저 내에 장착된 자료집록기(모델명: CR3000, 제조사: Campbell Scientific Inc.) 및 CF 메모리카드에 저장되고 있다. 10Hz 간격의 원자료는 용량이 매우 크기 때문에 위성통신을 통한 전송은 불가능하고 연구원의 현장방문시 메모리카드에서 직접 회수한다. 참고로 2012년 최초 설치시에는 집록기에서 지원하는 메모리카드의 용량이 2GB로 한정되어 있어서 3개월 미만의 자료만 저장할 수 있었으나 2013년부터는 16GB 용량의 메모리카드 사용이 가능하게 되어 현장 방문이 어려운 10월부터 5월까지의 장기간 자료도 획득할 수 있게 되었다.

KOPRI 극지연구소

Fig. 19. Eddy-covariance system at the Council site (CSAT3A and EC150, Campbell Scientific Inc.).

KOPRI 극지연구소

(다) 복사계

지표면 에너지 분배의 원천인 하향 태양복사에너지와 지면에서 반사되는 상향 태양복사에너지, 대기로부터 지면으로의 하향 장파복사에너지, 지면이 대기로 방출하는 상향 장파복사에너지 등 4가지 성분을 모두 관측하고 있다(Fig. 20). Fig. 12에 2012년 7월 30일부터 9월 13일까지 측정된 하향태양복사량과 순복사량을 나타내었다. 맑은 날 낮에는 태양복사량이 약 750 Wm^{-2}까지 증가하나 강수가 있었던 날에는 200 Wm^{-2} 미만의 작은 값을 보이기도 하였다. 지면으로 들어온 하향태양복사량과 반사되어 나가는 상향태양복사량의 비율인 알베도는 카운실사이트에서 약 0.18로 관측되었다. 또한 9월 중순에는 야간에 순복사량이 음의 값을 나타내어 지면냉각이 이루어지고 있음을 알 수 있다 (Fig. 20, 21).

Fig. 20. Four-component net-radiometer (CNR4, right sied of the boom) at the Council site.

KOPRI 극지연구소

(라) 수동챔버시스템

알래스카대학-페어뱅크스의 국제북극연구센터 김용원 교수는 총 81개 (5미터 간격의 9×9 격자) 지점에서 빛이 통과하지 않는 금속챔버를 이용해 식생 및 토양에서의 이산화탄소 배출량을 매년 6월부터 9월까지 측정하였다. 2013년 여름철에는 25개 지점에서 관측을 수행하였고 2014년부터는 5미터 간격의 81개 (9×9) 지점에서 관측을 수행하였다. 이 관측은 식생 및 토양에서의 호흡에 의한 이산화탄소 배출량을 한 지점이 아닌 다수 지점에서 측정하여 호흡에 의한 배출량의 공간적 분포를 파악하고 6월부터 9월까지 매월 자료를 통해 호흡량의 월별 변화를 분석하는 것이다.

각 지점에서 챔버내 이산화탄소 농도를 측정 후 뚜껑을 닫고 일정시간 지난뒤 다시 챔버내 이산화탄소 농도를 측정하여 그 시간동안 농도 변화로부터 호흡량을 산출하게 되며 호흡량에 영향을 주는 환경인자로서 토양온도와 수분값 역시 측정한다.

Fig. 21. Manual chambers at the Council site (metalic chamber).

(마) 식생 현장관측

본 연구과제 수행 중 카운실 사이트에서의 온실기체 플럭스 연구결과를 기후모델 예측능력 향상으로 연결하기 위해 현지 식생의 특성 중 모델에 필요한 물리적·생리적 특성 연구 필요성이 제기되어 서울대학교 류영렬 교수팀이 2015년도에 참여하게 되었다. 류 교수 연구팀은 2015년 7월 1일부터 10일까지 ASD (Analytic Spectral Devices Inc.), FieldSpec 4 (반사도 NDVI 측정), Licor-6400, LAI-2200 Plant Canopy Analyzer (엽면적 측정) 등의 측정장비를 활용하여 카운실 현지 사이트 식생을 분석하였다. (Fig. 22, 23)

○ Transect 360m에 2x2m 영역 18개의 plot (Fig. 22, 23의 오른쪽 사진에서 노란색 점)에서 ASD point measurement 8개와 LAI-2200 5개 지점 관측

○ Transect A, B, C는 각 100m 길이이며 1m간격으로 1 x 1m plot 속에 0.15 x 0.15m plot으로 구성됨

○ 1x1m plot 내에서는 ASD 장비를 이용한 9개 점 관측 및 LAI-2200 장비를 이용한 6개 점 관측 수행

○ 0.15 x 0.15m plot 내에서 ASD 장비를 이용한 3개 점 관측 및 LAI-2200 장비를 이용한 3개 점 관측 수행 후 잎을 모두 따서 스캔하여 true LAI값과 비교

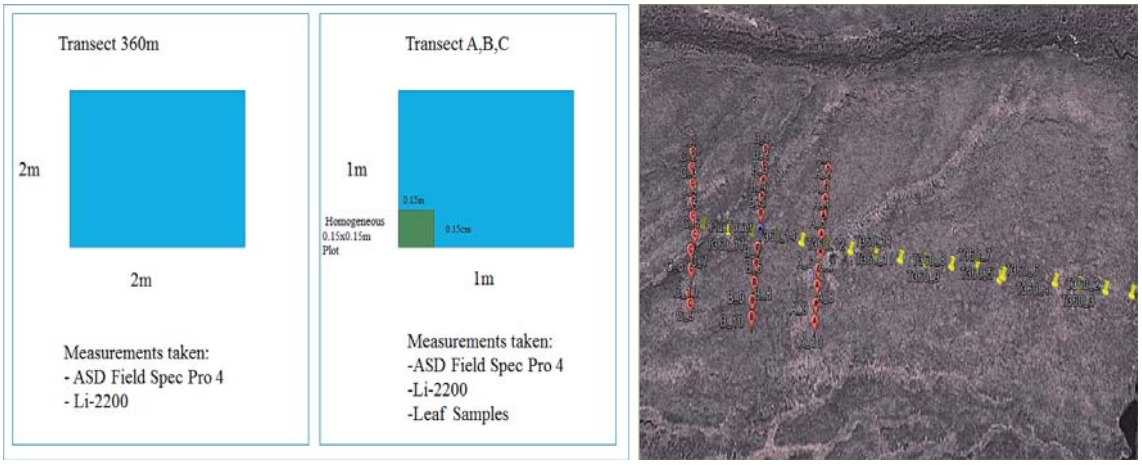


Fig. 22. Left) Transect 360m, A, B, C and right) locations of the measuring points.

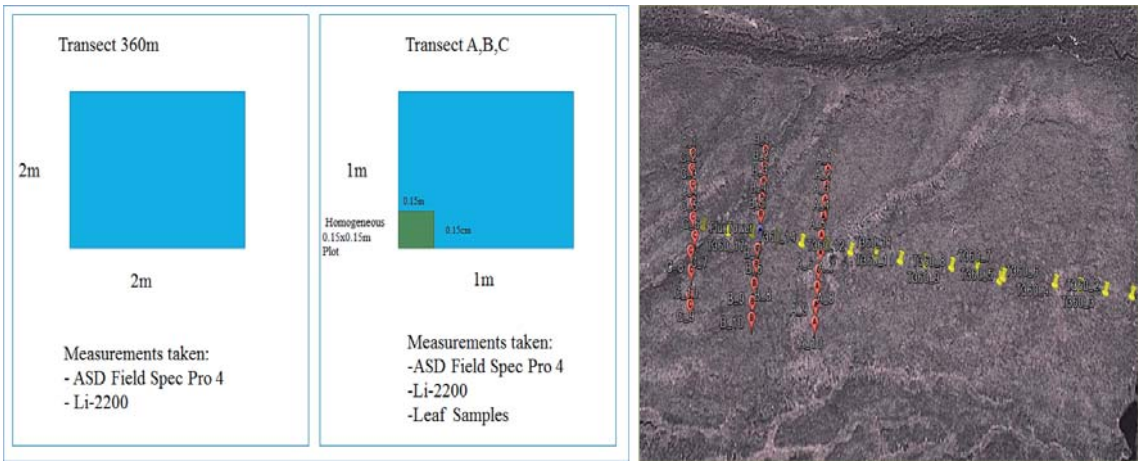


Fig. 23. Left) Transect 360m, A, B, C and right) locations of the measuring points.

Fig. 24. 1) Leaf scanning, 2) LAI-2200 measurement, and 3) ASD measurement.

(바) 전력공급시스템

카운실 사이트에서 관측시스템 운영에 관한 사항 중 가장 큰 어려움은 전원공급 문제이다. 현지에 전력망이 연결되지 않았고 북위 64도의 고위도 지역인 관계로 여름철에는 일조시간이 하루 20시간 이상이지만 겨울철에는 5시간 미만으로 계절별 일조시간 차이가 크고 영하 20도까지 내려가는 극한의 환경임을 고려해 겨울철에도 관측시스템에 최소한의 전원 공급이 가능하도록 구성하였다. 우선 관측시스템의 전력소모량에 대한 정밀한 계산을 바탕으로 태양광 모듈과 배터리를 충분하게 설계 구성하였다. 또한 관련 전문가 자문을 통해 극한환경에서 성능과 장기운영 능력이 입증된 Deep-cycle 젤타입 배터리와 전선 등 자재를 사용하는 등 노력을 기울였다. 또한 관측장비의 운영프로그램 설계시 겨울철에는 일부 변수 관측이 지속되도록 구성하여 전력사용 최적화를 시도하였다.

태양광 모듈은 교류전원이 없는 알래스카 동토층에서 에디공분산 장비의 운영을 위해 최대 840와트(160와트×6모듈)의 전력을 생산할 수 있도록 했고(Fig. 25) 극한지용 배터리(Fig. 26) 및 제어시스템(Fig. 27)을 결합한 안정적인 전력시스템을 구축하여 2016년까지 안정적으로 운영되고 있다.

Fig. 25. Solar panels of the Council site.

Fig. 26. Deep-cycle gel-type rechargeable battery of the Council site.

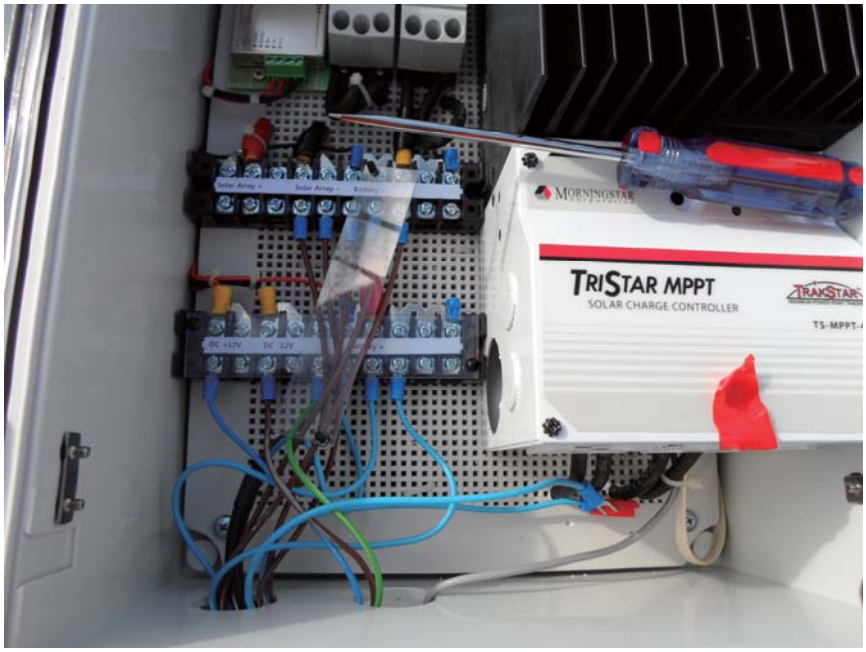


Fig. 27. Solar charge controller of the Council site.

(4) 자료처리과정

(가) 자동챔버 자료

자동챔버시스템의 관측자료 중 이산화탄소 농도는 10초 간격, 토양온도 및 토양수분 자료는 10분 간격으로 자료집록기(CR1000, Campbell Scientific Inc.)에 저장되고, 연구원 현장 방문시 전체 자료가 회수된다. 일정 간격으로 순차적으로 작동하는 자동챔버의 스케줄과 10초 간격 농도자료를 이용해 각 챔버별 이산화탄소 농도 변화를 계산하고 이로부터 이산화탄소 교환량을 산출하였다.

(나) 에디공분산 자료

알래스카 카운실 사이트의 에디공분산시스템에서 생산되는 초당 10회 간격의 원자료는 자료집록기(모델명: CR3000, 제조사: Campbell Scientific Inc.)에서 집록됨과 동시에 추가로 장착된 대용량 (2GB 또는 16GB용량) CF메모리카드에 저장된다. 메모리카드에 저장된 원자료는 매년 여름철에 연구원의 현장 방문시 백업되어 이후 연구소에서 다음과 같은 처리과정을 거쳐 최종적인 플럭스 자료로 산출되었다.

관측자료는 일차적으로 시계열 확인 등 해당 연구원의 품질검사를 거치며 특히 에디공분산자료는 대기난류특성에 기반한 여러 품질검사를 거쳐 선별된 자료를 이용해 이산화탄소 플럭스 산출 등에 사용된다. 에디공분산자료의 처리과정은 다음과 같다.

- 각 변수 (3차원 풍속, 기온, 수증기농도, 이산화탄소농도) 시계열에 대해 간헐적으로 나타는 튀는 값, 즉 ‘spike’ 검사를 수행한다. 에디공분산장비는 초당 10회의 고속관측을 수행하는 정밀한 장비로서 관측환경에 따라 불량자료를 발생시킬 수 있으므로 각 변수별로 비정상적인 행태를 보이는 데이터를 제거할 필요가 있다. 그렇지 않을 경우 통상 30분 간격으로 산출되는 통계치에 큰 영향을 줄 수 있다, 시계열 검사는 30분 동안의 자료를 대상으로 평균값(m)과 표준편차(s)를 구하고 평균값으로부터 크게 벗어난 경우(예: m±3s 범위 외부)를 spike로 인식하여 제거할 수 있다.
- spike 검사 이외에도 ‘amplitude resolution’, ’drop-out’, ’absolute limit’, ’skewness & kurtosis’ 검사를 수행하여 시계열 자료 중 불량자료를 걸러낸다 (Vickers & Mahrt, 1997)
- 시계열 자료 필터링 후 플럭스 산출을 위해 평균풍 방향으로 ‘Double rotation’ 좌표변환을 실시한다. 이 때 평균풍 방향을 새로운 x축, x축과 수직인 수평 방향을 y축, x축 및 y축과 수직하는 연직 방향을 z축으로 하고, 이 중 y축 및 z축 방향의 바람성분은 30분 평균하면 0이 되도록 좌표변환하여 새로운 x, y, z 방향 바람, 즉 u, v, w의 시계열 자료를 산출한다.
- 좌표변환된 3차원 풍속(u, v, w) 및 온도, 수증기농도, 이산화탄소농도 변수를 이용하여 평균값(mean), 표준편차(standard deviation), 공분산(covariance) 등 통계치를 산출한다.
- 계산된 플럭스에 잠열보정, 스펙트럴보정, 밀도보정을 수행하여 운동량플럭스, 현열플럭스, 잠열플럭스, 이산화탄소플럭스를 산출한다.
- 기존 연구들에서 수립된 일반적인 난류통계치에 근거하여 산출된 플럭스의 품질을 평가한다. 여기서는 널리 사용되는 ‘integral turbulence characteristic test’ 및 ’steady state test’를 수행하고 Mauder and Foken (2004)의 방식을 따라 플럭스의 품질등급을 0(좋음)-1(보통)-2(불량) 등급으로 표기하였다.
- 운동량, 현열, 잠열, 이산화탄소 플럭스에 대해 2 등급인 경우는 해당 플럭스를 제거하였으며 특히 운동량 플럭스가 2등급인 경우에는 모든 플럭스를 제거하였다.
- 이에 더해 카운실 사이트의 플럭스 중 이상치 제거를 위해 다음과 같은 기준을 추가로 적용하였다. 1) MaxAGC >85 인 경우 잠열/이산화탄소 플럭스 불량; 2) MeanDiagCSAT >7 경우, 모든 플럭스 불량; 3) StDevH2O > 2.0 g/㎥경우 잠열플럭스 불량; 4) StDevCO2 > 20 ㎎/㎥경우 이산화탄소 플럭스 불량; 5) StDevTs > 1.5℃ 경우 현열플럭스 불량; 6) StDevW >1.0 ㎧ 경우 모든 플럭스 불량

KOPRI 극지연구소

(5) 연구결과

(가) 기상 및 토양 환경

○ 기상

알래스카 카운실 사이트에서의 온실기체 플럭스와 관련된 환경인자를 살펴보기 위하여, 2012부터 2015년 동안 각 해의 식생성장기인 6월에서 9월까지 월별 평균 기온과 월별 강수량을 조사하였다(Fig. 28, 29). 기온에 있어서 네 해 동안 특별한 차이점은, 2014년 8월의 경우 상대적으로 5°C 이상 차이를 보이면 매우 높았고 9월도 상대적으로 높은 값을 보였다.

반면 2015년도에는 7월 기온이 상대적으로 높은 편이었고 8월은 낮은 편에 속했다. 한편 강수량의 경우에는 2012년 8월 강수량이 160mm으로 매우 많은 양이 오면서 다른 해의 두 배가량 되고, 그 해 여름 강수량의 절반에 해당되는 양이였다. 또한 7월과 9월 역시 상대적으로 높은 값을 보이며 다른 해와 비교하여 많은 양의 강수가 있었다. 반면 2014년도에는 6월 동안 강수량이 거의 없었다가 7월에 많은 양의 강수가 있었고, 반면 8월 강수량은 적은 편으로 다른 해와 다른 패턴을 보였다. 정리하면, 2014년 8월의 매우 높은 기온 그리고 2012년 8월의 비롯한 대체적으로 많은 강수량 결과가 네 해의 정량적인 비교에서 두드러진 차이점을 보였다.

KOPRI 극지연구소

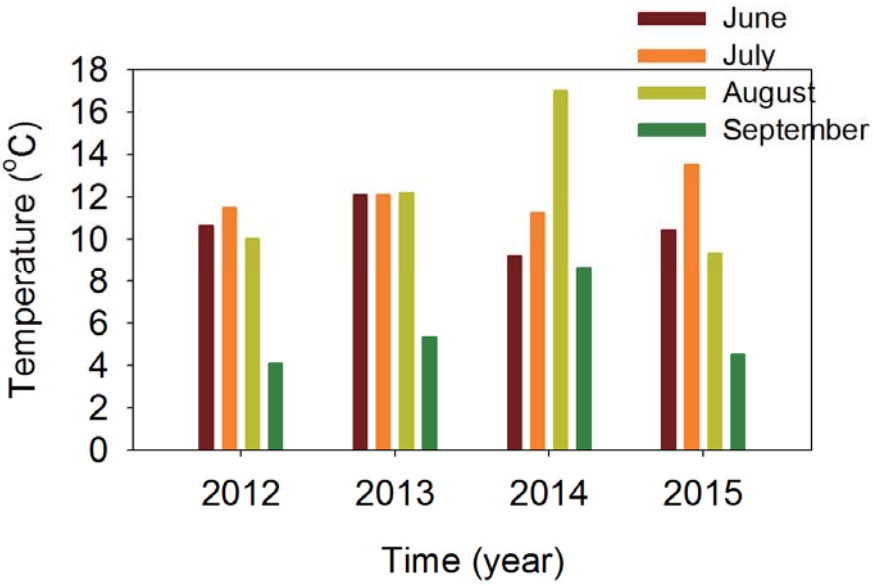


Fig. 28. Monthly mean air temperature during summer in 2012-2015.

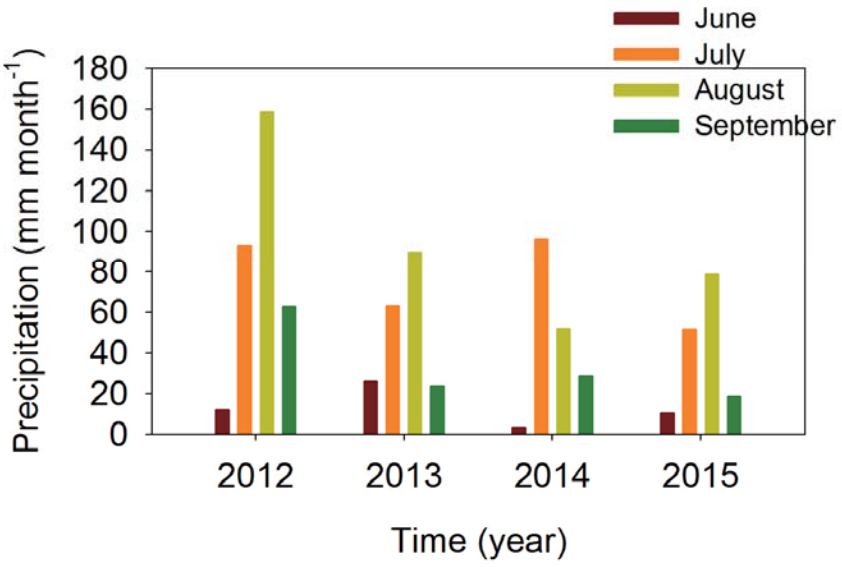


Fig. 29. Monthly total precipitation (mm) during summer in 2012-2015.

○ 풍향

카운실 사이트에서 풍향은 기존 알래스카 대학의 기상관측자료에 따르면, 연간 북

풍과 북서풍이 65% 가량으로 우세하고 남풍 계열인 남풍, 남서풍, 남동풍이 25%를 차지하고 나머지는 서풍과 동풍이므로 거의 확실하게 북풍과 남풍 계열의 풍향이 주를 이루는 것으로 나타난다. 2012년 이후 에디공분산시스템에서 측정된 바람자료에 따르면 7월부터 8월까지의 여름철로 한정할 경우에도 북서풍 계열이 가장 우세하였으며 다만 2012년 경우에는 남풍계열 바람의 비중이 가장 우세하였다 (Fig. 30, 31, 32). 카운실 사이트에서 풍속은 대체로 약한데 2012년 이후 여름철 자료 기준으로는 약 2.5-3m/s 내외의 평균풍속을 보여주었다.

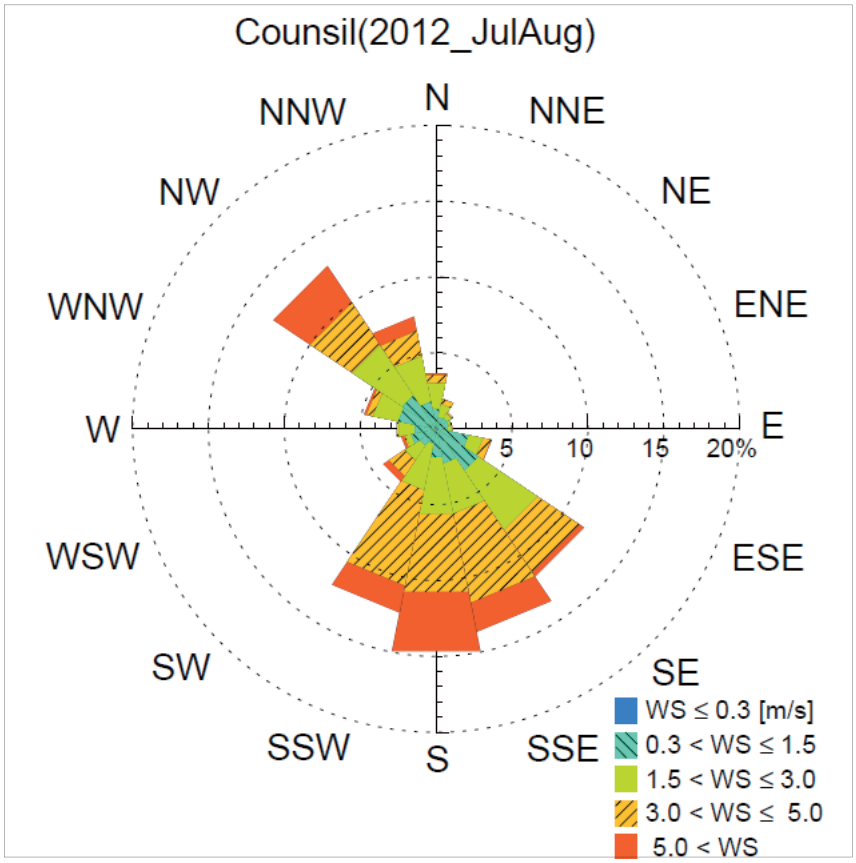


Fig. 30. Windrose for 2012 sumemr at the Council site.

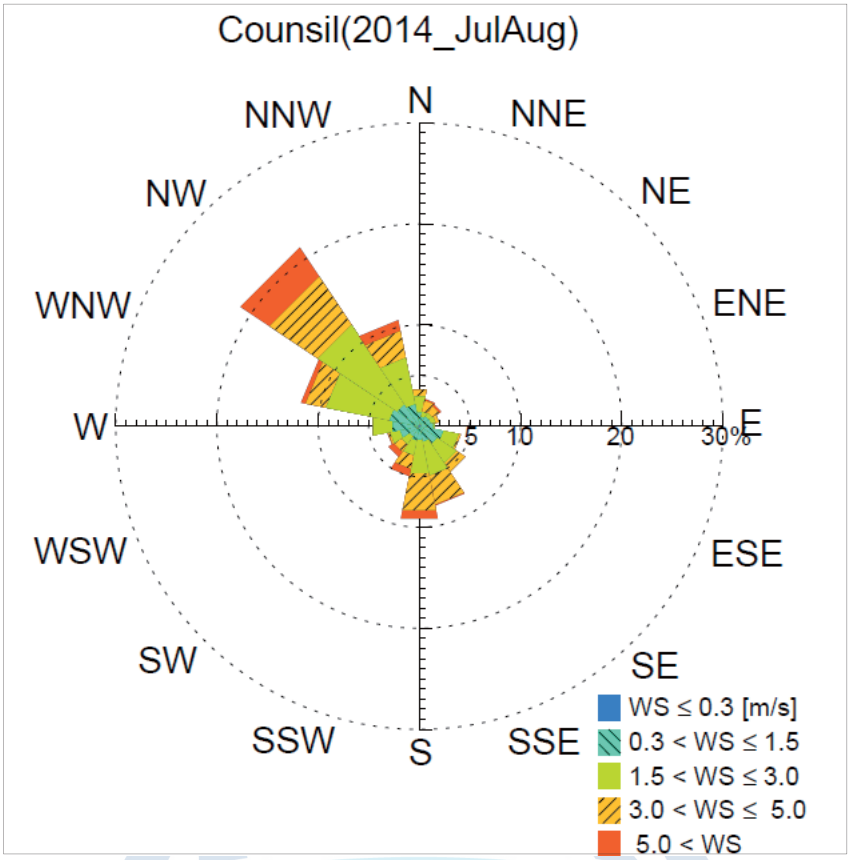


Fig. 31. Windrose for 2014 summer at the Council site.

극지연구소

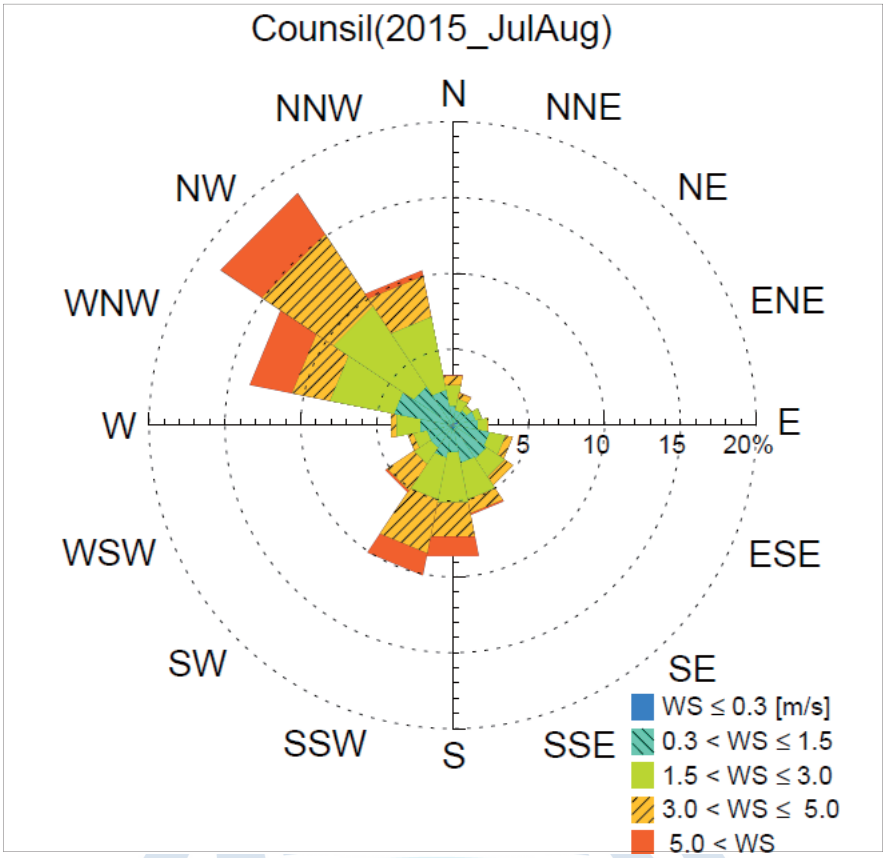


Fig. 32. Windrose for 2015 summer at the Council site.

극지연구소

○ 토양온도

기존 연구들에서 토양에서 대기로 방출되는 이산화탄소는 토양온도에 의해 가장 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 15개 각 챔버 내에서 토양온도를 측정하였다. 또한 챔버 내부 조건에 의한 영향을 알아보기 위하여 8번 챔버 주변 외부에도 센서(16번)를 설치하여 토양온도를 측정하여 15개 챔버 내 토양온도와 외부에 설치된 센서에서 관측된 토양온도를 비교하였다. 식생 종별 챔버 내 토양온도 간에도 차이가 존재하는데 이는 토양의 해빙 상태와 지형적인 특징으로 인하여 토양 수분의 함량과 부식층의 상태가 다른 것이 가장 큰 영향을 주었을 것으로 판단된다. 2013년을 제외하고 2012년부터 2015년까지 각 여름철에 측정된 토양온도 시계열을 나타내었다 (Fig. 33, 34, 35).

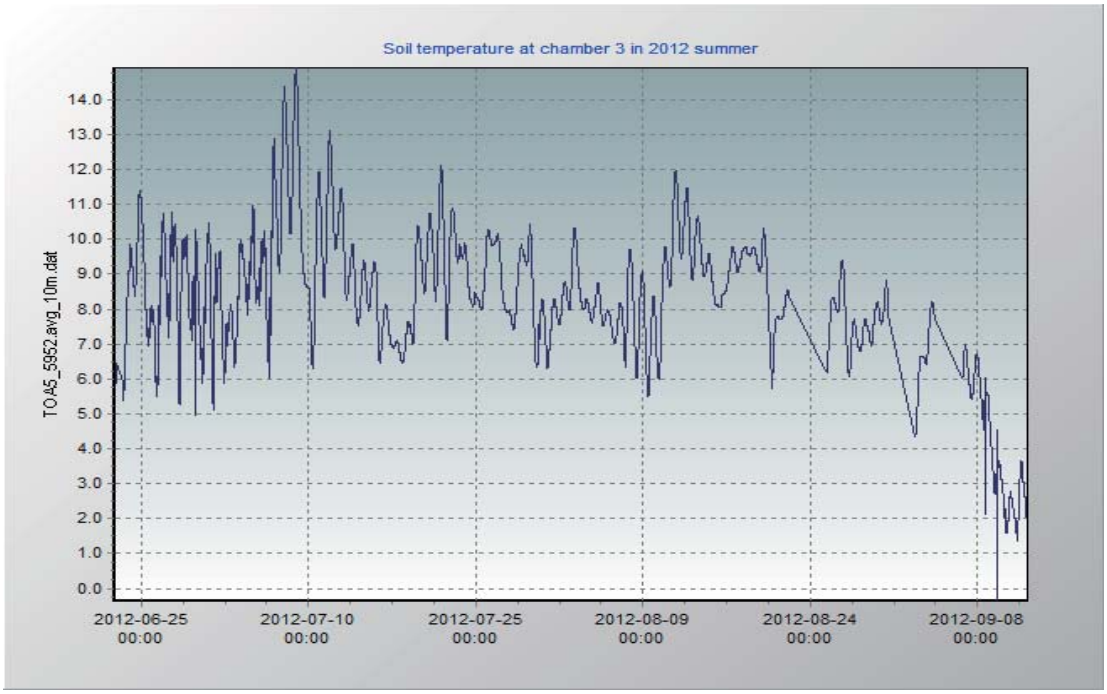


Fig. 33. Soil temperature measured at spagnum chamber during 2012 summer.

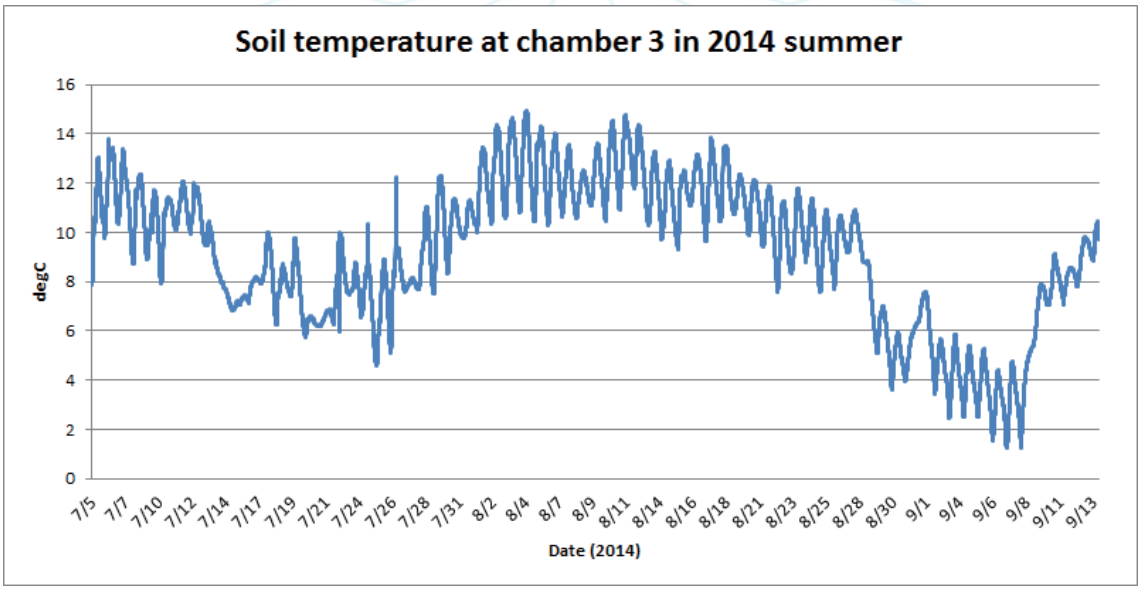


Fig. 34. Soil temperature measured at spagnum chamber during 2014 summer.

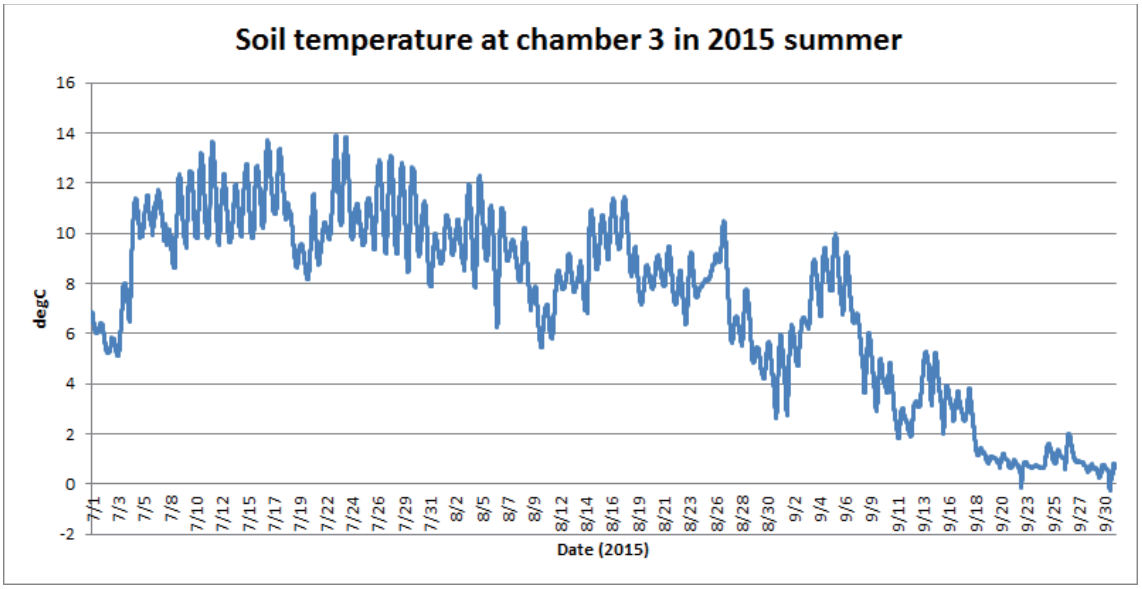


Fig. 35. Soil temperature measured at spagnum chamber during 2015 summer.

○ 광합성유효복사량 (PAR)

2012년, 2014년 및 2015년 7월부터 9월까지 측정된 광합성 유효복사량 (Photosynthetically active radiation, PAR) 자료를 아래에 나타내었다 (Fig. 36, 37, 38). 절기상 태양 고도각이 최대에 이르는 하지 기간이 없기는 하지만 7월부터의 자료에서 볼 때 7월에 최대 약 1500 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ 수준까지 관측되고, 많이 흐리거나 강수가 있는 날에는 약 300 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ 수준의 값을 보였다. 하루 중 가장 높은 값을 보이는 시간대는 14시 전후이다. 이러한 광합성 유효 복사량은 낮 동안 식생의 광합성 활동성을 대변하는 중요 인자로 사용될 수 있다.

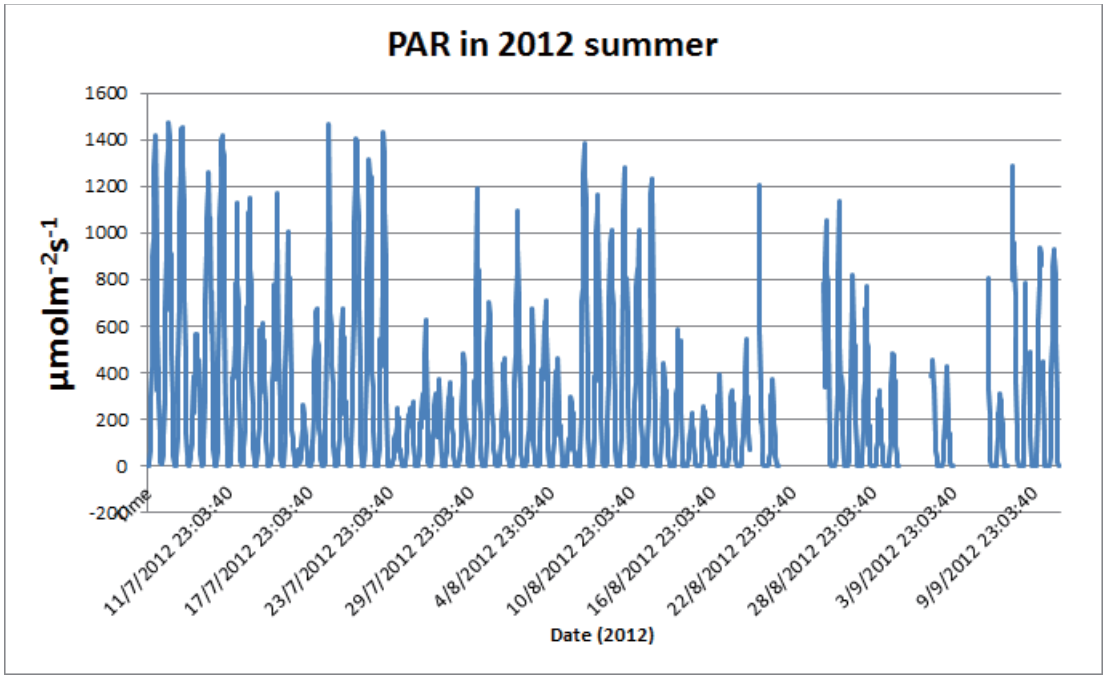


Fig. 36. PAR variation during 2012 summer at the Council site (July 6～Sep 11).

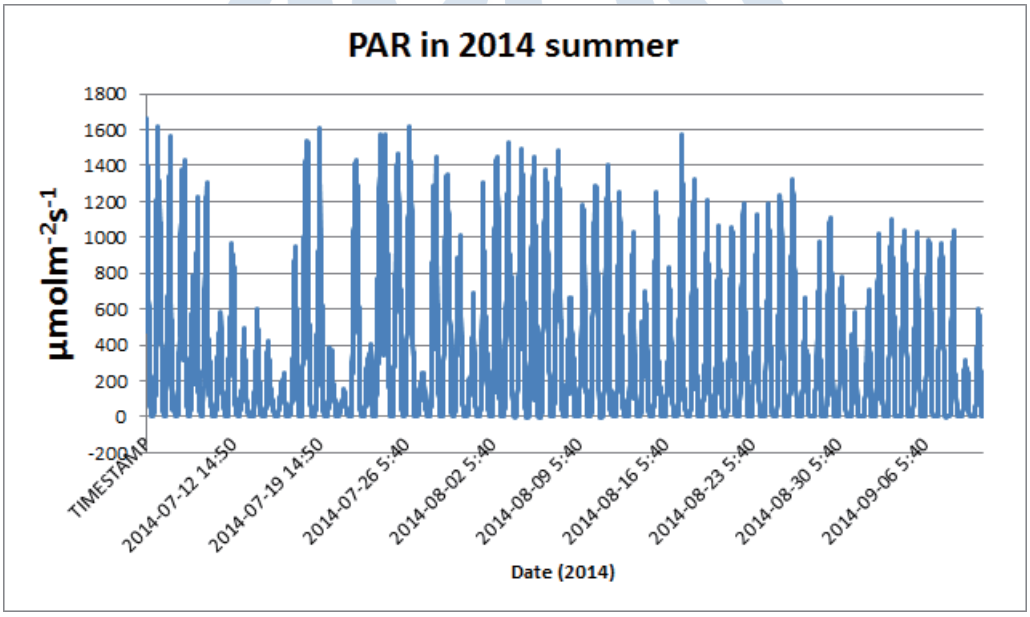


Fig. 37. PAR variation during 2014 summer at the Council site (July 5～Sep 10).

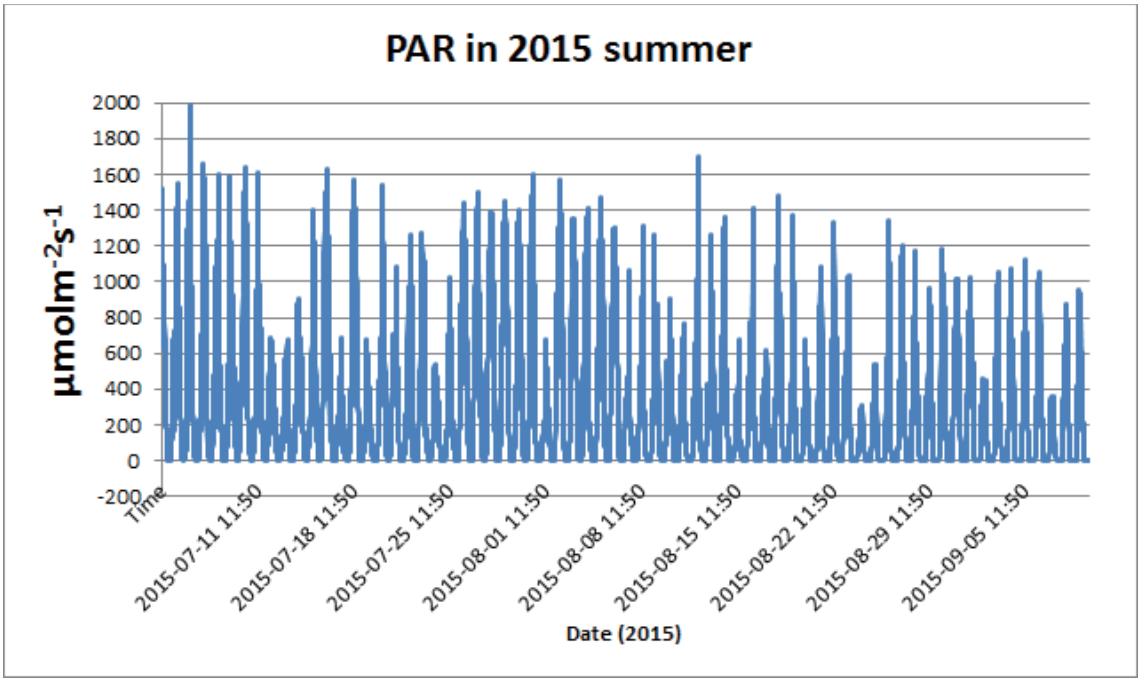


Fig. 38. PAR variation during 2015 summer at the Council site (July 4～Sep 10).

○ 활성층

카운실 사이트에 방문하게 되면 관측지의 thaw depth를 직접 측정하여 계절별 융해 정도를 파악하고 이로부터 카운실 사이트의 활성층(active layer) 변화를 확인할 수 있다. 아래 Fig. 39는 알래스카 대학 김용원 교수가 2011년부터 2015년까지 매년 여름철 사이트 방문시 다수 지점에서 측정한 thaw depth를 나타낸 것이다. 해마다 약간 차이를 보이기는 하지만 여름이 끝나는 시기인 9월에 이르면 대체로 60～70 cm의 활성층을 보여주고 있다. 이후 9월 중후반에 들어서면 기온이 영하로 떨어지기 시작하여 thaw depth는 다시 감소하게 된다.

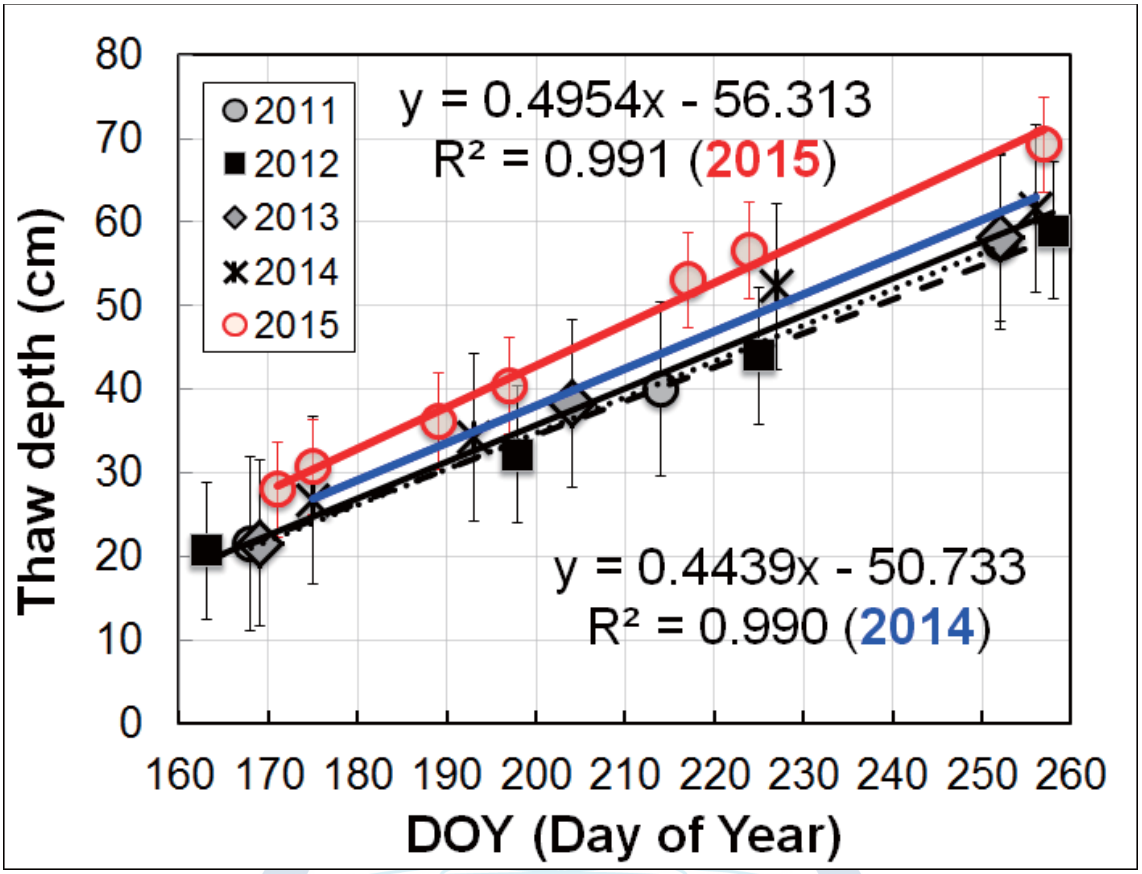


Fig. 39. Thaw depth variation during summer in 2011-2015 (Y.W. Kim, UAF).

극지연구소

(나) 현열 플럭스

Fig. 40~42는 각각 2012, 2014, 2015년 7월과 8월에 관측된 현열 플럭스를 나타내었다. 여름철에 강한 일사에 의해 일중 뚜렷한 일변화를 보여(Fig. 43) 낮시간에 최대 약 250 Wm^{-2} 수준까지의 값을 보이고 야간에는 약 30 m^{-2} 이내의 음의 값을 보여 미명이 존재하는 알래스카의 여름철에도 야간에는 지면냉각이 발생하고 있음을 보여준다.

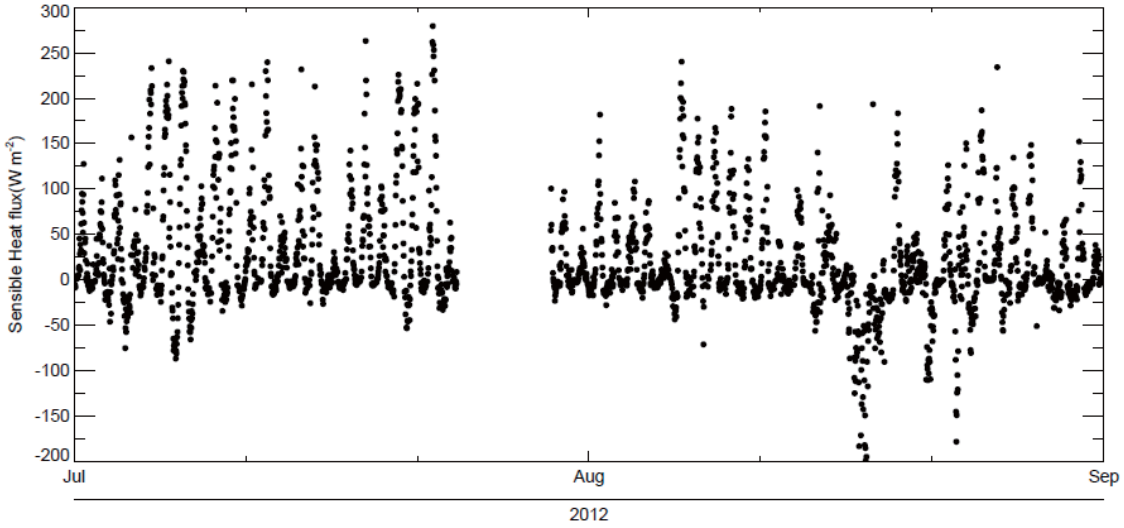


Fig. 40. Sensible heat flux at Council site during summer in 2012.

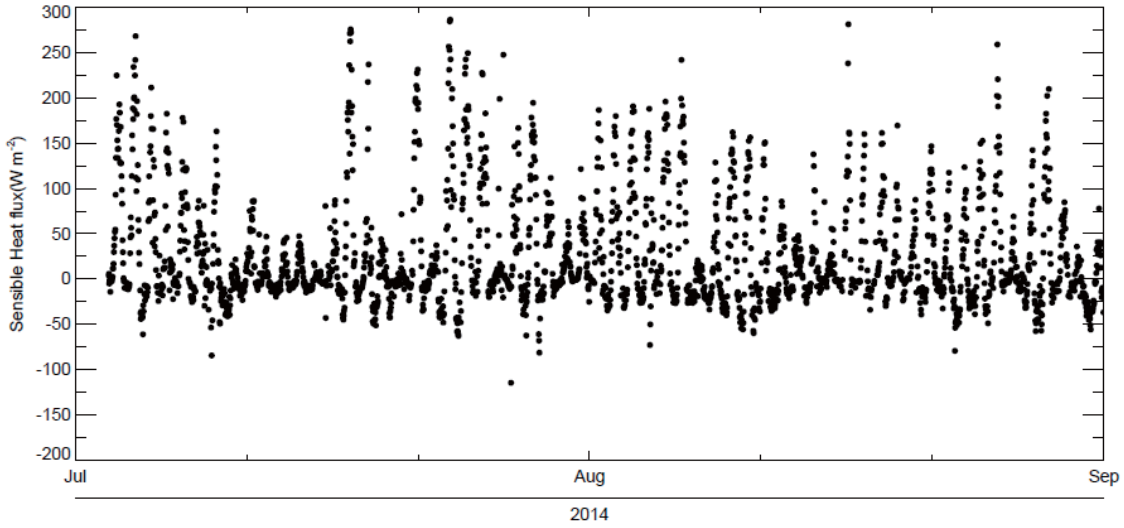


Fig. 41. Sensible heat flux at Council site during summer in 2014.

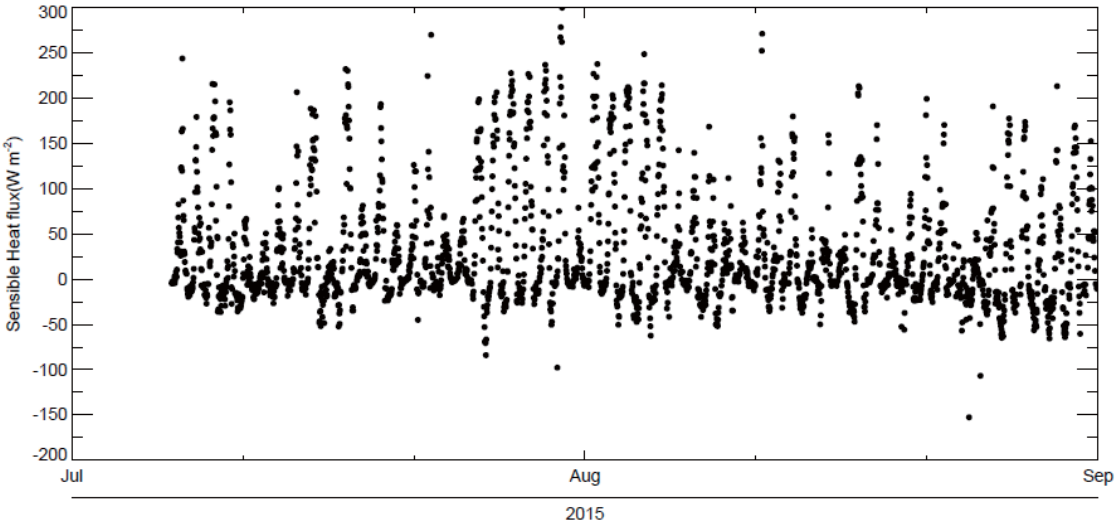


Fig. 42. Sensible heat flux at Council site during summer in 2015.

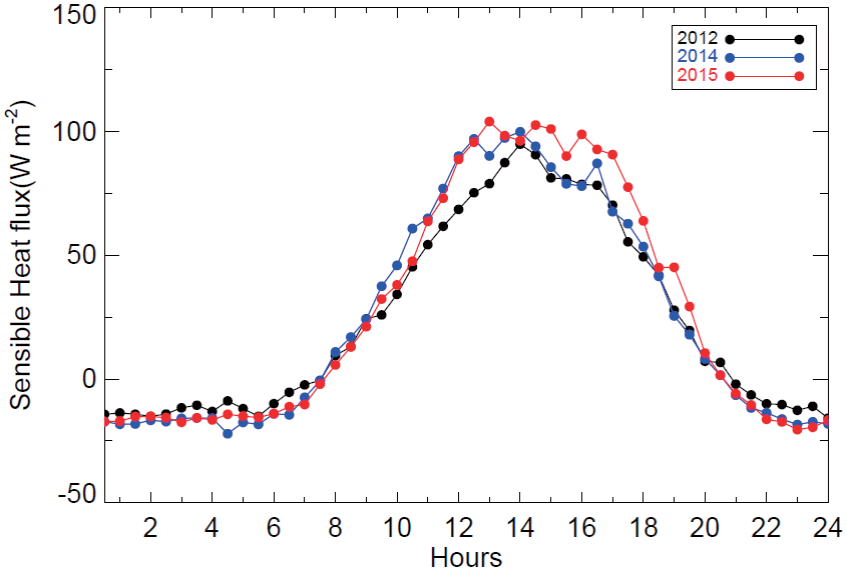


Fig. 43. Diurnal variation of sensible heat flux averaged during summer.

(다) 잠열 플럭스

Fig. 44~46에 각각 2012, 2014, 2015년 7월과 8월에 관측된 잠열 플럭스를 나타내었다. 현열과 마찬가지로 여름철에 강한 일사에 의해 뚜렷한 일변화를 보이며 (Fig. 47)

그 크기는 현열보다 다소 작아서 낮시간에 최대 약 200 Wm^{-2} 수준까지의 값을 보이고 야간에는 0에 가까운 값을 보여준다. 2015년의 경우 앞선 2012년과 2014년에 비해 낮시간 잠열 플럭스 크기가 큰 특징을 보였다.

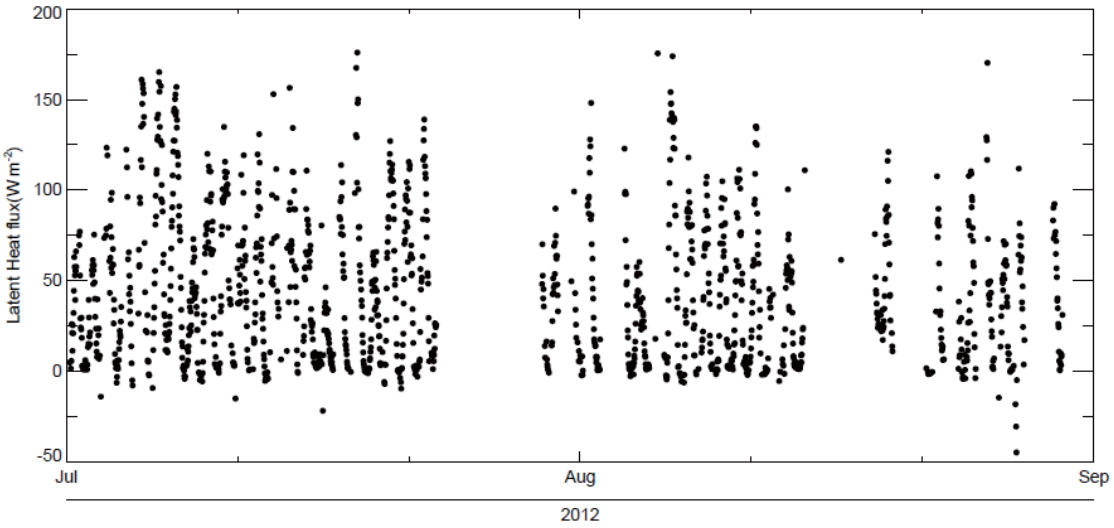


Fig. 44. Latent heat flux at Council site during summer in 2012.

극지연구소

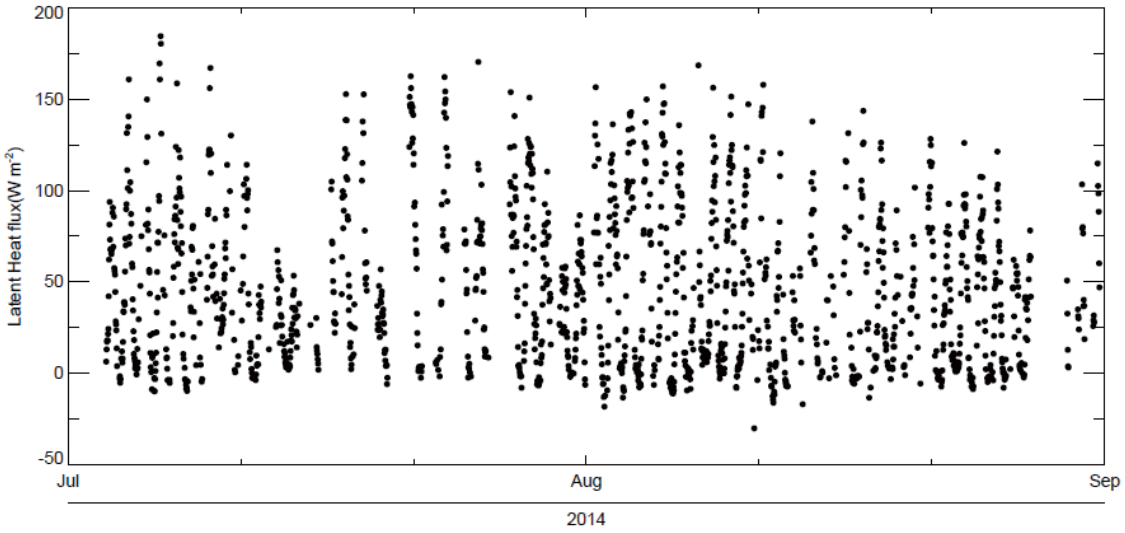


Fig. 45. Latent heat flux at Council site during summer in 2014.

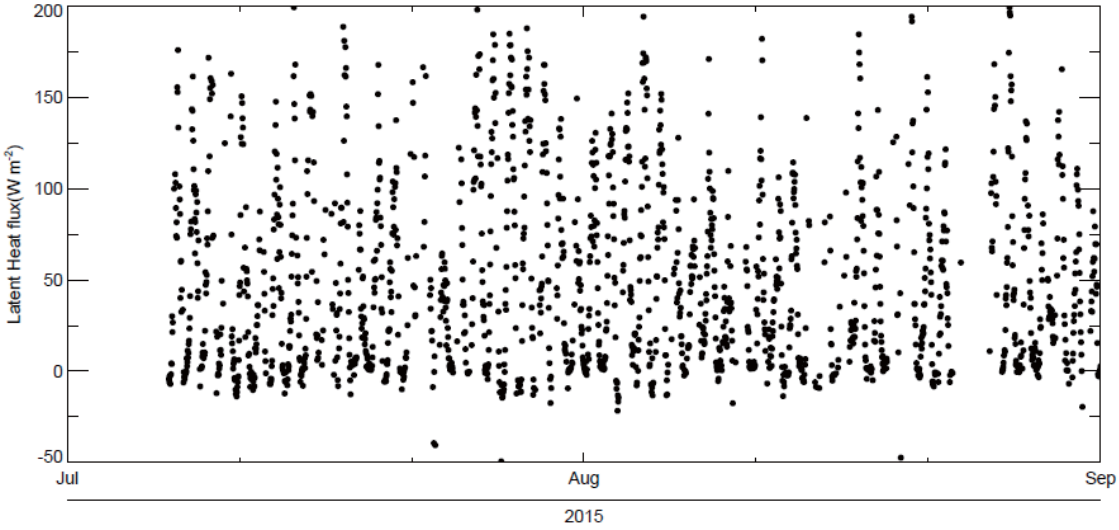


Fig. 46. Latent heat flux at Council site during summer in 2015.

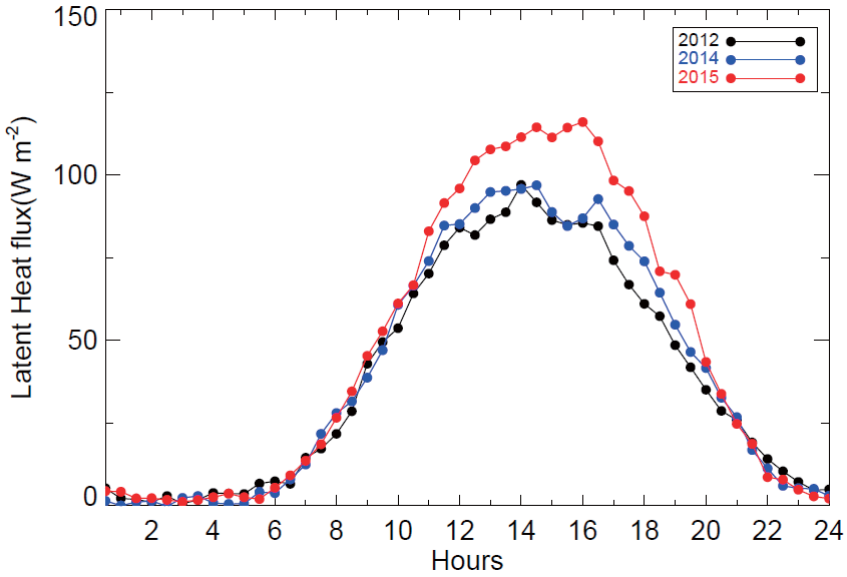


Fig. 47. Diurnal variation of latent heat flux averaged during summer.

(라) 온실기체

○ Net Ecosystem Exchange

에디공분산시스템에서 측정된 플럭스는 챔버 관측에 비해 수백 미터에 이르는 풋프린트를 갖고 있어서 사이트를 대표하는 값이라고 볼 수 있다. Fig. 48～50에 각각 2012, 2014, 2015년 7월과 8월에 관측된 이산화탄소 플럭스를 나타내었다. 현열 및 잠열과 마찬가지로 뚜렷한 일변화를 보여주고 있으며 (Fig. 51) 낮에 일사에 의한 광합성이 발생할 때는 최대 약 -10 $\mu mols^{-1}m^{-2}$ 수준까지의 이산화탄소 흡수량을 보이고 반대로 야간에는 약 5 $\mu mols^{-1}m^{-2}$ 수준의 이산화탄소 배출량을 보여주었다.

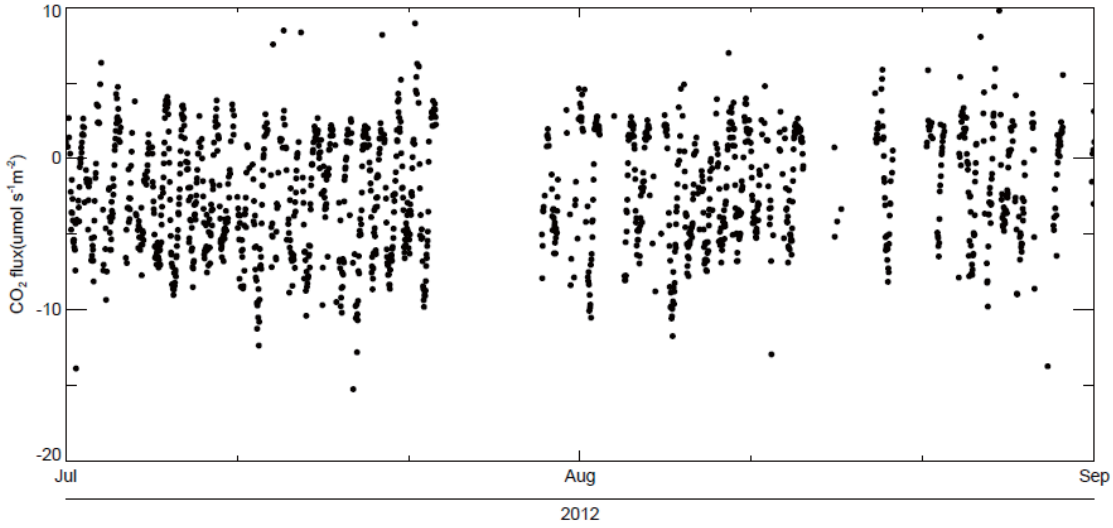


Fig. 48. CO_2 flux at Council site during summer in 2012.

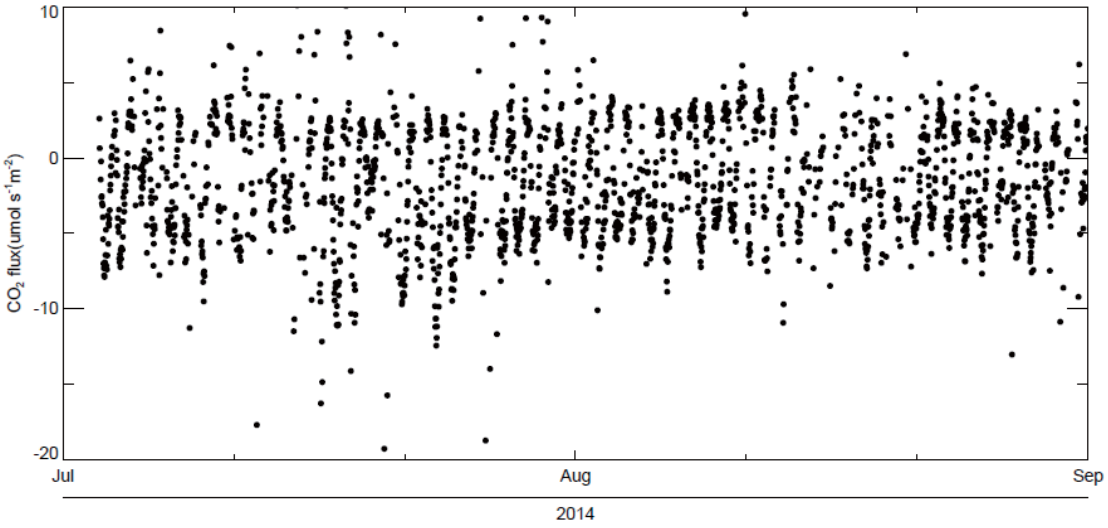


Fig. 49. CO_2 flux at Council site during summer in 2014.

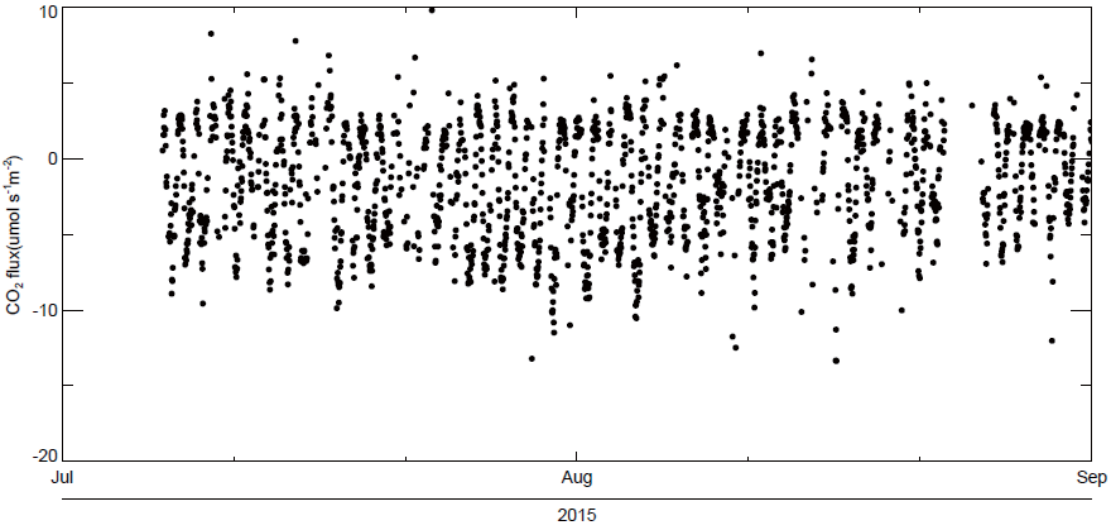


Fig. 50. CO_2 flux at Council site during summer in 2015.

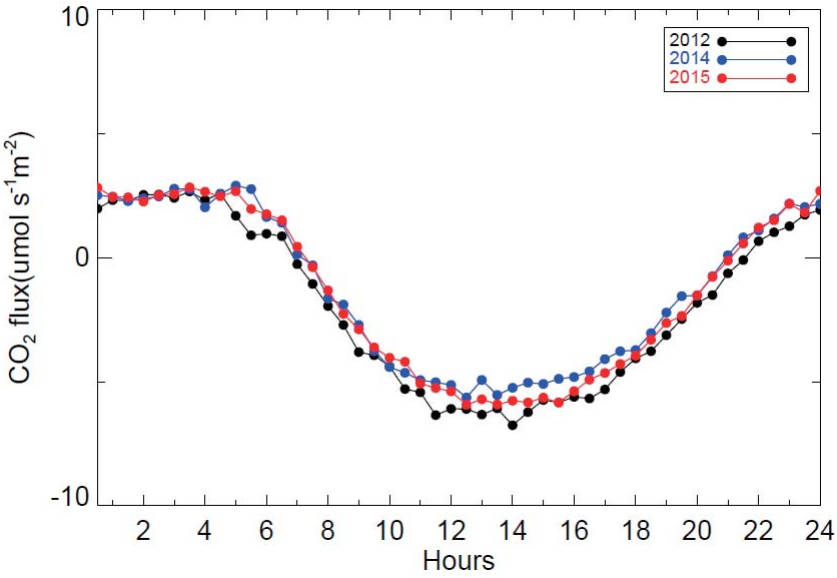


Fig. 51. Diurnal variation of CO_2 flux averaged during summer.

○ 식생종별 이산화탄소 플럭스

알래스카 카운실 자동챔버 시스템을 이용하여 각 식생별 이산화탄소 농도를 관측하였다. 관측된 식생별 이산화탄소 농도 결과를 통해 2014년과 2015년 순 이산화탄소 교환량 플럭스를 계산하였다(Fig. 52, 53). 식생별 비교 결과에서는 관목와 이끼류(Shrub & Moss), 이끼류(Moss) 그리고 지의류(Lichen)에서의 순 이산화탄소 교환량의 결과는 야간에 0.2 ~ 0.4mgm^{-2}s^{-1}의 범위를 보이며 여름 동안 탄소의 발원으로의 역할을 하고 있고, Tusscok 형태의 초본(Tussock grass)의 경우는 -0.2 ~ 0.2mgm^{-2}s^{-1} 범위에서 거의 균형을 이루고 있다. Li의 결과는 0.0 ~ 0.2mgm^{-2}s^{-1}의 범위로 탄소의 약한 발원의 결과를 보였다. 초본류의 식생 성장 상태는 2년 전과 비교하면 관목과 비교할 때, 더욱 왕성하게 성장했음을 알 수 있었다. 일부 챔버에서는 초본들의 성장으로 챔버를 거의 채우거나 밖으로 이탈하는 경우도 있었다. 따라서 잎의 성장이 빠르므로 다른 식물보다 비교적 많은 양의 이산화탄소 흡수가 가능하다. 두 해의 비교에 있어서는 2015년의 관목와 이끼류(Shrub & Moss) 야간의 호흡량의 범위가 최대 0.5mgm^{-2}s^{-1} 까지 증가하면서 2014년보다 큰 값을 보였다.

2012, 2014, 2015년 자료를 이용하여 토양에서 대기로 방출되는 토양 이산화탄소 플럭스(efflux)를 계산하였다. 각 식생별 관목와 이끼류(Shrub & Moss), 이끼류 (Moss), Tusscok 형태의 초본(Tussock grass) 그리고 지의류(Lichen) 챔버에서 관측된 토양 이산화탄소 플럭스를 정리하였다 (Fig. 54). 식생별 정량적인 차이의 비교에서는 대체적으로

관목와 이끼류(Shrub & Moss)와 이끼류 (Moss)의 결과에서 가장 높은 값을 보였고, 다음으로는 초본(Tussock grass) 그리고 지의류(Lichen) 순이었다. 세 해의 결과를 비교하여 살펴보면, 2015년에 지의류를 제외한 대부분의 식생에서 상대적으로 많은 양의 토양 이산화탄소 방출이 있었고, 방출량의 정량적인 비교에서 2012년과 2014년은 큰 차이를 보이지 않았으나, 식생별 차이는 있었다(Fig. 55). 2014년의 경우, 특이한 결과 중 하나는 높은 기온을 보였던 8월 식생의 반응을 살펴보면, 이전 7월에 많은 양의 강수로 인해 모든 식생에서의 토양 호흡량이 거의 0 $mgm^{-2}s^{-1}$ 가까운 낮은 값이었다가, 기온이 매우 높았던 8월에는 대부분의 식생 호흡량은 급속하게 증가하며 지속적으로 높은 값을 보이며 다른 해 보다 높거나 비슷하였다. 그러나 현화식물 포함된 관목와 이끼류(Shrub & Moss) 챔버 결과에서는 약간의 증가만 있었을 뿐 다른 해와 비교하여 상대적으로 작은 방출량을 보였다. 즉, 뿌리 호흡을 하는 현화식물의 경우, 지속적인 높은 기온은 뿌리 호흡을 억제했으리라 추정한다.

정리하면, 2014년에는 7월 많은 강수량에 대해서, 토양 이산화탄소 방출량은 음의 상관관계를 보였고, 8월 높은 기온에 대해서는 현화 식물이 포함된 챔버를 제외하고는 기온에 대하여 양의 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 2012년 8월에도 확인할 수 있는데, 8월 많은 양의 강수가 있었던 중순의 결과에서도 집중적인 강수에 따라 토양 이산화탄소 방출량이 급격히 감소하였다. 결론적으로 강수량에 대하여 토양 호흡량이 억제되는 결과가 발생하였는데, 그러한 이유는 많은 양의 강수가 토양의 공극을 채우면서 물리적으로 방출을 억제했을 확률이 높다. 따라서 토양 수분의 변화도 함께 고려하여 확인하고, 아울러 기온뿐만 아니라 토양 온도와의 관계를 추가적으로 분석할 예정이다. 세 해 동안의 토양 이산화탄소 플럭스를 적산하여 비교하였다(Fig. 56). 2015년의 결과에서 많은 양의 토양 이산화탄소 플럭스 방출이 있었는데, 특히 관목와 이끼류(Shrub & Moss), 이끼류 (Moss)에서 상대적으로 매우 많은 방출이 있었고, 반면 지의류에서는 약간 감소하였다.

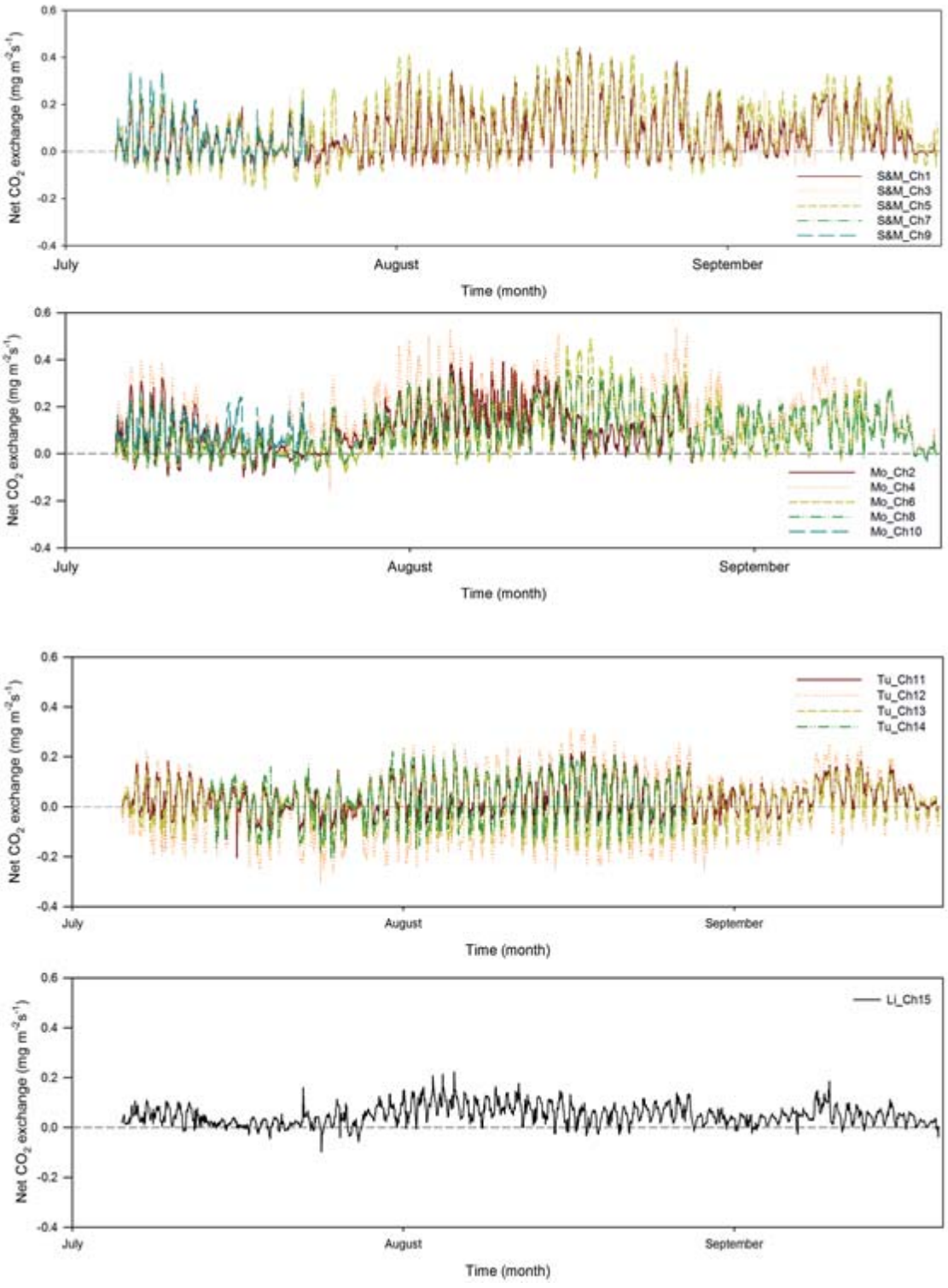


Fig. 52. Net CO2 exchange at dominant vegetation types (2014).

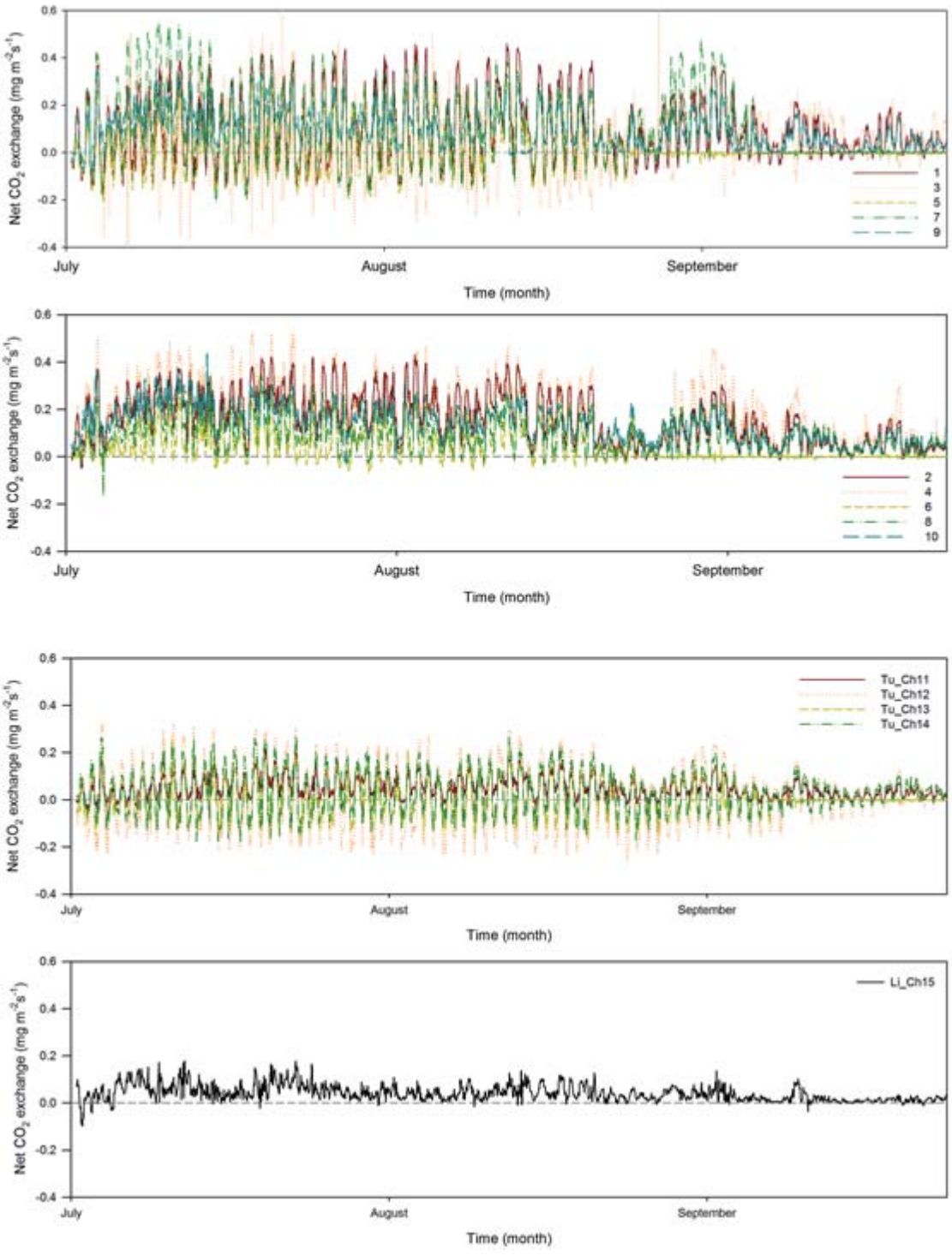


Fig. 53. Net CO2 exchange at dominant vegetation types (2015).

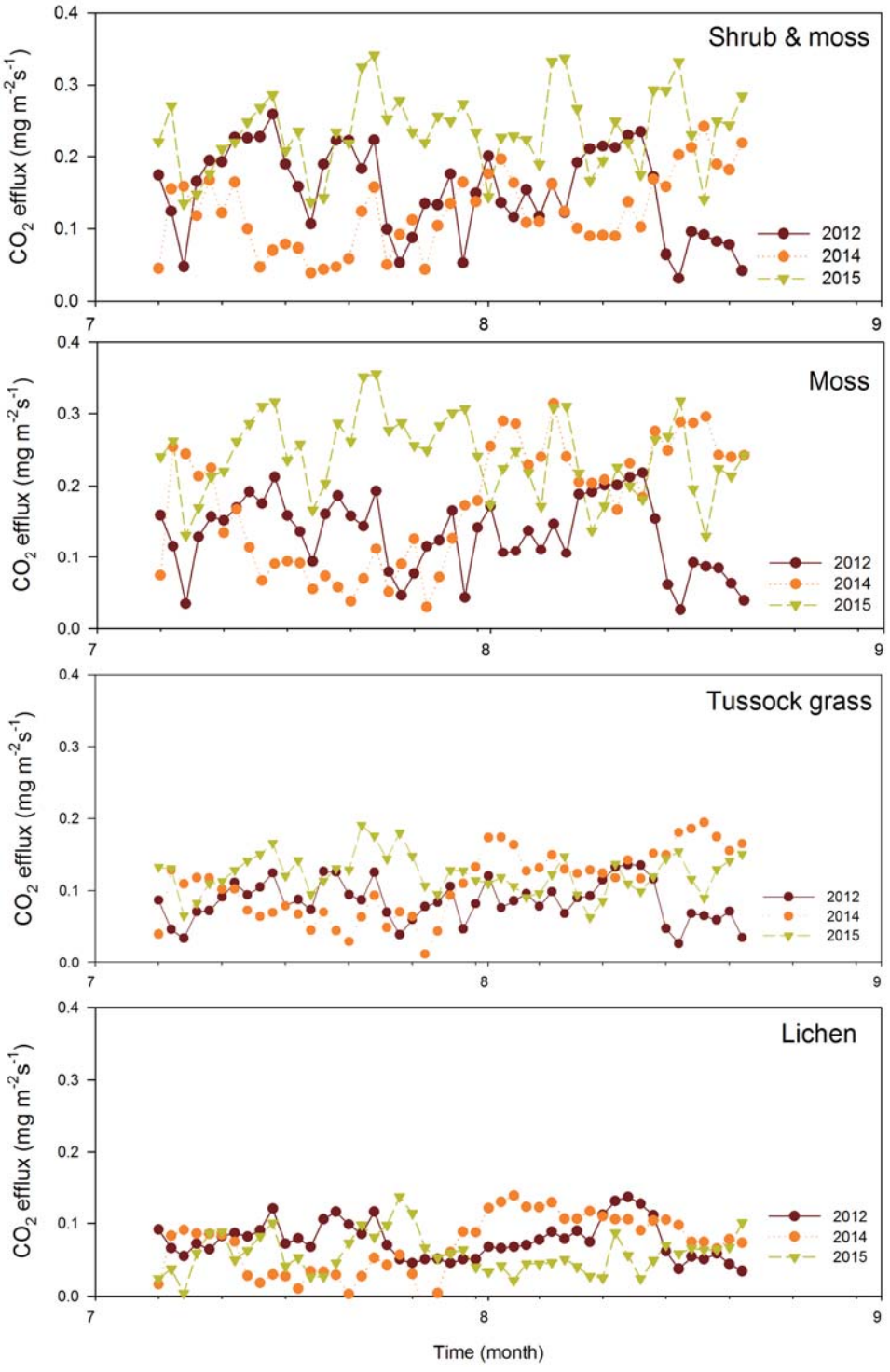


Fig. 54. Soil respiration at dominant vegetation chambers (2012, 2014, 2015).

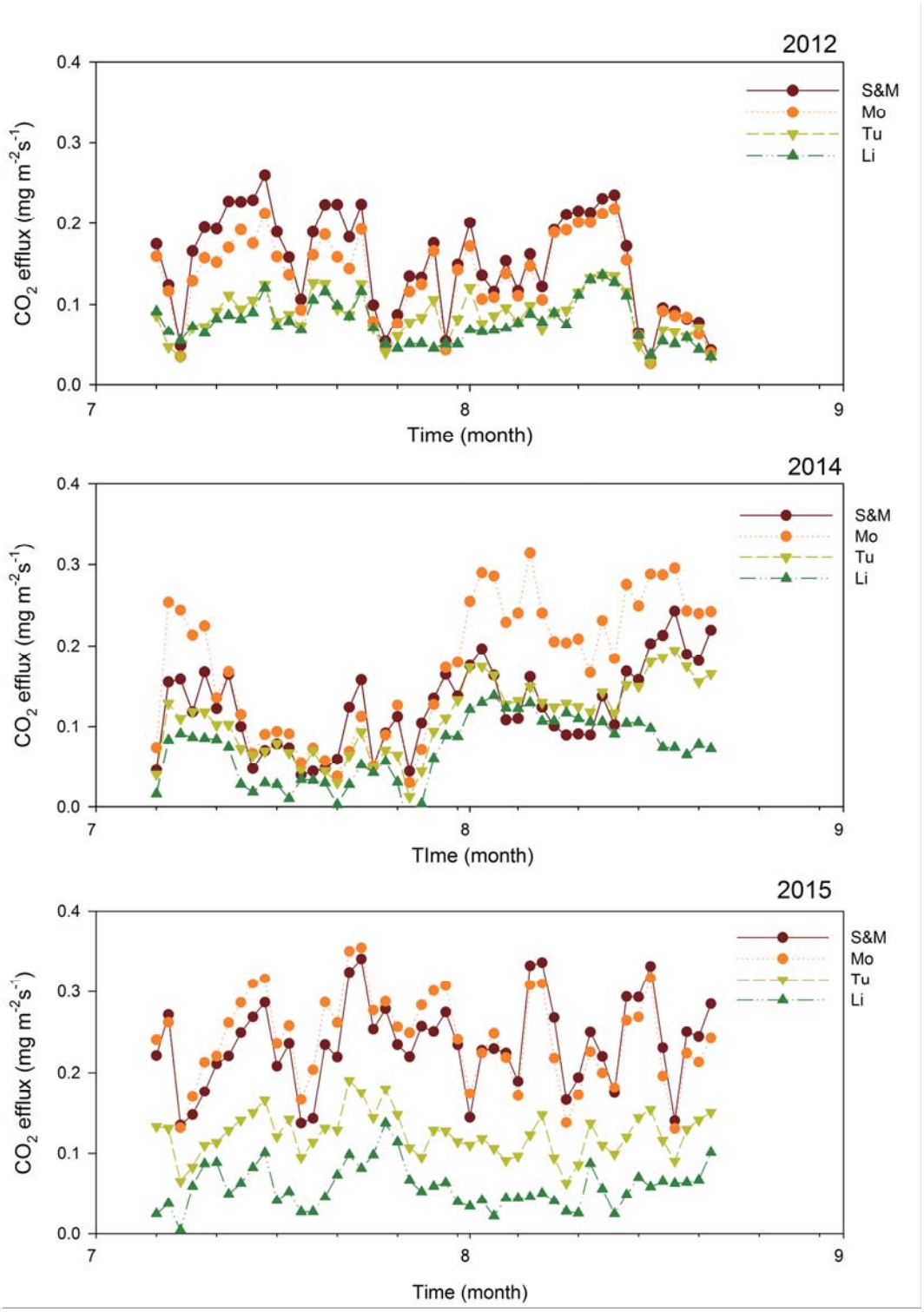


Fig. 55. Soil respiration at dominant vegetation chambers in 2012, 2014, and 2015.

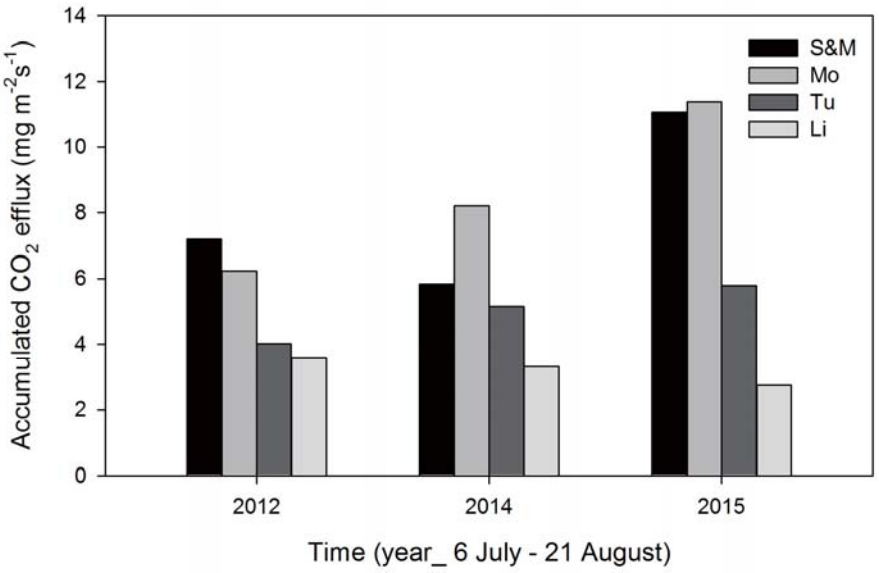


Fig. 56. Soil respiration amount at dominant vegetation types in 2012, 2014, and 2015 accumulated during summer.

○ 환경 조절 인자를 이용한 토양 이산화탄소 플럭스의 추정

자동 개폐 챔버시스템을 운영하지 않았던 2013년 토양 이산화탄소 플럭스를 추정하기 위하여 2012년의 토양 온도와 토양 이산화탄소 플럭스와의 상관관계를 이용하였다. 지수함수식을 이용하여 계수를 산출한 후 계수를 이용하여 각 챔버별 토양 이산화탄소 플럭스를 산출하였다(Fig. 57). 또한 100m × 100m 공간에 대하여 ubiquitous sensor network-based remote monitoring system (U-RMS)을 이용한 토양 온도 온도 및 수분 분포 자료를 이용하여 토양 이산화탄소 플럭스의 공간 확장을 시도하였다(Fig. 58).

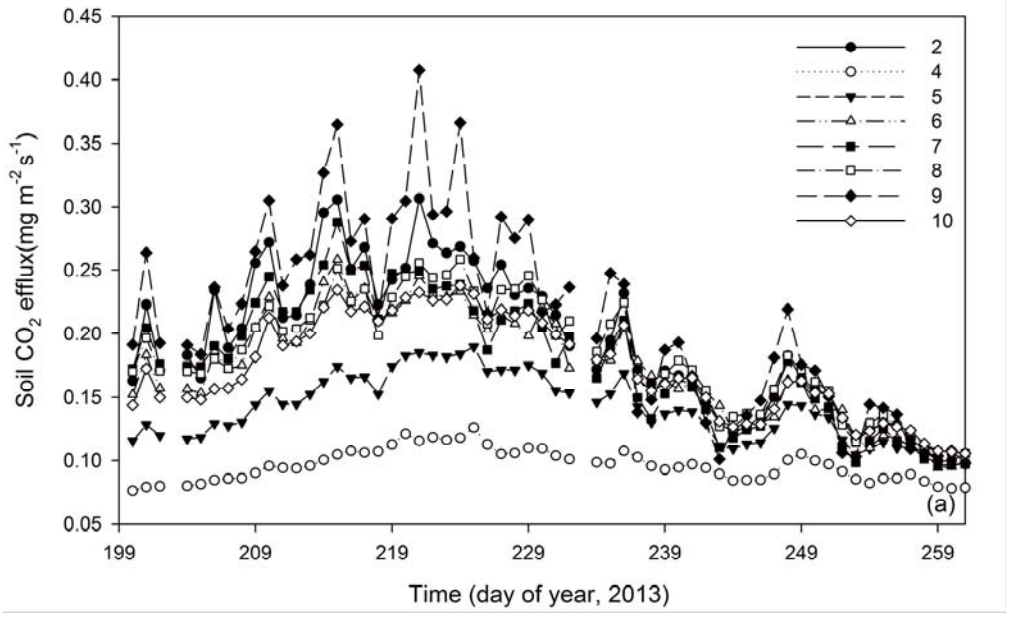


Fig. 57. Estimated soil respiration at each chambers.

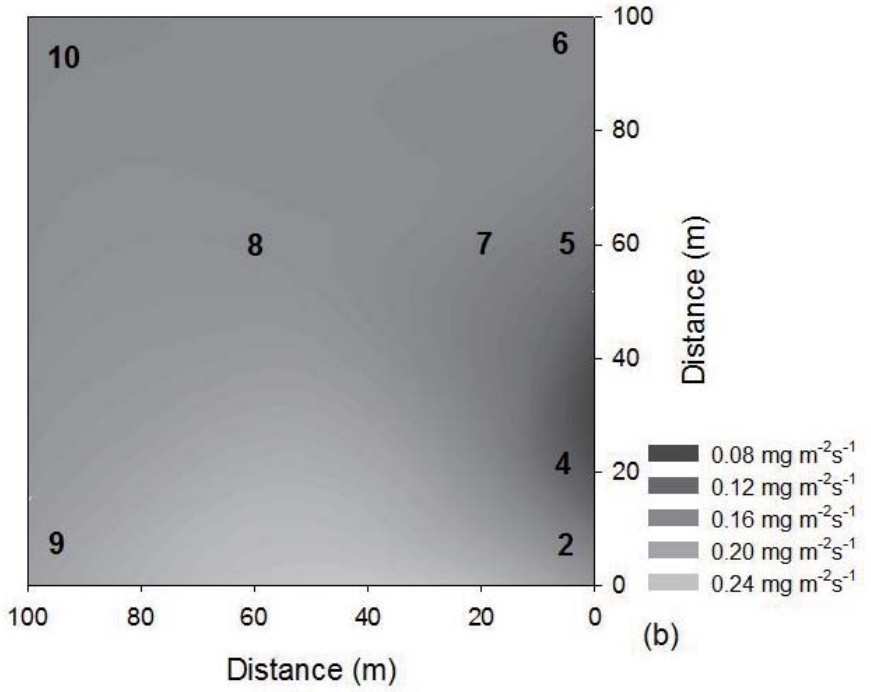


Fig. 58. Spatial distribution of soil respiration estimated with soil temperature.

○ 이산화탄소 배출(호흡)량 시공간적 변동

카운실 사이트에서 수행된 81개 지점 수동챔버 관측을 통해 40×40미터 영역에서의 이산화탄소 호흡량 공간분포 특성을 분석하였다. 아래 Fig. 59는 2011년과 2012년 측정자료를 분석해 얻은 여름철 월별 공간분포를 보여주고 있다.

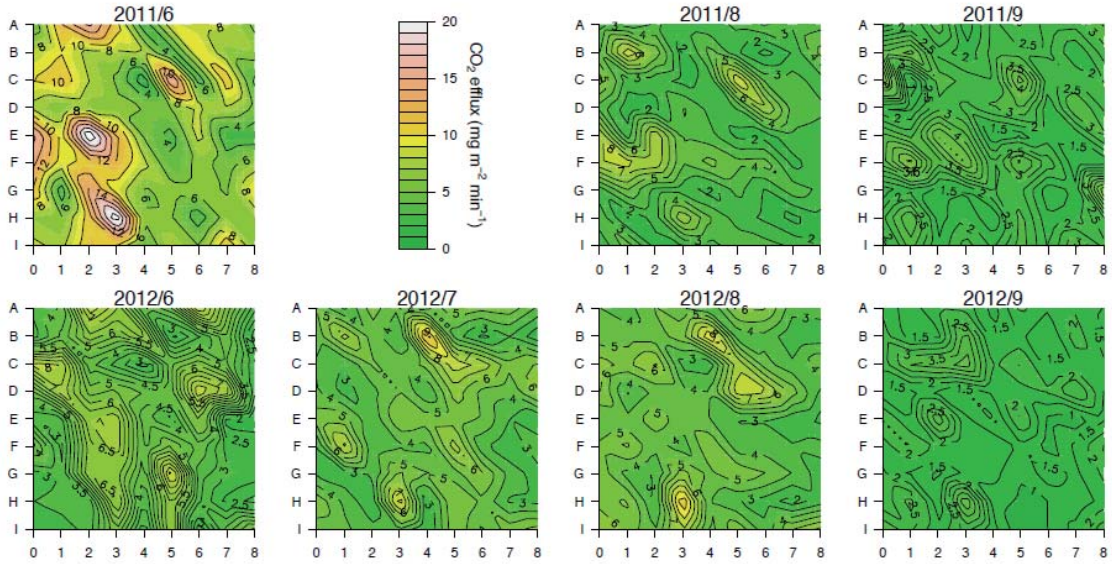


Fig. 59. Spatial distribution of CO2 efflux ($mgCO_2\ m^{-2}\ min^{-1}$) within a 40m×40m plot (5m interval; 81 points) in Council, Seward Peninsula, Alaska during the growing seasons of 2011 (upper panel) and 2012 (lower).

○ 메탄 플럭스

카운실 사이트는 습윤한 동토층 지역으로서 지표 유기물층의 분해에 의해 메탄 방출 가능성이 높은 지역이다. 본 연구과제 수행 중 2014년 7월 하계집중관측 기간에 약 3주간 에디공분산장비에 메탄분석기를 장착하여 메탄 플럭스를 측정하였으며 아래에 3주간 평균된 일변화 양상을 나타내었다. 예상대로 일중 대체로 메탄 방출 현상이 관측되었으며 낮시간에 가장 높은 방출량을 보여주었다. 3주간의 평균 자료에서 볼 때 낮시간에 약 0.3 $\mu gCH_4m^{-2}s^{-1}$ 수준이었고 기온이 낮아지는 야간에는 방출량이 0에 가까운 수준을 보여주었다(Fig. 60).

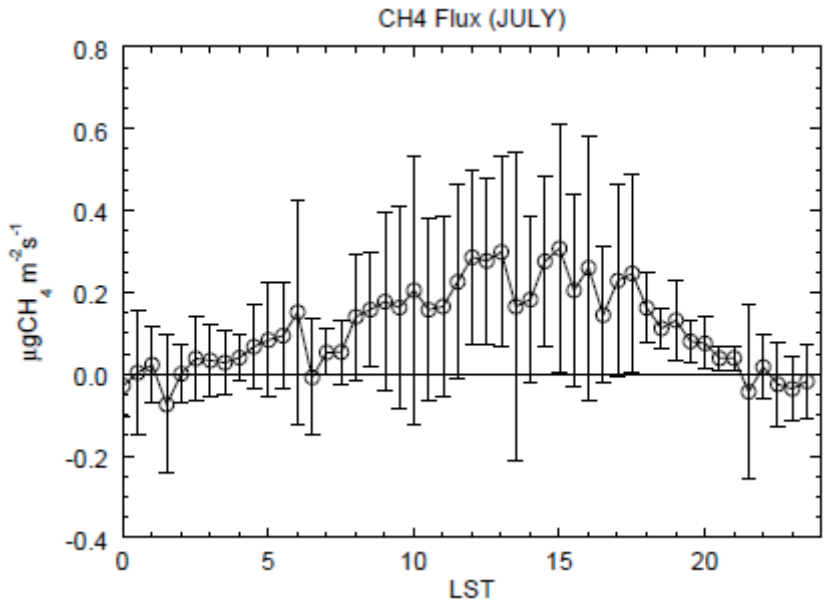


Fig. 60. Mean diurnal variation of CH4 flux in July 2014.

(마) 복사에너지

복사에너지는 단파(태양복사) 복사와 장파(지구 또는 대기복사) 복사로 구별될 수 있으며 상향 및 하향 복사에너지의 차이에 의한 순복사에너지가 지표면에 작용하는 가장 근원적인 에너지 원천이 되므로 동토층에서의 에너지수지 및 그 변화의 영향을 이해하는데 있어서 매우 중요하다.

○ 여름철 복사에너지

- 2013년 여름철 자료는 자료집록기 문제로 인해 유시된 관계로 2014년과 2015년 여름철 (7월, 8월) 태양복사 에너지의 변화를 Fig. 61과 62에 나타내었다. 단파복사에너지는 구름의 영향을 크게 받으므로 여름철에 강수현상이 있는 경우에 (2014년 7월 11일 이후 약 5일간) 낮은 값을 보이며 계절적으로는 6월 하순 하지를 경과한 이후 태양고도각이 감소하기 때문에 낮시간 최고값이 7월과 8월에 걸쳐 서서히 감소하는 경향을 볼 수 있다. 7월에 기록된 최고값은 맑은날 낮에 약 800 Wm^{-2} 수준이며 8월에는 대체로 700 수준 이하의 값을 기록한다. 하향 단파에너지 대비 상향 단파에너지의 비율은 지표면에서 반사되는 태양복사에너지 비율 즉 '알베도'라고 정의되며 지표면 종류, 수분, 식생타입, 식생량 등에 따라 결정된다. 카운실 사이트의 경우 습윤한 툰드라지대로 분류되며 여름철 알베도는 약 0.18 정도를 보여준다. 즉 지면으로 입사한 태양복사에너지 중 82%가 지면 식생 및 토양에 흡수되고 18%는 반사되어 대기중으로 방출된다.

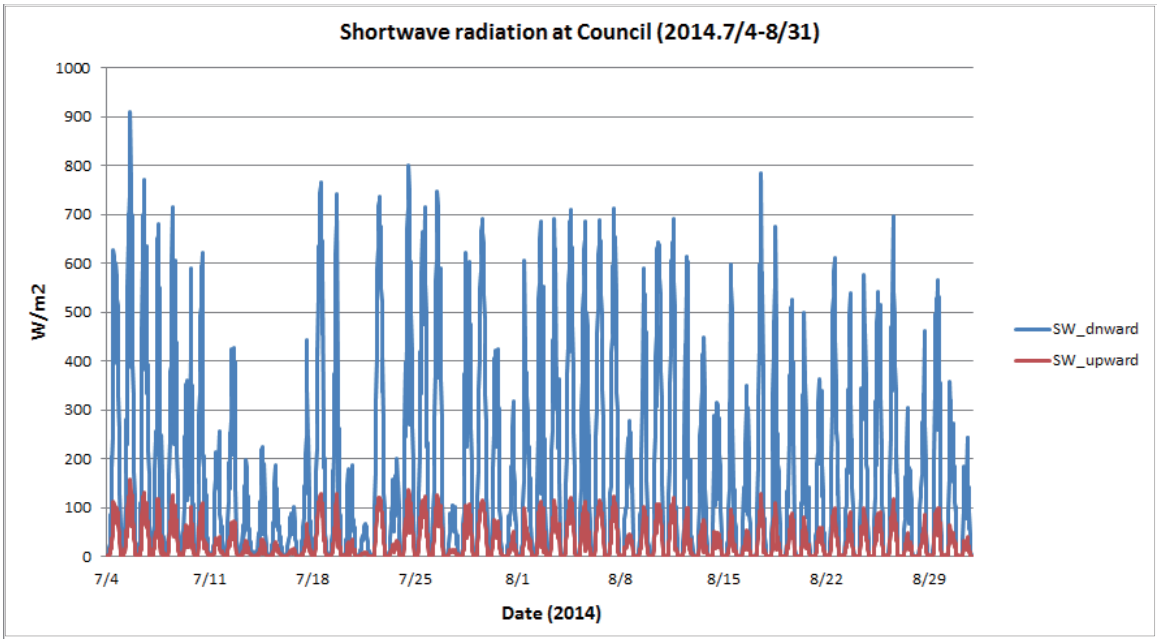


Fig. 61. Shortwave radiation measured at the Council site during July and August 2014.

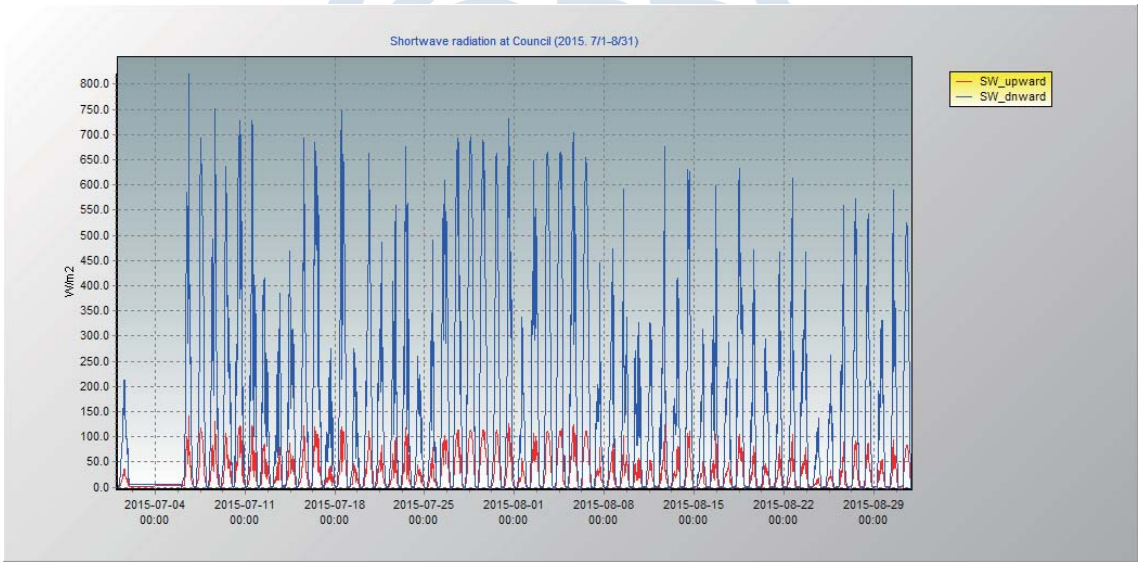


Fig. 62. Shortwave radiation measured at the Council site during July and August 2015.

- Fig. 63과 64는 2014년과 2015년 여름철 (7월, 8월) 장파복사 에너지의 변화를 나타내었다. 장파복사에너지는 단파복사에너지와 함께 순복사에너지를 결정하는 인자이며 역시 구름의 영향을 크게 받는다. 하향 장파복사 에너지는 상층대기의 온도 및 수분량에 크게 좌우되고 상향 장파복사 에너지는 지표면의 온도에 따라 결정된다. 여름철에 지표면 온도가 대기보다 높기 때문에 상향 장파복사 에너지가 하향 장파복사 에너지보

다 큰 값을 나타내며 특히 지표면 온도는 여름철 일사량 효과로 인해 뚜렷한 일변화를 보이므로 상향 장파복사 에너지 또한 낮시간에 크고 밤에 줄어드는 뚜렷한 일변화를 보이지만 상층대기 온도에 좌우되는 하향 장파복사에너지는 상대적으로 일변화 패턴을 약하게 보여준다. 하향 및 상향 장파복사 에너지의 차이에 의한 순장파복사 에너지는 이 기간 상향 에너지가 커서 장파복사에 의한 효과만을 볼 경우 지속적으로 냉각되고 있음을 알 수 있다. 그러나 낮시간에는 순단파복사 에너지의 크기가 매우 커서 지표면이 받는 순복사에너지는 양의 값, 즉 가열 효과를 가지며 태양빛이 약해지는 밤시간에는 음의 순복사에너지, 즉 냉각 효과가 나타난다.

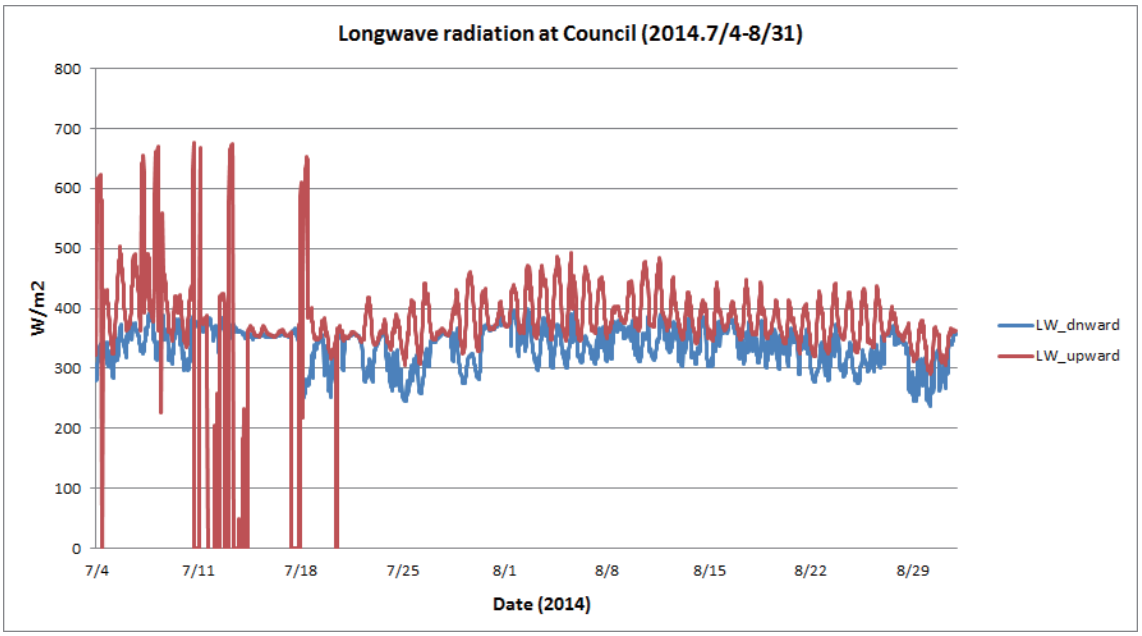


Fig. 63. Longwave radiation measured at the Council site during July and August 2014.

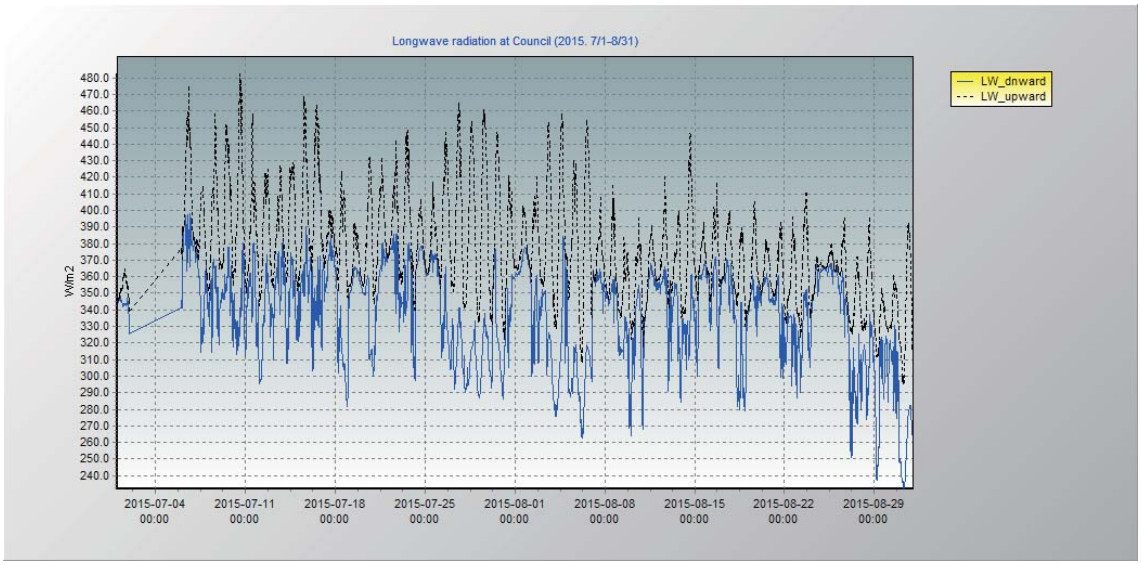


Fig. 64. Longwave radiation measured at the Council site during July and August 2015.

○ 가을철 복사에너지

- 앞서 7월과 8월 복사자료를 보였고, 계절에 따른 변화를 보기 위해 9월과 10월, 즉 가을철 복사에너지 자료를 보고자 먼저 2013년부터 2015년 가을철 단파복사 에너지를 Fig. 65부터 67에 나타내었다. 자료집록기가 2013년 9월에 수리되어 2013년 9월 14일부터의 자료를 획득할 수 있었다. 우선 앞서 여름철 단파복사 에너지 자료로부터 나타났던 계절적 감소경향이 이어지며 9월에는 400~500 Wm^{-2} 수준, 10월말에는 낮시간 최고값이 200 Wm^{-2} 수준을 넘지 못해 7월과 8월에 비해 25% 수준으로 감소한다. 2013년 10월 상순과 중순에 낮은 값을 보이는 것은 지속적으로 흐린 날씨 때문인 것으로 보이며, 이는 반사도가 높아지지 않은 것으로부터 알 수 있다. 이에 비해 2014년과 2015년에는 점진적으로 태양복사 에너지가 감소하는 양상을 보이고 있다.

지표면의 태양복사 반사율 즉 '알베도'는 눈이 내리기 전까지는 여름철 값과 비슷하다가 눈이 내려 지면을 덮으면 0.8~0.9 이상의 높은 값을 보인다 (예. 2014년 10월 23일 이후). 즉 태양고도각 감소에 따라 입사 태양복사 에너지가 감소하는 계절적 경향에 더해 눈이 내린 이후에는 그나마의 태양복사 에너지마저 90% 정도 반사되므로 지면에 흡수되는 복사에너지는 급격한 감소를 보이게 되어 지면의 복사냉각을 강화시키는 역할을 하게 된다.

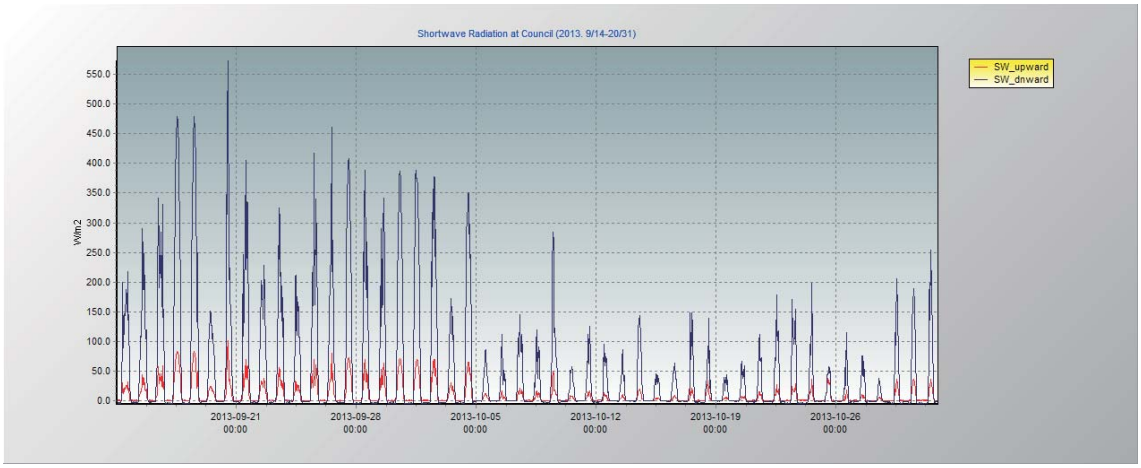


Fig. 65. Shortwave radiation measured at the Council site during September and October 2013.

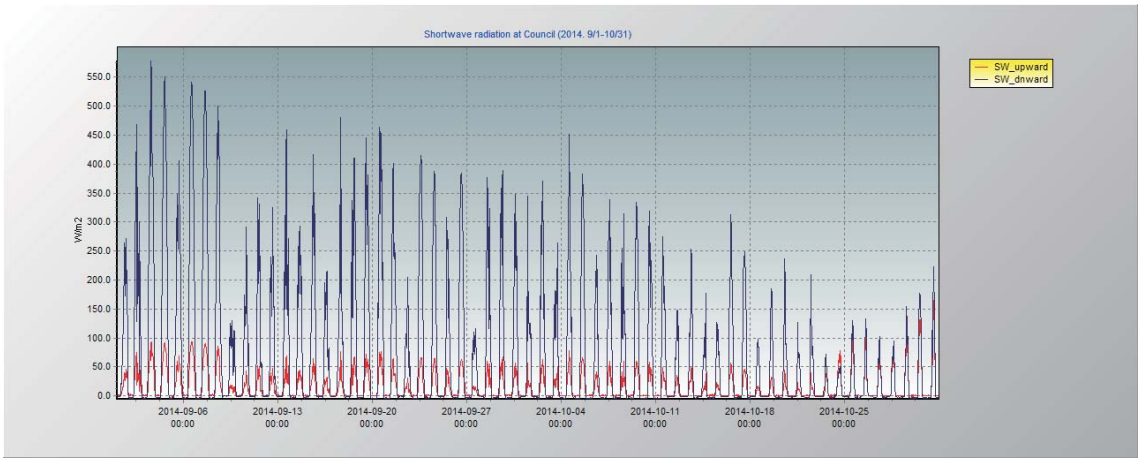


Fig. 66. Shortwave radiation measured at the Council site during September and October 2014.

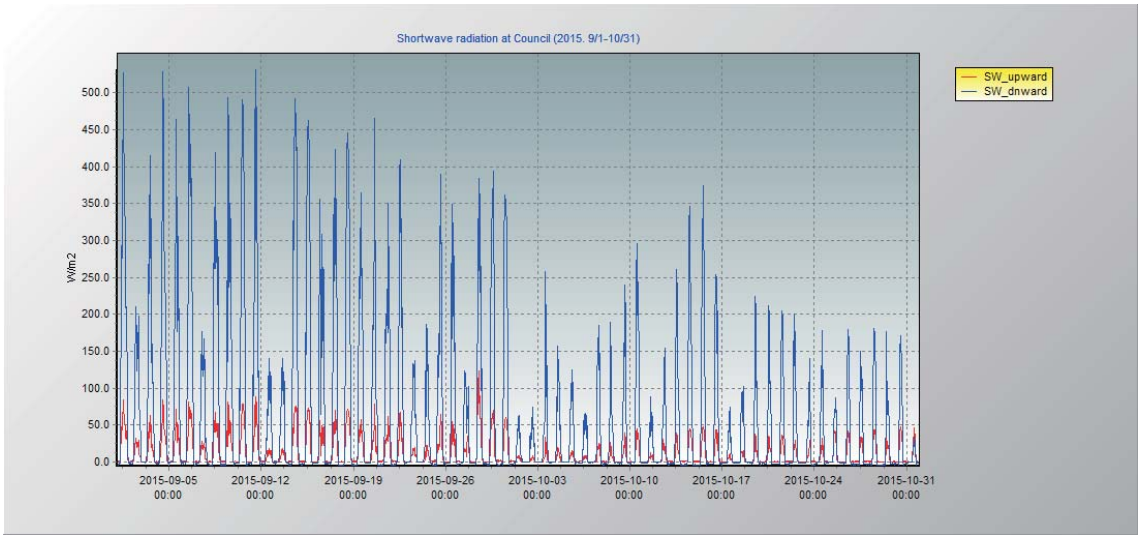


Fig. 67. Shortwave radiation measured at the Council site during September and October 2015.

- 2013년부터 2015년 가을철 (9월, 10월) 장파복사 에너지의 변화를 Fig. 68부터 70에 나타내었다. 여름철과 마찬가지로 가을철에도 지면에서 방출되는 장파목사 에너지의 크기가 대기로부터 지면으로의 장파복사 에너지보다 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 2013년 10월 상순과 중순의 경우 하향 장파복사 에너지가 상향값에 버금가는 큰 값을 가지는데 이는 앞서 2013년 가을 단파복사 에너지 변화에서 설명했듯이 구름이 많이 낀 날씨 때문이며 구름이 많으면 상층 대기에 비해 상대적으로 높은 온도를 가지는 구름으로부터 많은 양의 장파복사 에너지가 지면으로 방출된다.

앞서 단파복사 에너지가 가을철에 감소함을 보였는데 이는 장파복사 에너지의 순냉각 효과와 더해지며 가을철에 지면 온도를 하강시킨다. 특히 여름철에는 낮시간 단파복사 에너지에 의한 온도상승 효과가 있었는데 반해 가을철에는 낮시간 일사 효과도 약해지면서 온도하강을 강화한다.

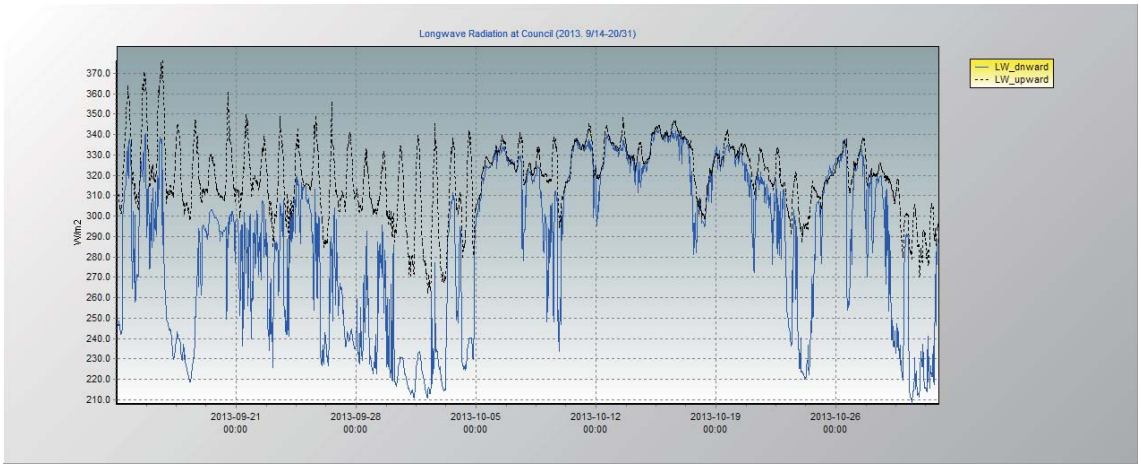


Fig. 68. Longwave radiation measured at the Council site during September and October 2013.

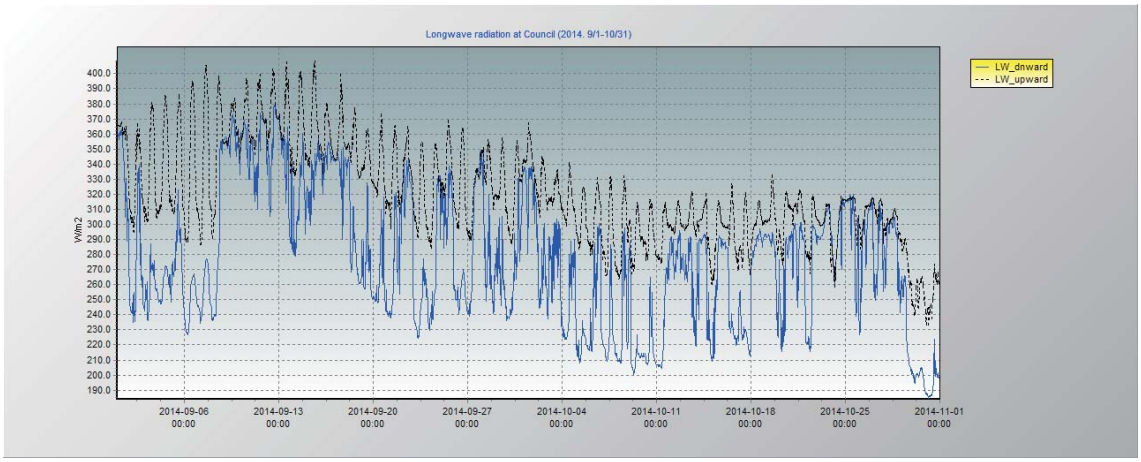


Fig. 69. Longwave radiation measured at the Council site during September and October 2014.

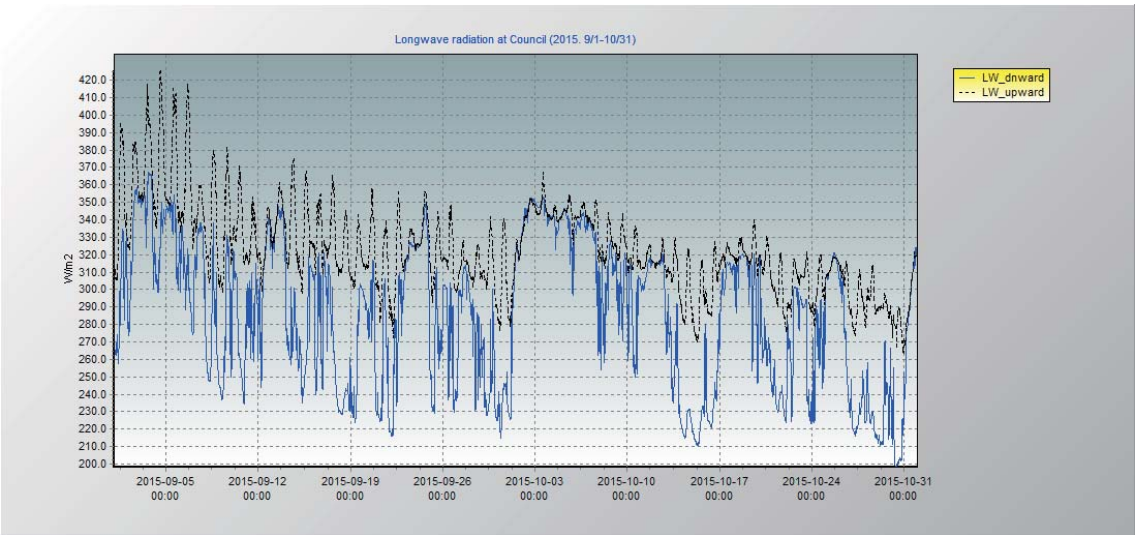


Fig. 70. Longwave radiation measured at the Council site during September and October 2015.

○ 겨울철 및 봄철 복사에너지

- 복사에너지의 계절변동성을 파악하기 위해 초겨울(11월)부터 초봄(4월)까지의 복사자료를 살펴보고자 한다. Fig. 71은 2014년 11월부터 2015년 4월까지의 하향 단파복사 에너지를 그렸고 Fig. 72는 2015년 11월부터 2016년 4월까지의 하향 단파복사 에너지를 나타내었다. 겨울기간의 단파복사 에너지를 보면 11월 하순부터 1월 중순까지는 낮시간 최고값이 약 20 Wm^{-2} 이하 수준을 보여 실제적으로 유효한 태양복사가 거의 없는 극야에 가까운 환경임을 보여주고 있다. 그러다가 1월 중순 이후부터 태양복사가 꾸준히 증가하여 4월말이 되면 낮시간 최고값이 약 700 Wm^{-2} 수준을 회복한다. 그러나 카운실 사이트가 대체로 10월말부터 다음해 5월초까지 눈으로 덮혀 있기 때문에 실제로 지면에 흡수되는 태양복사 에너지는 무시할 수준이며 우선적으로 지면을 덮은 눈표면의 온도를 상승시키며 녹이는 역할을 하게 된다.

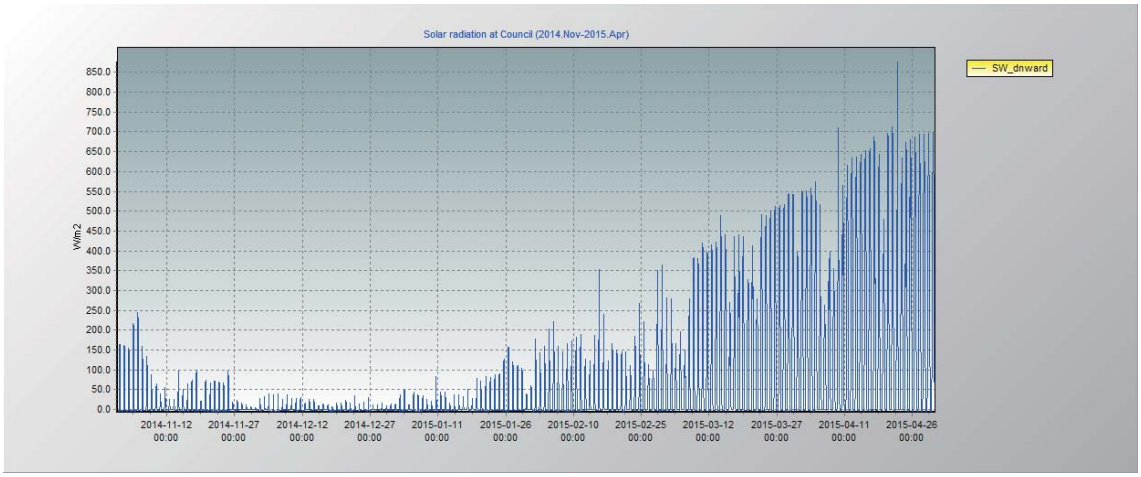


Fig. 71. Downward shortwave radiation at the Council site from November 2014 to April 2015.

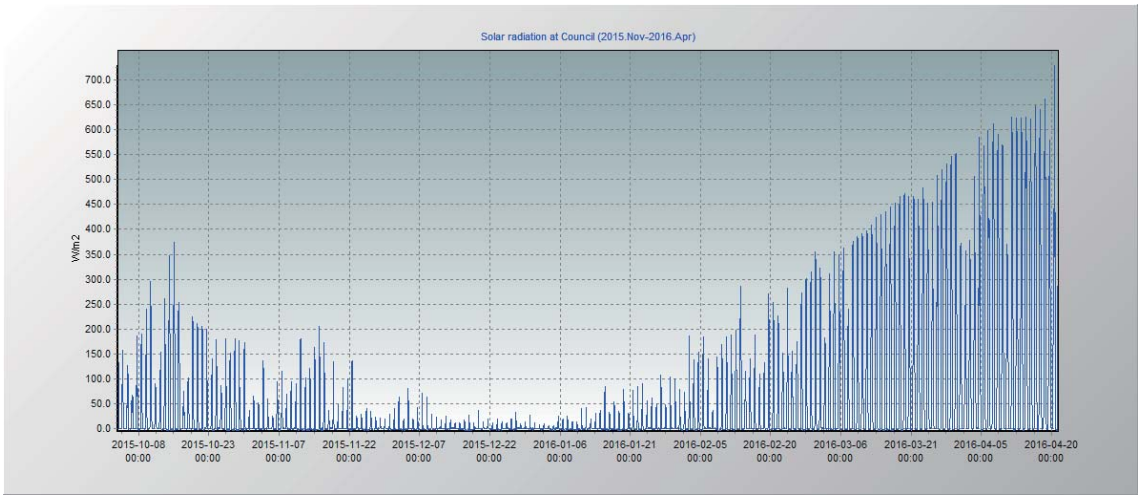


Fig. 72. Downward shortwave radiation at the Council site from November 2015 to April 2016.

- Fig. 73은 2014년 11월부터 2015년 4월, Fig. 74는 2015년 11월부터 2016년 4월까지의 장파복사 에너지 변화를 나타내었다. 상향 장파복사 에너지는 표면온도에 좌우되기 때문에 이 시기 눈표면 온도의 변화 양상을 대변한다고 볼 수 있으며 하향 장파복사 에너지는 상층 대기의 온도와 구름의 존재 여부에 크게 좌우된다.

겨울철 및 봄철에도 앞선 여름철 및 가을철과 마찬가지로 지면에서 방출되는 상향 장파복사 에너지가 대기로부터 지면으로의 하향 장파복사 에너지보다 큰 값을 가진다. 그러나 구름이 많은 흐린 날에는 상향 및 하향 장파복사 에너지가 비슷한 크기를 보여 표면 온도 변화가 적게 하고 구름이 적은 날에는 장파복사 에너지만으로도 약 50~100

Wm^{-2} 수준의 순냉각효과를 보여 온도를 하강시키게 된다.

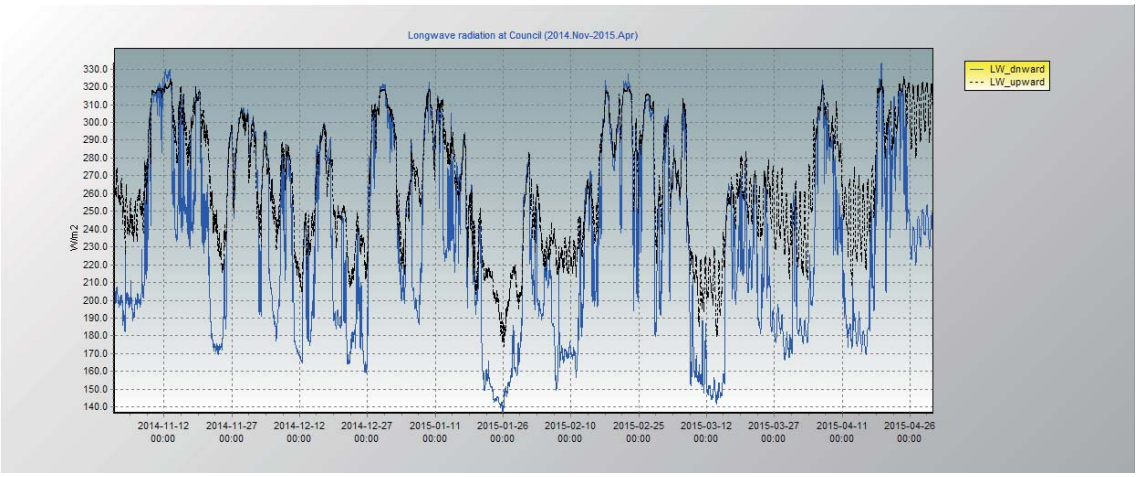


Fig. 73. Longwave radiation at the Council site from November 2014 to April 2015.

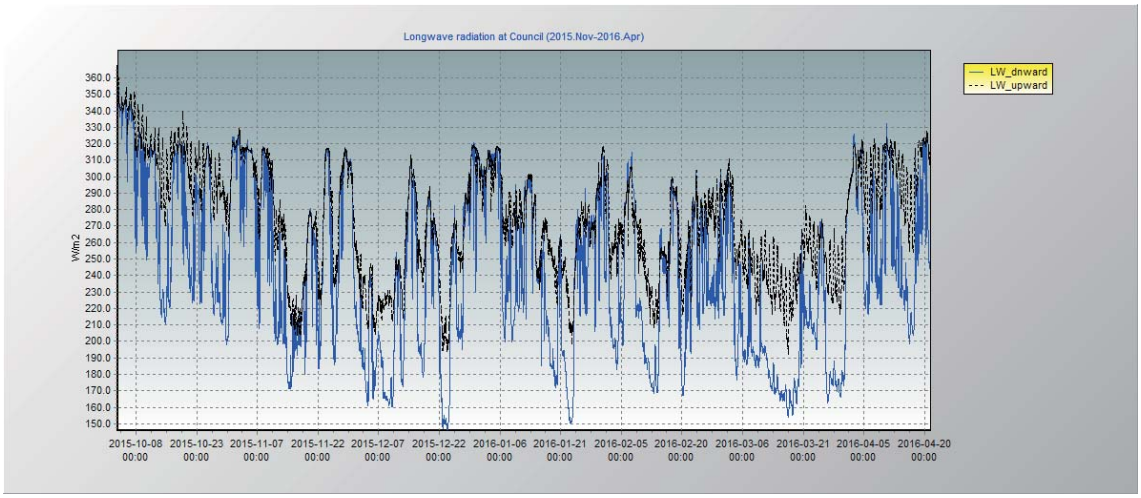


Fig. 74. Longwave radiation at the Council site from November 2015 to April 2016.

2. 캐나다 누나붓 주 “캠브리지 베이”(제2거점)

가. 대기-동토 온실기체 교환 특성

(1) 관측지 개요

제2거점 관측지는 캐나다 누나붓 준주의 캠브리지 베이(69° 7 ‘N, 105° 3’W)에 위치한다. 캠브리지 베이에는 인구 약 1,500명이 거주하고, 북극대학이 위치한 마을이 있다. 관측지는 마을에서부터 북쪽으로 자동차로 10분 거리에 있다. 관측지 주변에는 Environment Canada (EC) 소유의 지상 기상 관측 시스템과 상층 기상 관측 시스템이 있는데 운영과 관리는 현지의 Halmet of Cambridge Bay에서 담당한다. 마을 인근 여러 개의 담수호가 있는데 관측지에 위치한 플럭스 타워를 기준으로 북서쪽으로 약 200 m, 남서쪽으로 약 500 m에 호수가 있으며, 북쪽과 동쪽으로 약 1 km 떨어진 곳에 상대적으로 큰 호수가 있다. 관측지로부터 남동쪽으로 400 m 이상 떨어진 곳에는 소각장이 있어, 남동풍일 때에는 자료의 선택에 주의가 필요하다. 환북극 동토층 관측지 중에서 평균적으로 가장 추운 곳으로 1월 중 일 평균 기온은 -33℃까지 내려가며, 일 평균 기온에 근거하면 6월 ~ 8월 영상의 기온이 된다. 강수량이 적어 토양은 상대적으로 건조하며, 선태류, 지의류, 그리고 10 cm 이하의 초본류와 관목류가 주 식생을 구성한다.

캐나다 정부는 2007년 “Strengthernin Canada’s Sovereignty and Place in the World“를 발표하여 2017년 이 지역에 월동 가능한 첨단과학기지를 건설하여 북극연구의 거점으로 활용할 계획을 추진 중이다. 캐나다 북극연구활동을 지원하는 천연자원부 Polar Continental Shelf Program(PCSP)과 Canadian High Arctic Research Stations(CHARS)를 주도하는 INAC는 우리나라와 극지연구 협력에 많은 관심을 표명하고 있으며, 우리나라의 지역에서의 거점 관측지 구축 및 그에 따른 연구 활동은 국제 공동연구의 일환으로 지지를 받고 있다.

한국에서 캠브리지 베이로 가는 경로는 보통 캐나다의 캘거리, Yellowknife를 거쳐, 캠브리지 베이로 가는 항공기를 이용하게 되는 데 편도 3일이 소요된다. Yellowknife에서 매일 항공기로 접근 가능하며, 겨울에도 항공기가 운항된다. 또한 북서항로의 아래쪽에 위치하여 선박 접근도 용이하다. 캠브리지 베이에는 대학 및 관공서가 있기는 하지만 현 단계에서 우리 연구진이 활용할 수 있는 실험실은 없는 상태이다. 다만, 물품을 보관할 공간은 확보되어 있다.

숙소는 2 곳이 있으며, 식당도 호텔 내 한 곳에 불과하다. 다만, 관측지가 숙소로부터 멀지 않아 자동차를 이용하면 10분 내로 쉽게 접근이 가능하다. 관측지 주변에는 Environment Canada 소유의 지상 기상 관측 시스템과 상층 기상 관측 시스템, 그리고

마을로의 식수 공급을 위한 시설 등이 있어 교류 전기의 사용이 가능하다. 하지만, 인터넷은 이용할 수 없기 때문에 알래스카 카운실 관측지와 마찬가지로 관측 장비로부터의 자료는 자료 집록기에만 저장이 되기 때문에 자료 백업은 직접 방문하여 하게 된다.

(2) 관측

EC의 10 m 타워 뒤로는 남북방향으로 비포장 도로가 있다. 타워의 북동쪽 약 70 m 떨어진 곳에 Heater Shack이, 동쪽으로 길 건너편에 EC의 자동지상기상측정시스템(AWS)과 고층기상관측 시설이 있다 (Fig. 75). 남동쪽으로는 약 400 m 떨어진 곳에 소각장이 있다. 이에 대기-동토가 교환되는 온실가스 측정을 위한 연구 지역은 타워를 중심으로 북서에서 남서 방향의 섹터로 정하였다 (Fig. 76). 2012년 7월 대기와 동토 간의 에너지 및 이산화탄소 교환 연구를 위해 에디 공분산 시스템이 설치되었다 (Fig. 77). 에디 공분산 시스템은 삼차원 초음파 풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)와 개회로 CO2/H2O 기체 분석기(EC150, Campbell Scientific Inc., USA)로 구성되어 있다.

에디 공분산 시스템은 타워로부터 약 1.0 m 나와 있으며, 270도 방향을 바라본다. 플럭스 산출을 위한 에디 공분산 시스템의 측정 속도는 10 Hz이다. 기온과 기압은 EC150용 온도 센서와 기압 센서로부터 측정된다. 지표에서의 복사 수지를 정량화하기 위해 네 성분의 복사 즉, 하향태양복사, 상향태양복사, 하향지구복사, 상향지구복사를 측정할 수 있는 순 복사계(CNR4, Kipp & Zonen)가 지면으로부터 약 4.7 m의 높이에 남서쪽을 바라보게 설치되었다. 2014년 7월에는 하나의 토양열 플럭스가 0.08 m 깊이에, 네 개의 온도 센서로 이루어진 토양 온도계는 2개의 센서를 0.02 m에, 나머지 2개는 0.06 m에 설치하였다. 끝으로, 2015년 7월에 메탄 플럭스 관측을 위한 개회로 메탄 분석기(LI7700, Licor)가 설치되었다. 모든 자료들은 지면으로부터 약 1 m 높이에 설치된 자료 집록기에 30분 단위 통계량과 함께 저장된다. 자료 집록기는 처음에는 CR5000(Campbell Scientific Inc.)가 사용되었으나 2014년 6월에 CR3000(Campbell Scientific Inc.)으로 교체되었다. 각 측기의 운영은 Table 2에 요약되어 있다.

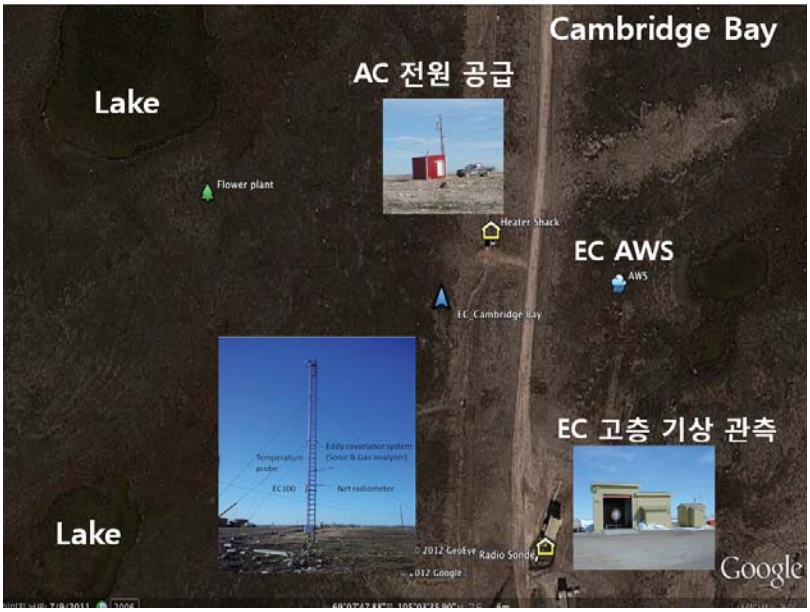


Fig. 75. Main facility at the research site in Cambridge Bay.

Fig. 76. Eddy covariance flux tower in winter.

Fig. 77. Eddy covariance system in summer of 2015.

Table 2. Variables form KOPRI measurement system

Instruments	Variables	Operating Period
CSAT3A (Campbell Scientific Inc.)	u, v, w, Ts	2012. 07. ~
EC150 (Campbell Scientific Inc.)	CO2, H2O	2012. 07. ~
LI7700 (Li-cor)	CH4	2015. 07 -
Net radiometer	Four radiative components	2012. 07. ~
Soil temperature	Soil temperature	2014. 07. ~
Soil heat flux plate	Soil heat flux	2014. 07. ~
Temperature probe	Air temperature	2012. 07. ~
Barometer	Atmospheric Pressure	2012. 07. ~

캠브리지 베이 관측지에서는 교류전원 이용이 가능하다. 북동쪽에 위치한 Heater Shack으로부터 타워까지 110V 교류 전원을 끌어온 후 1 m 높이에 설치된 함체 (enclosure) 내에서 12V/24V 직류 전원으로 전환된다. 12V 직류 전원은 에디 공분산 시스템 가동을 위해, 24V 직류전원은 자료 집록기 용으로 이용된다 (Fig. 78). 한편, 초기 장비 설치 당시 함체 내의 온도를 15도 이상 유지하기 위해 히터를 가동하였다. 하지만 2014년 1월에 히터의 전열판이 과열로 작동이 중지되었다.

EC (Environmental Canana)의 협력으로 현장 운영인력이 자료를 주 1회 컴퓨터에 자료를 회수하고 있으며, 매년 6~7월중 사이트를 방문한 연구원이 현장에 수집된 자료를 회수한다. 하지만, 특히 동계 기간을 중심으로 측기가 정상적으로 작동하지 못한 경우가 많았으며, 또한 현장 운영인력을 통한 빠른 조치가 이루어지지 못해 연속적인 자료 취득이 이루어지지 않았다. 향후 인터넷 설치를 통해 실시간 자료를 확인하여 문제가 발생한 즉시 조치를 취할 수 있도록 할 예정이다. Table 3과 4에 분석에 사용할 수 있는 월 단위 자료의 비율이 정리되어 있다.

자료 처리는 원칙적으로는 알래스카 카운실의 에디 공분산 자료 처리 중 아래의 기준을 따랐다. 향후 원시 자료를 이용하여 자세한 자료 분석이 수행될 예정이다.

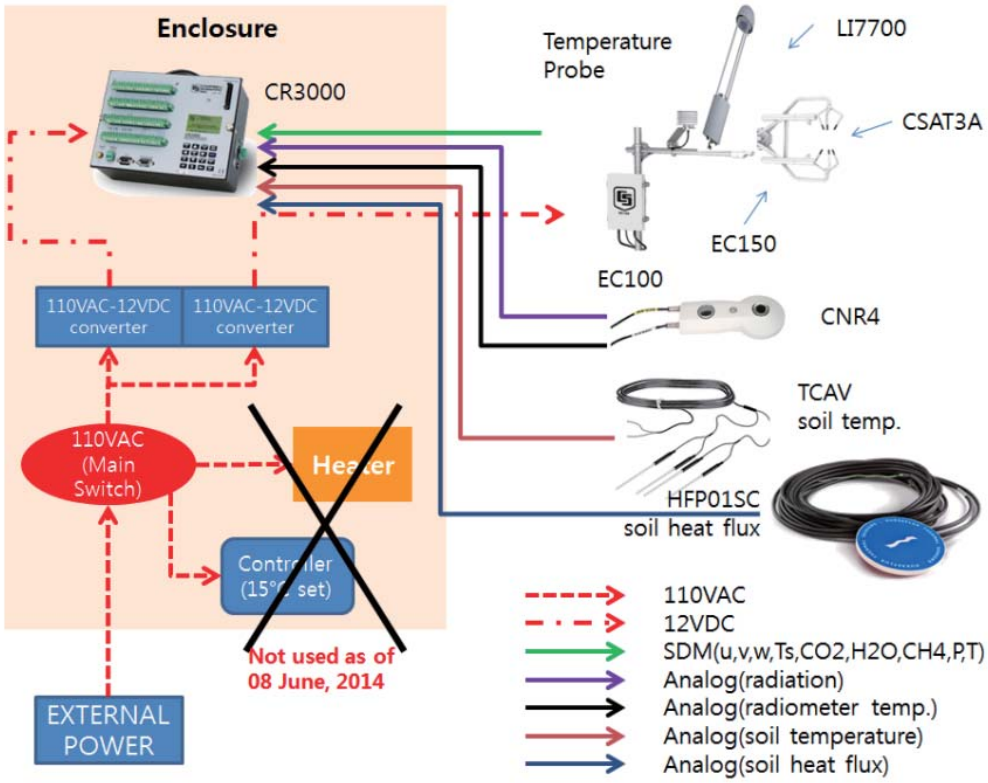


Fig. 78. Schematic diagram of eddy covariance system at Cambridge Bay in 2015.

Table 3. Data retrieval rate for eddy covariance flux measurement from July, 2012 to July, 2013

Variable	Wind	Temperature	Pressure	Carbon dioxide	water vapor
Number of data	4281	4314	4314	4281	4281

Table 4. Data retrieval rate for slow response measurement (%)

Year	Month	Radiation	Soil heat flux	Soil temperature
2012	7	100		
	8	100		
	9	91		
	10	55		
	11	85		
	12	100		
2013	1	68		
	2	12		
	3	100		
	4	86		
	5	100		
	6	94		
	7	83		
	8	62		
	9	64		
	10	95		
	11	100		
	12	100		
2014	1	4		
	2			
	3			
	4			
	5			
	6	77	77	77
	7	98	98	98
	8	97	97	97
	9	15	15	15
	10	71	71	71
	11	99	99	99
	12	88	88	88
2015	1	100	100	100
	2	100	100	100
	3	100	100	100
	4	100	100	100
	5	100	100	100
	6	93	93	93
	7	96	96	96
	8	98	98	98
	9	99	99	99
	10	100	100	100
	11	100	100	100
	12	100	100	100

KOPRI 극지연구소

(3) 결과

(가) 기상

삼차원 초음파 풍향 풍속계로부터 측정된 풍속 자료를 이용하여 관측 기간 동안 풍향 및 풍속을 살펴보았다. 월 단위 풍향의 빈도를 알아보기 위해 30분 평균 풍향을 8개의 방위 구간으로 나누었다(Table 5). 북서풍에서 남서풍의 바람은 월 단위 빈도는 6 ~ 81%였으며, 하계 보다 동계에 빈도가 높았다. 월별 경년 변동 또한 큰데 6월의 경우 2014년 6%로 가장 낮았으며, 2013년과 2015년은 34～35%로 빈도가 거의 같았다.

Table 5. The frequency of wind direction (%)

YearMonth	E	NE	N	NW- SW	S	SE	Number/ month
201207	3	16	23	35	6	17	1382
201208	8	7	18	42	8	18	1488
201209	10	5	13	44	5	24	1327
201210	17	28	14	32	4	5	954
201211	2	8	24	54	8	4	1225
201212	4	3	15	59	7	12	1488
201301	1	1	12	81	4	1	992
201302	10	21	25	27	2	16	166
201303	9	6	22	29	1	33	1437
201304	5	2	8	68	4	13	1292
201305	25	18	11	22	4	20	1488
201306	10	16	13	35	9	17	1275
201307	4	12	39	39	5	2	726
201308	10	18	7	20	7	38	902
201309	24	34	13	14	3	11	889
201310	27	20	9	29	2	13	1399
201311	7	4	13	56	9	11	1071
201312	1	4	19	73	3	2	1206
201401	13	16	1	54	6	10	94
201402							
201403							
201404							
201405							
201406	23	39	15	6	3	15	1029

KORI 국지연구소

201407	7	13	21	34	10	14	1457
201408	9	13	22	46	5	5	1488
201409	18	2	12	33	8	28	213
201410	12	28	17	23	3	16	887
201411	0	0	22	58	5	4	1426
201412	7	25	23	35	3	6	1487
201501	0	5	17	71	3	3	1261
201502	2	7	14	62	7	8	1000
201503	6	10	12	67	4	2	1487
201504	13	22	23	39	0	3	1413
201505	3	8	36	34	6	11	1473
201506	16	16	21	34	2	11	1344
201507	14	32	26	14	4	10	1484
201508	18	17	11	21	10	22	1486
201509	19	25	16	20	7	12	1428
201510	10	8	13	58	8	4	1464
201511	8	16	18	50	3	3	709
201512	6	4	14	50	7	19	1215

Fig. 79는 같은 기간 두 구간 즉, 남서-북서풍 구간과 나머지 구간에 대한 월 평균 풍속과 월 최대 풍속의 변동이다. 월 최대 풍속은 30분 평균값 중 그 달의 최고 풍속을 의미한다. 양 구간의 월 평균 풍속은 약 5 m/s를 큰 변동을 보이지 않는다. 풍속은 남서-북서풍 구간이 조금 강하였다. 월 최고 풍속은 남서-북서풍 구간에서 2015년 1월에 나타난 21m/s가 가장 강하였다. 에디 공분산 관측은 바람이 강하여 연직 혼합이 잘 이루어지는 환경에 적용할 수 있기 때문에 풍향과 풍속 자료에 근거하면 관측지의 바람 조건은 나쁘지 않은 것으로 판단된다.

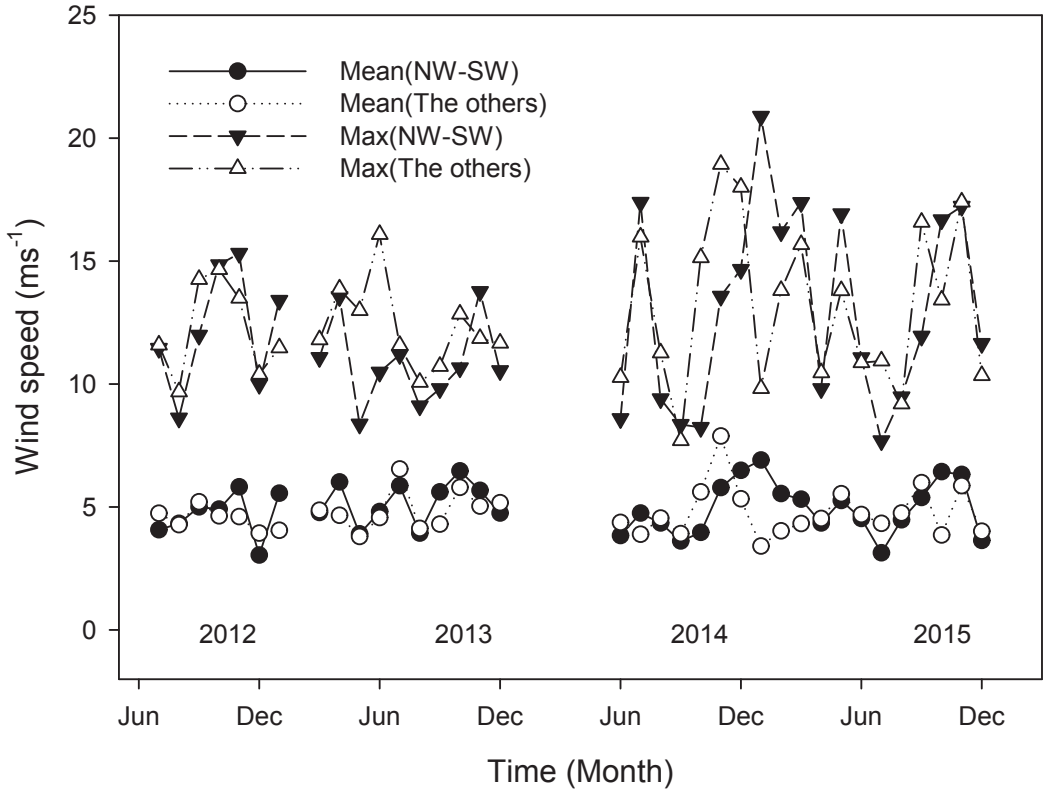


Fig. 79. The variability in monthly maximum and average wind speed for NW-SW and the other directions from July, 2012 to December, 2015.

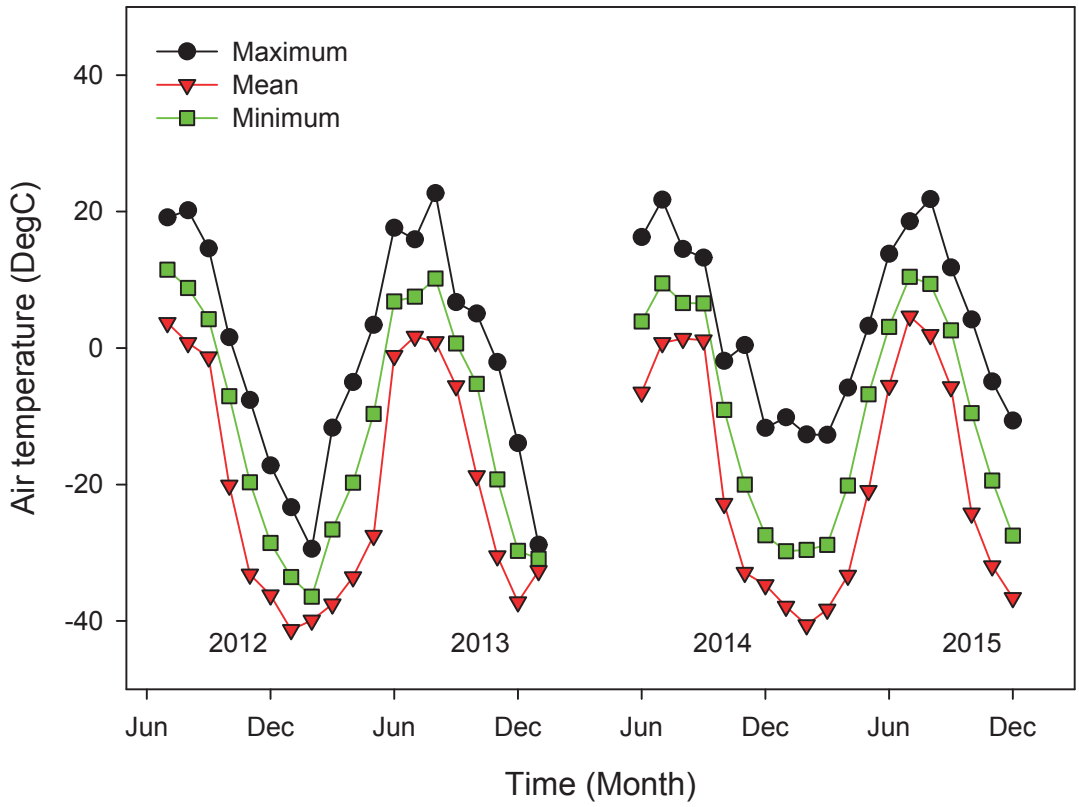


Fig. 80. The variability in monthly maximum, mean and minimum air temperature from July, 2012 to December, 2015.

Fig. 80은 분석 기간 동안의 초음파 풍속계로 측정된 월 최고, 평균 및 최저 기온의 변동이다. 저속 반응 온도계로 측정된 기온은 초음파 풍속계로 측정된 기온과 유사하였으나 2013년 2월과 3월에는 정상적으로 작동하지 않은 경우가 많았다. 초음파 풍속계로 측정된 월 평균 기온은 7 또는 8월이 연중 가장 높았으며, 최고 10.4 ℃이었다. 반면에 연 최저 기온은 2월에 나타났으며, 2013년 2월에는 월 평균 기온이 -36.2 ℃까지 내려갔다. 한편, 월 최고 기온은 매년 20 ℃ 이상, 최저 기온은 -40 ℃ 전후이었다. 특히, 11월부터 다음 해 4월까지 6개월 동안 월 평균 기온은 -20 ℃보다 낮았다. 이는 겨울철 측기의 작동 및 현장에서의 측기 관리에 어려움이 있을 수 있음을 가리킨다. 참고로 이 지역에서 기록된 최고 기온은 28.9 ℃, 최저 기온은 -52.8 ℃이다.

월 평균 기압은 약 104.8 kPa을 전후로 변하였으며, 겨울철 기압이 여름철보다 상대적으로 높았다. 겨울철 알래스카 주변 알류산 열도에 기후학적 저기압이 존재하지만 이 지역에서의 기압은 그에 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 계절에 따른 기압 배치

그리고 그와 관련한 풍향 빈도 변동을 이해하기 위해서는 종관 기압장에 대한 추가 분석이 필요하다.

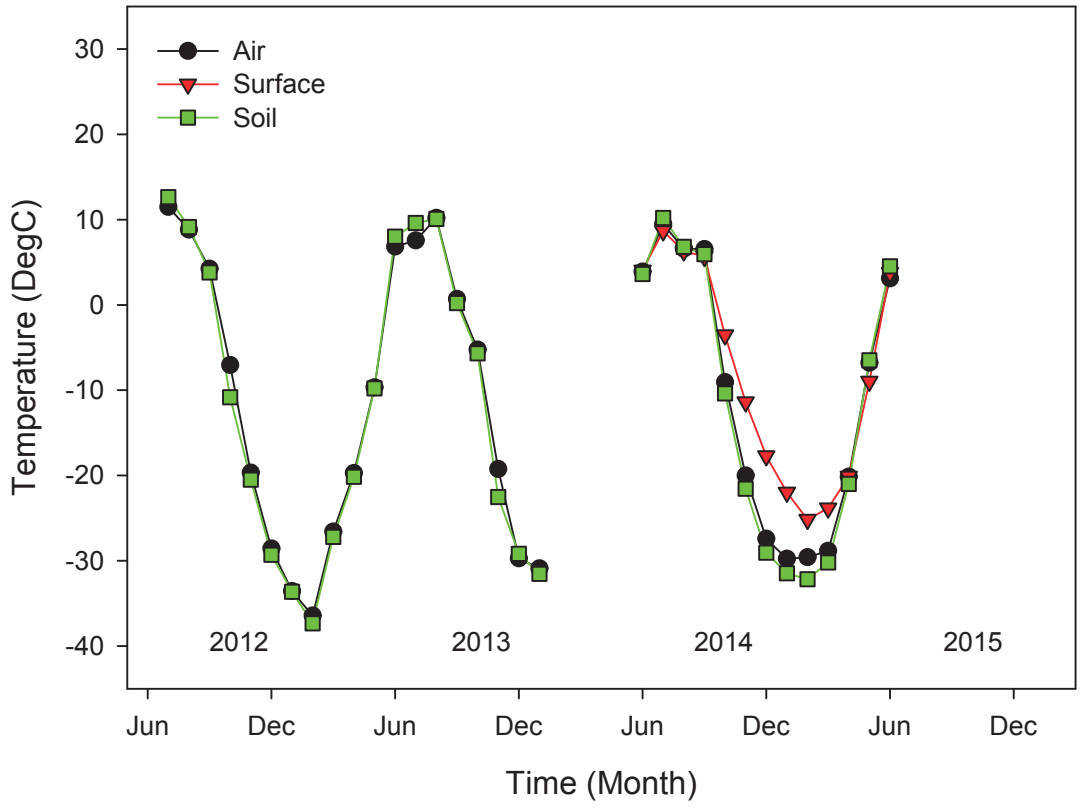


Fig. 81. The variability in monthly averaged air, surface and soil layer of 0.02 ~ 0.06 m from July, 2012 (2014 for soil) to December, 2015.

Fig. 81은 2012년 7월부터 2015년 6월까지 월평균 기온, 지표면 온도 및 토양 온도의 변동이다. 지표면 온도는 상향장파복사로부터 계산되었으며, 간단히 하기 위해 지표면의 상태와 무관하게 방출률을 1로 가정하였다. 2015년 7월부터 상향 장파 복사 값이 정상적인 값을 벗어나는 경우가 많아 2015년 6월까지만 분석하였다. 기온과 지표면 온도 그리고 토양 온도의 변동은 서로 잘 일치하였다. 하계기간 기온은 지표면 온도 보다 낮고 동계 기간 비슷하거나 높았다. 반면에 0.02 ~ 0.06 m의 토양 온도는 하계 기간 지표 및 기온보다 조금 낮았지만 동계 기간 상당히 높으며 특히 하계 기간이 지난 후 기온과 지표면 온도는 빠르게 감소하는 반면 토양온도는 느리게 감소한다. 하지만 최저 기온이 나타나는 시점은 같으며 그 이후 토양 온도는 기온 및 지표면 온도와 같은 속도로 증가하는 모습을 보여준다.

(나) 복사

캠브리지 베이 관측지는 북위 69° 로 6월 자정에는 해가 지평선 위에, 12월 정오에는 해가 지평선 아래에 있는 기간이 존재한다. 분석 기간 동안 측정된 30분 평균 태양 복사의 최고 값은 약 830 W/m2 이었다. Fig. 82는 월 평균 하향 및 상향단파 복사 값으로부터 계산된 알베도의 변동이다. 지표면에 눈이 없는 하계 기간 알베도는 0.2이며, 지표면에 눈이 내리거나 눈이 쌓여 있는 기간 알베도는 0.8을 중심으로 변동한다. 분석 기간 동안 알베도의 연변동은 서로 비슷하나 2014년 6월의 알베도는 0.4보다 크며, 이는 다른 해의 알베도인 0.2의 두 배이다. 2014년 6월 평균 기온은 약 3.9 ℃이며, 이 크기는 2015년의 3.1 ℃ 보다 높다. 이에 대해서는 적설량과 6월 이전 기온에 대한 분석이 필요한데 2014년의 경우 이용 가능한 기온 자료가 없다. 따라서 다른 기관의 관측 자료 입수가 필요하다.

Fig. 83은 월 평균 순단파복사(Rns), 순장파복사(Rnl) 그리고 순복사(Rn)의 변동이다. 순단파복사의 경우 2월에서 10월에 양의 값을 가지면 6월이 가장 크다. 반면에 순장파복사의 경우 연중 음의 값을 가지며 지면 가열이 많은 하계기간 음의 절대값이 크고, 동계 기간에 절대값은 작아진다. 그 결과 순복사의 부호는 순복사의 부호 변동은 9월에서 10월, 3월에서 4월에 일어난다. 순복사의 부호가 양이면, 지면은 복사에 의해 가열됨을, 음이면 지면이 냉각됨을 가리킨다. 순단파복사가 작은 동계 기간에는 순장파복사는 구름의 유무에 의해 영향을 받아 변동한다. 연중 자료가 있는 2013년의 연 평균된 순복사는 약 26 Wm^{-2}로, 이 지역은 복사 수지 결과 지표면은 에너지를 얻는다.

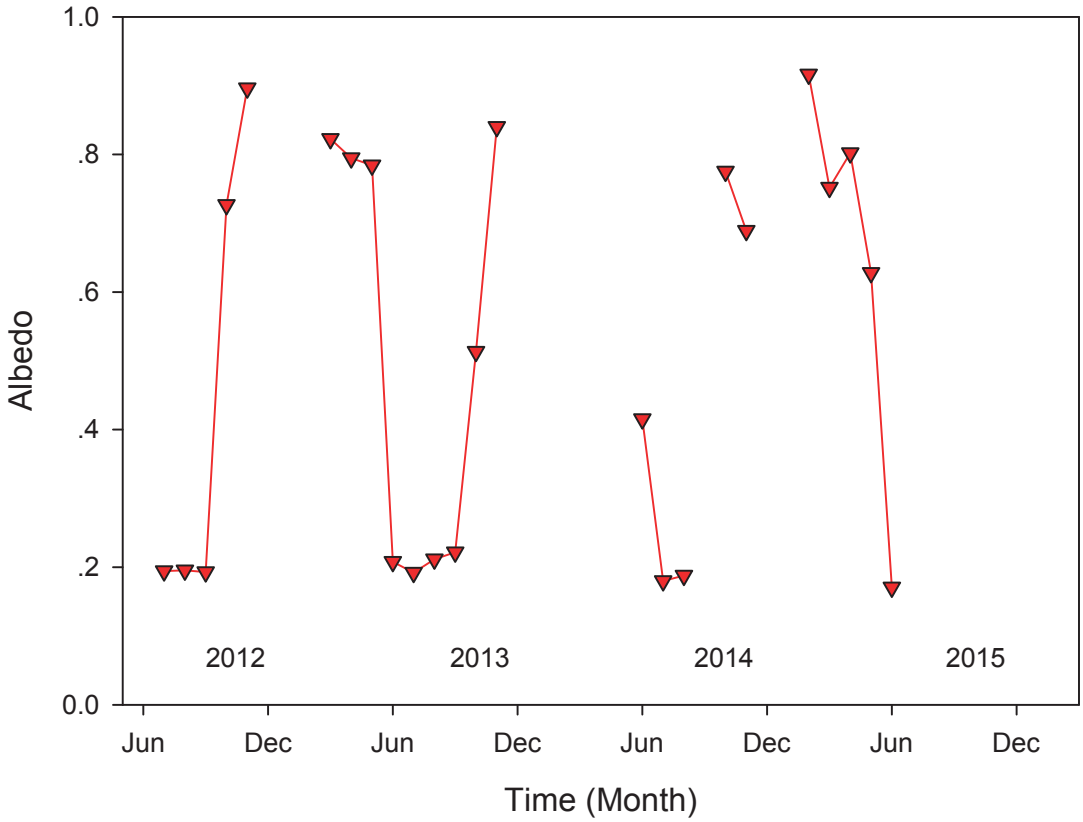


Fig. 82. The variability in monthly averaged albedo from July, 2012 to June, 2015.

극지연구소

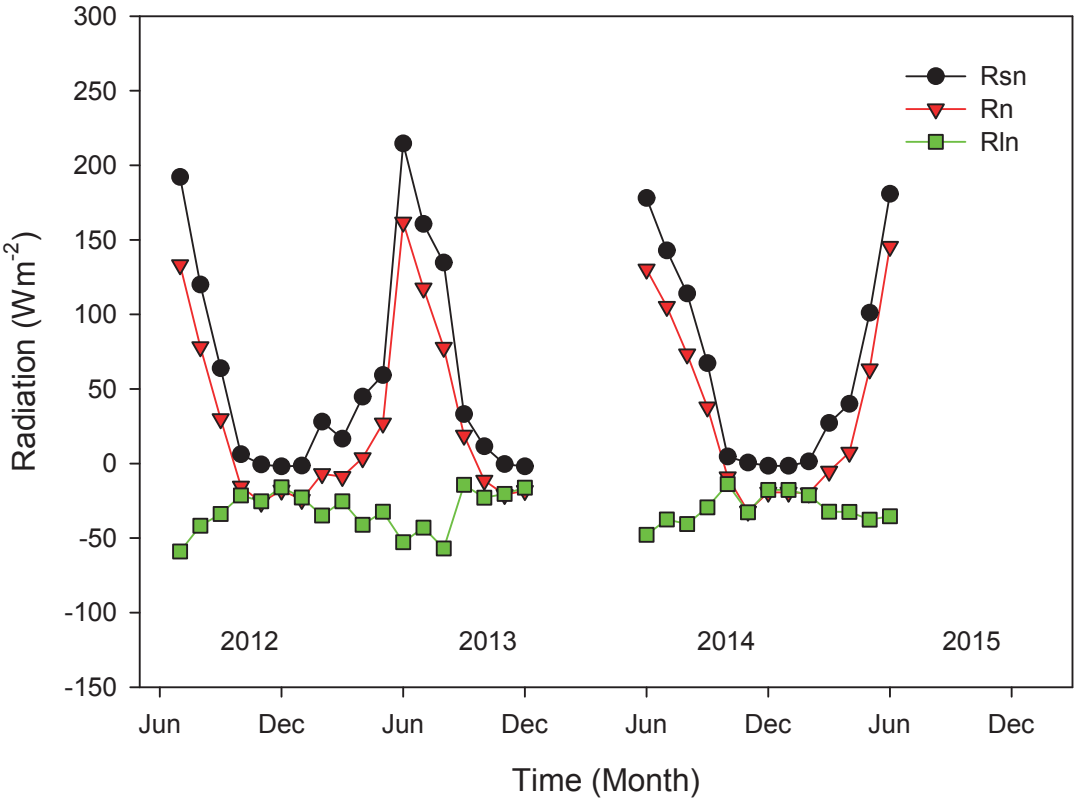


Fig. 83. The variability in monthly averaged net shortwave, net longwave and net radiation from July, 2012 to June, 2015.

(다) 에너지 및 온실기체 플럭스

Fig. 84와 85는 2012년 7월과 8월의 월 평균된 에너지 플럭스의 일 변동이다. 그 외 기간에 대해서는 현재 분석 중이다. 에너지 플럭스는 풍향이 북서에서 남서풍 사이일 때의 자료만을 분석하였다. 7월은 상대적으로 자료가 많았지만(n=451), 8월의 경우, 자료 수도 적으면서(n=151) 대부분의 자료가 8월 말에 편중되어 있다. 7월의 경우 순복사의 크기는 -40 ~ 320 Wm^{-2} 이었다. 반면에 현열과 잠열 플럭스는 서로 그 크기가 비슷하며, -10 ~ 100 Wm^{-2} 이었다. 현열 플럭스는 순복사가 음일 때 작은 음의 값 즉, -10 ~ 0 Wm^{-2}로 대기에서 지면으로 열이 전달되는 반면에, 잠열 플럭스는 여전히 대기로 에너지가 공급되었다. 현열 플럭스는 대부분의 시간 동안 잠열 플럭스 보다 작았지만, 순복사가 최대로 나타나는 시점을 전후해서는 잠열 플럭스 보다 컸다. 현열 플럭스와 잠열 플럭의 합인 가용 에너지는 순복사의 약 71%이었다.

한편, 8월의 순복사, 현열 및 잠열 플럭스의 변동은 7월과 유사하다. 다만, 순복사의 크기는 250 Wm^{-2} 이하로 작아졌다. 현열과 잠열 플럭스는 그 크기가 비슷하다. 7월과 마찬가지로 대부분의 시간 동안 현열 플럭스가 잠열 플럭스 보다 작지만 순복사가 최대가 되는 시점을 전후로 몇 시간은 현열 플럭스가 잠열 플럭스 보다 컸다. 가용 에너지는 58%로 7월보다 작아졌다.

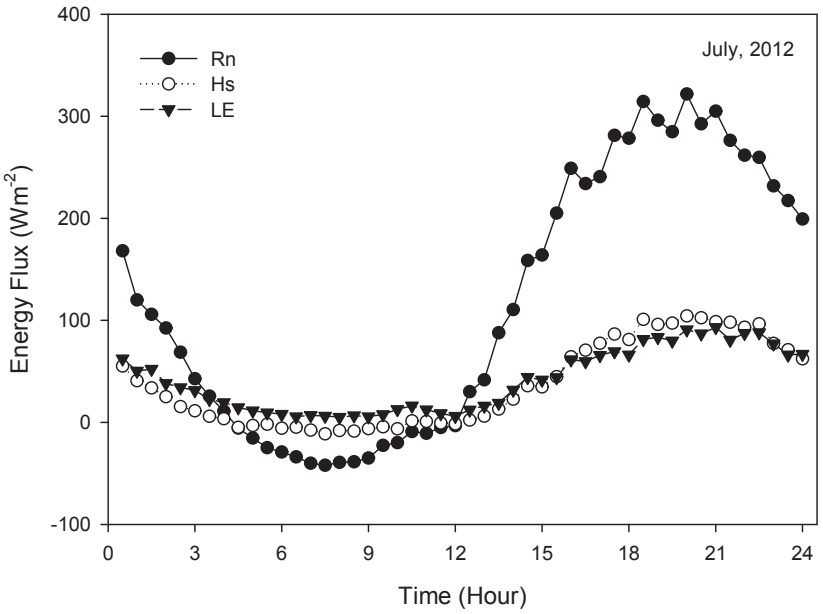


Fig. 84. Diurnal variations in monthly averaged net radiation, sensible heat flux and latent heat flux on July, 2012.

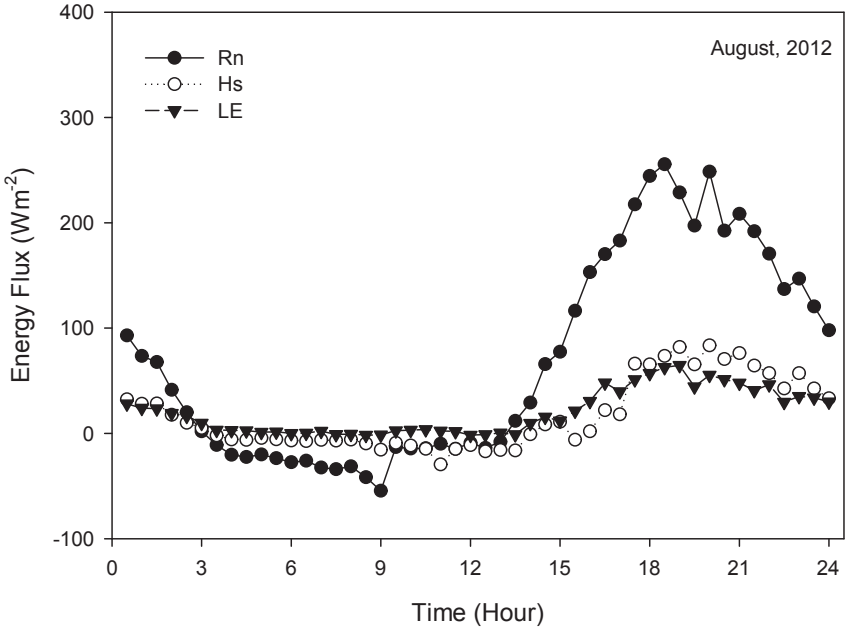


Fig. 85. Same as in Fig. 84 except for August.

Fig. 86은 2012년 7월과 8월 월 평균된 이산화탄소 플럭스의 일 변동이다. 에너지 플럭스 분석과 마찬가지로 풍향이 북서 ~ 남서풍일 때의 자료가 선택되었다. 에너지 플럭스 자료와 마찬가지로 분석에 사용된 7월의 이산화탄소 플럭스의 자료수는 403개인 반면, 8월의 자료는 120개이다. 8월의 자료는 대부분이 8월 말로 편중되어 있다. 7월의 이산화탄소 플럭스의 크기의 범위는 -0.2 ~ 0.1 $mgm^{-2}s^{-1}$ 사이였으며, 뚜렷한 일 변동을 보인다. 8월은 7월에 비해 식물에 의한 광합성 활동이 약해져 낮의 크기는 -0.05 $mgm^{-2}s^{-1}$로 작아졌지만, 야간의 크기는 비슷하였다. 이로 인해 일 변동이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 7월과 8월의 이산화탄소 플럭스의 평균은 각각 -0.05와 -0.006 $mgm^{-2}s^{-1}$로 7월에는 관측지 식생에 의한 광합성이 생태 호흡보다 커서 대기 중 이산화탄소에 대한 흡원으로 작용한 반면, 8월, 엄밀히 8월말은 대기 중 이산화탄소에 대해 거의 평형을 이루는 것으로 나타났다.

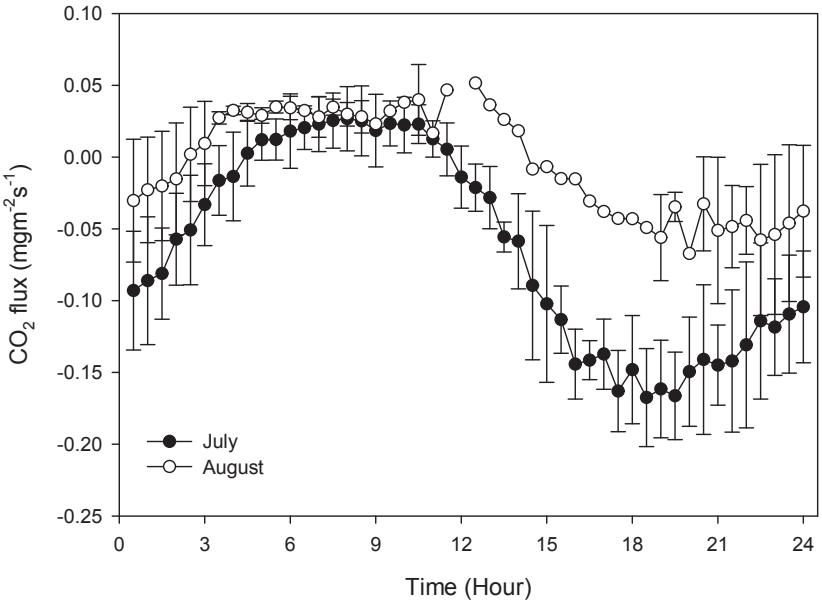


Fig. 86. Diurnal variations in monthly averaged carbon dioxide flux on July and August, 2012.

KOPRI
극지연구소

나. 캠브리지 베이 블랙카본 관측

(1) 관측지 개요

캠브리지 베이의 대기 중 블랙카본 농도를 측정하기 위해 2013년 7월 마을로부터 북쪽으로 약 800m 떨어진 고층관측동 (Upper Air Observatoy) 내에 블랙카본 분석기 (Aethalometer, AE-21)를 설치하였다. 약 100m 떨어진 곳에선 2012년 7월부터 10m 기상타워가 설치되어 연중 상시 기상요소들을 관측하고 있다 (Fig. 87, 88).

블랙카본 분석기는 내부진공펌프를 이용하여 고층 관측동 외벽 4.6m 높이에 있는 흡입구를 통해 외부 공기를 흡입한다. 흡인된 공기는 필터 테이프에 축적되며, 블랙카본 분석기는 이를 광학적인 방법으로 블랙카본의 양을 측정한다. 내부의 필터 테이프는 정해진 주기마다 자동으로 전진하는 구조로 이루어져 있으며 데이터는 CF메모리카드에 저장된다. 매년 6월 중 연구원이 현장을 방문하여 데이터를 회수해오고 있으며 회수한 블랙카본 관측자료는 현재 2013년 7월부터 2015년 6월까지이다.

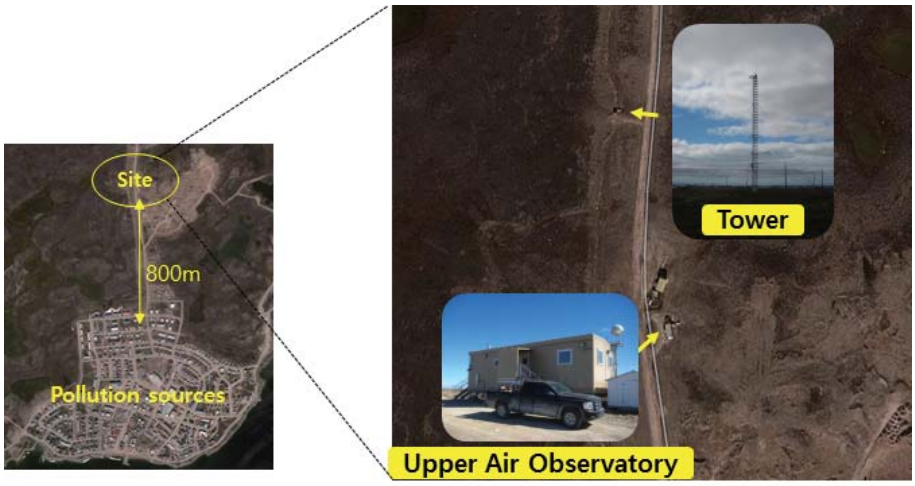


Fig. 87. Observation site at Cambridge Bay.

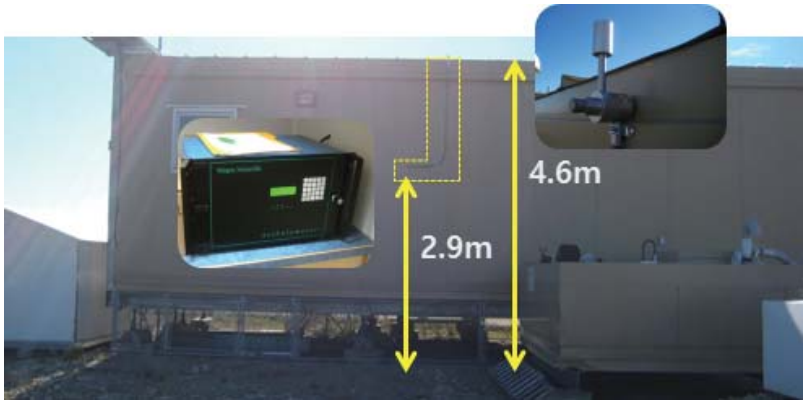


Fig. 88. Aethalometer installed in upper atmosphere observatory building.

(2) 분석 결과

블랙카본은 탄소를 포함한 연료가 불완전 연소하면서 생기는 고분자 덩어리로 인위적인 오염원의 유입을 파악할 수 있다. Fig. 89는 2013년 7월부터 2015년 6월까지 캠브리지 베이의 블랙카본 월평균 변화이다. 자료를 회수한 기간동안 2015년 2월을 제외한 모든 달의 평균은 100ng/m3 이하의 수준을 보였다. 가장 낮은 평균값은 2013년 7월에 20.27±43.44ng/m3이였으며 가장 높은 평균값은 2015년 2월에 102.14±38.79ng/m3이었다.

KOPRI 극지연구소

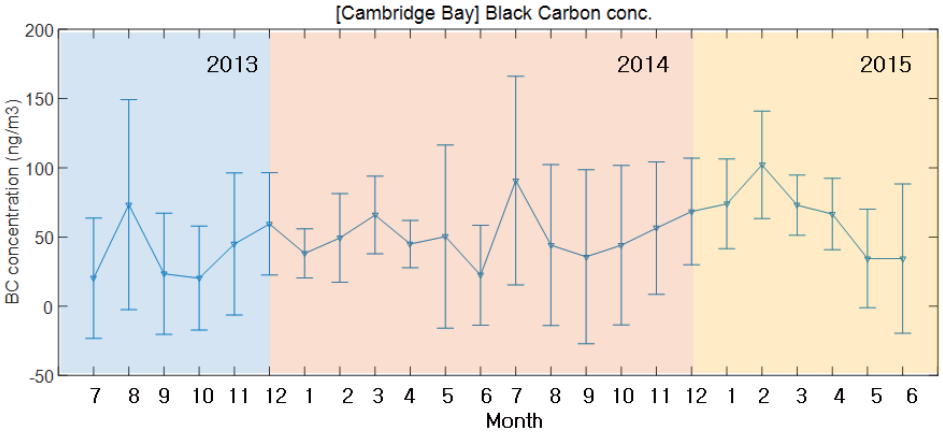


Fig. 89. Monthly BC concentration at Cambridge Bay from 2013.07 to 2015.06.

기상타워에서 관측된 풍향값을 이용하여 풍향에 따른 블랙카본의 농도를 알아보고자 하였다. 관측기간 중 2014년의 1월~5월, 9~10월까지 총 7개월의 기상 데이터가 결측되어 2014년도 데이터는 6, 7, 8, 11, 12월의 값만을 분석하였다. 가용된 기상데이터와 블랙카본의 데이터 정보는 Table 6 와 같다. 블랙카본 데이터는 5분 관측주기의 원시자료를 이동평균 후, 기상관측 주기에 맞춰 30분씩 평균을 내어 사용하였다.

Table 6. Data of BC concentration with wind direction

년도	2013	2014	2015
월	7, 8, 9, 10, 11, 12	6, 7, 8, 11, 12	1, 2, 3, 4, 5, 6
기상 관측 주기	30분	30분	30분
블랙카본 관측 주기	5분	5분	5분

Fig. 90은 풍향에 따른 블랙카본의 농도값을 년도별 scatter plot으로 나타낸 것으로 중심에서 멀어질수록 높은 값을 의미한다. Table 7은 풍향별 블랙카본 농도의 연평균값이다. 풍향별 블랙카본의 농도를 살펴보면, 2013년엔 북동풍(0~90°)이 불 때 34.3±49.6ng/m3, 남동풍(90~180°)일 때 16.7±30.4ng/m3, 남서풍(180~270°)일 때 69.6±141.7ng/m3, 북서풍(270~360°)일 때 99.1±153.1ng/m3 값을 보였다. 2014년엔 북동풍이 불 때 55.7±176.1ng/m3, 남동풍이 불 때 38.8±130.7ng/m3, 남서풍이 불 때 140.2±247.1ng/m3, 북서풍이 불 때 97.0±223.6ng/m3 값을 보였다. 2015년엔 북동풍이 불 때 57.4±46.9ng/m3, 남동풍이 불 때 41.4±39.0ng/m3, 남서풍일 때 109.4±149.0ng/m3, 북서풍일 때 79.1±78.4ng/m3 값을 보였다. 대체적으로 표준편차의 폭이 커 순간적인 오염에 의한 농도변화가 큰 것으로 판단되어진다.

2013년엔 북서풍일 때, 2014년, 2015년은 남서풍이 불 때 블랙카본의 농도가 높은 경향이 나타났다. 이것은 관측지로부터 남쪽으로 약 1km 떨어진 곳에 마을이 형성되어 있고, 남서쪽으로 약 2.5km 떨어진 곳에는 공군기지가 위치하고 있어 이곳들이 오염원으로 작용하는 것으로 판단되어진다. 또한, 관측 사이트 바로 서편에 있는 도로에 차량들이 수시로 이동하여 그에 따른 영향으로 동풍보다는 서풍에서 블랙카본의 농도가 높게 나온 것으로 판단되어진다.

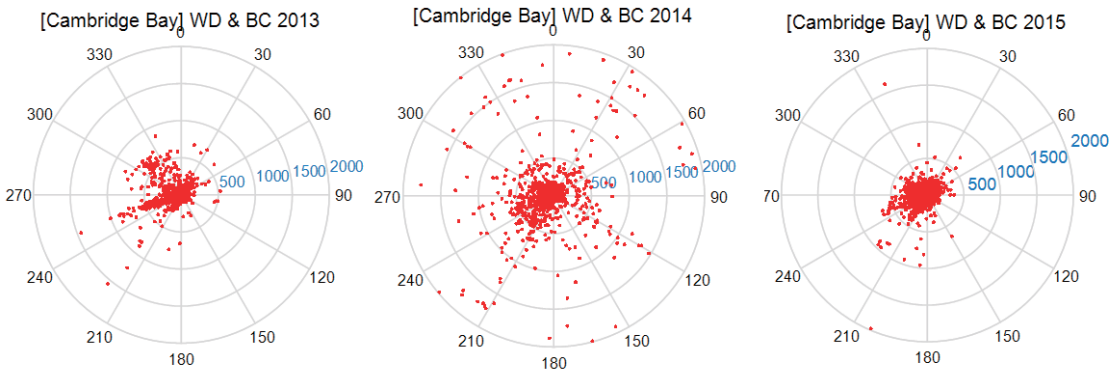


Fig. 90. Wind directional BC concentration during data available period.

Table 7. Averaged BC concentration with wind direction during data available period

풍향 / 년도	북동풍 (0~90°)	남동풍 (90~180°)	남서풍 (180~270°)	북서풍 (270~360°)
2013	34.3±49.6	16.7±30.4	69.6±141.7	99.1±153.1
2014	55.7±176.1	38.8±130.7	140.2±247.1	97.0±223.6
2015	57.4±46.9	41.4±39.0	109.4±149.0	79.1±78.4

KOPRI 극지연구소

3. 노르웨이 스발바르

가. 북극 대기에서의 구름응결핵(CCN)의 계절별 특성

극지연구소는 2007년부터 북극 지역에서 CCN Counter에 의해 수집된 구름응결핵(이하 CCN) 수농도에 대한 연구가 제플린 관측소에서 실시간으로 관측되고 있으며, 장기간 수집된 데이터를 사용하여 CCN의 계절별 특징에 대한 연구가 수행되었다. 데이터 분석기간은 2007년부터 2013년이며, CCN의 특징을 다차원적으로 비교하기 위해, 에어로졸 크기분포(model : DMPS) 및 전체 입자 수농도(CPC3010 및 CPC3025) 데이터를 사용하였다. 북극의 기상현상 중 가장 큰 영향을 끼치는 북극연무의 CCN 스펙트럼에 대한 연구결과를 고려했을 때, 과포화도가 0.33%일 때 최대 CCN 농도가 발생한다는 결과에 따라(Shaw, 1986), 이 연구에서 사용된 모든 데이터는 과포화도가 0.4일 때의 수농도를 사용하였다.

관측기간 동안의 CCN의 월별 중앙값의 시계열 중 최솟값은 17.3cm^{-3}이고 최댓값은 197.9cm^{-3}3이다(Fig. 91). CCN 수농도는 봄 동안에 증가하며, 가을과 겨울 동안에는 낮은 농도를 보이는 뚜렷한 계절적 순환을 보였다(Fig. 92). 봄 동안의 높은 CCN 농도는 주로 북극 연무 공기 (Arctic Haze) 괴의 장거리 수송에 따른 특성 때문이며, 여름 동안에는 다른 근원(source)에 의한 입자의 영향일 것으로 생각해 볼 수 있다. 더 정확한 이해를 위해 연구기간동안의 에어로졸 크기분포의 월 중앙값의 변화량을 보았다(Fig. 93). 여름철의 누적 모드의 기하학적 평균 입도(Accumulation mode의 geometric mean diameter)는 봄철보다 더 감소하였고, Nuclation mode 수농도는 더 증가하였다. Aitken mode 입자는 Accumulation mode로 성장할 수 있으며, 그 후에 CCN 형태로 활성화(activate)된다. 따라서, 여름철의 CCN은 봄철의 북극연무에 의해 발생되는 높은 농도의 CCN과 비교해 봤을 때 다른 출처(source)로부터 비롯되었다고 생각해볼 수 있다.

Fig. 94는 CCN의 활성화 비율(Activate ratio)의 물리적인 의미를 이해하기 위해 사용하였다. 활성화 비율은 겨울에서 이른 봄까지 높은 값을 유지하며, 4월부터 7~8월까지 감소한다. 봄에는 북극 연무의 영향으로 CCN 농도가 높기 때문에, CCN 및 전체 입자 수농도의 값이 높아져서 활성화 비율 또한 높으며, 여름에는 Aitken mode 입자가 증가하기 때문에 가장 낮은 활성화 비율을 보인다. 따라서, (100nm보다 큰 입자의 전체 입자 수농도와 CCN 수농도의 비율) CN(>100nm)/CCN의 비율은 여름 동안에 감소한다(Fig. 95). 봄 동안에, CCN농도와 Accumulation mode 입자 농도 모두 증가하지만, 여름철의 100nm보다 큰 입자 수농도와 CCN의 비는 감소한다. 결과적으로, 직경이 100nm보다 더 작은 에어로졸 입자가 여름 동안에 CCN입자로 더 활성화되었다고 생각해볼 수

있다.

모수화를 통한 CCN 스펙트럼은 CCN 수농도를 추정하기에 가장 효율적인 방법으로, 매우 적은 상수가 요구되기 때문에 분석에서 사용되었다. 전체 연구 기간 동안의 CCN 스펙트럼의 모수화 매개변수 C와 k를 월별 중앙값을 통해 산출하였으며(Fig. 96), C=81. 9cm^{-3} 와 k=0.2795의 결과를 얻었다. 또한, 계절적 및 월별 C와 k의 변동성을 Fig. 97에 나타내었다. C값은 봄 동안에 증가하며 5월에 최댓값을 보이고, 가을과 겨울 동안에 낮다. k값은 0.0875~0.5619의 범위를 보이고, 여름동안(6~8월)에 최댓값을 나타내는데, 과포화도의 변화에 민감한 CCN 농도가 봄과 다른 계절보다도 여름철 동안에 더 민감하기 때문이다.

Fig. 98는 각각 다른 크기 범위의 에어로졸 수농도와 CCN 수농도를 비교한 것이다. CCN과 3nm보다 큰 에어로졸 수농도 사이의 상관성이 가장 낮았다. 반면에, 직경이 100nm보다 큰 Accumulation mode의 입자 수농도와 CCN농도의 기울기는 0.9598이고 r^2는 0.8701로써 가장 높은 상관성을 보였다. 직경이 100nm보다 큰 Accumulation mode 입자 수농도와 CCN 수농도 사이의 높은 상관계수는 Accumulation mode가 CCN에 주로 기여하고 있음을 의미한다.

KOPRI

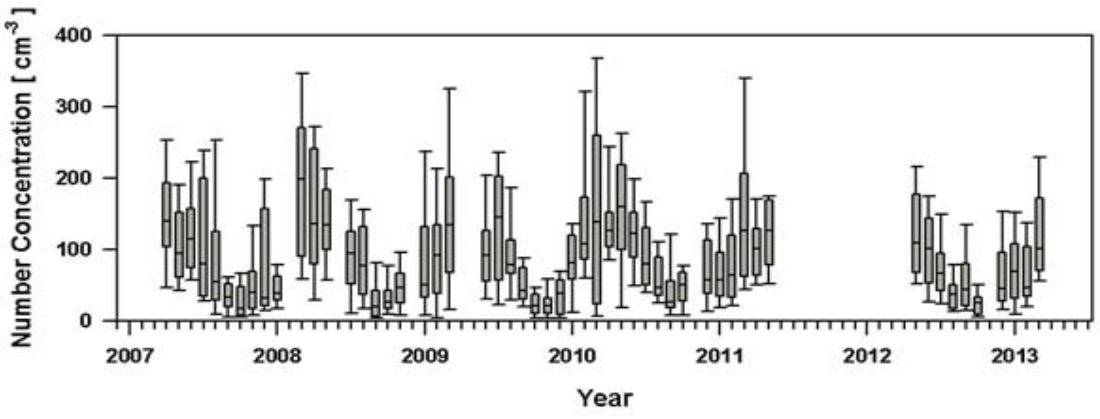


Fig. 91. Box-plot time series of monthly mean CCN number concentration observed from 2007 to 2013.

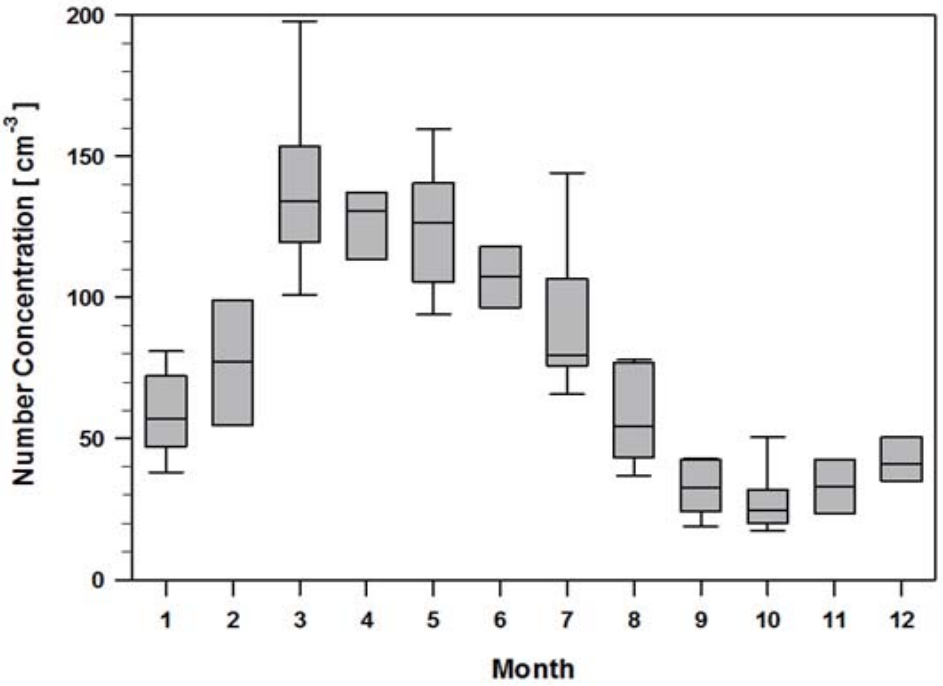


Fig. 92. Box-plot time series of monthly mean CCN number concentration observed.

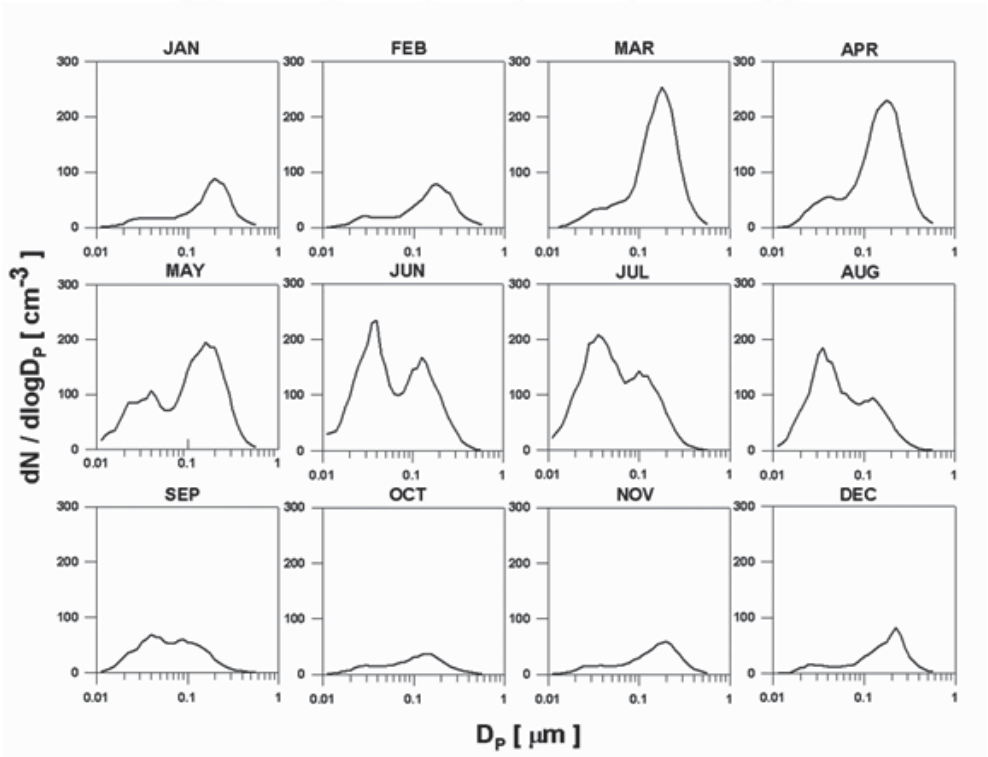


Fig. 93. Variations of monthly mean aerosol size distribution.

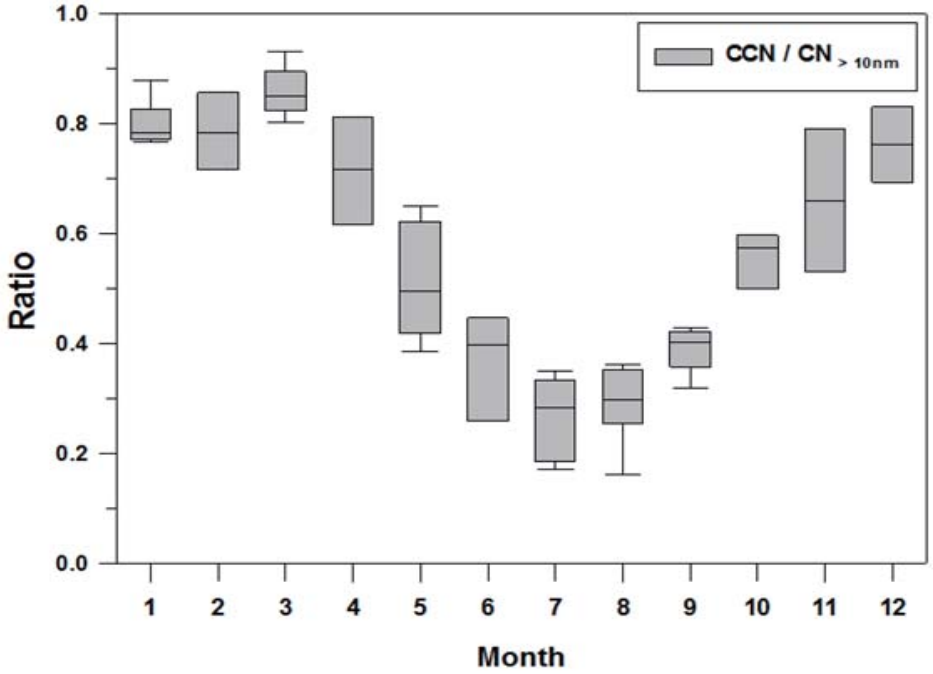


Fig. 94. Monthly ratio of total particle concentration of CCN and CN (>10nm).

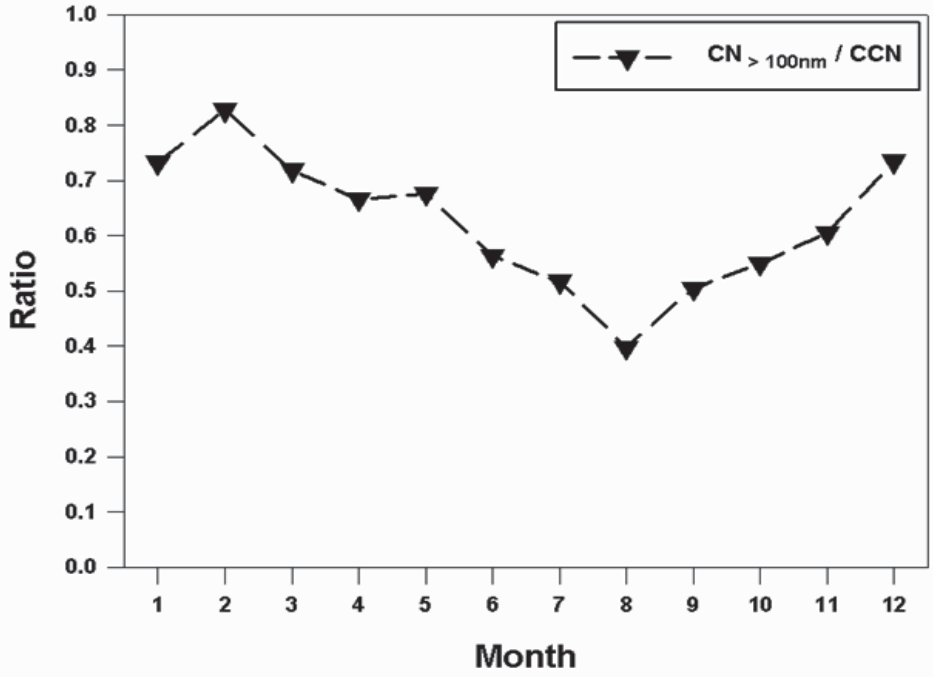


Fig. 95. Monthly ratio of total particle concentration of CCN and CN (>100nm).

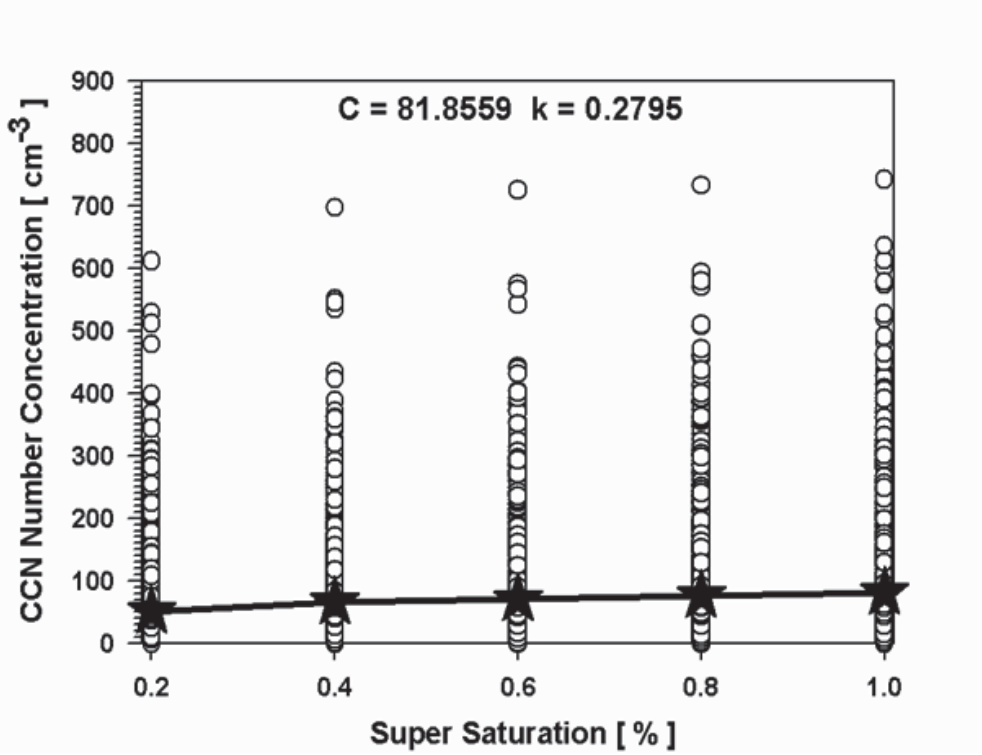


Fig. 96. Monthly mean of CCN concentration in each super saturation(bold line; spectrum parameters of C, k).

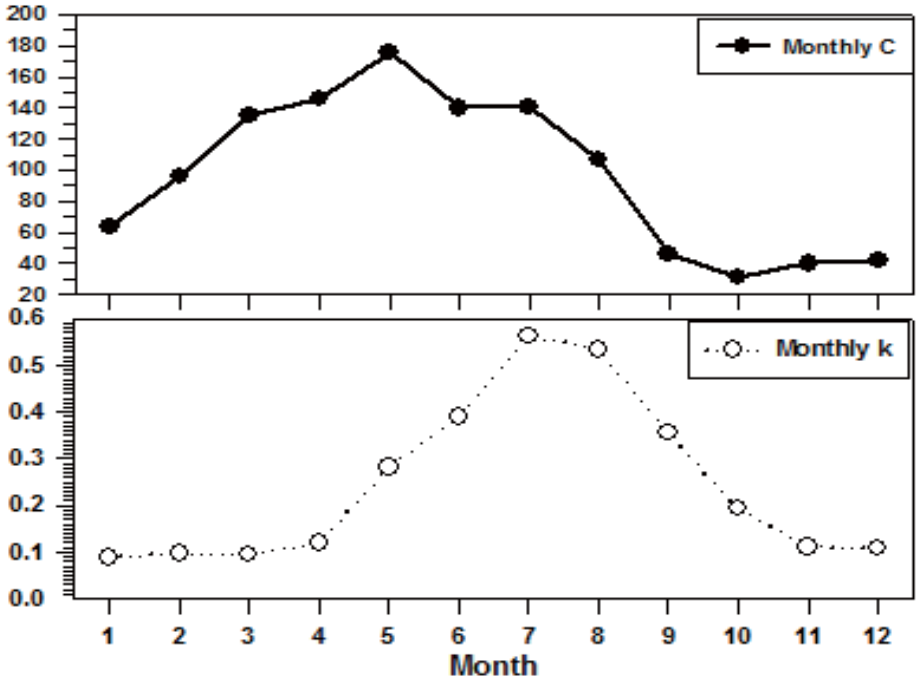


Fig. 97. Monthly variation of CCN spectrum parameters of C, k.

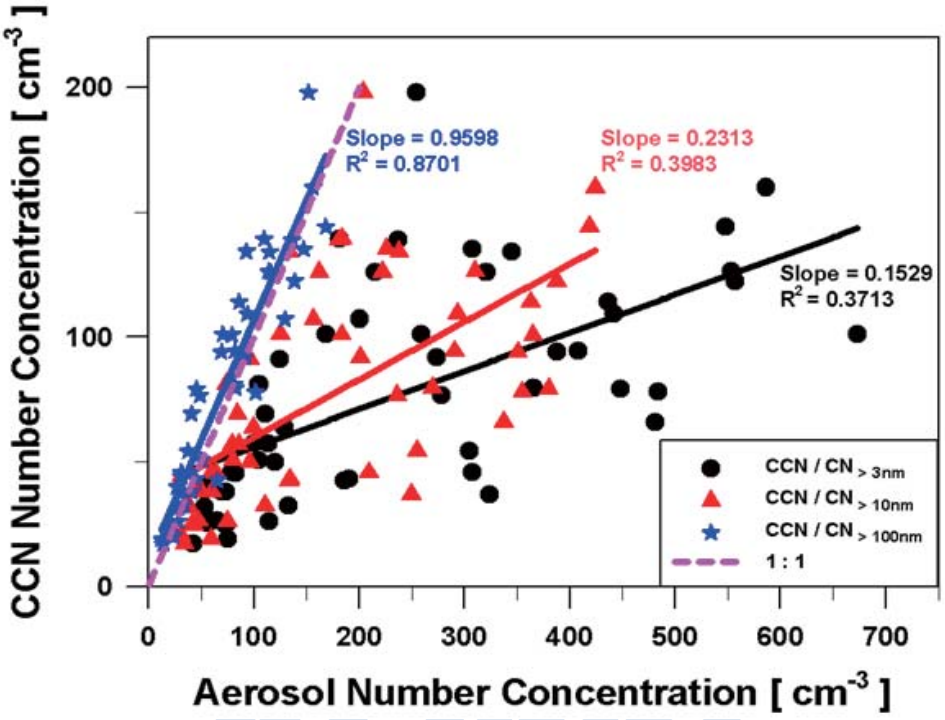


Fig. 98. Comparison CCN concentration to aerosol number concentration with different diameter(blue line: > 3nm, red line: > 10nm, black line: > 100nm).

극지연구소

나. DMS 농도 변화 관측

(1) 분석 기기 개발 및 현장 관측

생물기원 기후냉각물질인 DMS의 대기 중 농도는 다양한 환경요인에 의해 변화한다. 또한 대기 중 DMS는 빠른 산화과정을 거쳐 황화염 (sulfate)과 같은 에어로졸 성분으로 변화하기 때문에, 대기 중 농도 변화를 정확히 분석하기 위해서는 저농도의 DMS를 현장에서 실시간 분석할 수 있는 전처리 장치 및 미량 황분석 시스템의 구축이 필요하다. 본 연구를 통해 대기 중 극미량 (ppt 수준)의 대기 DMS 농도를 분석 할 수 있는 기기를 개발하였으며 (Fig. 99, Table 8), 해당 기기를 북극 스발바르에 위치한 제플린 관측소에 설치하여 장기간 북극 대기 중 DMS 농도 변화를 관측하였다.

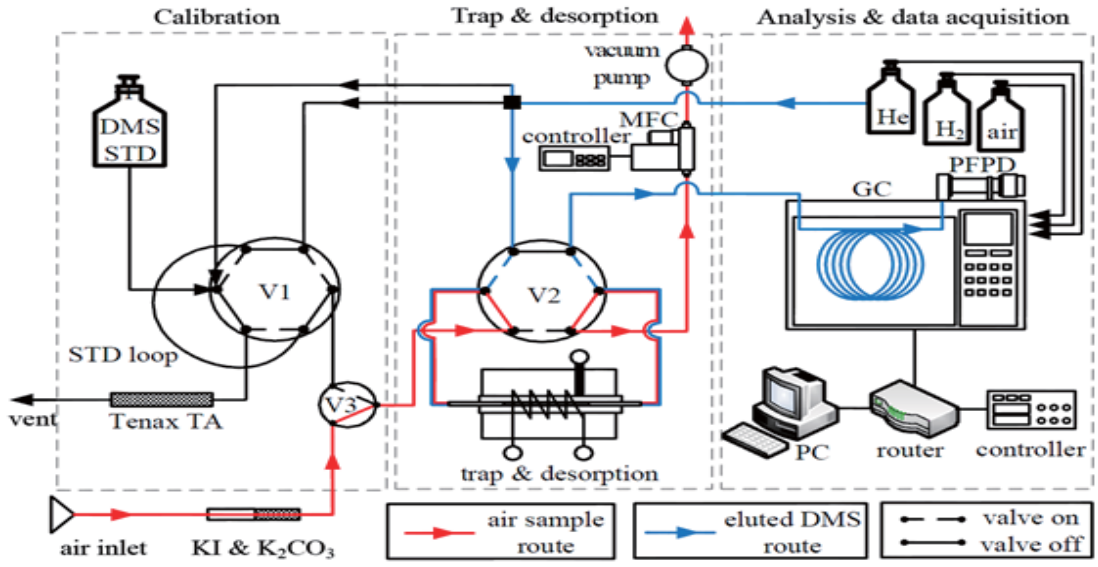


Fig. 99. Systematic diagram of DMS measurement equipment.

Table. 8. Specification of DMS measurement equipment

Trap	- Trap material: (i) Tenax TA 60-80 mesh (ii) Pre-packed column with adsorbent material based on graphitized carbon (U-T14H2S, MARKES International, UK) - Trapping temperature: 20 ° C - Eluting temperature: 220 ° C
Column	- DB-1, 30 m 0.32 mm, 5.0 μm, J&W Scientific - Temperature: 50 ° C to 120 ° C at 10 ° C min^{-1}, 120 ° C to 240 ° C at 50 ° C min^{-1} - Inlet pressure: 10 psi - Carrier gas: He
Detector	- Pulsed flame photometric detector (PFPD) - Temperature: 250 ° C, constant - H_2:9.5psi,Air:10.5psi,He:10psi
Calibration	(i) Standard gas: 0.6 to 6.2 ppbv, 860, 2850 ppbv (ii) Permeation tube: KIN-TEK, Standard Rate Disposable Permeation Tubes (SRT type), DMS Emission Rate 43 ng min^{-1} at 30 ° C

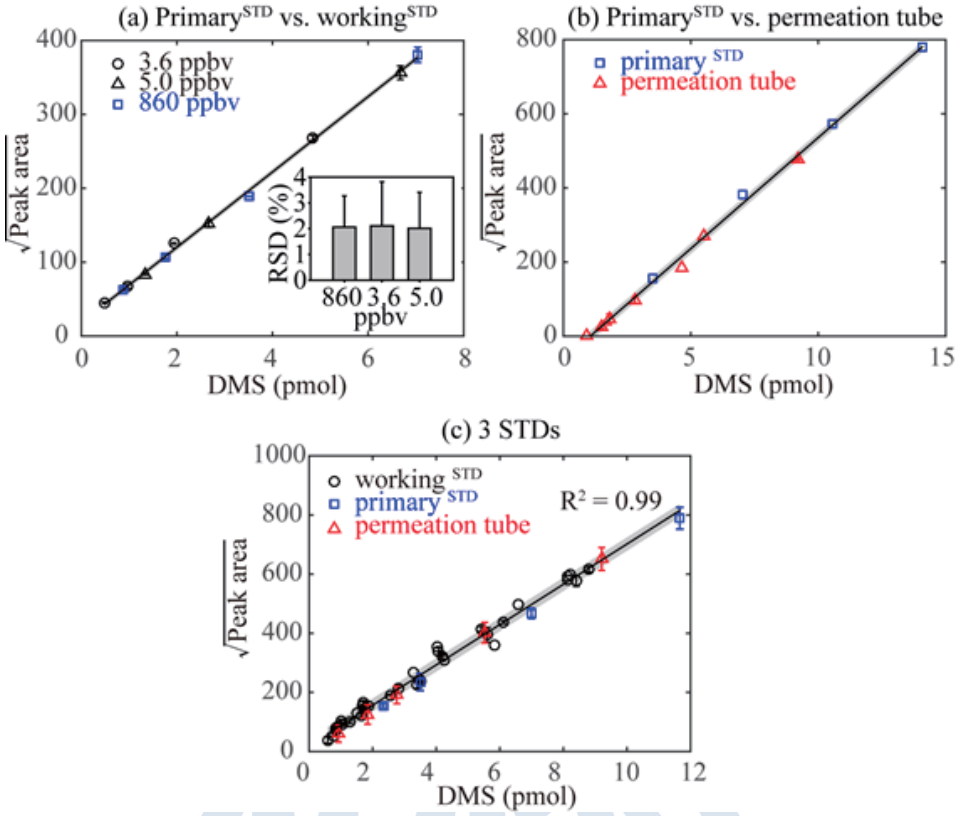


Fig. 100. Results of DMS measured from primary standard gas: 860 ppbv DMS, working standard gas: 3.6, 5.0 ppbv DMS, permeation tube.

극지연구소

미량의 대기 DMS 농도 변화를 정확하게 관측하기 위해서는 정기적인 표준물질 검량 및 분석기기의 장기간 안정성 확보가 중요하다. 본 분석기기는 주기적인 표준물질 검량 및 다양한 검량 방식의 비교 분석을 통해, 개발된 분석 기술의 효율성을 입증하였다. 상대적으로 고농도의 표준 가스 시료 (primary standard gas: 860 ppbv DMS) 및 표준 가스 시료를 희석한 저농도 표준 시료 (working standard gas: 3.6, 5.0 ppbv DMS)를 사용하여 표준 시료를 검량한 결과, 서로 다른 농도의 표준 시료를 주입하였을 때에도 동일한 선형성을 보이는 것을 확인하였으며, 또한 우수한 분석 오차 범위 (± 4% 이내)를 보이는 것을 확인 하였다(Fig. 100). 또한, permeation tube 방식을 활용한 DMS 표준 검량시에도 표준 가스 시료 (primary standard gas: 860 ppbv DMS)를 사용한 검량선과 동일한 선형성을 보임을 확인하였다. 표준 검량 물질 분석을 통하여 해당 분석기기의 우수한 검출 한계 (0.5 pmol DMS, 1시간 간격 분석 기준 1.5 pptv DMS) 및 제현성 (± 4% 이내)을 검증할 수 있었으며, 다양한 검량 농도 및 검량 방식에서 동일한 선형성을 보이는 것을 확인함으로써 해당 분석 기술의 정확성을 확신할 수 있었다.

개발된 분석기기의 장기간 현장 활용성을 평가하기 위하여 일정한 양의 표준 시료를 일정한 시간 간격 (1주일)으로 분석기기에 주입함으로써, 해당 시스템의 검출기기 및 전처리 장치의 감도 변화를 관찰하였다. 약 1년간 해당 실험을 수행 한 결과, 동일한 시료를 주입하였을 때, 분석기기의 반응 변화는 10% 이내로 일정함을 확인하였다(Fig. 101). 또한 장기간 각각 다른 표준 검량 방식(primary standard gas, working standard gas, permeatio tube)을 통하여 검량 곡선의 기울기 변화를 관측한 결과 역시 10% 이내의 일정한 기울기 값을 보이는 것을 확인하였다. 이를 통해 본 기술의 장기적 안정성 및 우수한 현장 활용 가능성을 확신 할 수 있었다.

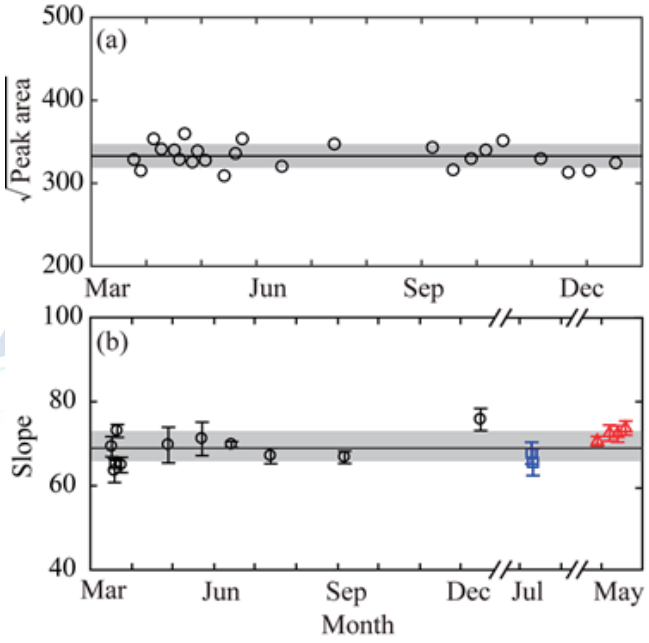


Fig. 101. Slopes of (a) detector response at long term standard gas (4.1 pptv DMS, 24mL), (b) primary standard gas: blue square, working standard gas: black circle, permeation tube: red triangle

위 연구 결과와 같이 우수한 검출한계 및 정밀성, 그리고 장기간 현장 관측 안정성을 가진 분석기기를 북위 79도에 위치한 제플린 관측소에 설치하여 북극 대기 중 생물기원 기후 냉각 물질인 DMS의 농도 변화를 장기간 연속 관측하였다. 본 분석기기를 통해, 세계 최초로 실시간 북극 대기 황성분 (DMS) 장기간 연속 관측 성공하였다. 2010년 3월 분석을 대기 DMS 농도 변화 관측을 시작하였으며, 이 후 지속적인 분석 시스템

의 정밀성 및 안정성 향상을 위한 개발을 실시하여, 2014년 현재의 시스템을 최종 개발하여 실시간 북극 대기 DMS 농도 변화 관측에 활용하고 있다(Fig. 102).

Fig. 102. DMS equipment at Zeppelin station in Ny-Alesund.

북극 대기 중 DMS 농도는 뚜렷한 계절 변화를 보이며, 특히 인근 해역의 생물량이 급증하는 봄철 (4월~6월)사이 급격히 증가하여 최대 450pptv의 농도를 보인 반면, 생물 활동이 낮은 북극의 겨울철 기간동안은 검출한계 이하 (1,5 pptv)의 농도를 보였다 (Fig. 103). 북극 대기 중 DMS 농도 변화는 급격한 계절별 변화 뿐 아니라, 급격한 일변화를 보이기도 하였는데, 이는 대부분 기상학적 요인(풍향, 풍속, 고도 등)의 변화에 기인하는 것으로 판단 된다. 본 연구를 통해 확보한 장기간 북극 대기 DMS 농도 변화 관측 자료는 북극지역의 기후변화 피드백 연구에 중요한 과학적 자료로 활용 될 수 있으며, 향후 보다 장기적인 관측 자료 획득을 통해 DMS 발생에 의한 기후 변화 영향에 대한 정량적·정성적 분석이 가능 할 것으로 기대된다. 해당 연구 결과는 국제 학술지 Atmospheric Environment(논문명: An analytical system enabling consistent and long-term measurement of atmospheric dimethyl sulfide)에 2016년 6월에 발표되었다.

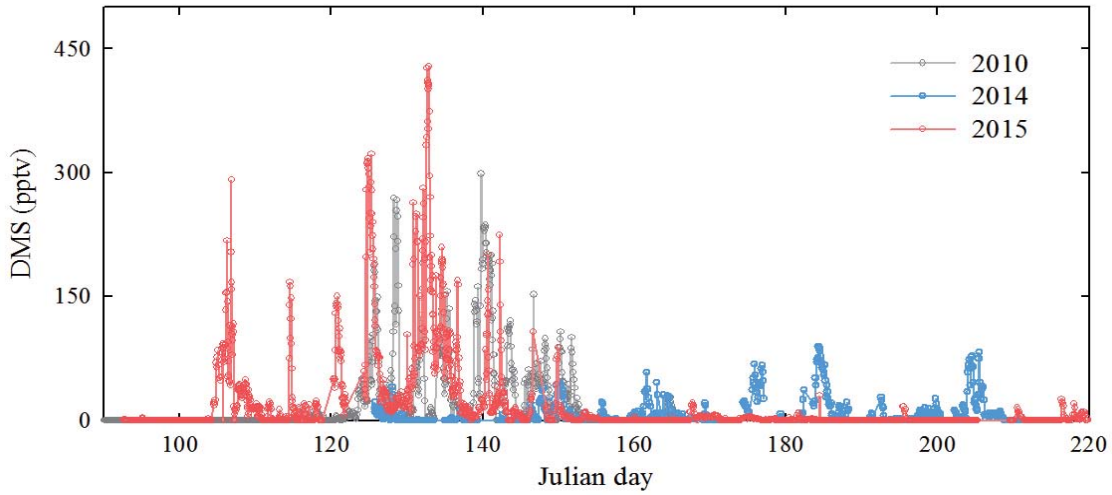


Fig. 103. Variations of DMS concentration analysed at Zeppelin station in Ny-Alesund (2010, 2014, 2015년).

(2) 북극 대기 DMS 발생과 인근 생물량 변화 상관성 연구

북극 대기 중 DMS 농도는 다양한 환경 요인에 의해 변화한다. 그림 Fig. 103에서 보는 바와 같이, 봄철 급격한 증가는 인근 해양의 일차 생산량 증가에 직접적인 영향을 받았을 것으로 추정할 수 있지만, 대기 중 DMS 농도 변화는 생물의 영향뿐만 아니라, 다양한 기상인자와의 복합적인 관계에 의해 결정되기 때문에 급격한 일변화를 보이기도 한다 (Park *et al.*, 2013). 실제로 2010, 2014, 2015년 대기 DMS 분석 결과 자료를 인공위성 자료를 활용한 인근 해양의 일차 생산량 (chlorophyll-a, Aqua-MODIS 위성 자료 활용) 변화와 단순 비교한 결과 2010년의 경우 대기 DMS 농도 변화와 바렌츠해 및 그린랜드해를 포함하는 스발바드 인근 해양의 일차생산량 변화가 유효한 양의 상관관계 (r=0.89)를 보이지만, 2014, 2015년에는 그와 양의 상관관계를 확인할 수 없었다(Fig. 104). 이와 같은 차이가 의미하는 바는, 첫째 관측지로 향하는 공기괴의 이동 경로가 항상 일정한 것이 아니기 때문에 넓은 범위의 평균 생물량 변동이 제플린 관측소에서 분석된 대기 DMS 농도의 변화를 직접적으로 대표 할 수 없으며(Fig. 105), 또한 수송과정에서 발생하는 희석 및 산화 등과 같은 물리·화학적 요인이 DMS 농도 변화에 직·간접적 영향을 미치기 때문이다. 따라서 인근 생물량의 변화와 대기 DMS 농도 변화와의 정확한 상관관계를 비교하기 위해서는 DMS 발생 및 소멸 특성에 초점을 둔 생물량 계산 방식(potential DMS source strength)의 적용이 필요하다.

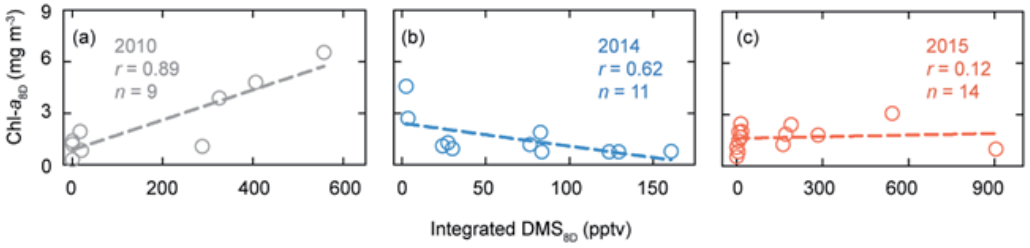


Fig. 104. Relationship of chlorophyll-a on surface of Barents Sea and Greenland Sea derived from satellite with DMS concentration measured in (a) 2010, (b) 2014, (c) 2015.

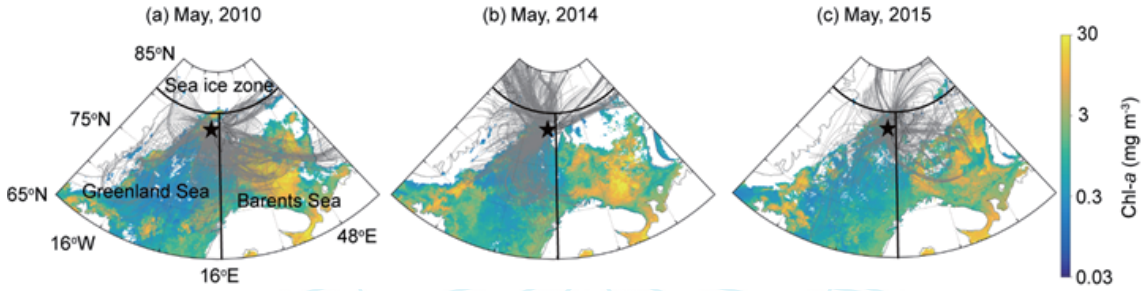


Fig. 105. Distribution of chlorophyll-a and back-trajectory in May of (a) 2010, (b) 2014, (c) 2015 (gray line, 2days air mass back-trajectory, NOAA HYSPLIT).

본 연구에서는 북극 제플린 관측소에서 관측된 DMS 농도 변화와 인근 해양 생물의 일차생산량 변화와의 정량적·정성적 관계 변화를 정확하게 판단하기 위하여, DMS 발생에 영향을 미치는 해양 표층 생물량을 2일(48시간) 동안의 공기역궤적에 따라 평균값을 구한 후 (Arnold *et al.*, 2011), 운송 과정에서 대기 중 DMS의 소멸 상수 (α =0.43; 1일 35% 소멸, Leck and Persson 1996; Sharma *et al.*, 1999) 및 바람세기에 따른 해양-대기간의 가스 교환 상수 (τ =1.47, Zemmelink *et al.*, 2004)를 적용하였다 (Fig. 106, 수식 1). 해양 표층의 생물량은 미국 NASA에서 제공하는 Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: : http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/) 의 4km 해상도 자료를 활용하였으며, 공기역궤적 분석 자료는 미국 NOAA에서 제공하는 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories: http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php) model을 활용하였다 (Draxler and Hess, 1998). 선행 연구 결과에 따르면,

북극 대기 중 DMS는 광화학적 산화 반응을 거쳐 2일 이내에 60% 이상이 황화염과 같은 물질로 산화되기 때문에, 본 연구에서 DMS 발생에 영향 미칠 해양 생물량의 추적 범위를 2일 간의 공기역궤적 분석 범위로 한정하였다.

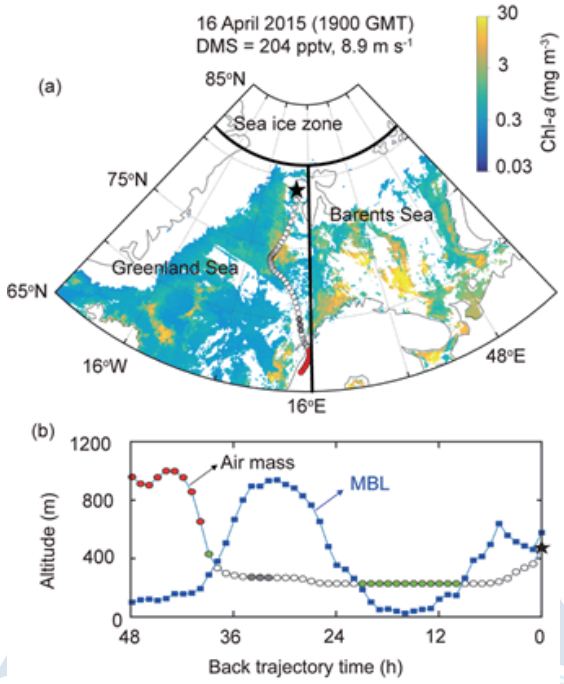


Fig. 106. Sample of potential DMS source strength calculation.

$$SS = \frac{\sum_{t=1}^{48} Chl_t \cdot e^{-\alpha(\frac{t}{24})}}{n} \left[\frac{S}{6}\right]^{\tau} \quad \text{(수식 1)}$$

수식 1. Potential DMS source strenght (SS).

여기서 Chlt: trajectory point에서의 일차생산량. α: 북극 대기 중 DMS 소멸 상수. τ: 해양-대기 간 DMS 가스 교환 상수. n: 평균 계산에 사용된 공기역궤적의 시간격 포인트 수를 나타냄.

공기궤적 이동 경로 상의 해양 일차생산량 평가 과정에서 불확실성을 낮추기 위하여 부적합한 데이터를 제거하는 과정 거쳐야만 한다. 예를 들어 공기궤적의 고도가 혼합층 (mixed boundary layer) 보다 높은 경우, DMS의 발생원인 해양의 가스 교환 영향을 적게 받기 때문에 해당 지점에서의 생물량 정보는 계산에서 배제하였으며, 동일한 이유로 공기궤적이 육상을 지나칠 경우 역시 생물량 정보는 계산에서 배제하였다. 그

외에 공기궤의 발생 기원지에 따른 지역별 차이를 파악하기 위하여, 2일 동안의 공기궤적이 바렌츠 해 또는 그린랜드 해에서 90% 이상 머무른 경우만을 평가 대상으로 제한하였으며, 피오르드 또는 인근 연안에서 발생되는 국소 지역적 발생원의 영향을 배제하기 위하여 48시간 동안의 공기역궤적 평균 풍속이 3m s-1이하인 관측 자료는 평가에서 제외하였다. 또한 위성 생물량 자료의 부족으로 발생하는 평균 계산의 부정확성을 줄이기 위하여, 유효한 생물량 정보를 가진 공기역궤적의 시간격 포인트 수가 전체 포인트 수 (48개)의 30%를 넘지 않는 자료는 평가에서 제외하였다. Fig. 107는 위 '수식 1'을 통해 계산된 potential DMS source stength와 DMS와의 상관관계를 보여 주는 그림으로써, 위에서 언급한 자료 필터링 과정을 거치면서 두 인자간의 상관성이 보다 뚜렷하게 보이는 것을 확인 할 수 있다.

위와 같은 계산과정 및 자료 필터링 절차를 거친 후 2010, 2014, 2015년에 북극 제플린 관측소에서 관측된 대기 DMS 농도 변화와 인근 해양 일차생산량과의 상관관계 변화를 살펴본 결과, 공기궤의 기원지 및 시기에 따라 두 인자간의 상관성이 크게 변화하는 사실을 확인할 수 있었다. 특히 흥미로웠던 점은 공기궤가 그린랜드해에서 이동하여 온 경우, 바렌츠해를 거쳐 온 경우 보다 단위 생물량당 DMS 발생 능력(DMS production capacity)이 3배 가량 높게 나타나는 것을 확인하였다. 2010년 2014년 2015년 4-5월의 경우 관측된 DMS와 계산을 통한 potential DMS source strength 사이에 유의미한 양의 상관관계를 보이는 것을 확인 할 수 있다 (Fig. 107, a-c).

KOPRI 극지연구소

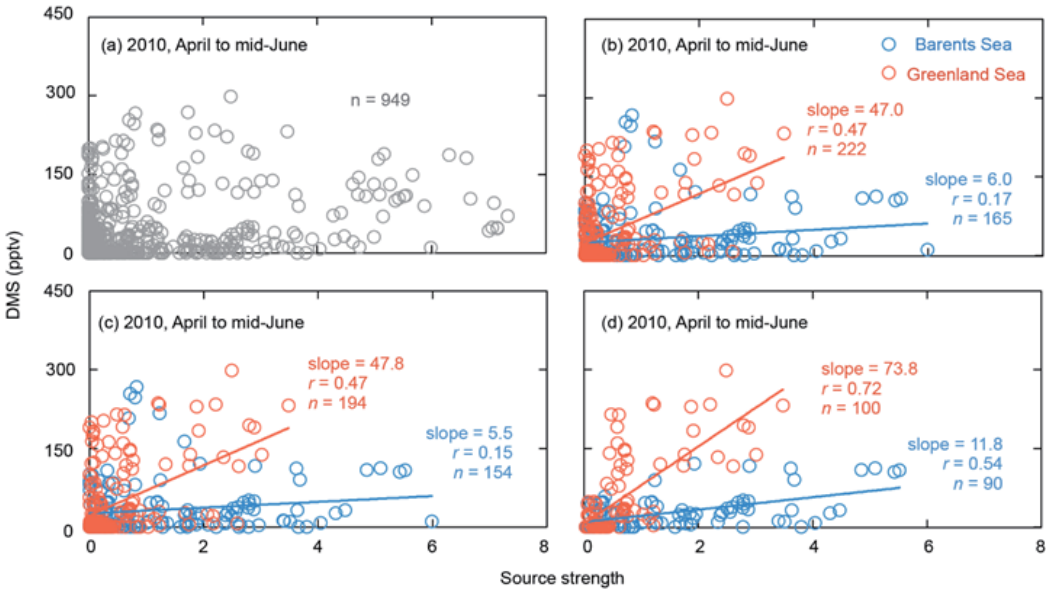


Fig. 107. Correlation of Potential DMS source strength and Arctic air DMS concentration, and filtering process.

두 인자가 양의 상관관계를 보일 때, 두 인자간의 기울기 (slope) 값은 생물량당 DMS 발생 능력(DMS production capacity)을 의미한다. 해양의 DMS 발생은 주요 식물플랑크톤의 종 조성에 따라 크게 달라지는데, 북극해는 prymnesiophytes와 diatom에 속하는 식물플랑크톤의 우점도가 높은 지역이다. 식물플랑크톤의 DMS 발생 능력은 종에 따라 매우 큰 차이를 보인다. 북극에 우점하는 두 식물 플랑크톤 중 prymnesiophytes는 현재까지 보고된 식물플랑크톤 중 DMS를 가장 많이 발생하는 종에 속하며 diatom에 비해 채내 DMSP (DMS의 전구물질)의 함량이 100배 이상 높은 것으로 알려져 있다 (Park *et al.*, 2014, Keller *et al.*, 1989, Stefels *et al.*, 2007). 스발바르 인근 해양 표층의 일차생산량은 바렌츠해가 그린랜드해에 비해 약 4배 가량 높지만 (Fig. 108), 그린랜드해를 거쳐 온 공기궤의 DMS production capacity가 바렌츠해를 거쳐 온 공기궤에 비해 3배 가량 높은 이유는 그린랜드해에 DMS 발생에 유리한 prymnesiophytes의 상대적 우점도가 높기 때문으로 판단 할 수 있다.

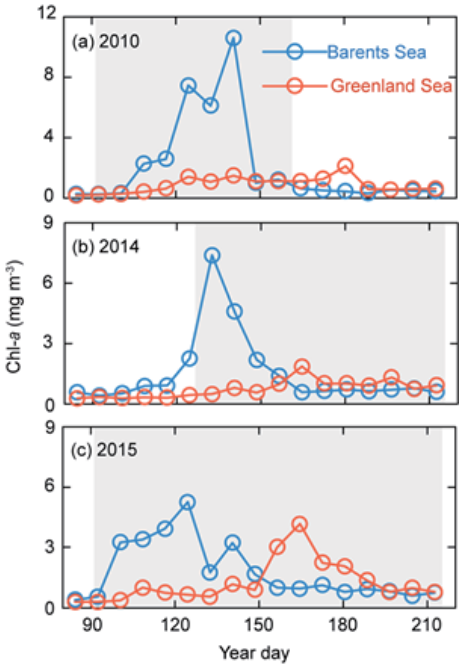


Fig. 108. Satellite-derived chlorophyll concentration in Barents and Greenland Sea.

2014년 2015년의 경우 5월 이후 대기 DMS 농도와 potential DMS source strength 사이에 유의미한 상관관계를 보이지 않는데, 이는 DMS 발생에 영향을 미치는 주요 생물요인의 변화를 의미한다. 2014년 6-7월의 경우, 전체적인 생물량의 감소와 함께 DMS 발생량이 증가하는 경향을 보이는데, 이는 포식압 또는 생리적 스트레스 요소 증가에 의한 DMS 발생 기작으로 이해할 수 있다 (Fig. 109, d; Dacey *et al.*, 1986; Sunda *et al.*, 2002). 2015년 6-7월의 경우, 생물량은 5월에 비해 증가하지만, DMS 발생량은 크게 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 주요 생물종이 DMS를 활발히 발생하는 종에서 DMS 발생에 둔감한 종으로 종의 천이가 일어났기 때문으로 판단할 수 있다 (Fig. 109, e).

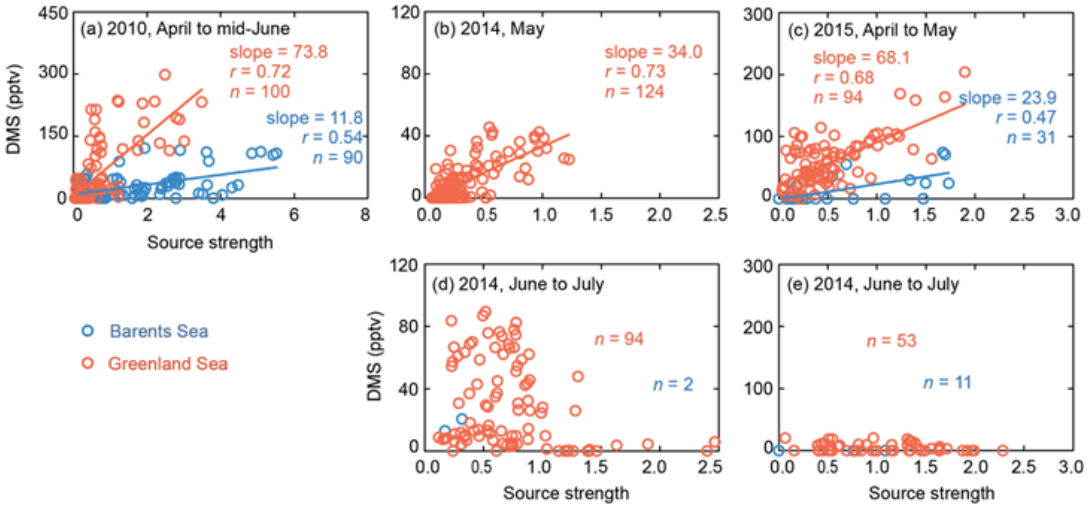


Fig. 109. Correlation of DMS concentration and potential source strength at Zeppelin station.

위 분석에서 관측된 DMS 농도 분포와 계산된 potential DMS source stength가 양의 상관관계를 보일 경우 (4월, 5월)에는 두 인자간의 기울기 값 (slope)을 통해 상대적인 생물량당 DMS 발생 능력(DMS production capacity)을 유추 할 수 있지만, 6-7월의 경우와 같이 두 인자간의 상관관계가 뚜렷하지 않은 경우에는 두 인자간의 기울기 값 변화에 의한 DMS 발생능력 변화에 대한 평가가 불가능하다. 따라서 월별 DMS 발생 능력을 비교하기 위하여 DMS-to-potential DMS source strength ratio의 변화와 월 평균 DMS 농도 변화를 비교・분석하였다 (Fig. 110). 그 결과 앞선 Fig. 109에서와 마찬가지로 그린랜드해 기원 공기궤의 DMS-to-potential DMS source strength ratio 값이 바렌츠해 기원 공기궤에 비해 월등히 높은 값을 보였으며, 2010년 및 2015년에는 관측된 DMS 농도와 potential DMS source strength가 양의 상관관계를 보인 5월에 월 평균 DMS 농도와 DMS-to-potential DMS source strength ratio 값이 최대치를 보였음. 이는 해양 일차생산자의 직접적인 DMS 발생이 이 기간동안의 DMS 발생에 가장 큰 기여를 하였음을 의미한다. 반면 2014년의 경우, DMS와 potential DMS source strength가 양의 상관성을 보인 5월에 비해, 6~7월의 DMS-to-potential DMS source strength ratio 값이 2배 가량 높은 값을 보였으며, 월 평균 DMS 농도 역시 7월에 가장 높은 값을 보였다. 이는 2014년의 경우, 해양 일차생산자의 직접적인 DMS 발생보다 포식압의 증가 생리적 스트레스 요인(광량 증가, 영양염류 감소)의 증가가 이 시기에 DMS 발생량에 가장 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단 할 수 있다.

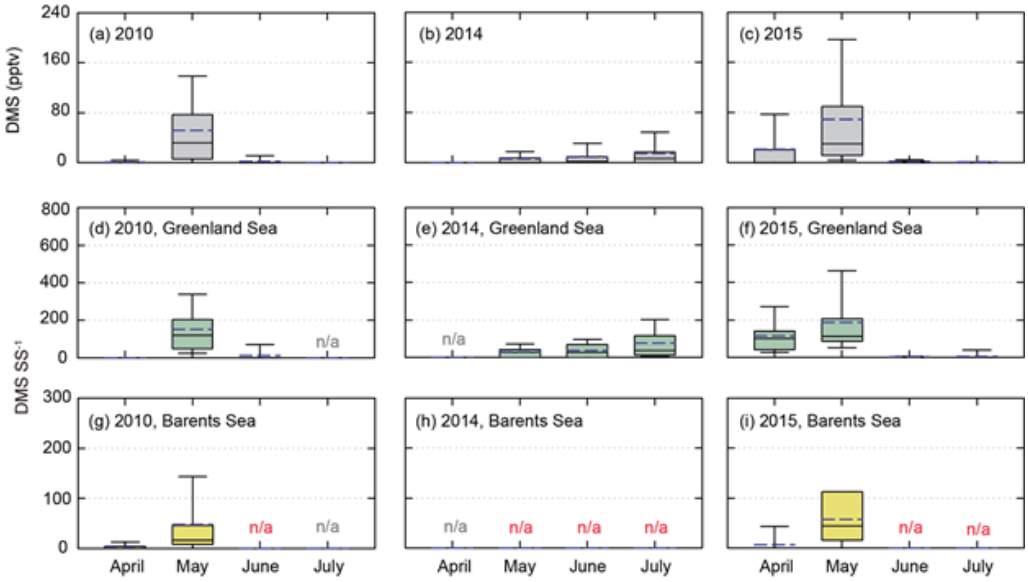


Fig. 110. (a-c) Variation of monthly mean DMS concentration in 2010, 2014, 2015(box plot, dotted line: mean values, (d-f) variation of monthly mean DMS-to-potential DMS source strength (SS) ratio from Greenland Sea, (g-i) variation of monthly mean DMS-to-potential DMS source strength (SS) ratio from Barents Sea. gray line: n/a (not available) of analysed DMS, red line: data deleted cases through potential DMS source strength calculation process.

본 연구를 통해, 해양생물기원 기후냉각가스인 DMS의 농도 변화를 장기간 북극에서 관찰하였으며, 대기 DMS농도 변화와 인근 해양 일차생산자와의 상관관계에 대하여 분석하였다. 해양 생물에 의해 발생하는 DMS는 기후 변화에 따른 음의 피드백 역할을 할 것으로 기대되지만 이에 대한 과학적 근거는 전무하다. 본 연구를 통해 아직까지 알려지지 않은 대기 DMS와 해양 일차생산량과의 정성적 관계에 대한 분석을 시도하였으며, 향후 장기적인 자료 축적을 통해 기후변화에 따른 해양 환경의 변화가 극지방의 DMS 발생에 어떠한 영향을 미칠 것인지에 대한 과학적 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 기후변화에 따른 북극지역의 환경변화는 다른 지역에 비해 그 속도가 2배 가까이 빠르게 진행되고 있으며, 그로 인한 해양생물량의 변화가 예상된다 (Arrigo *et al.*, 2008). 해양 환경의 변화는 DMS와 같은 생물기원 기후조절 물질의 발생량 변화로 이어질 수 있으며, DMS 발생 변화는 북극대기의 주요 에어로졸 형성 기작에도 영향을 미칠 게 될 것이다. 향 후 지속적인 관련 연구를 통하여, 대기 물리 특성(입자 수농도, 크기분도 등)와 화학 특성(주요 입자 물질의 조성 및 동위원소)의 변화와 대기 DMS 농도변화와의 상관성 연구를 통해 보다 정량적인 DMS의 기후 냉각 기여도에 대한 분석이 가능 할 것으로 기대된다.

다. 다산기지 동토 물리특성 연구

(1) 관측지 개요

전기비저항 관측지의 경우, 활동층과 영구동토층에 대한 물성변화를 조사하기 위하여 Fig. 111의 Site를 대상으로 활동층을 분석하였으며 다산기지 여름동안 지중으로 이동하는 해수에 대한 지중의 변화를 확인하였다. Site 선정은 전기비저항 탐사에 적합한 전기적 잡음이 적은 지역과 장기적인 모니터링을 위한 측선 보존이 가능한 지역을 선택하여 조사를 수행하였다.

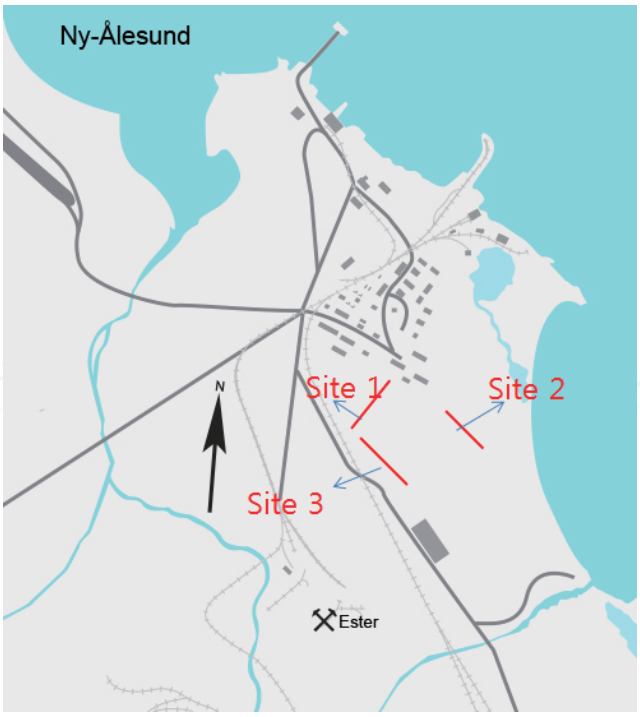


Fig. 111. 니알슨 주변 전기비저항 관측 Site.

(2) 관측

(가) 관측 시스템

① 전기비저항 탐사

전기비저항 탐사는 한 쌍의 전류전극을 통하여 지하에 전류를 주입하고, 다른 한 쌍의 전위전극에서 전위를 측정하여 지하의 전기비저항 분포 영상을 획득하는 물리탐사기법이다. 지하로 흘러간 전기는 지하매질의 저항 정도에 따라 측정되는 전위차가 발생하며 이 자료를 역산하여 지하 매질에 대한 전기비저항 분포를 작성할 수 있다. 또한 전기비저항 모니터링 기법은 지반 변화를 보다 효과적으로 영상화하는 기법이다. 전기비저항 모니터링은 시간적으로 변화된 지하 물성을 보다 효과적으로 획득하기 위하여 전극의 위치가 변하지 않도록 고정 설치 한 후 모니터링 자료를 획득한다.

활동층, 영구동토층, 해수에 대한 지중 변화를 연구하기 위하여 전기비저항 탐사를 2014년 7월 29일에서 8월 4일까지 수행하여 데이터를 획득하였다. 전기비저항 측정 장비는 미국 AGI 사의 Sting 탐사기를 사용하였으며, 측정된 자료 저장을 위한 노트북, 전류 및 전위 측정을 위한 전극과 21채널 수신 케이블을 사용하였다. 전기비저항탐사 방법은 일반적으로 많이 사용되는 Dipole-Dipole 방법을 사용하였으며, 전극간격은 1 m(Site 1 및 Site 2)와 2m(Site 3), 전극개수는 21개, 전극전개수(n)는 10까지 획득하였다. Fig. 112는 전기비저항 탐사 현장을 보여주고 있다. 현장 조사 모니터링은 3개의 Site에 대해 자료가 획득되어졌다.

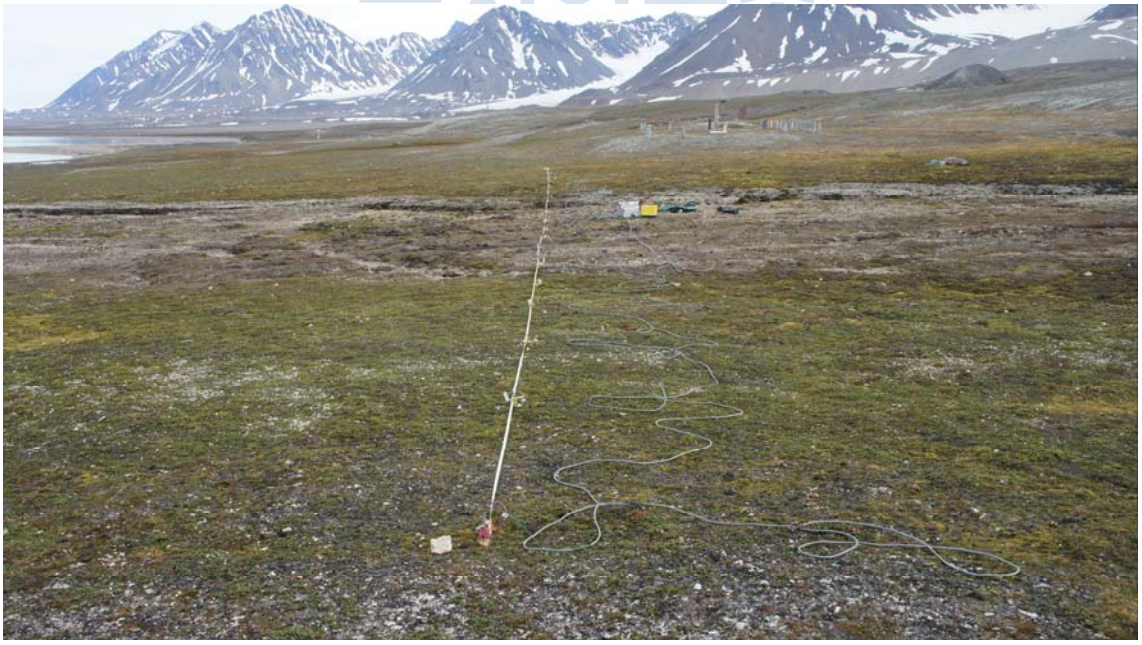


Fig. 112. Electrical resistivity observation site in Ny-Alesund.

② 전기비저항탐사 자료 처리

현장에서 전기비저항 탐사 결과로 측정한 전기비저항 탐사자료는 활동층과 영구동토층의 지중 참 비저항값이 아닌 겉보기비저항값이다. 즉 그 자체가 땅속의 진짜 모습이 아니라 전극배열법의 원리에 의해서 왜곡된 단면도이다. 따라서 지중의 참비저항 값을 알아내기 위해서는 적절한 해석과정이 반드시 필요하다. 일반적인 전기비저항탐사 측정자료는 2차원 가단면도로 표현된다.

탐사 현장에서의 정성적인 해석은 이 가단면도에 의존하며, 경험이 풍부한 전문가의 경우에는 대략적인 지하 지질구조의 해석이 가능하다. 그러나 측정 자료로부터 정확한 지하 비저항 분포를 알기 위해서는 컴퓨터에 의한 역산과정이 필요하다. 전기비저항탐사는 전류가 흐르는 실제 경로상에 없는 값을 나타내는 이른바 pants leg effect(바짓가랑이 효과, 양쪽으로 갈라지는 효과)를 가지고 있으며 이러한 효과들이 중첩 되었을 때 나타나는 현상들로 인해 실제 지중구조와 다르게 보인다.

비전도체가 있는 곳을 중심으로 양옆 사선방향으로 고비저항 띠가, 전도체가 있는 곳을 중심으로 같은 위치에 저비저항 띠가 형성된다. 지형이 오목하거나 볼록한 곳에서도 같은 효과가 발생한다. 전기비저항탐사 결과물은 겉보기비저항가단면도인 현장자료, 그리고 이론자료와 역산자료 3가지를 생성한다. 현장자료로부터 pants leg effect 효과를 제거하여 실제의 지하구조를 모델링한 결과값이 역산(inversion)자료이다. 이론자료는 역산자료를 다시 현장자료로 바꾸어 보는 이론적인 것으로 현장자료와 이론자료가 유사할수록 역산의 모델링이 잘 되었다 할 수 있다. 요컨대 역산을 이용하는 방법은 주어진 가상 지하구조로부터 이론 자료를 계산하고, 그 이론 자료와 현장 탐사자료간의 오차로부터 그 오차를 최소화할 수 있는 지하구조를 계산하며 이러한 과정을 오차가 원하는 값 이하가 될 때까지 컴퓨터가 반복 수행한다. 일반적으로 역산 수행 시, 육상 구간에서는 지형에 의한 등전위선의 왜곡이 발생하므로 이를 보정할 수 있는 해석 방법이 적용되나 본 측선의 경우 고도차가 없어 지형보정은 생략하였다. 역산에 이용된 소프트웨어는 한국지질자원연구원(KIGAM)의 DIPRO for Windows V.4.0 이다.

(3) 결과

전기비저항탐사를 이용하여 활동층과 영구동토층에 대한 물성변화 분석 및 해수에 대한 지중의 변화를 분석하고자 한다.

(가) 전기비저항

다산기지 주변의 활동층과 영구동토층에 대한 물성변화 분석, 지하수의 위치 및 해수에 대한 지중의 변화를 분석하기 위한 전기비저항탐사는 Kongsfjord 해안을 기준으로

수직인 Site 1, 수평인 Site 2와 3에서 3개의 측선을 설정하여 수행하였다. 각 측선의 수진기 간격은 활동층과 영구동토층에 대한 물성변화를 감지하고자 Site 1 및 Site 2는 1m 간격으로 설치하고, Site 3의 경우는 Site 2와의 비료와 5m이하의 해수를 탐사하고자 2m 간격으로 설치하였다. 전극배열은 모든 Site에서 Dipole-Dipole 배열방법을 사용하였다. 특히 Site 2 및 3의 경우 해수의 영향을 분석하기 위하여 Site 2는 해안 쪽에 그리고 Site는 해안 쪽에서 떨어져서 탐사를 수행하여 해수 자료의 신뢰도를 높이고자 하였다.

송신원은 최소 50mA에서 최대 1000mA의 직류 전류를 사용하였다. 비저항탐사에서 측정된 저항은, 전극의 배열 방식(Dipole-Dipole)에 따라 보정되어 겉보기비저항값으로 환산하였으며 이 겉보기비저항값 분포를 야기하는 지하모델을 역산방법(inversion method)을 이용하여 계산하였다. 또한 측선상의 고도차가 작으므로 지표면을 기준으로 한 심도별 비저항 역산단면을 작성하였다. Fig. 113에서 5는 다산기지 인근 지역에서의 전기비저항을 측정한 결과를 해석을 통해 구한 전기 비저항 분포도이다. 이들 분포도에 의하면 상부층에서는 주로 저비저항대가 형성되어 있으며, 하부로 깊어질수록 상대적으로 높은 전기비저항을 나타내고 있다. 전체적인 비저항값은 주로300~3,000 Ωm의 분포를 보이고 있다.

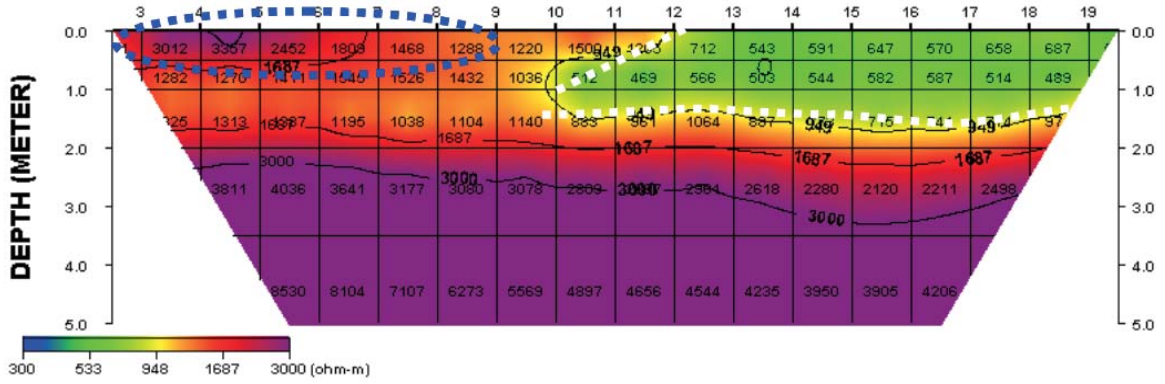


Fig. 113. Result of electrical resistivity observation at site 1.

Fig. 113은 Site 1에서 측정된 비저항값을 나타내고 있다. 시점쪽으로 측선 0~10m 구간에서는 상대적으로 높은 비저항대가 관찰되며, 측선 10~21m 구간에서는 저비저항값을 나타내고 있다. 또한 측선 0~10m 구간의 심도 0~1.5m에서는 상대적으로 높은 비

저항대가 분포 하고 있으며 측선 11~21m 구간의 심도 0~1.5m에서는 저비저항대가 분포하는 것으로 확인되었다. 역산 단면 Site 1의 3m이하의 지반은 전반적으로 수평구조의 고른 전기비저항 분포를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 또한 전구간에 걸쳐 심도 1.5~5m에서는 지표면에 비해 상대적으로 높은 비저항값이 분포되며 심도가 깊어질수록 비저항값이 커짐을 알 수 있다. 이는 심도가 깊어질수록 흙의 상대밀도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 심도 1.5~5m 구간까지 나타나는 상대적 저비저항대는 활동층이 영상화된 것으로 판단되며 측선 시점부(0~10m)에 비해 종점부(10~21m)에 저비저항대로 분포하는 것은 지표면 토사 특성 및 일조량 등에 의해 지하수의 유입이 차단되어 활동층의 연장성을 단절시킨 것으로 판단된다.

Fig. 114는 Site 2에서 측정된 비저항값을 나타내고 있다. 측선의 모든 구간에서 지표를 기준으로 상대적으로 낮은 비저항대가 관찰되고 있다. 특히 측선 시점쪽에서 7~8m 및 15~17m 구간의 심도 1~1.5m에서 낮은 비저항값이 관찰되고 있어 이 심도에서는 활동층이 존재할 것으로 판단된다. 또한 측선 9~10m 및 12~14m의 심도 1.5~2m에서도 낮은 비저항값이 관찰되어 이부분도 활동층이 존재할 것으로 판단된다. 이렇게 활동층의 심도가 일정하지 않은 것은 지표면 토사 특성에 따라 활동층의 심도가 다소 차이가 나타날 수 있으며 하절기에 발생하는 지표수의 흐름에 의해 부분적으로 활동층의 심도가 깊어지는 구간이 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

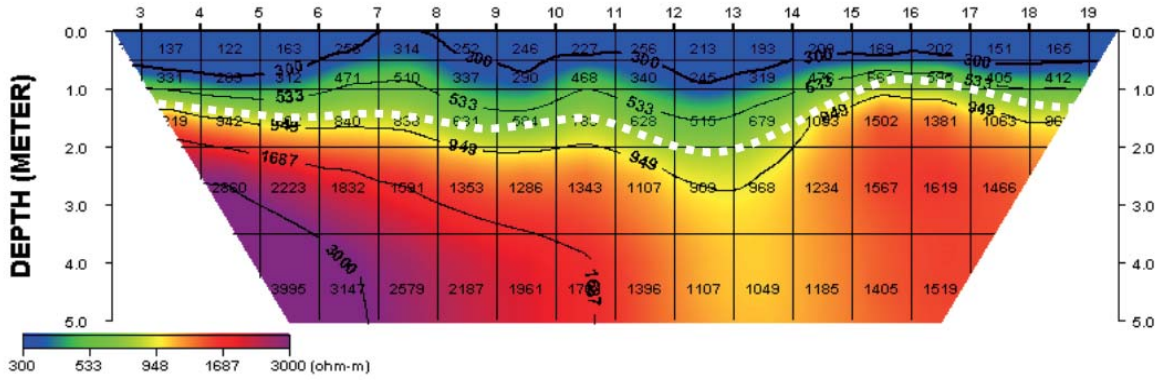


Fig. 114. Result of electrical resistivity observation at site 2.

해수의 영향과 Site 2에서 얻은 전기비저항에 대한 지중 변화의 차이를 확인하기 위하여 Site 3에서는 2m 간격의 수진기를 설치하고, 전극배열은 Dipole-Dipole 배열방법을 사용하여 전기비저항값을 측정하였다. Fig. 115는 Site 3의 전기비저항 탐사 결과는

Site 3에서 측정된 비저항값을 나타내고 있다. 측선 시점쪽에서 24m 까지는 심도 1.5~2m에서 낮은 비저항값이 관찰되고 있어 이 심도에서는 활동층이 존재할 것으로 판단된다. 또한 측선 24~42m의 심도 1m에서도 낮은 비저항값이 관찰되어 이 부분도 활동층이 존재할 것으로 판단된다. Site 2와 같이 이렇게 활동층의 심도가 일정하지 않은 것은 지표면 토사 특성으로 판단된다. Site 3의 심도 2~6m에서는 높은 비저항값을 나타내고 있다. 또한 이러한 높은 비저항값이 부분적으로 발생하고 있으며 이 영역에서는 부분적인 동토층이 존재하는 것으로 판단된다.

이러한 동토층을 연결하면 동토층 하부 경계와 일치하는 것으로 나타났다. 특히 측선 32~38m에서의 심도에서는 Site 3에서 가장 높은 비저항값을 나타내고 있는데 이 영역은 영구동토층이 존재하는 것으로 판단된다. 이는 해수침투에 의한 영향 또는 해수침투에 의한 염수의 경계에 수평적인 경계면이 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 역산단면의 심도 6m이하에서는 낮은 비저항값을 나타내고 있는데 이는 동토하부에 있는 지층의 지하수가 어느 정도 염수화가 진행된 것으로 그 결과로 낮은 비저항값을 나타내고 있는 것으로 판단된다.

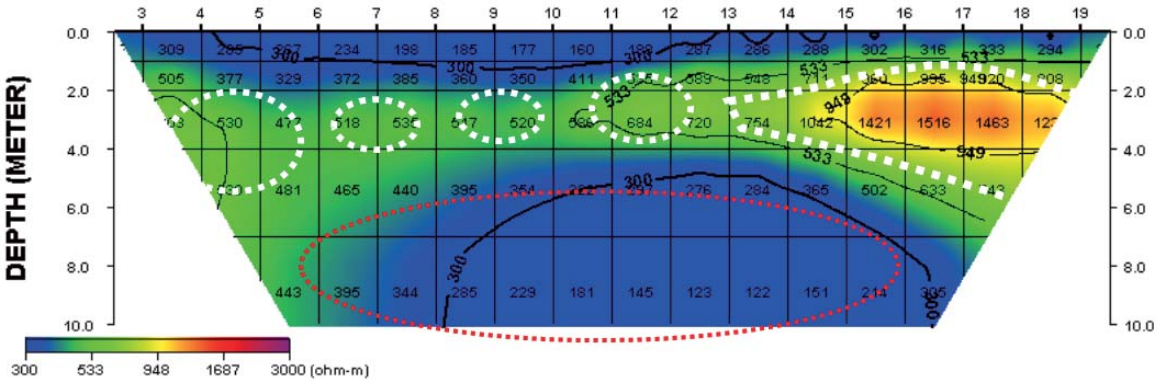


Fig. 115. Result of electrical resistivity observation at site 3.

라. 대기-동토 온실기체 교환 특성

(1) 관측지 개요

관측지는 노르웨이 스발바드 군도 내의 니알슨(Ny-Ålesund) 주변에 위치해 있다. 니알슨은 Kongsfjord 해안에 위치하며, 34 m 높이의 Amundsen-Nobile Climate Change Tower (CCT) 관측 타워는 니알슨으로부터 남서쪽 약 1.3 km 떨어져 있다(Fig. 116).

CCT로부터 수 km 이내에 높고 가파른 산과 빙하, 깊은 계속, 평지 그리고 침강된 지역이 혼재되어 있다. CCT로부터 북쪽 방향에 Schetelig 산이, 남쪽으로는 Zeppelin 산과 그 정상부에는 GAW 지구급 관측소가, 동쪽으로는 니알슨의 오른편에 위치한 Nobile Mast가 있다(Fig. 117).

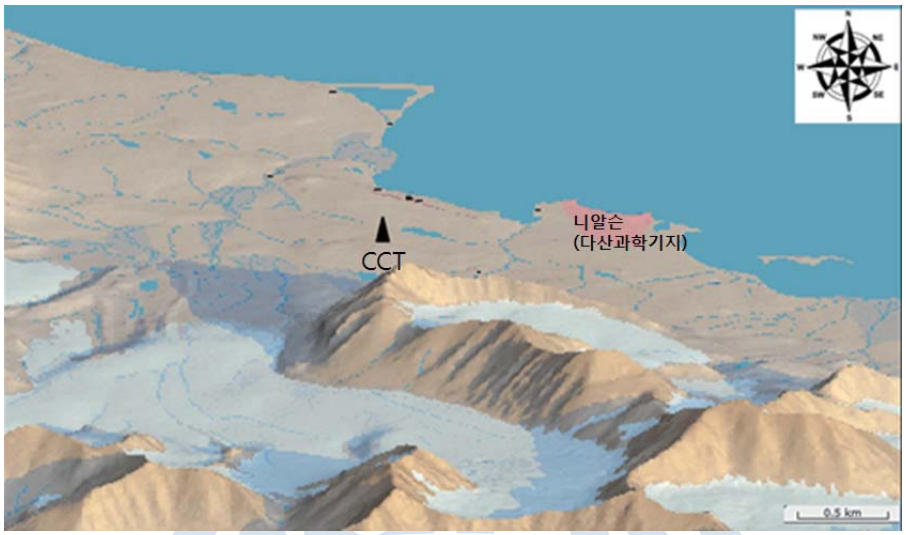


Fig. 116. Topographic map around research site, CCT.

극지연구소

노르웨이 니알슨을 방문하기 위해서는 매일 운항되는 롱이어비엔까지의 항공편을 이용한다. 롱이어비언으로부터 니알슨까지는 계절에 따라 2회/주(월/목) 항공기가 운항되는데 사전 예약이 필수적이다. 니알슨에는 북극다산과학기지가 있으며, 이곳에서 실험 준비 및 숙식을 하게 된다. 다른 거점 관측지 보다 전기, 통신, 연구 지원 체계가 매우 잘 갖추어져 있다. 방문 기간에 필요한 물품은 사전에 한국에서 발송하게 되며, 북극다산과학기지 내에 기본적인 물자들이 갖추어져 있다. 관측지인 CCT까지 하계 기간에는 차량으로, 그 외 눈이 덮인 기간에는 스노우 모빌로 이동한다. 드물지만 북극 곰이 나타나기도 하기 때문에 상시 총기 및 무전기를 휴대하고 연구 현장에서 일을 하게 된다.

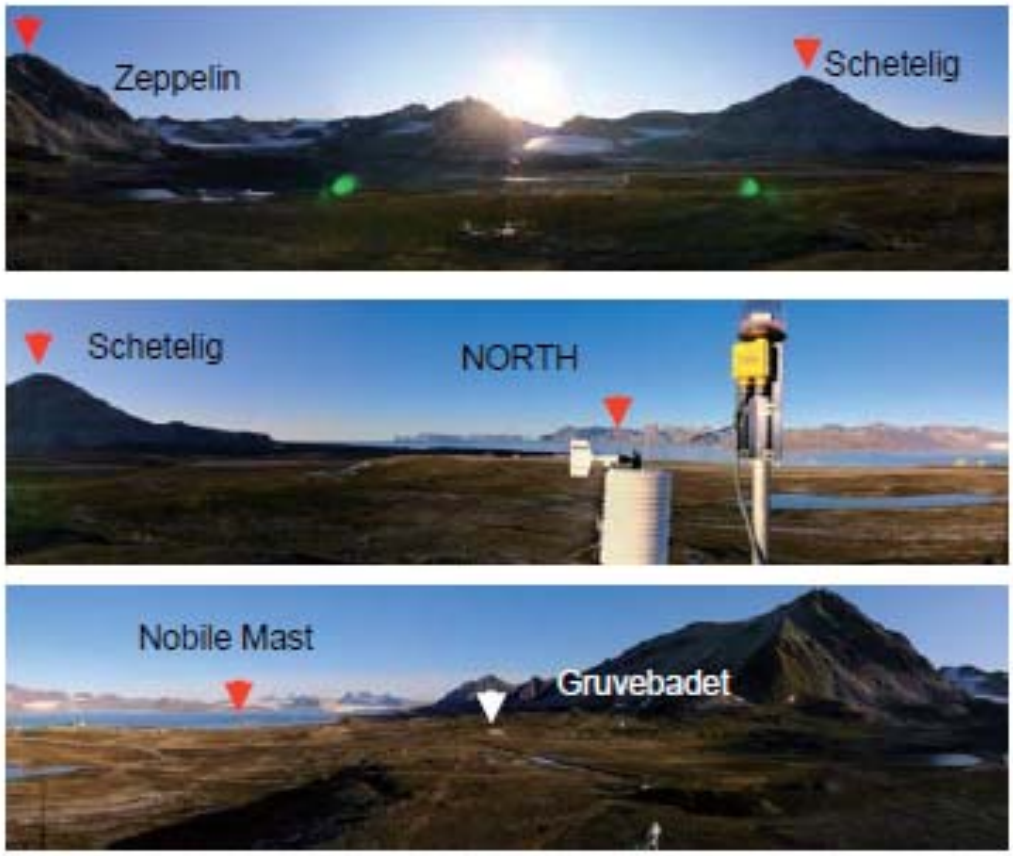


Fig. 117. View to the four azimuthal direction from the CCT(Angelo *et al.*, 2010).

극지연구소

(2) 관측

니알슨 지역 대기경계층 관측을 위해 2009년 후반기 이태리의 CNR-ISAC는 니알슨 과학타운에서 약 2 km 떨어진 Kongs 피요드르의 남쪽 연안에 34 m 높이의 Amundsen-Nobile Climate Change Tower (CCT) 타워를 구축하였다 (http://www.isac.cnr.it/~radiclim/CCTower/). 이 피요르드는 남동에서 북서방향으로 뻗어 있는데 남동쪽은 낮은 산들과 빙하에 의해 경계가 지어지는 반면, 북서쪽으로는 바다로 이어진다. 이 지역의 지형은 복잡한데 수 m 이내에서 경관이 바다에서 500~600 m 높이의 산으로 바뀐다. 이로 인해 지형에 의한 주풍향이 뚜렷하다. 첫 번째는 피요르드 안쪽의 동쪽과 남동쪽 사이의 빙하로부터, 두 번째는 관측지의 남쪽 계곡, 세 번째는 여름철 큰 규모 대기 순환의 변화로 인해 북서풍이 주 풍향을 이룬다.

CCT는 대기경계층 과정을 비롯한 여러 연구 목적의 다양한 대기 관측용 측기가 설치되어 있는데 측기는 Table 8에, 측정변수는 Table 9대해 요약되어 있다. 이 중 20.5

m 높이에는 2011년 하반기부터 본 사업을 위해 극지연구소 장비들이 설치되었다. 극지연구소에서 운영 중인 에디 공분산 시스템은 삼차원 초음파 풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA), 개회로 CO_2/H_2O 기체 분석기(LI7500, Licor, USA), 개회로 CH_4 분석기(LI7700, Licor, USA) 그리고 폐회로 $CO_2/CH_4/H_2O$ 분석기(CRDS, Picarro, USA)로 구성되어 있다. 에디 공분산 시스템은 CCT의 나머지 풍향풍속계 및 초음파 풍속계와 마찬가지로 북쪽을 향하여, 타워로부터 약 2.5 m 떨어져 있다. 개회로 CO_2/H_2O 분석기와 개회로 CH_4 분석기는 삼차원 초음파 풍속계로부터 각각 0.7 과 0.75 m 떨어져 있다(Fig. 118, 119).

Figs. 118. Whole body of CCT 34-m Walk-up tower.

Fig. 119. Eddy covariance system consisting of CO2/H2O gas analyzer, 3-D Sonic anemometer and CH4 analyzer (from left to right) in 2012.

이산화탄소 및 잠열 플럭스 관측을 위하여 두 종류의 개회로 CO_2/H_2O 기체분석기(LI7500과 EC150)가 장착되어 있다. 2011년 9월 EC150이 설치되었으나 고장으로 2012년 3월까지만 운영되었다. 이에 LI7500을 2012년 5월 18일에 장착하였고, 2013년 5월 26일에 수리를 위하여 반출하였던 EC150을 재장착하여 밀도 보정을 위한 수증기 관측을 수행하고 있다. 한편, LI7500 주변에는 장비의 발열로 인한 부가적인 현열 플럭스 보정을 위하여 백금선 온도계 및 미세열전대가 설치되어 일정기간 운영되었다.

CCT 지상에는 고속으로 이산화탄소/메탄 농도 분석을 할 수 있는 공동감쇄분석기(CRDS)가 설치되어 있다(Fig. 120). 다른 가스 분석기와의 비교를 위해 CRDS는 CH4-H2O 모드와 CO2-H2O 모드로 운영되었으며, 기간은 표에 요약되어 있다. CRDS를 이용한 관측은 뒤에 자세히 설명된다. CRDS를 이용하여 측정되는 메탄 플럭스와의 비교를 위해 개회로 메탄 분석기(LI-7700, Li-cor)가 2012년 5월부터 2014년 3월까지 운영되었다. 플럭스 측정을 위해 1차적으로 10 Hz의 집록주기로 관측값을 집록기에 저장하고, 정기적으로 윈도우스 기반의 컴퓨터에 저장하였다. 한국에서 원격으로 현장의 컴퓨터에 접근하여 시스템의 상태 점검 및 자료를 회수하였다. 하지만, 가끔 인터넷이 연결되지 않아 일부 자료 손실이 발생하기도 하였다.

Table 8. Summary of measurements from CCT in 2012

Instrument /model	Height (m) agl	Data	Sampling rate
Heat flux plates	0	ground heat flux	1 s
temperature snow T1	0.07	snow temperature	1 s
temperature snow T2	0.17	snow temperature	1 s
Young anemometer 4 Vaisala HD thermohygrometer 4	2.00	wind speed/direction temperature/relative humidity	1 s
GILLR2 sonic anemometer	3.70	3-D wind, sonic temperature, humidity	20 Hz
SR50	4.2	snow height	
Young anemometer 3 Vaisala HD thermohyrometer 3	4.8	wind speed/direction temperature/relative humidity	1 s
GILLR3 sonic anemometer Campbell KH-20 Hygrometer	7.5	3-D wind, sonic temperature, humidity	20 Hz
Young anemometer 2 Vaisala HD thermohygrometer 2	10.3	wind speed/direction temperature/relative humidity	1s
Campbell Anemometer, LI7500, LI7700, CRDS	20.5	3-D wind, sonic temperature, CO2/H2O, CH4, CH4/H2O	10 Hz
K&Z CG14 LW radiometer, K&Z CM11 SW radiometer	24.8	upwelling shortwave and longwave radiation	1 min.
K&Z CNR1 net radiometer	32.5	Albedo, Net radiation	1 min.
Young anemometer 1 Vaisala HD thermohygrometer 1	33.4	wind speed/direction temperature/relative humidity	1 s

KOPRI 극지연구소

Table 9. Eddy covariance measurements of KOPRI

Instruments	Variables	Operating Period
CSAT3A (Campbell Scientific Inc.)	u, v, w, Ts	2011. 09. ~
EC150 (Campbell Scientific Inc.)	CO2, H2O	2011. 09. ~ 2012. 03. 2013. 05. ~ 2014. 01. 2014. 09. ~
LI7500 (Li-cor)	CO2, H2O	2012. 05. 18. ~
LI7700 (Li-cor)	CH4	2012. 05. ~ 2014. 3.
CRDS (G2301-f, Piarro)	CH4-H2O CO2-H2O CH4-CO2	2012. 05 ~ 2012.7.21.~ 2012. 7.27. 2014. 05 ~

동토층으로부터 발생하는 메탄의 양을 측정하기 위해 공동 감쇠 분광기(Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS)가 CCT 타워 옆 지면에 2012년 5월에 설치되었다. CRDS는 삼차원 풍향 풍속계와 함께 폐회로 방식으로 메탄 플럭스를 측정하게 된다. Fig. 121은 CRDS를 이용하여 삼차원 초음파 풍속계 주변의 메탄 농도 관측을 위한 튜빙의 경로를 보여준다. 초음파 풍속계 주변의 이산화탄소, 수증기 및 메탄 농도 측정을 위해 CRDS 인렛을 초음파 풍속계로부터 약 0.6 m 뒤쪽에 설치하였다. 인렛과 CRDS는 내경이 3/8 인치이고, 길이가 23.5 m인 decarbon 튜빙으로 연결되어 있다. CRDS의 외장 펌프를 이용하여 튜빙 내를 이동하는 공기의 속도는 4.9 $L\ min^{-1}$ 이다. 이 공기의 이동 속도는 mass flow controller (MQV0020,Yamatake, Japan)를 이용하여 연속적으로 측정되어 자료 집록기에 저장이 되어 플럭스 교정에 사용된다. 공기의 이동 속도가 4.9 $L\ min^{-1}$ 로 유지된다면 레이놀즈 수는 약 2900으로, 튜빙 내의 공기는 난류상태가 된다.

한편, CCT에 설치된 CRDS는 플럭스를 측정하고자 할 경우에는 세 스칼라 중 두 스칼라 밖에 측정할 수 없다. 따라서 기본적으로는 메탄과 수증기 농도를 관측하도록 되어 있지만, 개회로 기체 분석기와의 비교 등 필요에 따라 이산화탄소-수증기 농도 관측도 이루어졌다. 모드 별 운영 기간은 Table 9에 나와 있다.

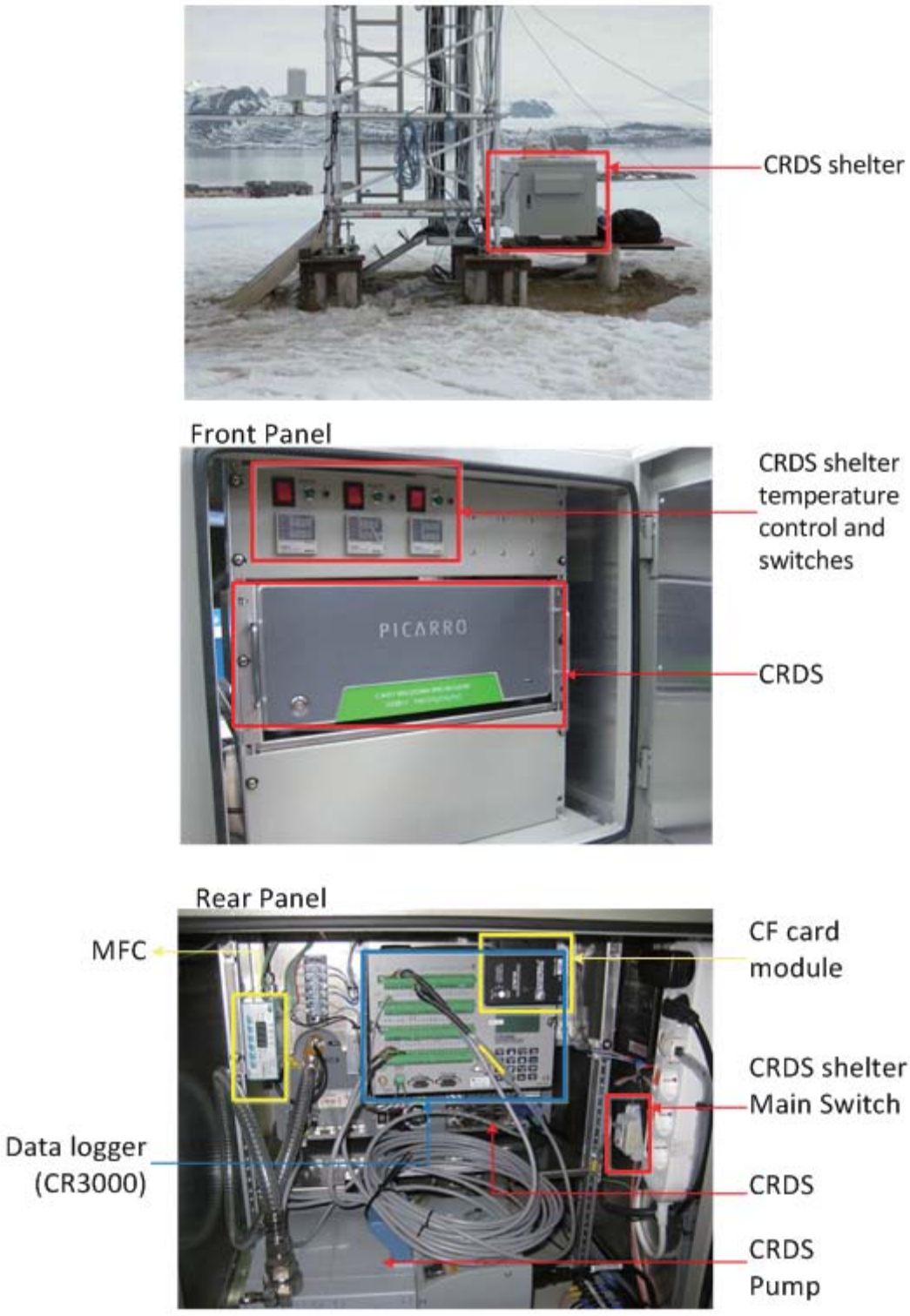


Fig. 120. CRDS measurement system.

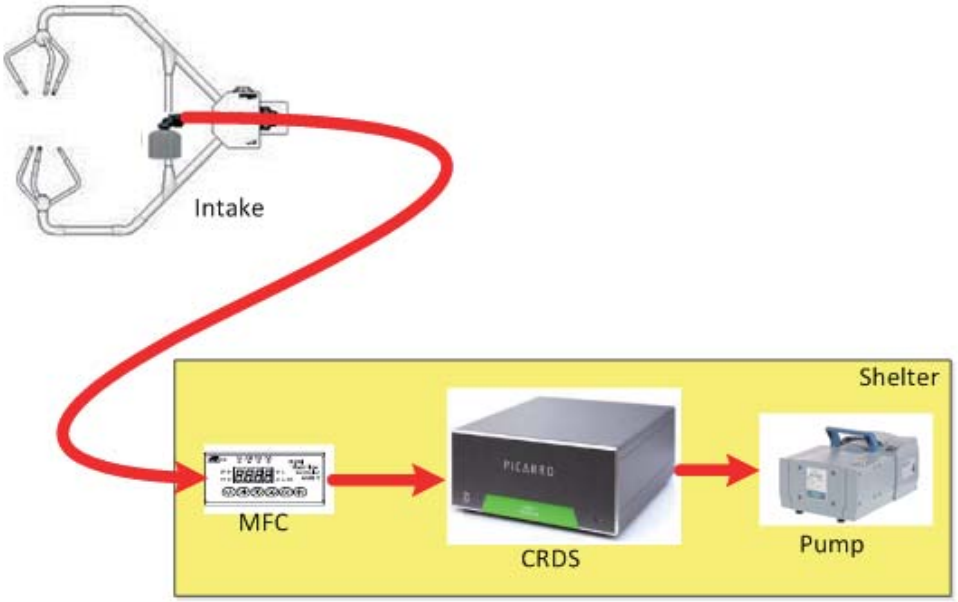


Fig. 121. Tubing connection from measurement point to external pump through MFC and CRDS.

CRDS를 눈과 비로부터 보호하기 위해 쉘터(0.9 × 0.9 × 0.9 m3)를 제작하여 그 내부에 설치하였다(Fig. 122). CRDS가 설치된 쉘터는 CCT 옆에 지면으로부터 약 0.5 m 높이에 위치한다. 이 쉘터 내부의 온도가 내려가면 히터가 가동되어 일정 온도 이상 내려가지 않도록 되어 있어 CRDS는 365일 운영된다. 쉘터는 한국에서 제작되었으며, 북극에 설치하기 이전에 국내의 냉동 창고에서 난방 시스템에 대한 작동을 점검하였으며, 그 결과는 Fig. 123과 같다. 테스트 결과와 같이 2012/13년 겨울에도 CRDS는 잘 작동되었다. 쉘터에는 CRDS 뿐만 아니라 공기의 속도를 측정하는 MFC, CRDS 외장 펌프 그리고 에디 공분산 시스템 자료 집록을 위한 자료 집록기 그리고 자료 집록기로부터 자료 백업을 위한 랩탑 PC도 함께 설치되어 있다. CRDS는 기존의 NDIR 방식의 기체 분석기 보다 훨씬 안정적으로 농도 측정이 가능하며, 교정도 간편하다. 북극 다산기지에는 일반적으로 5월과 9월에 연구원이 방문하게 되며, 이 때 CRDS를 포함한 기체 분석기에 대한 교정을 수행한다 (Fig. 124).

Fig. 122. Test of CRDS shelter in low temperature.

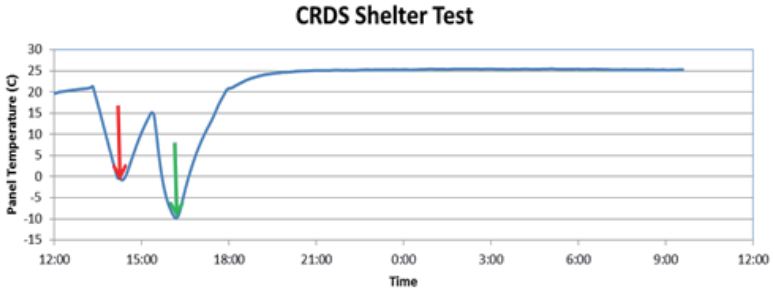


Fig. 123. Temperature response of the shelter 0 (red arrow) and - 10 (green one) DegC.

Fig. 124. CRDS calibration in the field.

CCT에서는 교류전원 이용이 가능하다. Fig. 125는 에디 공분산 시스템의 전원 모식도이다. 220V 교류 전원은 직접 CRDS, CRDS 외장 펌프, 그리고 랩탑 PC에 이용된다. 한편, 교류-직류 전환기를 이용하여 전환된 12V 직류 전원은 에디 공분산 시스템과 자료 집록기에, 24V 직류 전원은 MFC 용으로 이용된다.

KOPRI 극지연구소

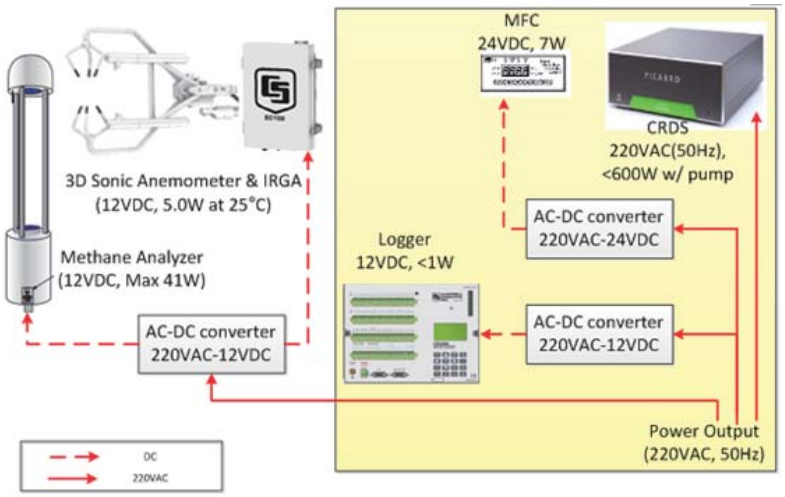


Fig. 125. Schematic diagram of eddy covariance system at CCT in 2012.

2011년부터 2015년까지 다산기지 방문 또는 인터넷을 통해 회수한 10Hz 원시자료와 30분 평균 자료는 부록에 정리되어 있다. 변수가 많고, 양이 많아 이 자료들은 계속 분석 중이며, 이 보고서에서는 그 중 일부 결과만 소개된다.

에디 공분산 자료 처리를 위해 EdiRe (http://www.geos.ed.ac.uk/homes/rclement/micromet/EdiRe/)가 사용되었다. 이 프로그램은 에디 공분산 시스템자료 집록기에 집록되는 자료의 형식을 지원한다. 또한 자료 처리 조건을 사용자가 다양하게 적용할 수 있는 옵션이 있다. 플럭스 산출을 위한 벡터량의 좌표 회전은 이중 회전 방법을 적용하여 30분 동안의 평균 연직 풍속과 측면 풍속이 0 m/s가 되도록 하였다. CRDS로 측정되는 스칼라는 측정 지점과 분석기 간의 거리가 약 20 m 떨어져 있기 때문에 주어진 시각에 집록되는 스칼라는 풍속과 다른 시간의 값이 저장된다. 이 지체 시간은 연직 풍속과 스칼라 간의 교차 상관이 최대가 되는 시간으로 결정되었다. 경우에 따라 허용된 시간 내에 교차 상관이 최대가 되지 않을 경우 튜빙의 길이, 내경, 샘플 공기의 이동 속도를 고려하여 이론적으로 결정된 지체 시간을 사용하기도 하였다.

스칼라의 시간 지체에 의한 효과가 제거되면, 평균, 분산 및 보정 되지 않은 플럭스와 같은 통계량 들이 30분 간격으로 산출된다. 플럭스 보정을 위해 초음파 풍속계와 스칼라 기기 간의 간격, 측기의 주파수 반응이 고려되었다. CRDS와 같은 폐회로 장비의 경우 튜빙 감쇄 보정이, 개회로 장비의 경우 밀도 변동 보정이 적용되었다. 폐회로 장비의 경우 밀도 변동 보정이 적용되지 않았는데 이는 스칼라가 밀도 대신 혼합비로 측정되기 때문이다. Fig. 126는 플럭스를 산출하기까지 필요한 절차를 간략히 표현한 알고리즘이다. 플럭스를 산출하기 위해서는 1) 좌표 변환, 2) 시간 지연(time delay) 계산 및 제거(CRDS), 3) 통계량 산출, 4) 플럭스 계산, 5) 주파수 반응 보정(frequency response correction) 계수 계산 및 적용, 6) 밀도 보정(WPL 보정), 7) 그래프 그리기의 순으로 연산을 수행한다. 기본 알고리즘은 Fig. 126과 같지만, 장비별, 사이트 특성에 맞게 각 단계별로 적용 여부, 적용 방법 등을 선택해야 한다.

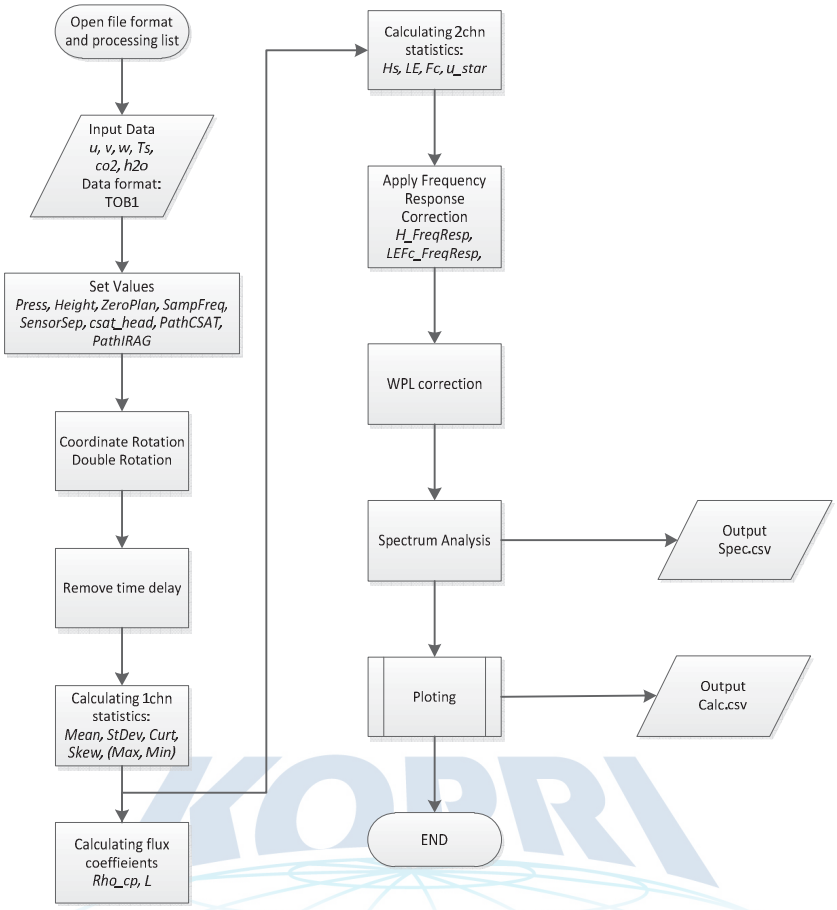


Fig. 126. Flow chart of flux calculation based on EdiRe.

KOPRI 극지연구소

플럭스 관측에 이용되는 기체분석기는 대체로 측정하는 공기 내 기체 분자의 수밀도(number density)를 측정하고, 이 스칼라와 연직 속도와의 공분산으로부터 플럭스가 계산된다. 그런데 그 스칼라를 포함한 공기의 밀도는 온도 및 수분의 양에 따라 달라져 결과적으로 측정하고자 하는 스칼라의 밀도가 달라진다. 이로 인해 인위적인 플럭스가 발생하기 때문에 이에 대한 보정이 필요하다 (Webb *et al.*, 1980). 밀도 변동 보정은 스칼라의 배경 농도에 비해 플럭스의 크기가 작은 이산화탄소 등 온실가스 플럭스 계산에 중요하다. 이 보정은 스칼라 플럭스를 현열 및 잠열 플럭스와 동시에 측정하면 후처리 과정에서 보정이 가능하다. 밀도 보정된 플럭스 F는 보정 전 플럭스 F_0와 가중치 (A,B)가 고려된 잠열플럭스(LE)와 현열플럭스(Hs)와 합으로 간단히 표현할 수 있다.

$$F = F_0 + A \cdot LE + B \cdot Hs$$

다산기지 CCT에서 관측한 2012년 평균값을 이용하여 관측된 현열플럭스와 잠열플럭스가 이산화탄소 플럭스의 밀도 보정에 미치는 영향을 산정하였다(table 10). 계산 결과를 바탕으로 CCT에서 관측된 현열플럭스와 잠열플럭스의 범위를 고려하면 밀도 보정의 효과는 -0.12 ~ 0.25mg/m^2/s의 크기를 가질 것으로 예상된다. CCT에서 관측된 이산화탄소 플럭스 -0.1 ~ 0.1 mg/m^2/s의 크기임을 감안하면 밀도 보정의 효과가 플럭스의 부호를 바꿀 수 있는 매우 큰 수준이다. 특히 현열플럭스와 잠열플럭스가 비슷한 크기라고 할 때, 현열플럭스는 잠열플럭스에 비해 약 3-4배 더 큰 밀도 보정 효과를 가지고 있기 때문에 기체분석기 주변에서 현열플럭스 관측이 중요하다.

Table 10. Effect of density variation on CO2 flux (100kPa for pressure, 280K for temperature, 728mg/m^3 for CO2 density, 6.24g/m^3 for water vapor density, 1232g/m^3 for air density are given. The unit of sensible and latent heat flux are in W/m^2)

Hs \ LE	-100	-50	0	50	100	150	200	250	300
-100	-0.25	-0.23	-0.21	-0.19	-0.17	-0.15	-0.13	-0.12	-0.10
-50	-0.14	-0.12	-0.10	-0.09	-0.07	-0.05	-0.03	-0.01	0.01
0	-0.04	-0.02	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.09	0.11
50	0.07	0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22
100	0.17	0.19	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	0.30	0.32
150	0.28	0.30	0.31	0.33	0.35	0.37	0.39	0.41	0.43
200	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50	0.51	0.53
250	0.49	0.51	0.52	0.54	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64

앞서 언급된 밀도 변동은 자연적인 수증기와 온도 변화에 기인하는 반면, 스칼라를 측정하는 스칼라 측기가 발생하는 열에 의해서도 밀도는 변할 수 있다. 일반적으로 이 효과는 플럭스가 매우 작은 극지방에서 중요한 것으로 알려져 있다 (Grelle and Burba, 2007). 이에 개회로 기체분석기(LI7500) 주변에 백금선을 이용한 추가 온도 센서를 장착하여 플럭스 관측에 대한 장비의 가열 효과를 관측하였다. 한편 LI7500 가스 분석기를 이용한 대부분의 플럭스 관측지에서 장비의 가열 효과에 대한 고려를 해오고 있지 않기 때문에 Burba *et al.* (2006)은 기존의 관측자료와 관측지의 일사량을 이용한 경험식을 제안하였다.

CCT에서 측정된 이산화탄소 플럭스 보정을 위해 CCT에서 측정된 일사 자료를 이용한 경험식을 적용하는 한편, 센서 주변 온도를 백금선을 이용하여 직접 측정한 자료를 이용한 두 가지 보정을 적용하였다. 우선, 삼차원 초음파 풍속계로부터 측정된 현열플럭스(H)와 백금선 온도계로 측정된 현열 플럭스(Hpt)를 비교하였다 (Fig. 127). Hpt가

H보다 약 16%정도 작았다. 반면 경험식을 이용하여 계산한 가열 효과(Hem)는 Hs에 비해 약 8% 크게 나와 기대와는 다른 결과를 얻었다. Grell and Burba (2006)은 현열 플럭스의 크기가 -100 ~ - 500 W/m^{2}일 때 백금온도계로 측정한 현열 플럭스가 초음파 풍계로부터 측정한 현열 플럭스보다 약 12% 큼을 보였다. 또한 백금온도계로 측정한 기온 역시 초음파 풍속계 기온(2 ~ 18℃) 보다 약 2℃ 큼을 보였다. 따라서 CCT에서 백금온도계를 이용한 현 분석에서 장비 가열로 인한 현열플럭스가 어떠한 변동을 보이는가에 대한 결론을 내리기는 이르다. 추운 환경에서 기체분석기가 작동하면 모터 등의 작동으로 인한 발열이 있어 가열 효과가 커질 것으로 예상된다. 자료 분석에 사용한 기간인 2012년 7월 21일 - 28일의 기온은 4- 9℃ 사이이다. 그러나 백금선 온도계나 미세열전대를 이용하여 기체분석기 주변에서 온도 변동을 관측하는 방법이 쉽지 않고, 경험식 역시 기체분석기가 직립한 상태에서 제안된 방법이기 때문에, 현장에 설치된 장비의 방향에 따라 오차는 커질 수 있다. 또한 LI7500 센서와 자료 집록기간의 거리가 20 m 이상인데 센서 주변 기온 측정에는 빠르게 반응하는 백금선이 사용되었지만 약 20 m 거리는 일반 신호 케이블이 사용되어 기온 변화에 빠른 반응을 나타나는 지는 불확실하다. 따라서 장비 가열 효과를 고려한 현열플럭스의 효과를 정확하게 정량화하기 좀 더 세밀한 실험 설계를 통한 다양한 기상 조건에서 중복된 관측을 통해 이산화탄소 플럭스에 미치는 영향을 평가해야 할 것으로 보인다.

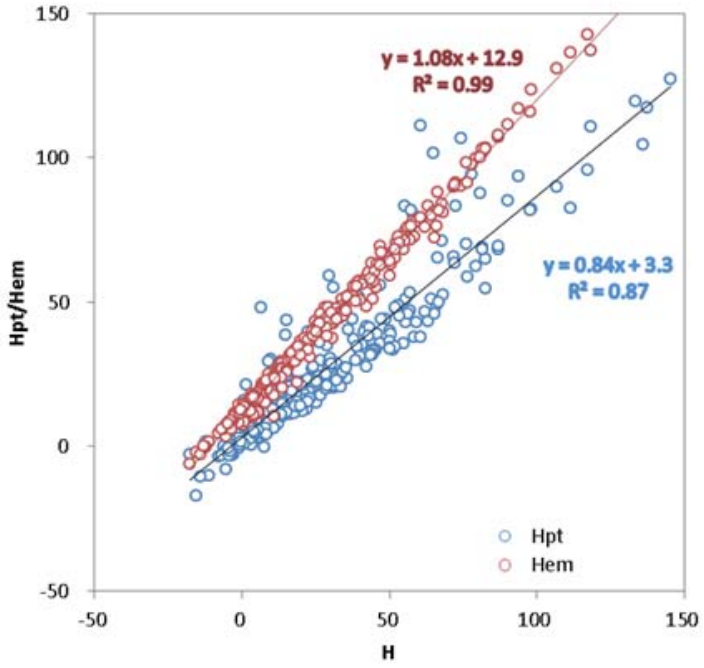


Fig. 127. Comparison of sensible heat flux using sonic temperature (H), platinum resistance wire (Hpt) and temperature using empirical equation(Hem).

백금선 온도계에서 산출한 현열플럭스를 밀도 보정에 적용하여 산출한 잠열플럭스(LEtp)를 Fig. 128에 표시하였다. 잠열플럭스의 경우, 장비의 가열 효과를 고려한 잠열플럭스(LEtp)와 전형적인 밀도변동 보정만 고려한 잠열플럭스(LE) 사이는 무시할 만하였다. 이는 경험식을 이용하여 가열 효과를 고려한 잠열플럭스(LEem)도 같은 결과를 보였다.

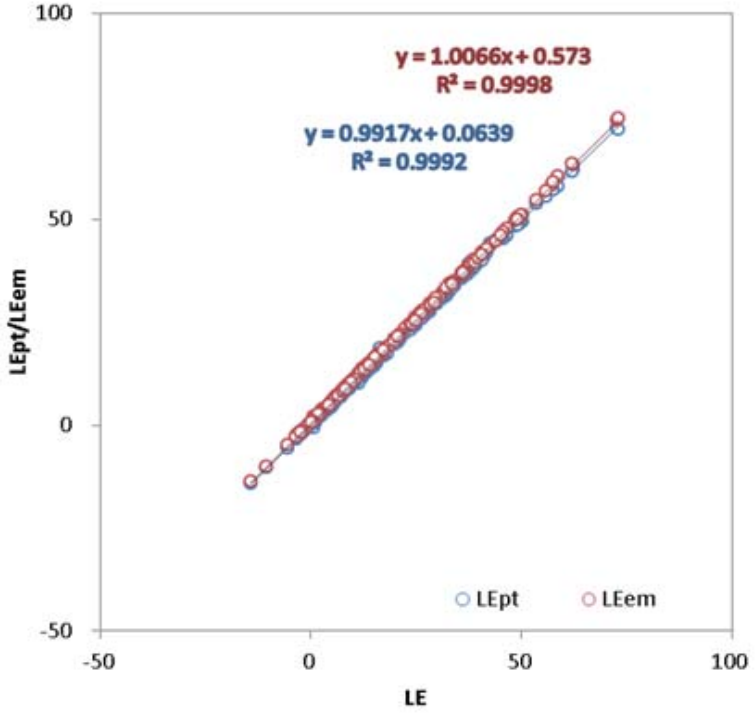


Fig. 128. Comparison of latent heat flux using sonic temperature(LE), platinum resistance wire (LEpt) and temperature using empirical equation(LEem).

이산화탄소 플럭스도 잠열플럭스와 마찬가지 방법으로 백금선 온도계와 경험식을 이용하여 장비 가열 효과를 고려한 플럭스를 산출하였다(Fig. 129). 백금선온도계를 이용하여 가열 효과를 고려한 이산화탄소 플럭스(Fcpt)는 고려하지 않은 이산화탄소 플럭스(Fc)에 비해 약 4%가량 크게 계산된 반면, 경험식을 이용하여 고려한 이산화탄소 플럭스(Fcem)은 2% 작게 계산되었다. 두 방법의 경향이 서로 다른 것은 백금선과 경험식의 현열플럭스의 경향이 다름을 반영한 것이다.

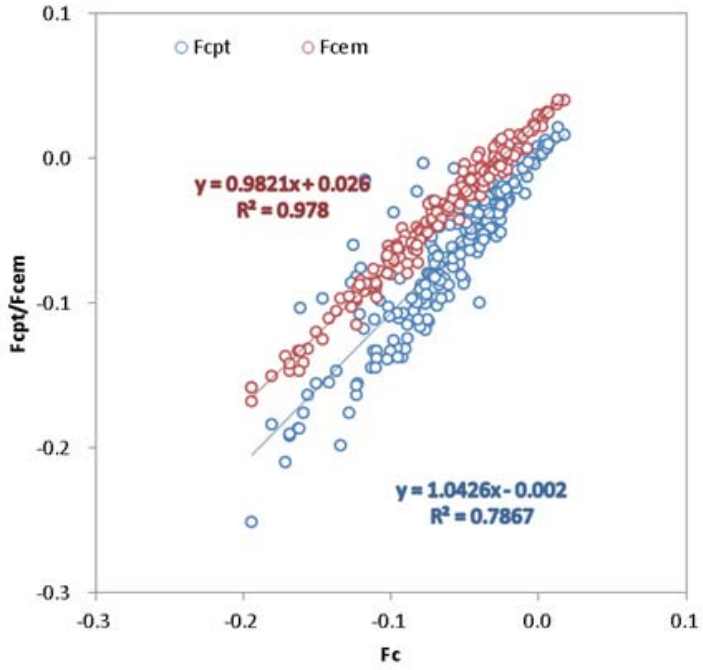


Fig. 129. Same as in Fig. 128 except for carbon dioxide flux.

2012년 7월 21일부터 27일까지 관측한 연직풍속, 기온(CSAT3, 백금선), 이산화탄소 및 수증기 농도(LI7500, CRDS), 메탄농도(LI7700)에 대하여 스펙트럼 분석을 수행하였다 (Fig. 130). 관측된 시계열을 분석한 후 상호 비교를 위하여 주파수(f), 분산(σ^2)을 이용하여 정규화(normalization)을 실시하였으며, 주파수는 관측높이(z), 평균 풍속(u)을 이용하여 정규화하였다. 정규화시킨 자료는 대기안정도(z/L)별로 분류하여 조화평균을 산출하였다. 불안정 조건에서 관성아 영역에서의 기온(Ts), 연직 풍속(w), 개회로 기체분석기의 이산화탄소 및 수증기(CO2, H2O)의 경우 기존의 문헌에서 알려진 바와 같이 -2/3 파워가 뚜렷이 나타난 것을 확인할 수 있었다. 백금선(Tp)의 스펙트럼은 고주파수 영역에서 파워가 커지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 실제 기온 관측보다 관측방법의 노이즈(기계적 혹은 전기적)가 클 수 있음을 시사한다. 반면 CRDS의 관측요소(CO2:CRDS, H2O:CRDS)는 다른 스칼라의 스펙트럼과 다른 양상을 보였다. 이는 관측 장비의 반응속도가 관측 주기보다 느린 경우나, 샘플된 공기가 긴 튜브를 통과하면서 농도의 변동이 감쇄되어 나타날 수 있는 경우 등을 의심해 볼 수 있다. 최근 CRDS와 집록기간의 통신 문제로 인한 집록 실패의 경우가 많아 원자료에 결측이 반영되는 현상이 자주 발견되어 이로 인한 문제일 수도 있다. 안정도가 높아지면서 피크가 전체적으로 저주파수 쪽으로 이동하는 경향이 보이나, 전체적인 패턴은 불안정한 경우와 비슷하였다.

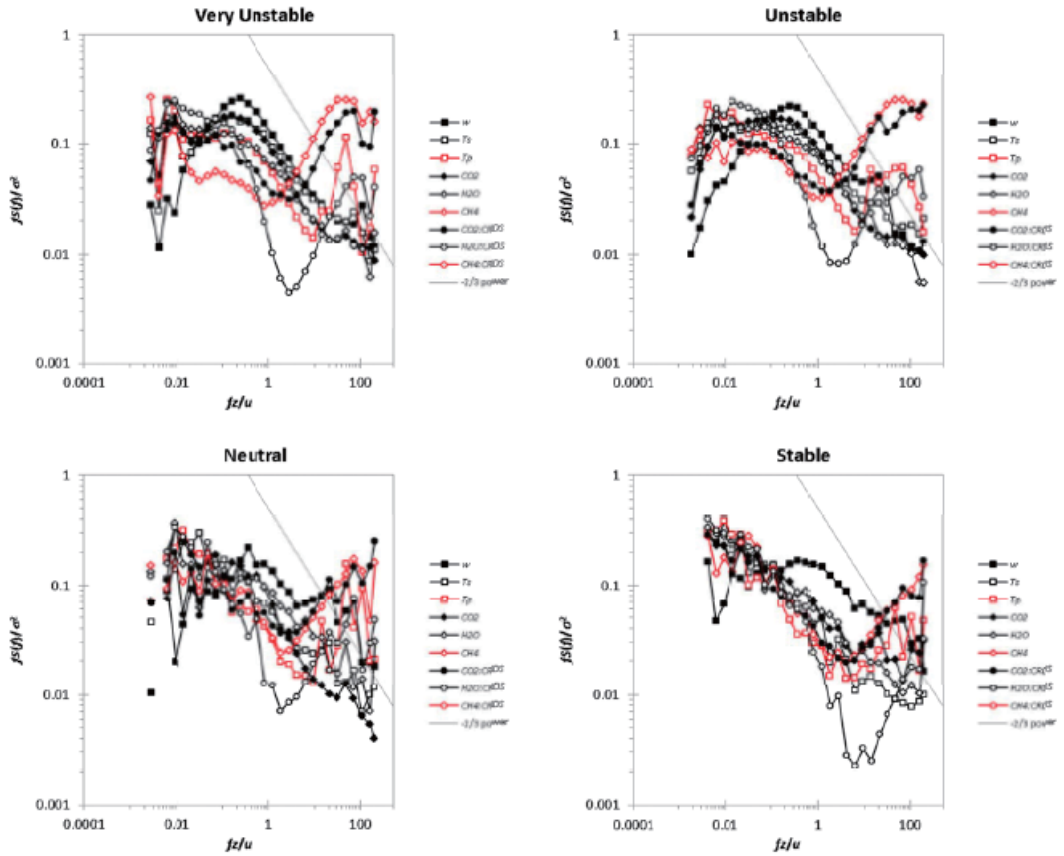


Fig. 130. Spectral analysis for variances of eddy covariance data (ver unstable: $z/L < -2$, stable: $-2 \leq z/L < -0.1$, neutral: $-0.1 \leq z/L < 0.1$, stable: $z/L \geq 0.1$).

스펙트럼의 분석기간(2012년 7월 21~27일)에 대하여 연직속도와의 공분산에 대한 코스펙트럼 분석을 실시하였다(Fig. 131). 관측된 시계열을 분석한 후 상호 비교를 위하여 주파수(f), 공분산(wx)을 이용하여 정규화(normalization)을 실시하였으며, 주파수는 관측높이(z), 평균 풍속(u)을 이용하여 정규화하였다. 정규화시킨 자료는 대기안정도(z/L) 별로 분류하여 조화평균을 산출하였다. 관성아 영역에서 기온(Ts), LI7500의 이산화탄소, 수증기 농도(CO2, H2O)과 연직 풍속의 공분산은 -3/4 파워 법칙을 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 폐회로기체분석기인 CRDS의 경우 튜브를 통과하여 농도의 변동이 감쇄하여 발생하는 고주파수 영역의 신호 감쇄 현상은 확인이 어렵고, 상사이론에 따라 다른 스칼라의 공분산의 경우처럼 -3/4 파워를 만족하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 CRDS의 스펙트럼이 $fz/u = 1$근방에서 파워가 떨어지는 것과 관련이 있는 것으로 추정된다. 불안정 조건과 달리 중립, 안정 조건에서의 코스펙트럼은 관성아구간의

-3/4파워가 잘 보이지 않으며, 이론적인 곡선과 차이를 보였다. 다양한 조건에서의 관측된 플럭스 자료 분석을 통해, 주파수 보정, 밀도 보정 등이 플럭스 산출에 미치는 영향을 등을 분석 중에 있으며, 이를 통대로 서로 다른 기체 분석기를 이용한 플럭스 관측 자료간 상호 검증을 실시할 예정이다.

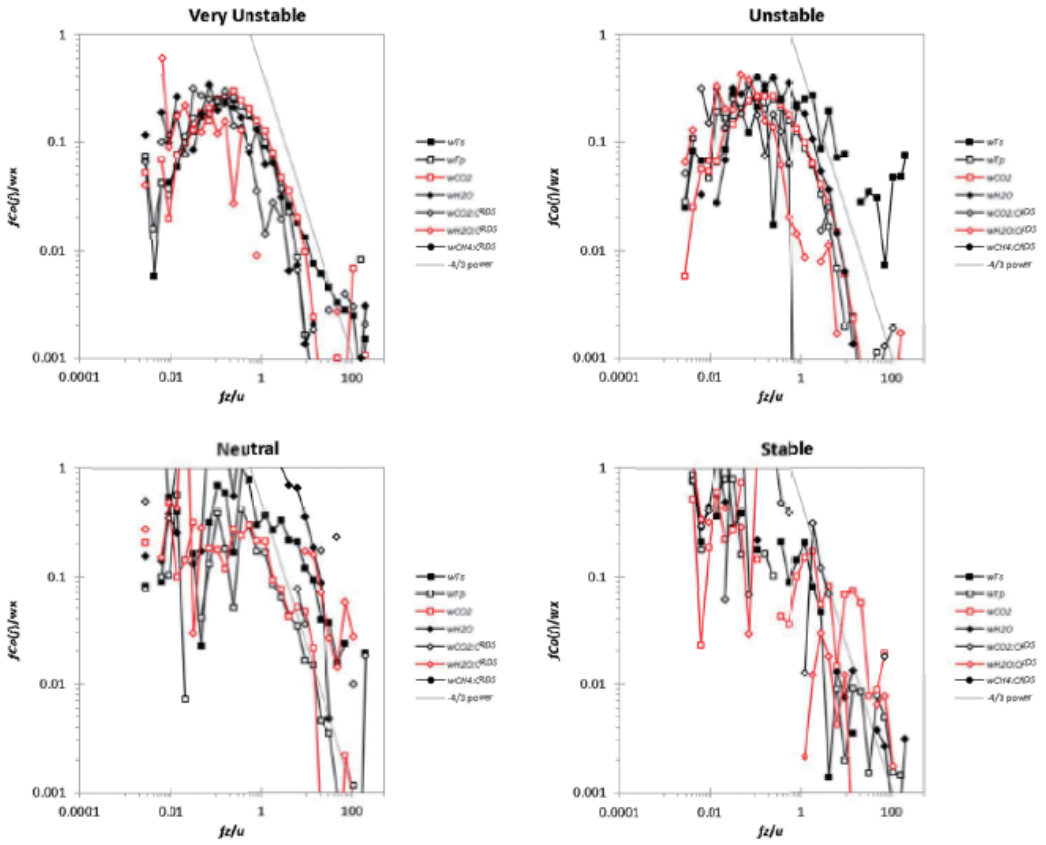


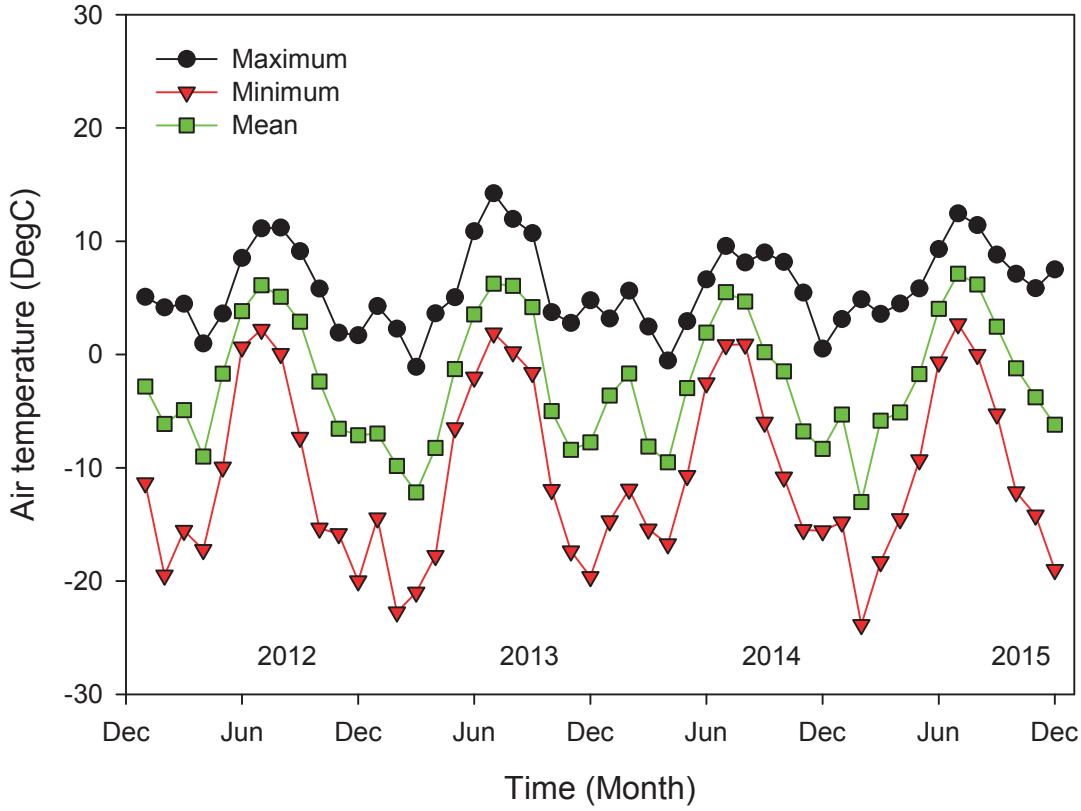
Fig. 131. Same as in Fig. 130 except for covariances.

(3) 결과

(가) 기상

Fig. 132는 분석 기간 동안 10 m 높이에서 측정된 월 최고, 평균 및 최저 기온의 변동이다. 월 평균 기온은 7 또는 8월이 연중 가장 높았으며, 최고 기온은 14 ℃ 이상이었다. 반면에 연 최저 기온은 2월에 나타나지만 2014년에는 1월에 나타났다. 이 현상은 2013년 가을에서 겨울에 이르는 동안 지속적으로 기온이 하강한 결과이다. 분석 기간

기록된 최저 기온은 약 -24 ℃이었다. 한편, 월 최고 기온은 1년에 1-2달을 제외하면 연중 영상이었다.



극지연구소

Fig. 132. The variability in monthly maximum, mean and minimum air temperature from January, 2012 to December, 2015.

Fig. 133은 같은 기간 두 구간 즉, 남풍 계열(남서 및 남동 구간)과 동풍 구간에 대한 월 평균 풍속의 변동이다. 우선, 동풍이 남서 및 남동풍보다 강하였으며, 그 크기의 차이는 동계 기간에 뚜렷이 나타난다. 반면에 하계기간에는 남동 및 남서풍이 동풍보다 강하거나 비슷하였다. 전반적으로 풍향에 무관하게 동계 기간 강한 바람이, 하계 기간에 약한 바람이 부는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

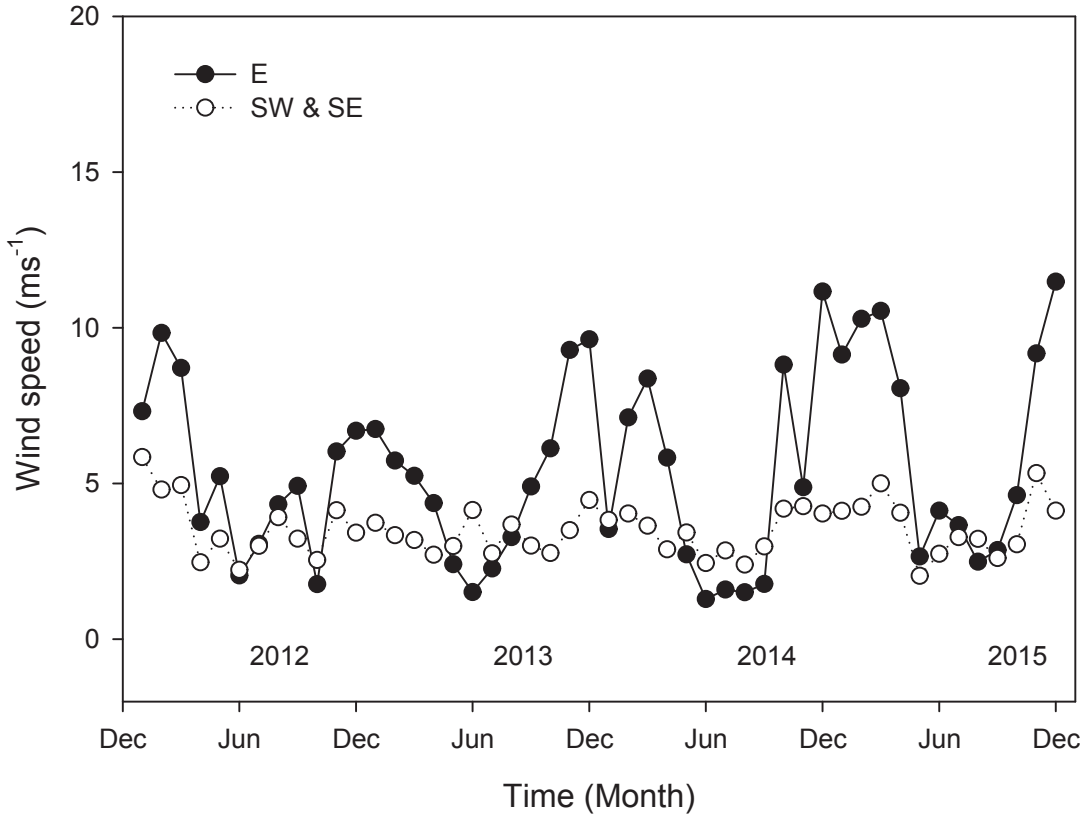


Fig. 133. The variability in monthly maximum and average wind speed for NW-SW and E from January, 2012 to December, 2015.

Fig. 134는 월 평균 하향 및 상향단파 복사 값으로부터 계산된 알베도의 변동이다. 지표면에 눈이 없는 하계 기간 알베도는 약 0.14까지 내려간다. 지표면에 눈이 내리거나 눈이 쌓여 있는 기간 알베도는 0.8을 중심으로 변동한다. 분석 기간 동안 알베도의 연변동은 서로 비슷하나 2014년 6월의 알베도는 약 0.7보다 크며, 이는 다른 해의 알베도보다 매우 높았다. 그 이유는 다른 해와는 달리 5월(~ -3 ℃)과 6월(~ 2 ℃) 기온이 상대적으로 느리게 상승하여 낮아 지면에 쌓였던 눈이 덜 녹았기 때문이다. Fig. 135는 월 평균 순단파복사(Rns), 순장파복사(Rnl) 그리고 순복사(Rn)의 변동이다. 순단파복사의 경우 3월에서 9월에 양의 값을 가지며 6월과 7월이 비슷한 크기로 연중 가장 크나 2015년의 경우 7월이 상대적으로 6월의 값보다 컸다. 반면에 순장파복사의 경우 연중 음의 값을 가지며 지면 가열이 많은 하계기간 음의 절대값이 크나 흐린 날이 많은 2013년과 2014년 하계 기간에는 그 값이 동계 기간의 값과 다르지 않았다. 순복사의 부호는 순복사의 부호 변동은 3월에서 4월, 8월에서 9월에 일어난다. 순복사의 부호가 양

이면, 지면은 복사에 의해 가열됨을, 음이면 지면이 냉각됨을 가리킨다. 순단파복사가 작은 동계 기간에는 순장파복사는 구름의 유무에 의해 영향을 받아 변동하며, 결과적으로 순복사에 직접 영향을 미친다. 연 평균 순복사는 약 0 Wm^{-2}이며, 이 지역은 복사 수지 결과 지표면은 복사 평형 상태에 있다.

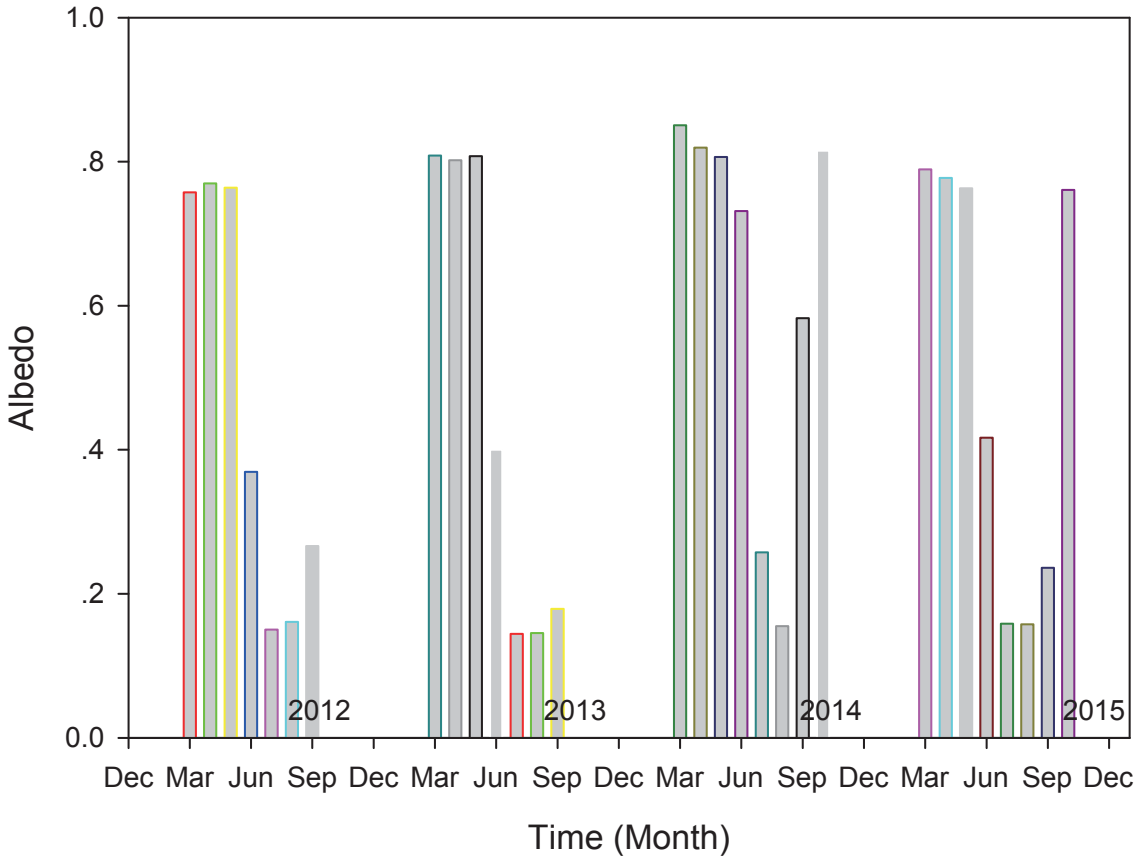


Fig. 134. The variability in monthly averaged albedo from 2012 to 2015.

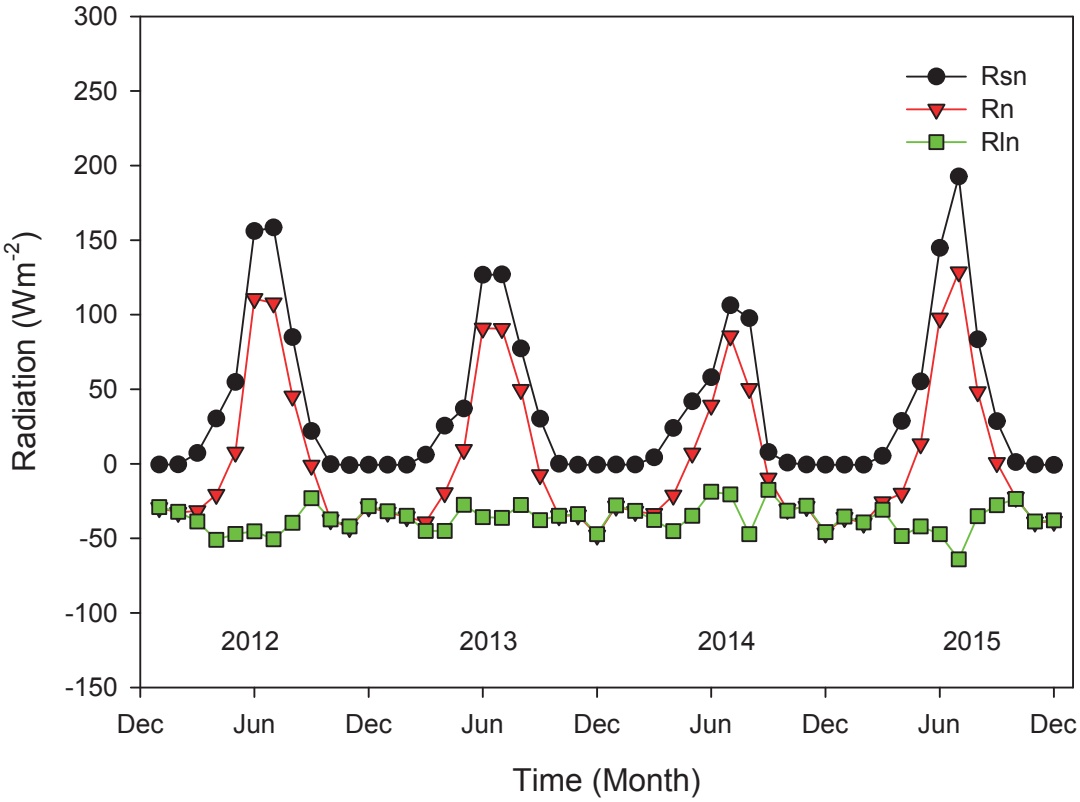


Fig. 135. The variability in monthly averaged net shortwave, net longwave and net radiation from January, 2012 to December, 2015.

극지연구소

(나) 스칼라 농도 변동

Fig. 136은 CCT에서 남쪽으로 약 500 m 떨어져 있고, 해발 고도가 약 475 m인 Zepplin 지구대기감시(Global Atmosphere Watch) 지구급 관측소에서 측정된 시간 평균 이산화탄소 농도와 시간 변화율이다. 2012년은 CCT에서 본격적인 에너지 및 온실기체 플럭스 관측이 시작된 해이다. 2012년 측정된 이산화탄소 농도는 8월에 최저값 381.2 ppmv이 나타나고, 2월경 최고값 407.4 ppmv로 그 차이는 약 26.2 ppmv이었다. 하계 기간 북방 식생에 의한 대기 중 이산화탄소의 제거가 뚜렷하게 나타난다. 한편, 시간당 농도 변화는 간헐적으로 큰 값이 나타났지만 대체로 ± 0.5 ppmv 내에서 변동 하였다.

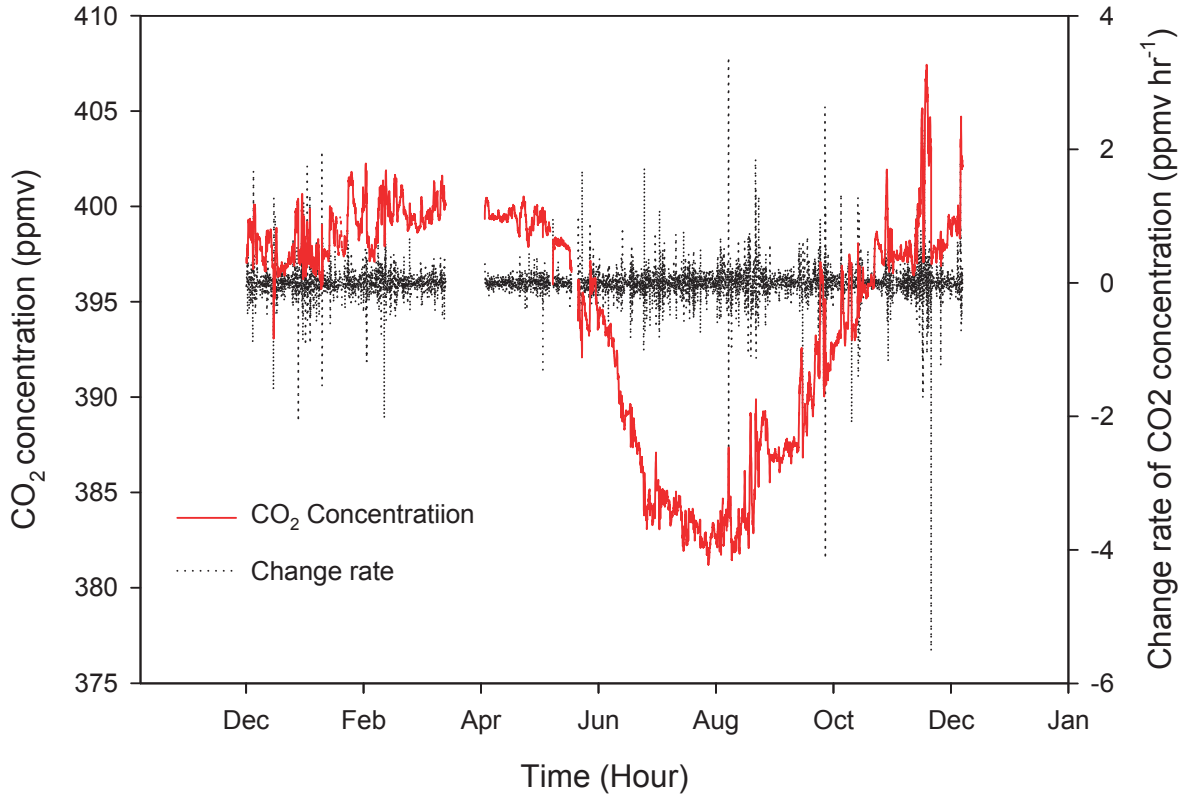


Fig. 136. Time series of CO2 concentration and its change rate per hour at Zeppelin station in 2012 (Data was obtained from World Data Center for Greenhouse Gas).

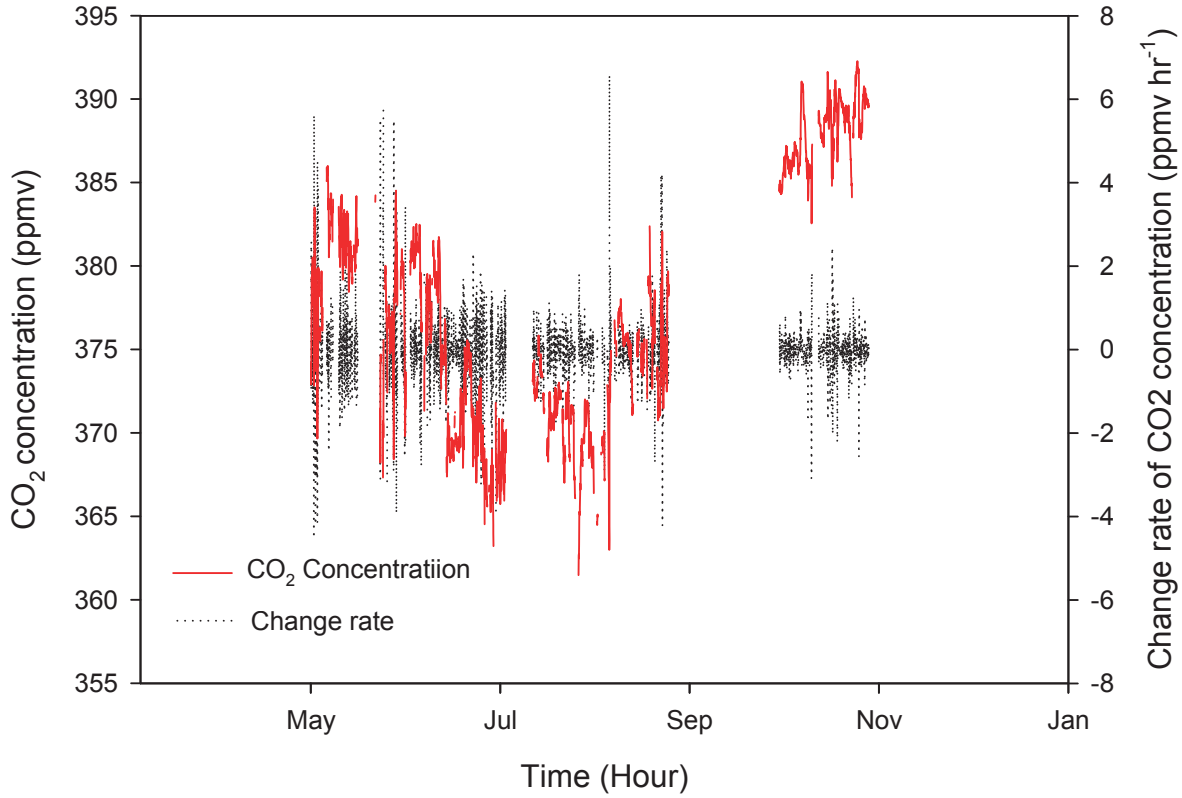


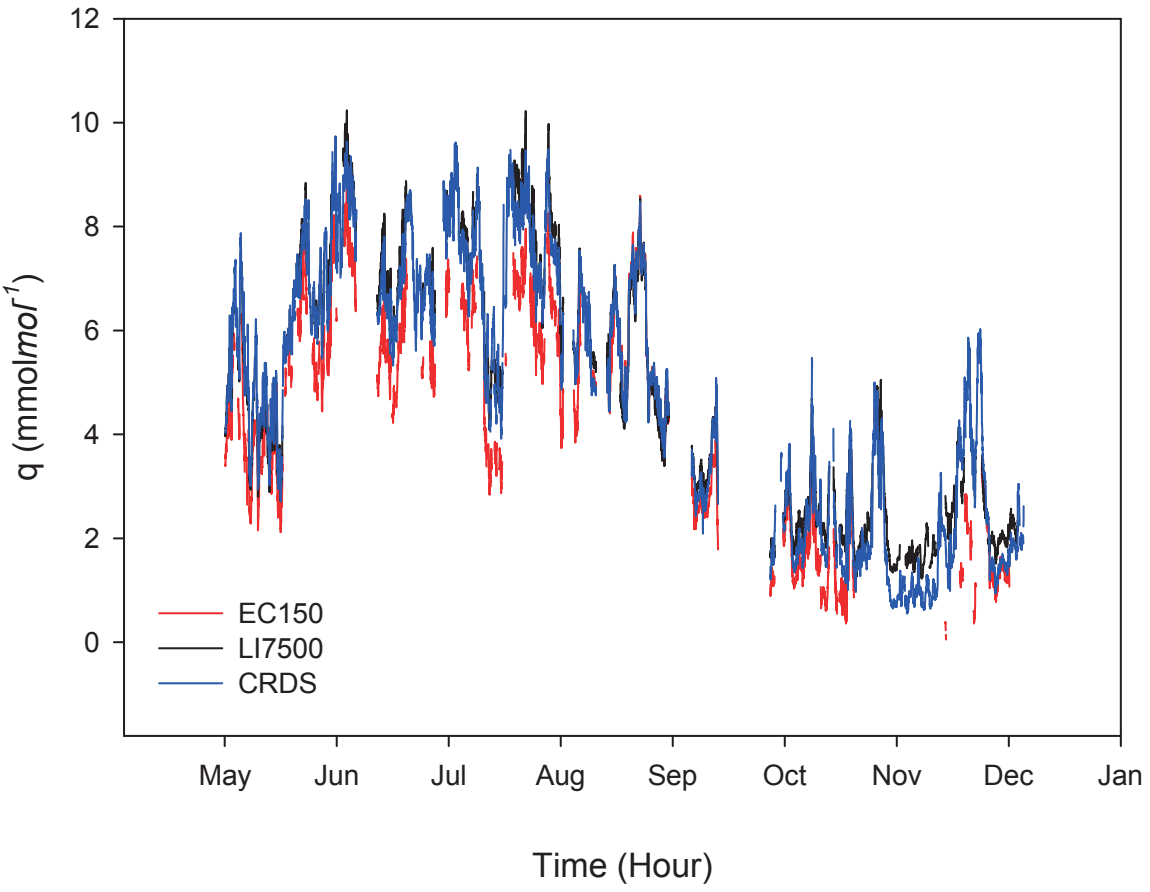
Fig. 137. Same as in Fig. 137 except for CCT with a different gas analyzer.

극지연구소

Fig. 137은 CCT에서 개회로 기체 분석기(LI7500, Licor)로 측정된 시간 평균된 이산화탄소 농도 및 시간 변화율이다. 농도의 변동은 Zepplin 관측소에서의 변동과 유사하나 전반적으로 큰 폭으로 변동하는 모습을 보인다. 농도가 다른 이유는 CCT 이산화탄소 측기의 교정이 Zepplin GAW 관측소 교정 만큼 엄격하지 않기 때문에 교정에 의한 차이와 함께 지면 가까이에 위치한 개회로 기체 분석기가 상대적으로 동토와 대기간 교환되는 이산화탄소에 의한 영향을 상대적으로 많이 받기 때문이다. 결과적으로 시간당 변화율도 CCT에서 측정된 값이 크게 나타났다. 추가적으로 개회로 기체 분석기는 강수에 민감한데 강수에 의해 오염된 농도 값이 제대로 제거되지 않았을 수도 있다.

Fig. 138은 두 종류의 개회로 기체 분석기와 CRDS로부터 측정된 시간 평균된 수증기의 농도이다. 세 측기로부터 측정된 수증기 농도는 그 변동이 서로 잘 일치한다. 상대적으로 LI7500으로 측정된 수증기 농도가 CRDS로부터 측정된 수증기 농도와 잘 일치한다. 강수에 상대적으로 덜 민감한 CRDS로부터 측정된 자료가 많으며, 주목할 것은 겨울철 EC150으로부터 측정된 수증기 농도 자료가 품질 평가로부터 상대적으로 많이

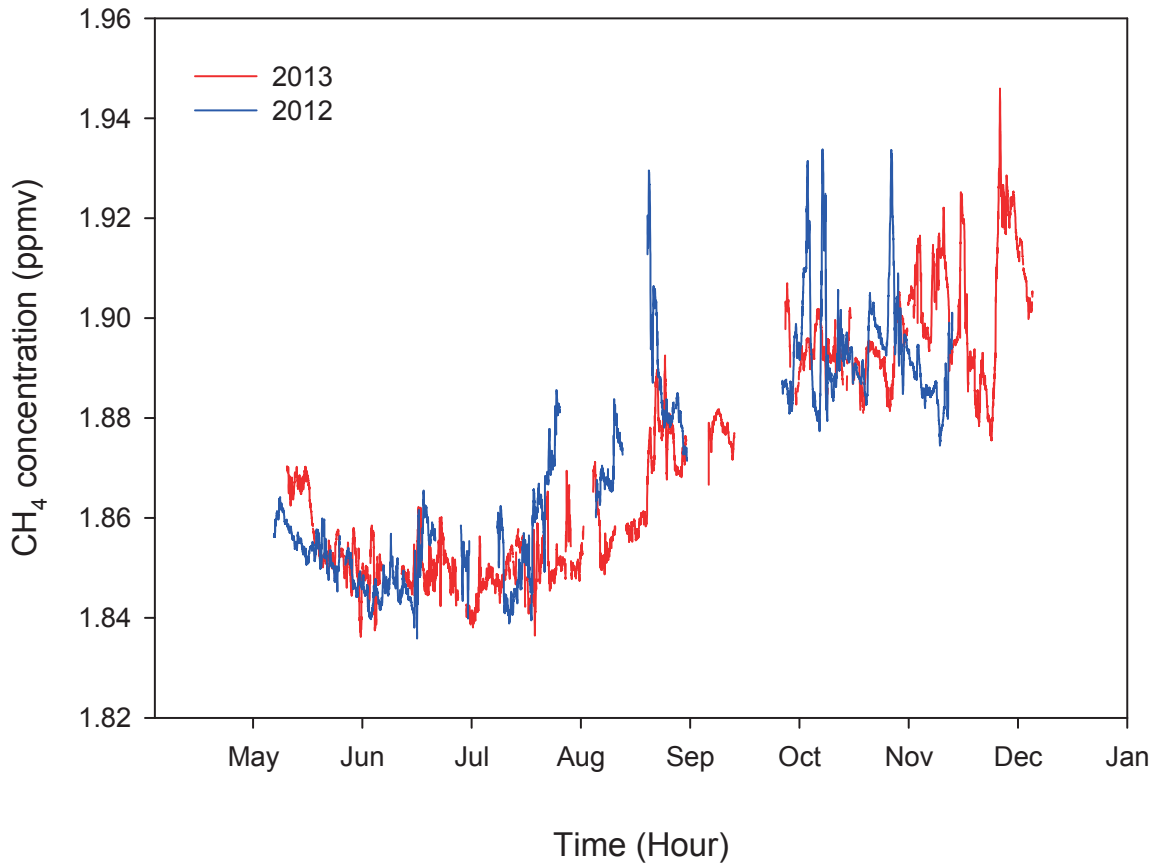
제거었다는 것이다 (Table 11). 이는 겨울철처럼 수증기 농도가 낮은 환경에서 측정 경로 간격이 짧은 EC150를 사용할 경우 교정이 주의 깊게 진행되어야 할 것으로 보인다. 또는 측기의 구조 상 내린 눈이 측정 경로에 오래 머물렀을 수도 있다. 반면에 하계 기간의 경우 경로 길이가 상대적으로 긴 LI7500의 자료가 EC150 자료에 비해 상대적으로 많이 제거되었다. 이 결과는 두 측기의 성능이 같다는 가정 하에 운영될 환경 조건에 따라 측기가 선택되어야 보다 많은 자료를 확보할 수 있음을 가리킨다.



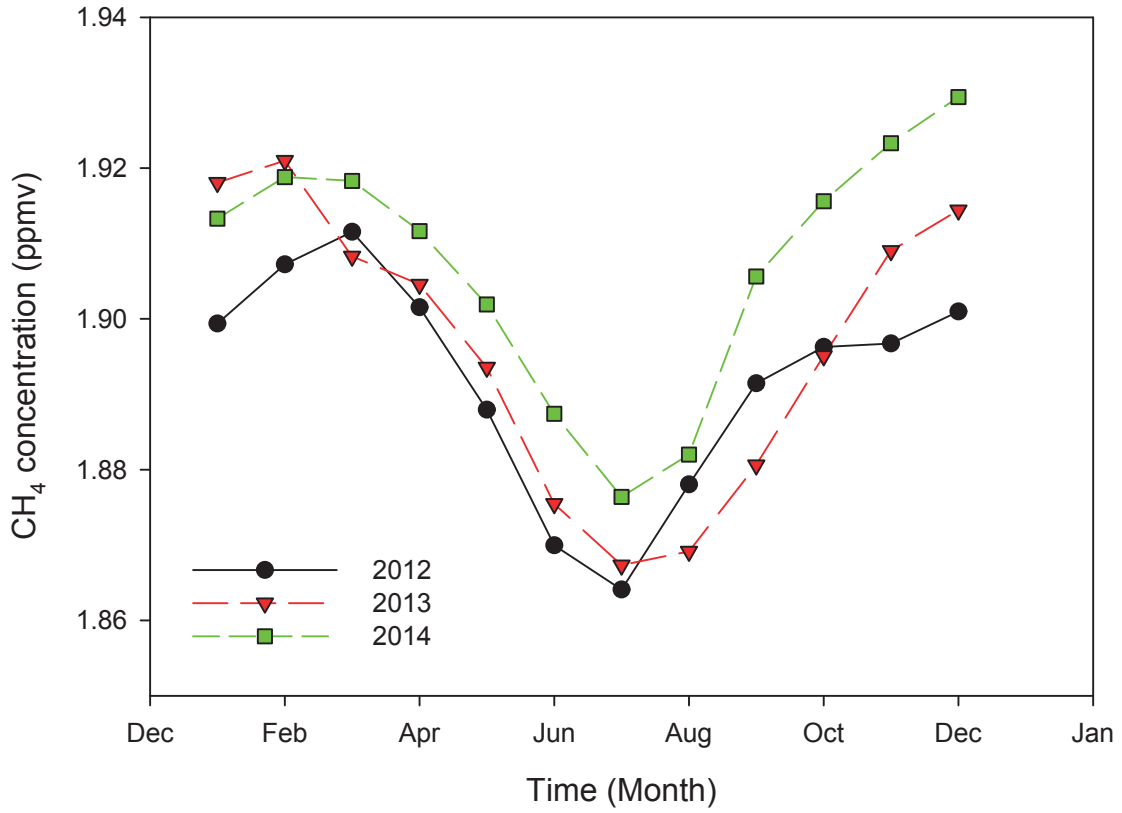
Fig, 138. Time series of water vapor concentration(q) from EC150 (red), LI7500 (black) and CRDS (blue) from late May to December in 2013.

Table 11. Data number available for further analysis from June to December in 2013

Month	q_CRDS	q_EC150	q_LI7500
6	1374	896	910
7	1087	596	597
8	1336	771	720
9	1064	882	811
10	578	552	547
11	1328	635	1204
12	1470	462	997
Total Number	8237	4794	5786



Fig, 139. Time series of hourly averaged methane concentration from early June to December in 2012 and 2013.



Fig, 140. Time series of hourly averaged methane concentration from early June to December in 2012 and 2013.

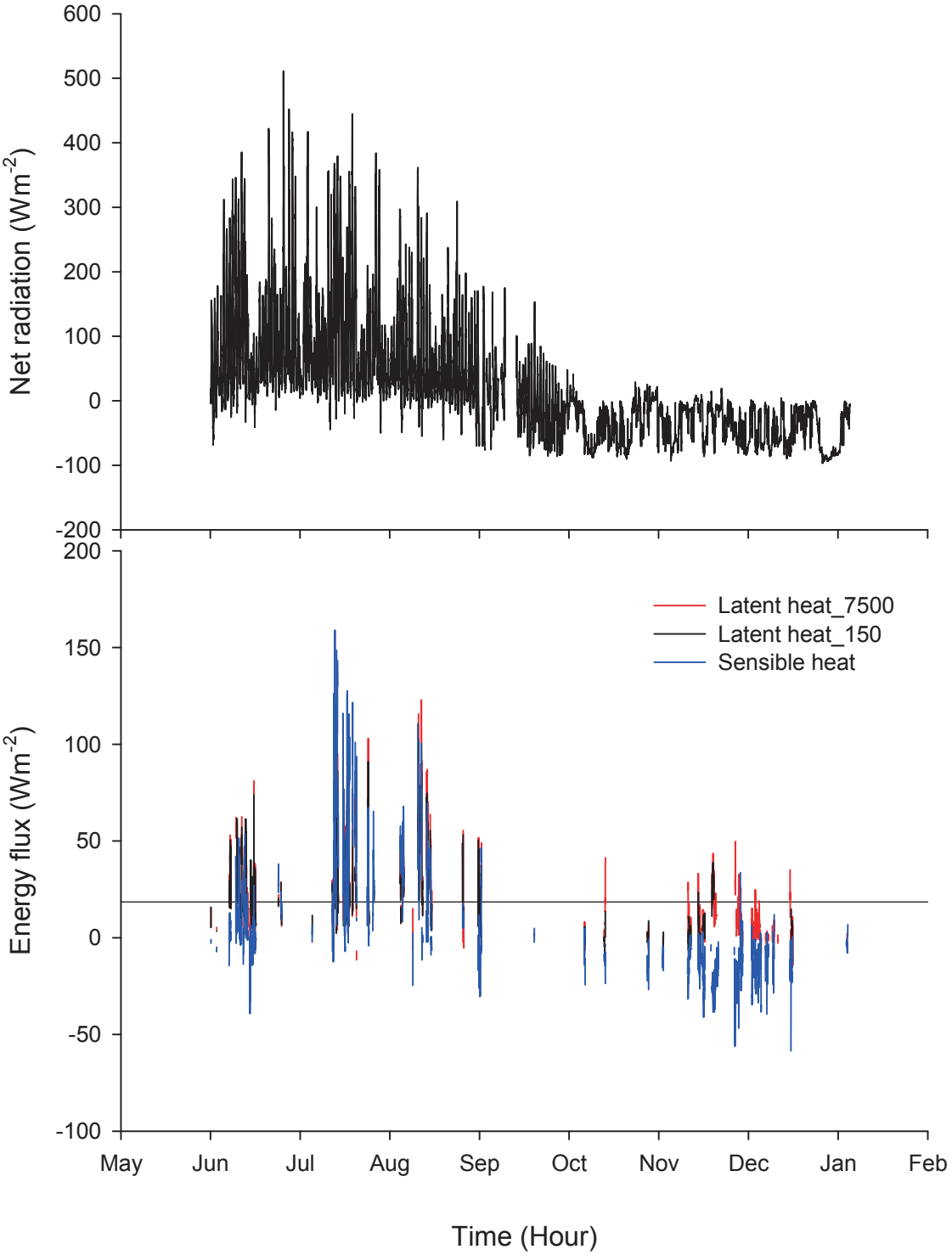
극지연구소

Fig. 139는 CCT에서 2012년과 2013년 CRDS로 측정된 메탄의 농도 변동이다. 두 해의 변동 패턴은 서로 유사하다. 즉 하계 기간인 7월에 농도가 가장 낮으며, 8월부터 농도가 증가하기 시작한다. 두 해의 6~7월 농도는 서로 비슷한 반면에 8월 중순 이후는 2012년에 빠르게 농도가 상승하다가 10월부터는 일정하게 농도가 유지되었다. 반면에 상대적으로 느린 증가 속도를 보인 2013년의 경우는 12월까지 그 농도가 증가하여 2013년 농도보다 높았다. 지면 근처에서 측정된 메탄의 농도 변화 경향이 Zeppelin 관측소에서 측정된 메탄 농도 변화와 어떻게 다른 가를 살펴보기 위해 Zeppelin에서 측정된 메탄 농도 자료를 분석하였다. Zeppelin에서 측정된 농도 역시 2012년과 2013년의 농도 변동이 CCT 타워에서 밝혀진 경향과 잘 일치한다. 2012년의 경우 하계 기간 앞선 두 해의 농도보다 확실히 높아 경년 변화가 시기에 따른 다르게 나타날 수 있음을 보여준다.

(다) 에너지 플럭스

2013년에는 두 종류의 개회로 기체분석기가 동시에 운영되어 이 해의 에너지 플럭스를 서로 비교하였다. 풍향 및 풍속 조건, 측정된 수증기 농도 및 연직 속도에 대한 품질 평가 기준에 의하면 상대적으로 많은 자료의 유실이 있었다. 이는 이 관측지가 강수량은 적지만 적은 양의 강수가 자주 내려 개회로 기체 분석기를 이용한 관측 환경에는 좋지 못하다. 그럼에도 불구하고 두 종류의 개회로 기체 분석기로부터 도출된 잠열 플럭스는 하계기간을 거쳐 동계 기간에 이르기 까지 크기 변동을 잘 보여 준다. 현열 플럭스의 경우 하계 기간 잠열 플럭스 보다 상대적으로 크며, 9월부터 12월까지는 지속적으로 음의 값을 유지한다. 순복사는 특히, 하계 기간 난류 에너지 플럭스 보다 매우 큰데 지중으로의 열 전달 그리고 저류항 등이 필수적으로 고려되어야 지면 과정 및 그에 따른 경계층 과정에 대한 올바른 이해가 가능하다. 또한 안정 경계층이 많은 시간을 차지하는 관측지 환경에서 난류 특성에 대한 보다 명확한 이해가 있어야 할 동토-대기 간의 에너지 및 온실기체 교환량을 보다 정확하게 정량화 할 수 있다. 이에 대한 분석이 현재 진행 중에 있다.

본 거점 관측지는 고위도 북극에 위치하며, 식생이 잘 발달한 지역이 아니며 흐린 날들이 많아 대기-동토간 교환되는 에너지와 물질이 적다. 따라서 그로인한 측정이 상대적으로 매우 어렵다. 개회로 기체 분석기보다는 폐회로 기체 분석기가 상대적으로 유리한 점이 많은 관측지이다. 하지만 폐회로 기체 분석기인 CRDS의 경우 1차년도를 제외하면 통신 문제 등으로 인해 애초 기대했던 것 보다 자료의 연속성 그리고 동시화 측면에서 많은 문제점이 나타났다. 또한 CRDS 자체에 자료가 집록되었지만 에디 공분산 시스템의 자료 집록기에는 집록되지 않는 일도 많아 자료 처리에 상당한 어려움을 겪고 있다. 이런 점들이 향후 유사한 환경에서의 관측 기반 연구를 수행할 때 잘 고려되어야 할 것이다.



Fig, 141. Time series of hourly averaged net radiation (top) and energy fluxes (bottom) from June to December in 2013.

4. 그린란드 노르드 (제4관측 거점)

가. 관측지 개요

제4거점 그린란드 노르드(Nord) 관측지(81 ° 36’ N, 16 ° 40W)는 그린란드의 북동쪽 연안에 위치하고 있다 (Fig. 143). 캐나다의 Alert 군사기지를 제외하면 가장 고위도 북극에 위치한 유인 기지로 북극점에서 933 km 떨어져 있다. 노르드기지는 덴마크의 군사 기지이지만, 기지 내에 연구를 위한 Villum Research Station (VRS)가 덴마크의 Aarhus 대학에 의해 운영되고 있다. VRS은 International Arctic Systems for Observing the Atmosphere (IASOA)에 참여하고 있다 (Fig. 144). IASOA는 수문학, 빙하학, 해양학 그리고 육상 및 생물권 관측을 통해 기후변화에 따른 북극권 전체의 변화 과정 이해를 위한 관측 네트워크이다. 이 관측 네트워크에는 노르웨이 스발바르도 포함되어 있다. 기후학적으로 북극해로부터 한류가 주변을 흐르기 때문에 하계 기간 2개월 전후의 기간만 해빙이 녹으며, 육상 동토의 활동층의 깊이는 약 0.2 m이다. 연평균 기온은 영하 21℃이고, 6월부터 8월까지 최고(최저) 기온의 평균은 2 ~ 4 (-1 ~ 1)℃의 영상 기온이 나타난다. 반면, 11월부터 3월까지 기온은 평균적으로 -33℃까지 내려가며, 기록된 최저 기온은 -51℃이다. 강수량은 188 mm로 적다. 노르드기지 기후는 북반구 중위도로부터 들어오는 난류로 인해 연중 많은 기간 해빙이 없는 스발바드 지역과는 대조를 이루는데 스발바드 지역 활동 층은 약 1 m이다. 노르드기지의 풍향은 하계기간(6월 - 8월)에는 동풍이, 나머지 기간은 남서풍이 주풍이다. 풍속의 경우 11-12월에 상대적으로 강한데 주변의 빙상으로부터의 활강풍이 주 원인으로 파악된다 (e.g., Nguyen *et al.*, 2013).

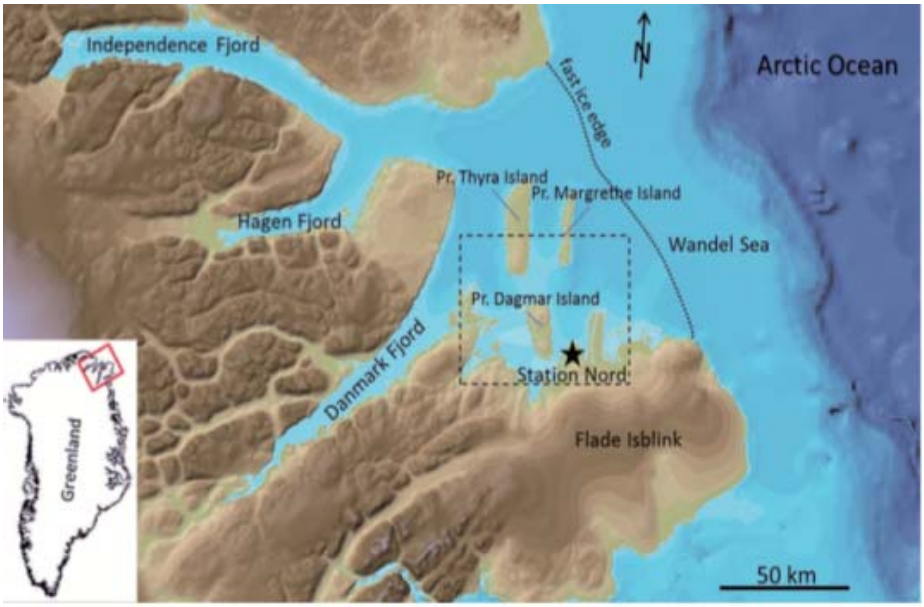


Fig. 143. The geographic location of Station Nord, Greenland.

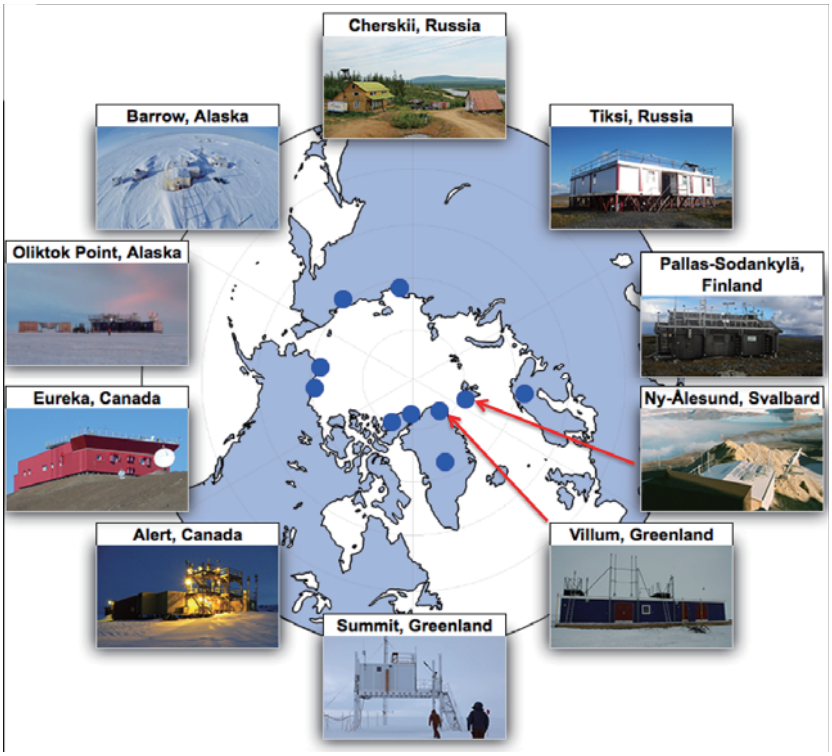


Fig. 144. The geographic location of sites for International Arctic Systems for Observing the Atmosphere. Villum Research station and Svalbard Ny-Alesund are used for the sites for KOPRI.

나. 로지스틱스

노르드기지는 군사 기지이기 때문에 사전에 덴마크 외교부의 허가를 받아야 하며, 또한 Search and Rescure (SAR) 보험 가입이 필수적이다. 덴마크 Aarhus 대학의 VRS 사무국을 통해 연구활동 허가 신청을 할 수 있으며, 비교적 간단한 절차를 거치면 연구활동 허가를 받을 수 있다. 활동 허가 승인이 나면 연구 활동 번호를 받게 되며, 이를 근거로 Kalaallit Forsikring Agentur에 이메일(kfa.privat@if.dk)을 통해 보험 가입을 신청할 수 있다.

노르드기지로의 출입 및 화물 수송은 두 가지 경로를 통해 이루어진다. 덴마크의 Aalborg와 노르드 간은 군 수송기가, 스발바드 롱이어비엔과 노르드 간에는 트윈오터가 사용된다. 입출입 경로의 경우 방문 시기에 이용 가능한 항공편이 선택된다. 2016년의 경우 들어갈 때는 덴마크 Aalborg-노르드(세 시간 소요) 구간을, 나올 때는 노르드-롱이어비엔(두 시간 소요) 구간을 이용하였다.

현지 체류는 VRS 내의 숙소를 이용하며, 식사는 노르드기지를 운영하는 덴마크 군인들로부터 제공받는다. VRS은 2015년 6주에 걸쳐 완공 되었는데, 한번에 14명이 체류할 수 있는 숙소와 회의 및 휴식을 위한 거실, 다양한 종류의 실험실, 이메일 송수신 등이 가능한 사무실이 있는 주 건물, 스노우 모빌 등 연구활동을 지원하는 물품들을 보관하는 창고 그리고 2 km 남쪽에 위치한 대기관측동으로 이루어져 있다. 외부와의 통신은 이리듐을 이용한 전화 및 이메일만 가능하여 매우 제한적이다. 외부 활동 시 VRS에 위치를 보고해야 하며, 북극곰을 대비한 총기 휴대가 필수적이다. 보다 자세한 사항은 http://villumresearchstation.dk/ 에서 확인할 수 있다.

다. 관측

VRS의 대기관측동에서 남쪽으로 약 20 m 떨어진 곳의 6 미터 높이 타워(81° 34.842'N, 16° 38.394'W)에 2015년 8월에 VRS 연구자의 도움으로 전원 및 통신선이 연결되었으며, 2016년 5월 4일 관측 장비 설치가 완료되었다 (Fig. 145). 이 타워에는 태양복사 및 장파복사를 상향 및 하향에서 각각 관측할 수 있는 순복사계(CNR4, Kipp & Zonen)가 6 m 높이에, 세 방향 풍속, 기온, 이산화탄소 및 수증기 농도를 초당 10회 고속관측하는 개회로 에디 공분산 시스템(CSAT3A 및 EC150, Campbell Scientific Inc.)이 5.5 m 높이에, 별도의 풍속 및 기온만을 측정하는 삼차원 초음파 풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc.)와 온습도계(HMP45C, Campbell Scientific Inc.)가 2.5 m 높이에 설치되어 있다. 그리고 토양 온도 측정을 위해 네 개의 센서로 구성된 토양 온도계

(TCAV-L70, Campbell Scientific Inc.)를 이용하여 두 개의 센서는 0.02 m에, 나머지 두 개가 0.06 m 깊이에 설치되어 0.08 m 층의 평균 토양 온도를 측정하도록 되어 있으며, 토양 열 플럭스를 측정하기 위한 토양 열 플럭스 판(HFP01SC-L70, Campbell Scientific Inc.)이 0.08 m 깊이에 설치되어 있다 (Fig. 146).

에디 공분산 시스템은 초당 10회의 고속으로 삼차원 바람성분(u, v, w), 기온(sonic temperature), 이산화탄소(CO_2) 농도, 수증기(H_2O) 농도를 측정하여 대기-동토층간 발생하는 운동량, 현열, 잠열, 이산화탄소의 플럭스를 측측한다. 측정되는 자료는 타워 하부에 위치한 자료 집록기(CR5000, Campbell Scientific Inc.) 내의 메모리카드에 실시간 저장된다. 자료의 백업을 위해 자료 집록기에 저장되는 모든 자료는 매 5분마다 대기관측동 내의 노트북 PC에 저장된다. 이 자료들은 극지연구소 또는 VRS 연구원이 현장 방문 시 이동용 자료 저장 매체에 자료를 복사 한 후 담당 연구원에게 전달된다. 따라서 노르드관측지에서의 자료 분석은 측정 후 일정 시간 경과 후에나 가능하여 본 보고서에도 포함되지 않았다. 또한 이런 경우 장비 작동 상태를 수시로 확인할 수 없기 때문에 장기간 관측 자료 획득이 안될 우려가 있다. 향후 별도의 통신 장비를 설치할 계획이며, 그럼으로써 준 실시간 자료 수집을 통해 장비 상태를 점검하는 한편, 분석 시간도 앞당길 계획이다.

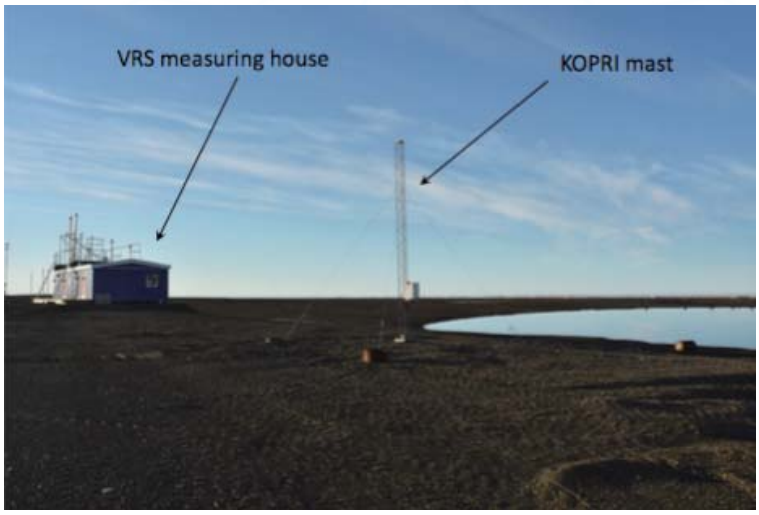


Fig. 145. VRS Atmospheric Measuring house and KOPRI's flux tower on August, 2015.

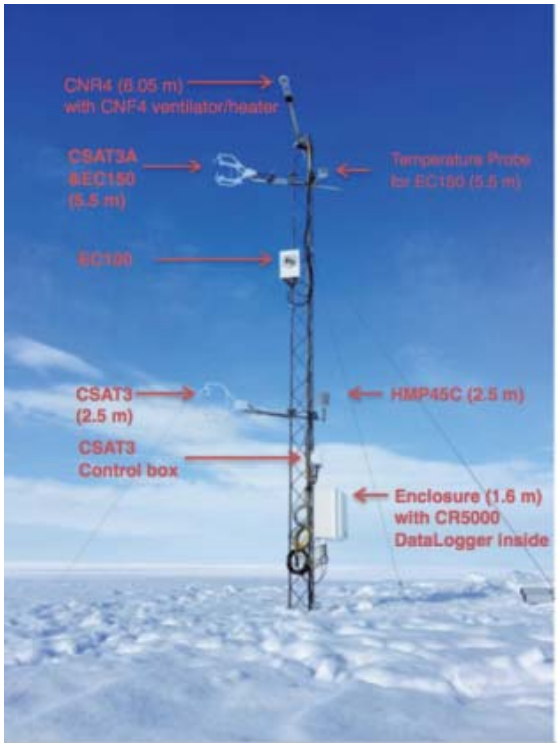


Fig. 146. Eddy covariance flux system established on May 4, 2016.

Fig. 147는 에디 공분산 시스템의 전원 및 신호 연결 모식도이다. 노르드에서는 교류전원 이용이 가능하다. 대기관측동으로부터 220V 교류 전원이 함체 내의 AC/DC 컨버터에 연결된다. 12VDC는 자료 집록기, 에디 공분산 시스템 그리고 RS232-RS485 신호변환기에 공급된다. 한편, 대기관측동에는 노트북 PC에는 자료집록기로부터 통신선이 연결되어 있으며, 매 5분마다 자료집록기로부터 노트북 PC에 자료가 저장되도록 되어 있다. 통신 상태는 1주일에 한번씩 노르드 기지를 운영하는 덴마크 군인에 의해 확인된다.

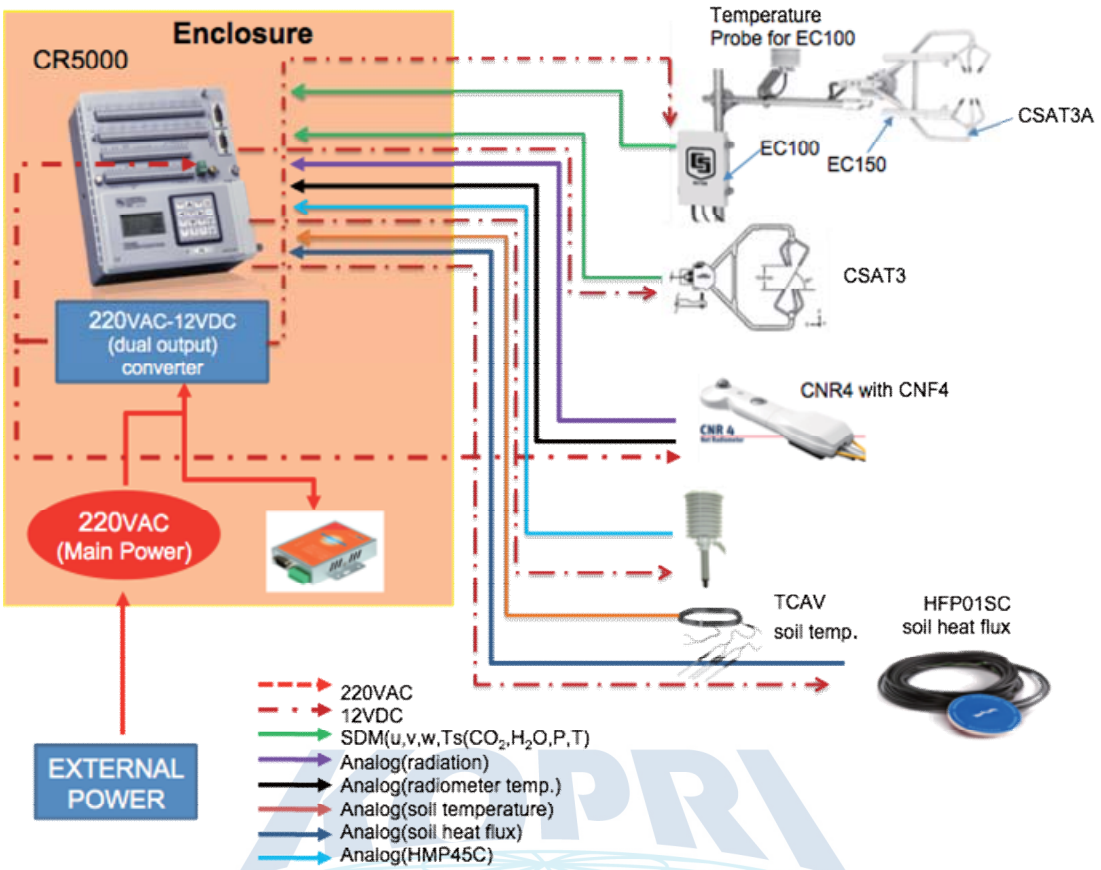


Fig. 147. Schematic diagram of power and singal for eddy covariance systems

5. USN 기반 기술 개발

가. USN(Ubiquitous Sensor Network) 시스템

이 과제에서는 신뢰성 있는 고 정밀 센서와 USN 기술을 이용하여 극지 환경에서 최소 1년 이상 안정적으로 동작 가능한 센서 노드를 개발하는 것을 목표로 한다. 본 연구개발에 사용된 USN 기술은 저비용, 저소비전력, 고 신뢰성, 유지보수가 간단한 매우 유연한 프로토콜이다. 속도는 250kbps 이며, 성형(Star) 및 Peer-to-peer (mesh) 동작이 가능하다. 또한, 많은 센서노드들은 CSMA/CA(Carrier sense multiple access with collision avoidance)을 사용하여 무선 채널을 공유하면서 안정적이 통신을 하게 된다. 본 연구개발에서 안정적으로 동작하는 무선 센서 네트워크 구현에 사용된 기술인 지그비(Zigbee)에 대해 간단히 소개하기로 하겠다.

지그비란 IEEE 802.15.4 국제 표준 기반으로 저전력과 저가격을 목표하는 저속 근거리 개인 무선 통신의 국제 표준 스펙이다. 지그비는 전력소모가 적고 칩 가격이 저렴하고 통신의 안정성이 높아 최근 가장 급속한 발전을 하고 있는 기술이다. 이름의 유래는 ZigZag와 Bee로부터의 합성어이다. 명칭자체가 꿀벌처럼 작고 민첩한 무선의 느낌을 잘 표현하고 있다. 또한 멀티 홉으로 메쉬 네트워크를 지원하지만 꿀벌처럼 서로 정보 교환하면서 지그재그의 경로로 목적지에 도달하는 이미지를 표현하고 있다. 지그비는 IEEE 802.15.4 표준의 물리 PHY와 매체접근제어 MAC계층 위에 그 상위계층으로 네트워크(NWK)계층, 응용지원(APS)계층과 보안(Security) 및 응용(APL)을 규격화하였다. 지그비 기술은 앞으로 원격제어, 원격관리, 원격 모니터링에 적합하고 가정자동화, 공장자동화, 산업자동화에 활발하게 적용될 전망이다. 또한, 지그비는 저전력, 저비용, 초소형의 특징을 장점으로 갖고 있어 본 연구개발에서 극지역에 설치할 센서 네트워크를 구현하는데 매우 적합하다고 판단된다.

본 연구개발의 최종 결과물은 극지역에 설치될 각종 환경 센서와 센서에 내장되어 통신과 센서 값을 읽는 동작을 위한 내장형 프로그램, 연구자에게 각종 정보를 제공하고 제어하기 위한 인터페이스를 제공하는 운영프로그램이다. 온습도 센서노드와 게이트웨이, 카메라 노드의 네트워크 형태는 위에서 언급했듯이 성형, 메쉬형으로 구성할 수 있도록 하였으며 전송 속도는 250kbps이다. 기본적으로 성형의 형태를 사용하며 관측지역이 확장되면 라우터(Router) 기능을 갖는 노드들을 추가하여 네트워크 범위를 확장해 나 갈수 있다. Fig. 148은 이런 네트워크 구조를 나타낸다.

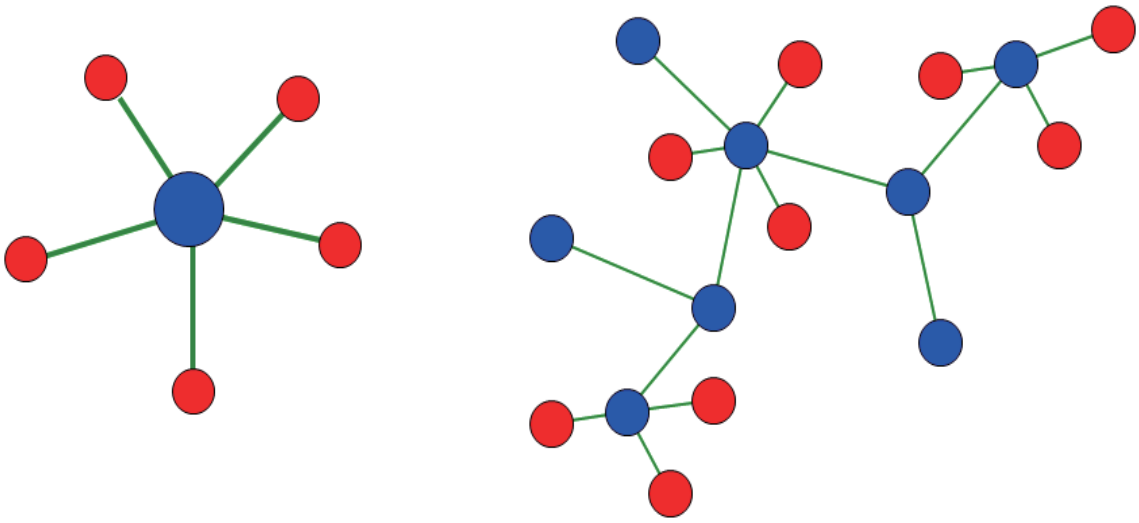


Fig. 148. Plastic structure(Star) and mesh structure(Peer-to-peer).

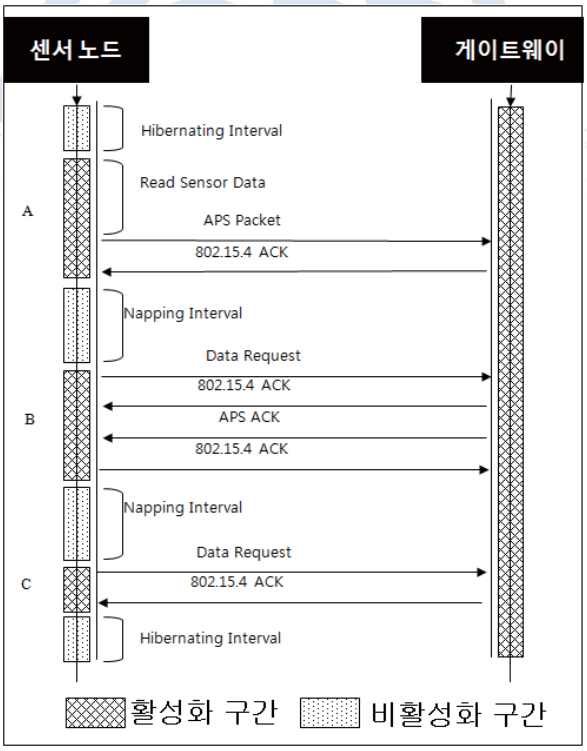


Fig. 149. Move method for extension of battery life.

본 과제에서 개발하는 무선 센서 노드는 상용전원 공급이 불가능한 극지 특성상 센서는 개별적으로 갖고 있는 배터리로 동작해야 하며 극지 특성에 맞는 저전력 동작이 가능한 시스템으로 구현되어야 한다. 현재 극지 환경에 설치되는 많은 관측 시스템들은 전력을 공급 받기 위해 태양광 발전기술을 사용한다. 하지만, 관측 범위가 확장될수록 비례적으로 증가하는 수많은 센서 노드에 모두 태양광 발전 모듈을 설치하는 것은 매우 비효율적이고, 설치를 매우 힘들게 하며 시스템 크기가 커지므로 인해 관측지인 극지 환경을 오염 시킬 수 있다. 따라서 작은 배터리로 1년 이상 동작하는 무선 센서 노드의 개발은 본 연구개발과제를 성공적으로 달성하기위한 필수적 요소 기술이라 할 수 있다. 본 연구개발에서는 배터리 수명을 연장하기 위해 온습도 및 카메라 센서가 동작하지 않는 시간에 센서 노드가 슬립 모드로 동작하게 하였다(Fig. 149). 이때 소비 전력은 최소가 되면 대략 수 마이크로암페어로 동작한다. 본 연구에서 전력 소모를 최소화 하기위해 사용된 알고리즘은 대기 시간에 sleep-mede로 동작하며 사용자가 원하는 시간에 데이터를 처리하는 과정이 포함되어 있다. 즉, 센서 노드들은 대기 시간에 sleep-mode로 동작하여 최소의 전력만 소비한다. 센서 데이터를 읽거나 USN 게이트웨이와의 통신이 필요한 경우에만 wakeup-mode로 활성화 되어 동작한다. sleep-mode와 wakeup-mode의 주기는 원격으로 조정 가능하다.

나. USN 시스템 성능 분석

USN 시스템의 성능은 센서 노드가 동작할 경우 소비전력 성능을 분석하여 USN 시스템의 성능을 분석하였다. 앞에서 극지 관측지 환경은 전력 공급의 제한 때문에 배터리로 동작되어야 하며 1년 이상 동작이 지속되기 위해서는 sleep-mode로 동작해야만 가능 하다고 설명하였다. Fig. 150에서 152는 센서 노드가 1년 이상 사용 가능하다는 것을 실험을 통해 확인한 것을 정리하여 설명하는 그래프이다. Fig. 150의 왼쪽은 본 실험에서 사용한 에이질런트 사의 DSO6104A 오실로 스코프이며 A와 B는 오른쪽 회로에서 측정을 위해 프로브를 연결한 포인트를 나타낸다. C는 A와 B의 차를 나타낸 것이다.

Fig. 151은 센서 노드가 동작하는 한주기 동안 측정한 데이터를 그래프로 그린 것이다. A와 B는 위에서 설명한 회의의 위치이고 C는 A와 B의 차를 나타낸 것이다. 이 그래프에서 측정된 전압을 통해 소비되는 전류를 옴의 법칙을 사용하여 계산하면 소비 전력을 구할 수 있게 된다.

KOPRI 극지연구소

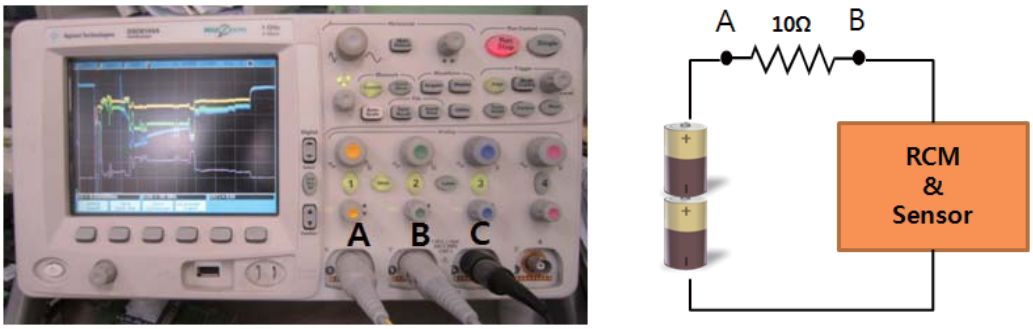


Fig. 150. Measurement of used volatage and current of sensor node.

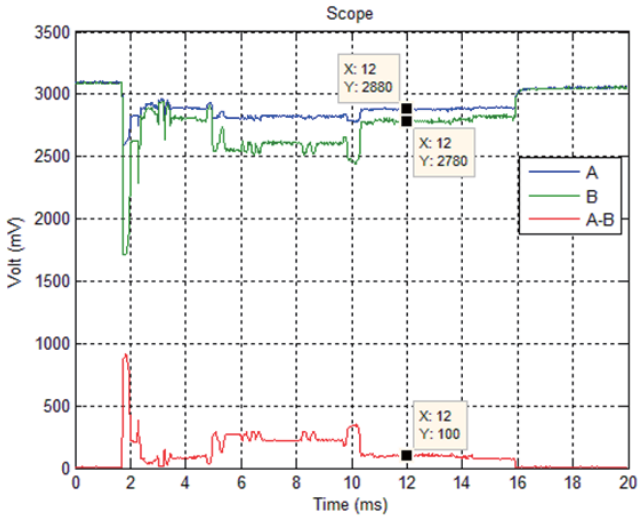


Fig. 151. Measured data of used voltage.

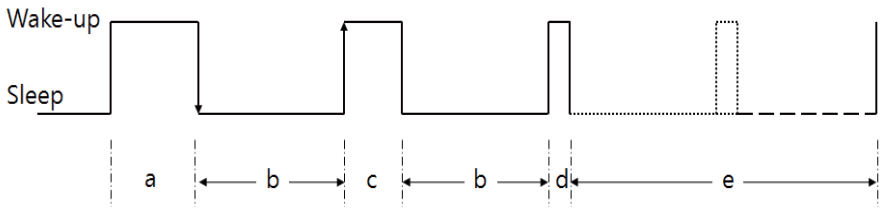


Fig. 152. Measured data of used current.

센서노드는 Fig. 152와 같이 3종류의 활성 구간과 1개의 비활성 구간을 갖고 동작한다. 각 구간별 소비 전력 측정 데이터를 Fig. 153에서 Fig. 156의 그래프로 첨부 하였

다. 위의 실험 데이터를 종합하여 계산할 경우 Table 11과 같이 계산된다. 예를 들어 3분 주기로 측정할 경우 19000mAH/평균 소비전류 = 540일 된다. 따라서 본 연구개발 과제에서 당초 목표로 잡은 1년 동안 배터리 교체 없이 운영 가능하게 된다.

Table 11. Calculation of consumed current

Mode	Active Time (mSec)	Average Current(mA)
A	150.80	9.374
B	16.14	15.048
C	10.04	12.685
Sleep	-	0.003306

KOPRI
극지연구소

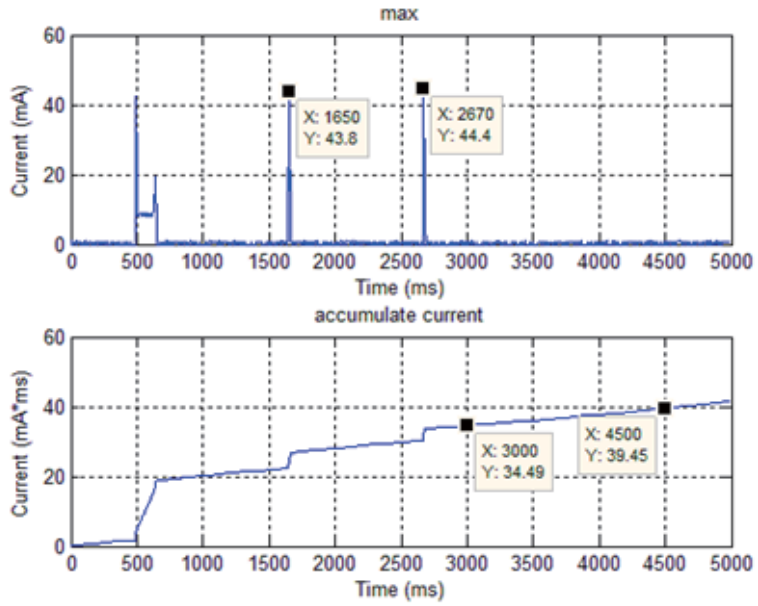


Fig. 153. Measured data of total operated current.

KOPRI

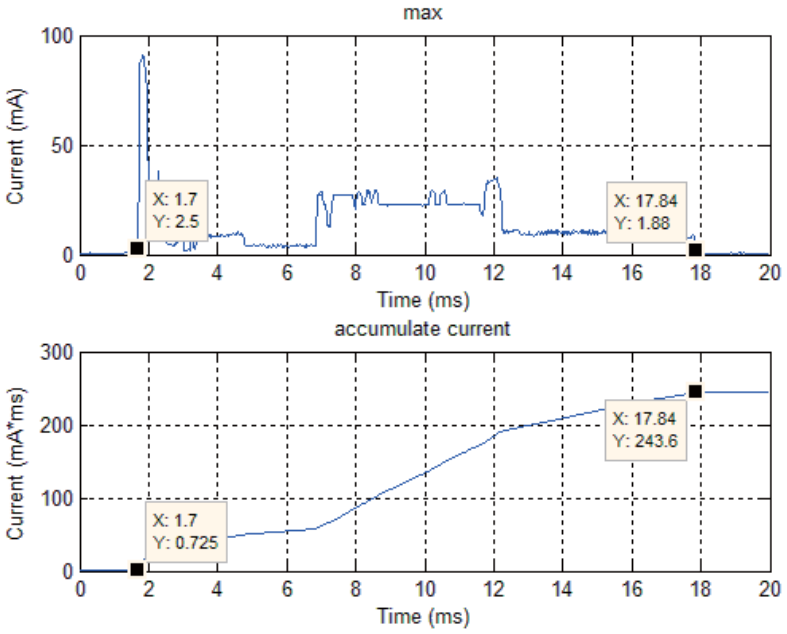


Fig. 154. a section measured data.

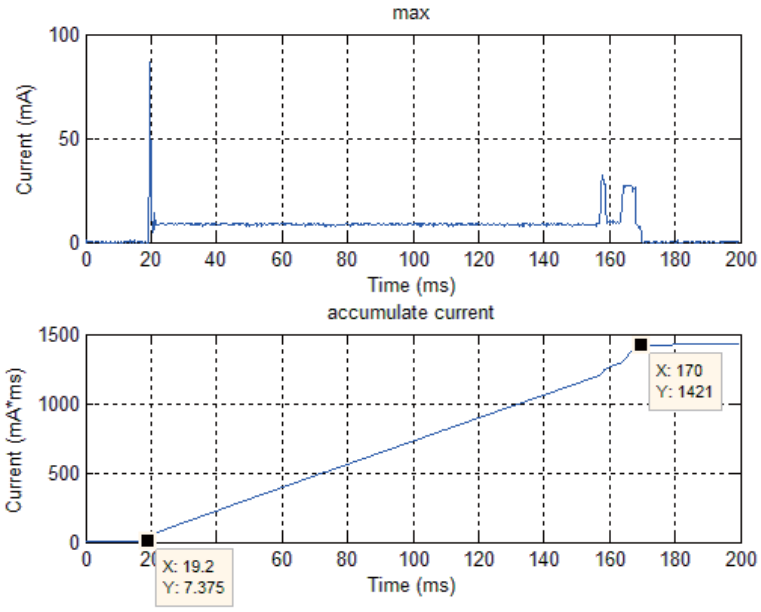


Fig. 155. c section measured data.

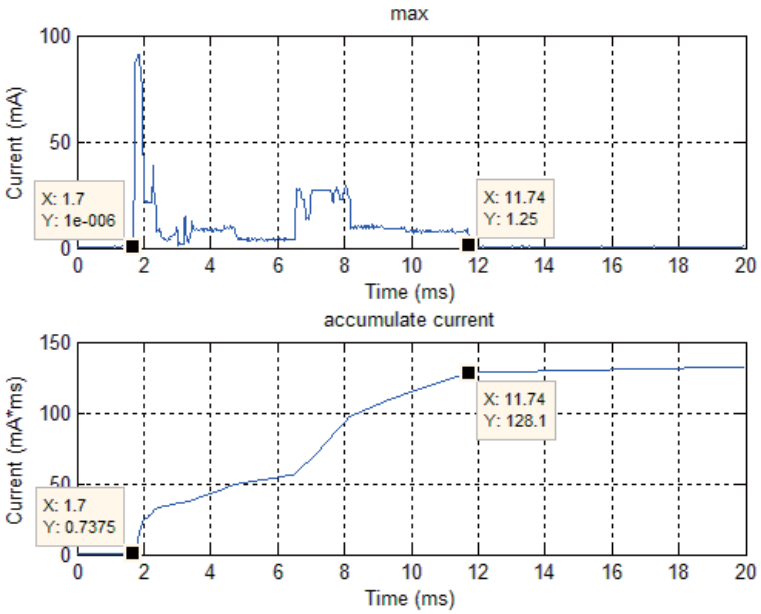


Fig. 156. d section measured data.

USN 시스템의 성능을 분석하기 위하여 지그비 노드들의 무선 신호 강도를 측정하는 시험을 수행하였다. 센서 노드들을 극지의 관측지에 넓게 분포시켜 데이터를 수집하게 되므로 거리에 따른 RF 신호의 강도는 매우 중요하다. 실험실에서는 수 미터거리에서 이루어지지만 실제 관측 지는 수백 미터가 될 수도 있다. 따라서 본 실험에서 거리를 증가 시키면서 RF 신호 강도(RSSI)을 측정하는 실험을 진행하였다. Fig. 157는 RF 신호 강도 측정 실험을 위해 만든 통신 모델을 나타낸다. 0.25초에 한 번씩 메시지를 전송하고, 고정된 위치 당 100회의 RSSI 값을 측정하였다.

Table 12는 측정 결과이다. 측정 결과에서 확인 할 수 있듯이 400m 거리까지 RF 신호 강도가 안정적으로 통신 할 수 있는 값으로 확인 되었다. 참고로 본 과제에 사용한 RF 통신 칩의 수신 감도는 -85dBm 이상의 신호강도가 유지되면 통신 에러 확률이 1% 보다 낮다. 따라서, 반경이 400m 인 관측지에서 USN 네트워크를 통해 센서 데이터를 수집하는데 문제없이 사용 될 수 있다. Table. 12를 바탕으로 살펴보면 170m 반경인 경우 -65dBm 범위를 갖기 때문에 100m 내의 반경을 갖는 관측지에서는 통신 채널의 변화가 발생하더라도 통신의 안정성을 보장 받을 수 있다고 판단된다.

Table 12. Results of RSSI measurement test with distance

Distance (m)	A(dBm)	B(dBm)
90	-60.325	-55.117
130	-58.350	-53.367
170	-67.192	-63.042
200	-82.900	-76.917
280	-86.333	-80.975
320	-84.883	-79.000
370	-85.283	-79.958
400	-87.550	-82.500

KOPRI 극지연구소

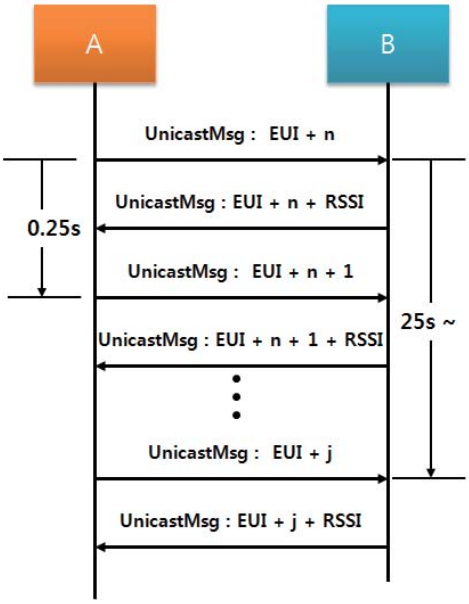


Fig. 157. RSSI test telecommunication model.

다. USN 시스템 구축

이 과제에서는 총 3종의 센서 노드와 2종의 게이트웨이를 개발 제작 하였으며 알래스카 카운실에 설치되어 데이터 수집 운영 중이다. 제작된 하드웨어는 센서노드, USN 게이트웨이로 구성되어 있다. Fig. 158는 USN 시스템 구조를 나타낸 그림이다. 특히 현장에서 계측된 데이터를 수집하는 데이터 수집 프로그램과 이미지 수신 프로그램이 USN게이트웨이에 포함되어 USN 시스템으로 구성되어 있다. 특히 개반된 USN 시스템은 전원 공급이 어려운 야외 환경에서 시스템을 장기간 운영하기 위하여 저전력 소비 알고리즘과 재생에너지 수집 시스템을 접목하여 구현 하였다. Fig. 159는 GPS 좌표를 바탕으로 알래스카 카운실 관측지에 온습도 센서를 설치한 위치를 구글 맵을 사용하여 표시한 그림이다. 정확한 GPS 좌표는 Table 13에 자세하게 정리하였다. Fig. 160과 161은 관측지 전경과 각각의 온습도 센서와 USN 게이트웨이, 센서 배치, 설치 위치 및 설치 모습의 사진이다.

Table 13. Coordinates of installed USN

T/H GPS 좌표(3m)			
	(N,W)		(N,W)
0	50.637,42.649	8	50.604,42.649
1	50.636,42.675	9	50.603,42.674
2	50.635,42.740	10	50.601,42.733
3	50.633,42.794	11	50.600,42.788
4	50.626,42.649	12	50.581,42.647
5	50.625,42.675	13	50.580,42.675
6	50.624,42.736	14	50.577,42.729
7	50.623,42.792	15	50.575,42.782

WiCAM GPS 좌표(3m)			
	(N,W)		(N,W)
0	50.643,42.638	8	50.626,42.643
1	50.641,42.661	9	50.626,42.653
2	50.636,42.651		
3	50.634,42.652		
4	50.632,42.656		
5	50.628,42.639		
6	50.628,42.639		
7	50.627,42.637		

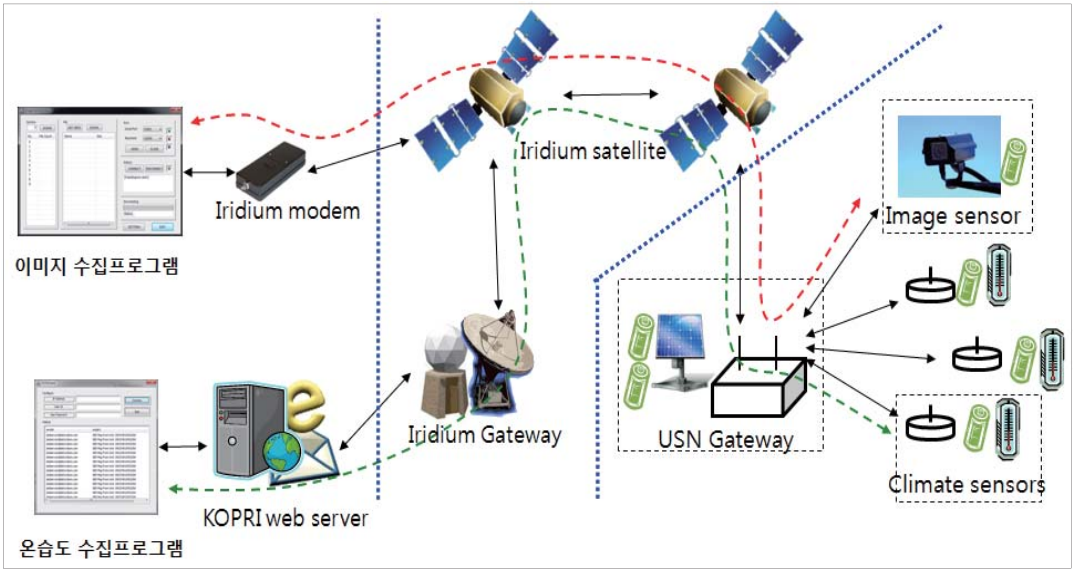


Fig. 158. USN system.

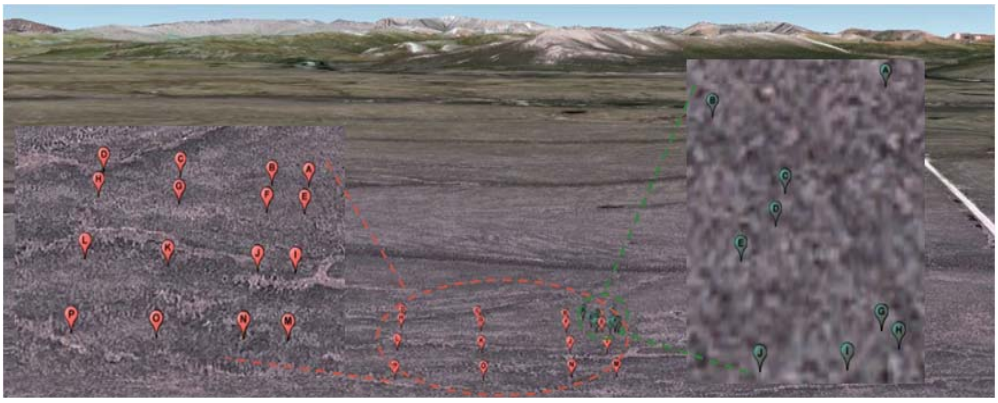


Fig. 159. Location of installed USN system.

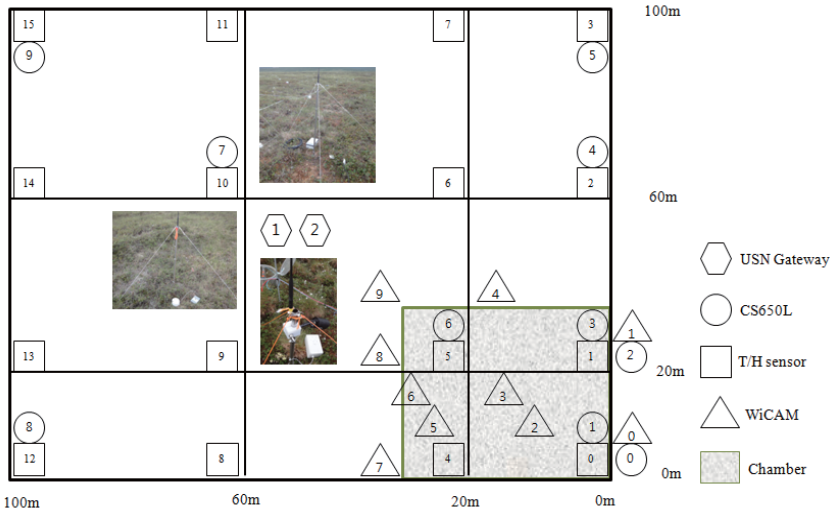


Fig. 160. Sensors layout of USN system.

Fig. 161. Installation of USN system.

관측지에 분포된(100m X 100m) 각각의 온습도 센서가 수집한 데이터는 USN 게이트웨이를 통해 KOPRI 웹 서버에 전송된다. 이렇게 웹 서버에 전송된 데이터는 POP3로 동작하는 수집프로그램을 통해 마이크로소프트사의 엑셀 파일 포맷으로 변환된다. 마이크로소프트사의 엑셀 파일은 데이터의 편집 및 분석이 매우 편리한 도구로 사용될 수 있다. 사용자들은 이렇게 만들어진 엑셀 파일을 사용하여 그래프를 그리고 편집하면서 데이터를 분석 할 수 있다.

카메라 센서 노드의 이미지 데이터의 경우 웹서버를 거치지 않고 바로 운영 PC로 전송된다. 이는 실시간으로 원하는 시간대의 사진을 촬영 가능하게 하며 촬영된 이미지를 선택하여 다운로드 할 수 있게 한다. 이리듐 인공위성 모뎀은 앞에서 설명 했듯이 시리얼 통신(RS232C) 케이블을 사용하여 운영 PC와 연결된다.

(1) 온습도 수집 시스템

극지역 관측지에서 수집된 온습도 센서 데이터가 이리듐 인공위성 중계기를 통해 웹 메일 서버로 전송이 되면 PC에서 온습도 수집 프로그램을 사용하여 메일 서버로부터 메일에 첨부된 온습도 데이터를 읽어 오게 된다. 이렇게 서버로부터 읽어 들인 데이터는 분석의 편의성을 제공하기 위하여 엑셀 파일로 변환되어 저장이 된다. Fig. 162는 메일에 첨부된 온습도 데이터 텍스트 파일을 마이크로소프트사의 엑셀 파일 포맷으로 변환한 모습이다.

습도센서 노드는 지중/지상의 온도와 지상 온습도를 측정하여 게이트웨이로 측정 데이터를 전송하는 기능을 갖는 센서 노드이다. Fig. 163은 케이스에 조립되기 전의 PCB 상태를 보여주는 사진이다. 사진과 같이 무선 모듈과 센서와의 인터페이스를 위한 베이스 보드로 구성된다. 센서를 지중에 설치하여 지중의 온도를 측정 할 수 있다. 사진의 모습은 지상 온습도를 측정할 수 있는 센서를 장착한 모습이다(Fig. 164). 온습도 센서 노드는 앞에서 언급했듯이 배터리 절약 모드로 동작하도록 프로그램 되어 있다. 앞으로 본 연구과제에서는 배터리 절약 모드를 슬리피 동작 모드로 기술 하도록 하겠다. 이는 통신 모듈이 활성화 동작(Wakeup-mode)과 비활성화 동작(Sleep-mode)을 반복적으로 수행하므로 동작 상태를 이해하기 쉽게 정의하여 사용하는 것으로 하겠다. 비활성화 동작 주기는 게이트웨이를 통해 설정 가능하다. 비활성화 동작 주기를 짧게 설정하면 짧은 주기로 많은 데이터를 수집하는 데는 유리하지만 배터리 소비가 증가하게 된다. 기본적으로 3분 주기로 활성화 동작을 하도록 프로그램 되어 있으며 앞에서 언급했듯이 원격으로 변경 가능하다.

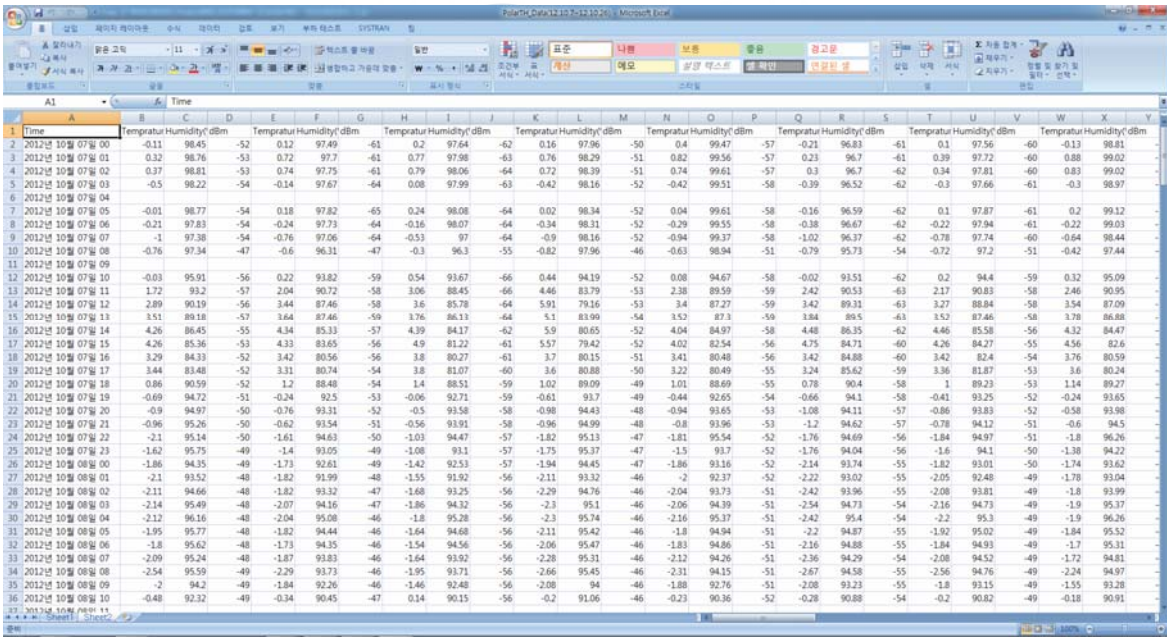


Fig. 162. Transformed Excel file.

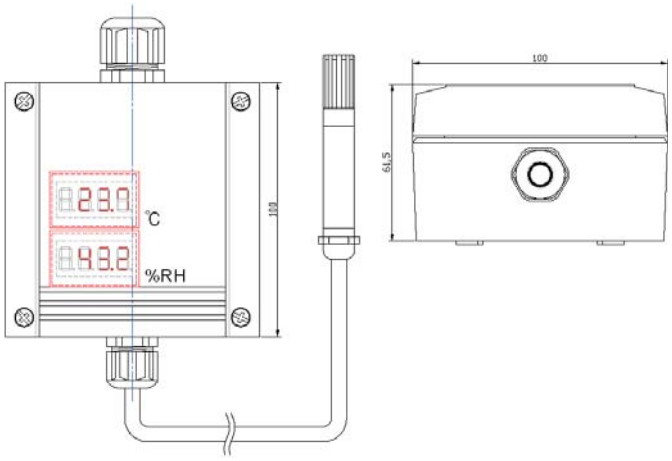


Fig. 163. PCB state before assembly in case.

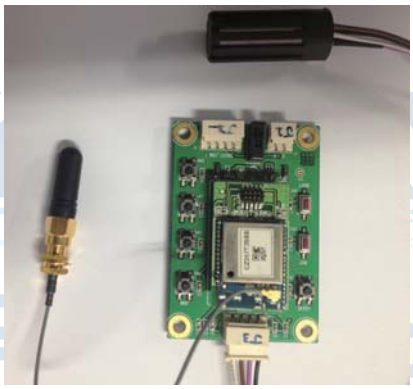


Fig. 164. Node of Temp./RH. sensors.

본 연구에서 개발된 센서의 신뢰성은 연구 활동의 수집되는 데이터의 품질을 좌우하므로 무엇 보다 중요하다고 할 수 있다. 개발된 센서 노드는 온도의 측정 및 정밀한 제어가 요구되는 환경에서 사용되도록 설계/디자인 되어 극지 환경에서 안정적으로 운영 가능한 구조이다. 또한 지속적인 안정성이 있어 화학 물질과 습윤성에 대한 내구성이 강하다. 상태 습도(Relative humidity)와 온도 오차는 Fig. 165 및 166과 같은 특성을 갖는다. 상대 습도(Relative humidity)와 온도 오차는 다음 그림과 같은 특성를 갖는다. 온습도 센서 노드는 G&V-GHP-20TL 으로, 교정 방법은 박막형 디지털 습도계의 교정 작업표준 (KASTO 03-50204-060)에 따라 교정되었다. 온습도 센서는 직사 광선에 의한 센서의 측정 오류를 방지하기 위해 백엽상 기능을 갖는 직상광 쉴드(Soloar Shield)로 보호된다(Fig. 167). 따라서 극지 관측지에서 보다 신뢰성 높은 데이터를 수집 할 수 있다.

USN 게이트웨이 노드는 온습도 센서 노드나 카메라 센서 노드로 부터 전송된 센서 데이트를 저장하거나 이리듐 네트워크를 통해서 전송하는 역할을 수행한다. USN 게이트웨이는 온습도 센서가 전송한 온습도 데이터를 1차적으로 SD 카드에 저장한다. SD 카드에 저장하고 그중 사용자가 원격으로 설정한 비율로 샘플링한 데이트를 이리듐 네트워크를 통해서 전송한다.

이 연구과제에서는 이리듐 인공위성 네트워크를 이용하여 웹서버로 전송하도록 설계 되었다. Fig. 168는 온습도 센서의 USN 게이트웨이 프로그램 이 실행되는 모습을 나타내었다. 습도 센서의 USN 게이트웨이 프로그램은 온습도 센서로 부터 전송된 데이터를 1차적으로 수집하기 역할을 수행한다. 빨강색 사각 박스로 표시된 부분이 온습도 센서 노드를 나타낸다. 업데이트된 최근 온습도 데이터를 표시한다. 파란색 사각 박스로 표시된 버튼은 온습도 센서 노드들이 데이터를 측정하는 시간 주기를 설정하기 위한 버튼이다.

Fig. 169은 온습도 센서 데이터 수집 주기를 설정하기 위한 대화상자이다. 빨강색 박스로 표시된 부분은 수집된 온습도 데이터를 얼마나 자주 저장하는가를 설정하는 부분이다. 녹색으로 표시된 박스는 이종 네트워크를 통해서 전송하는 주기 설정을 위한 부분이다. 파랑색으로 표시된 박스는 슬립 모드의 주기를 설정하기 위한 부분이다. 모든 설정을 완료 하였으며 검정색으로 표시된 박스의 버튼을 누르면 설정상태로 변경되고, 설정 상태가 저장된다. Fig. 170은 게이트웨이의 하드웨어 모습이다.

KOPRI 극지연구소

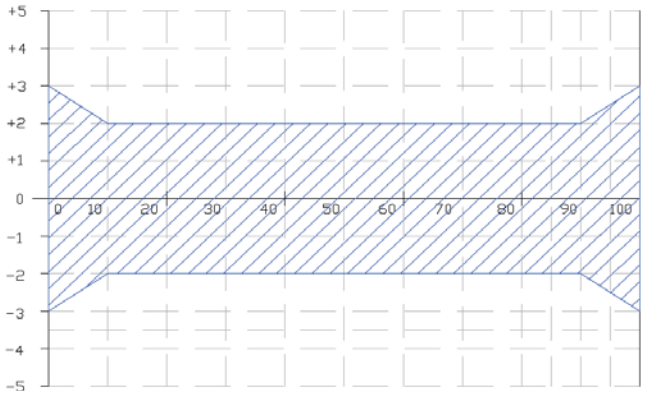
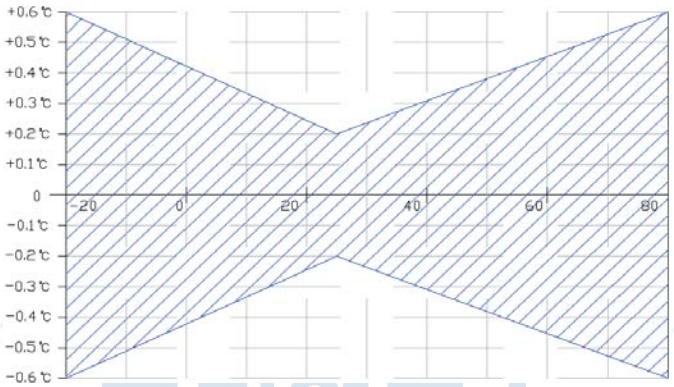


Fig. 165. Characteristic of RH.



극지연구소

Fig. 166. Characteristic of Temp.

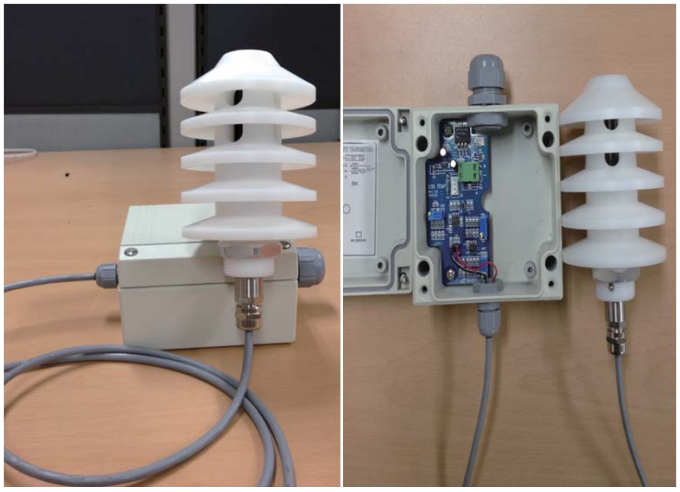


Fig. 167. Photos of finished product of sensors.

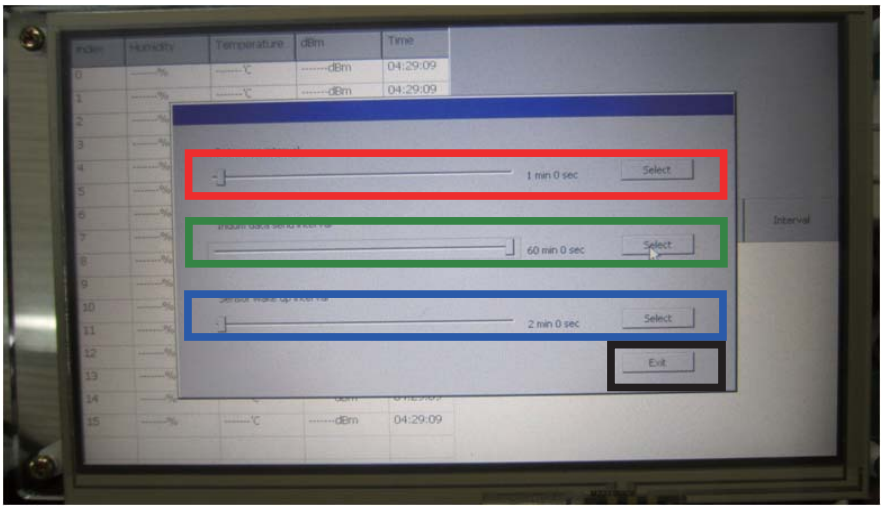


Fig. 168. Program for data acquisition of Temp./RH.

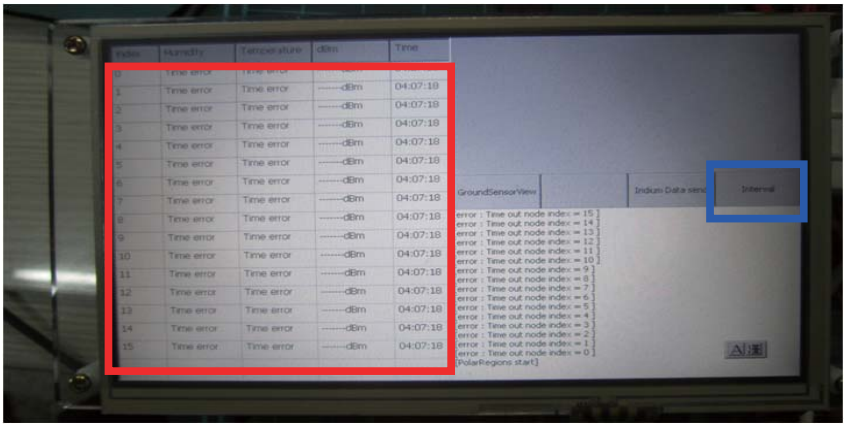


Fig. 169. USN gateway for sensors of Temp./RH.

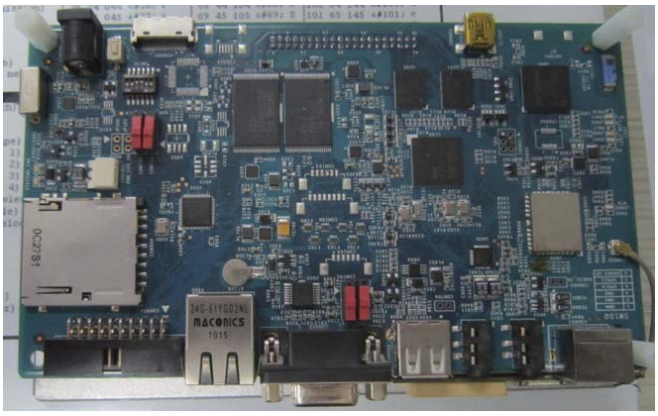


Fig. 170. Photo of USN gateway.

카메라 센서가 전송한 이미지 데이터는 위와 마찬가지로 SD 카드에 1차적으로 저장하고 이종 네트워크를 통한 요청이 있는 경우 해당 이미지를 전송한다. 본 연구개발 과제에서는 이리듐 인공위성 네트워크를 이용하여 이리듐 모뎀으로 전송하도록 설계되었다. 이리듐 모뎀은 시리얼 통신(RS232C)을 통해 컴퓨터에 연결된다. 컴퓨터에서 동작하는 운영프로그램으로 연결, 이미지 요청, 즉시 촬영, 촬영 예약 등을 설정할 수 있다.

SD 전원에 저장되어 있는 수집된 데이터의 파손을 방지하기위해서 전원을 분리 하여야 하며 분리한 SD 카드는 SD 카드 리더가 장착된 PC에서 열어서 복사 할 수 있다. 저장되는 파일 포멧은 온습도 센서 데이터는 텍스트 파일로 카메라 센서는 JPEG 파일이다. PC에 복사 한 후 SD 카드를 게이트웨이에 장착하는 방법 또한 전원이 분리된 상태에서 이루어 져야 한다. SD 카드가 정확하게 장착된 후 전원을 연결하면 된다.

Fig. 171은 USN 게이트웨이가 케이스에 장착된 모습이다. 게이트웨이는 USN 네트워크의 코디네이터 노드이므로 슬립모드로 동작 시킬 수 없다. 때문에 자가 발전에 의해 전원을 공급해야 된다. 자가 발전용으로 풍력이나 태양광을 이용할 수 있는데 본 과제에서는 태양광 발전을 사용하였다. Fig. 172는 태양광 발전 구성 및 배터리 연결도를 나타낸 것이다.

Fig. 173은 USN 게이트웨이를 알래스카 카운실에 설치한 모습이다. 지표 온습도센서, 토양 온습도센서를 위한 것과 카메라 센서를 위한 2개의 USN 게이트웨이가 설치되어 운영 중이다. 이리듐 네트워크의 장점은 진정한 글로벌 솔루션으로 낮은 데이터 링크 지연시간, 단일 가격 체계, 단일 규약 등을 장점으로 함대 관리, 원격 측정, 석유 가스관 모니터링, 재난 및 위험 대응, 환경 모니터링, 해양 관측의 응용 분야에 널리 활용되고 있다.

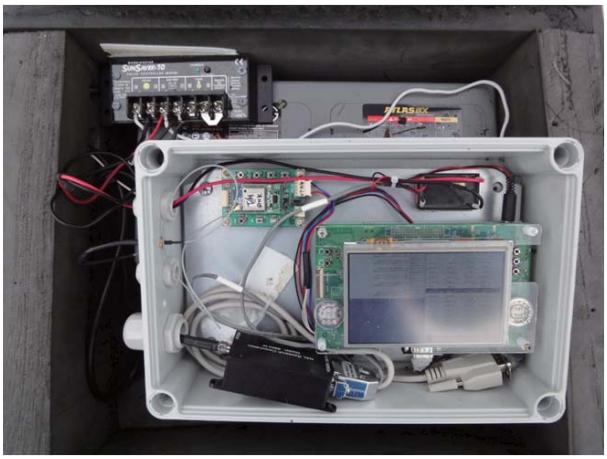


Fig. 171. Photo of assembled gateway.

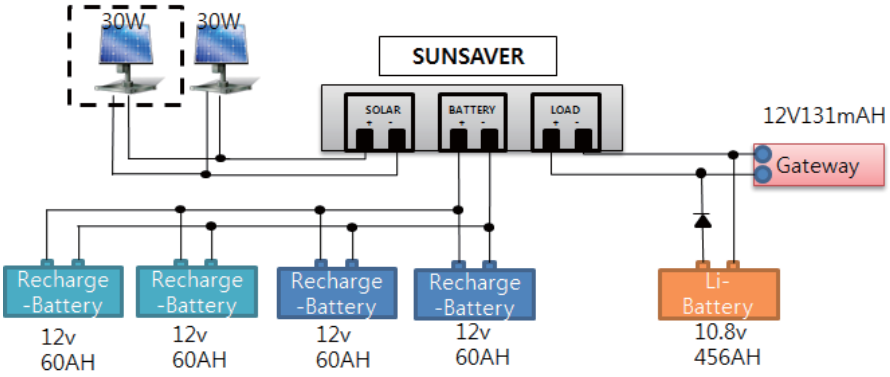


Fig. 172. Connection of battery and solar panel.

Fig. 173. Photo of installed gateway at Council site.

(2) 토양 온도와 토양 수분 수집 시스템

극지역 관측지의 토양 온도와 수분 함량을 수집하기위해 사용한 CS650L 센서노드는 위에서 기술한 지표 온습도센서와 게이트웨이를 공유한다. 수집된 도양의 온도와 수분 함량 데이터는 지표 온습도센서와 같이 이리듐 인공위성 중계기를 통해 웹 메일 서버로 전송이 되면 PC에서 온습도 수집 프로그램을 사용하여 메일 서버로부터 메일에 첨부된 온습도 데이터를 읽어 오게 된다. 이렇게 서버로부터 읽어 들인 데이터는 분석의 편의성을 제공하기 위하여 엑셀 파일로 변환되어 저장이 된다. Fig. 174는 토양 온습도 센서를 관측지에 설치 전 현장에서 통신 테스트 및 데이터의 이상 유무를 확인하는 사진이다.

(3) 이미지 수집 시스템

이미지 수집용 운영프로그램은 이리듐 인공위성용 모뎀을 사용하여 원격지에 있는 USN 게이트웨이에 저장된 이미지를 다운로딩하기 위한 프로그램이다(Fig. 175). 'PolarImageCollector.exe' 프로그램을 더블클릭하여 실행 시키고 이리듐 인공위성용 모뎀이 연결되어 있는 시리얼 통신 포트에 맞게 파랑색 박스의 설정을 변경한다. 기본적으로 포트번호는 COM3으로 속도는 19200으로 설정될 것이다. 설정이 완료되면 아래의 CONNECT 버튼을 클릭하면 옆의 녹색 LED 박스가 'ON'되면 원격지에 있는 게이트웨이와 정상적으로 연결된 것이다. 연결이 정상적으로 이루어지면 빨강색 박스에서 원하는 카메라 노들 번호를 선택한다. 선택되어진 카메라 노드의 촬영 이미지 수가 나타날 것이다. 다음으로 'GET INFO' 버튼을 클릭하면 녹색 박스에 카메라 노드정보가 보여

질 것이다. 노드 정보는 촬영된 이미지의 이름과 파일 사이즈이다. 다운로드를 원하는 이미지 이름을 선택하고 'DOWN'을 클릭하게 되면 다운로드가 시작된다. 다운로드 과정은 50 킬로바이트 기준으로 약 30분 정도 소요 된다. 소요시간은 이리듐 인공위성의 연결 상태에 따라 차이가 날 수 있다. 이리듐 인공위성은 연결 시간대에 따라 음영 지역이 될 수 있어 10분의 통신 불응답 상태가 지속될 수 있다. 따라서 대기 시간이 좀 더 소요될 수도 있다.

Fig. 174. CS650L soil sensors for Temp./RH.

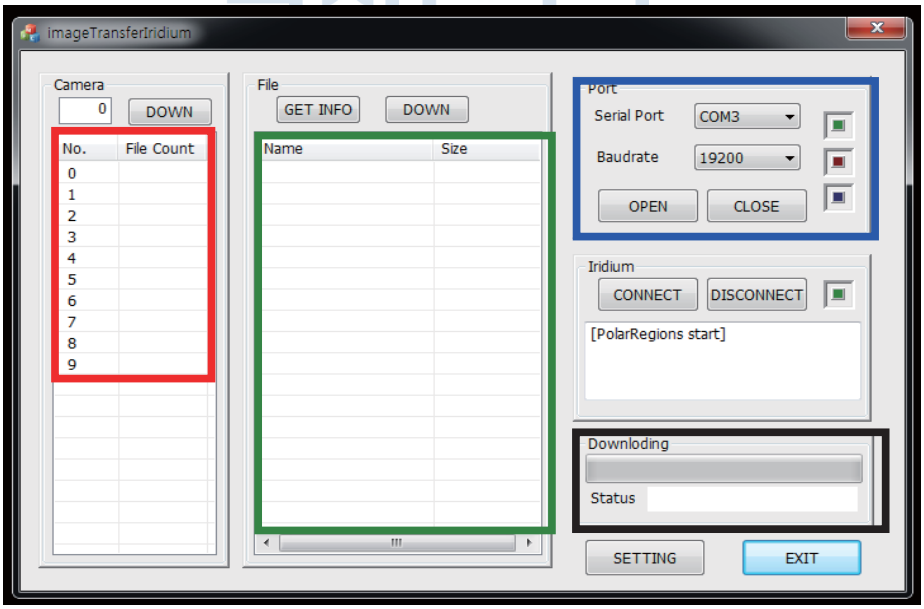


Fig. 175. Program for acquisition of image.

Fig. 176은 카메라 센서 노드가 설치된 모습이다. 카메라 모듈은 통신 모듈과 RS232C로 연결되며 JPEG(Joint Photographic Experts Group)로 압축된 이미지를 출력한다. 카메라 모듈은 동작 대기 모드시 60mA의 대기 전류를 소비하여 이를 최소화하기 위해서 EEPROM(Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)과 Shutdown 기능이 있는 DC/DC regulator를 사용하였다. 미리 정의된 시간 동안 sleep mode에 있던 카메라 노드는 정의된 시간을 초과하게 되면 wakeup모드로 진입하고 USN 게이트웨이에 이미지 요구 메시지가 있는지를 요청한다. 이미지 요구에 대한 대기 메시지가 없는 경우 sleep mode로 진입한다. 반대로 이미지 전송 요청에 대한 대기 메시지가 있는 경우 카메라 모듈에 전원을 인가하고 카메라 모듈에서 이미지를 읽어와 EEPROM에 임시적으로 저장한다. 카메라로부터 JPEG 이미지 파일이 모두 읽혀졌는지 확인하면서 이미지 읽기 동작을 반복하게 된다. 카메라로부터 이미지 파일을 모두 읽어 들인 것이 확인되면, 카메라 전원을 끄고 EEPROM에 임시적으로 저장했던 이미지 데이터를 64bytes로 분할하여 USN 게이트웨이로 전송하게 된다(Fig. 177). EEPROM에 임시 저장된 이미지 데이터를 이리듐 게이트웨이로 모두 전송하면 다시 sleep mode로 진입한다.

또한 카메라 센서 노드는 일정한 주기로 촬영한 이미지를 게이트웨이로 전송하는 기능을 갖는 센서 노드이다. 위의 사진과 같이 카메라 센서 노드는 카메라 모듈과 통신 모듈, 그리고 인터페이스를 위한 베이스 보드로 구성된다. 카메라 센서 노드도 온습도 센서 노드와 같이 슬리피 모드로 동작하여 배터리 수명을 연장 할 수 있도록 하였다. 카메라 센서 노드는 1장의 압축 이미지를 전송하기위해 작은 데이터 블럭으로 나눠서 전송한다. 데이터 블럭은 64바이트이다. 영상의 압축율은 게이트웨이를 통해 변경 가능하며 0~255 의 범위를 갖는다. 촬영되는 이미지에 따라 다르지만 보통 가장 작은 압축율로 압축한 이미지의 사이즈는 약 50 킬로바이트가 된다. 이를 바탕으로 계산하면 하나의 이미지는 800개의 데이터 블럭으로 나눠서 전송하게 된다. Fig. 178은 10개의 카메라로 부터 전송된 관측지 시스템과 식생 관측 챔버의 사진이다.

Fig. 176. Photos of senors for acquisition of image.

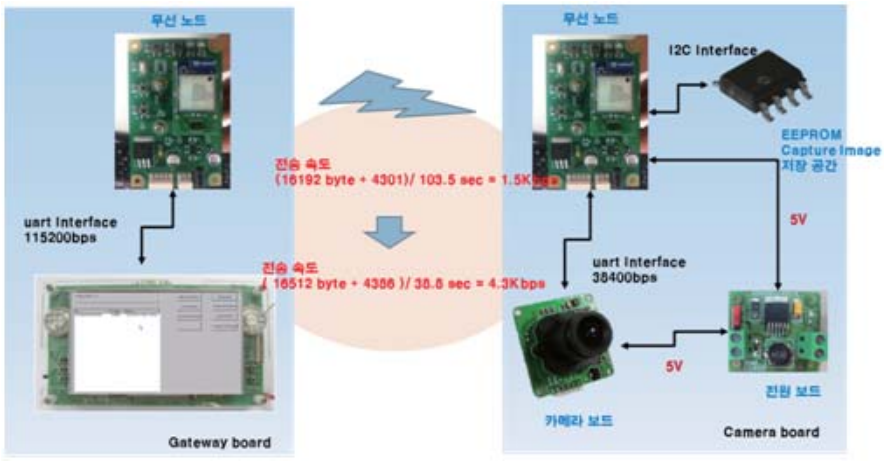


Fig. 177. Outline of movement of sensors for image acquisition.

Fig. 178. Electrical transmitted images through TUSN system.

(4) 지중 온도 프로파일 센서

2014년, 영구 동토층 관측을 위해 USN 관측 시스템에 지중 온도 프로파일 센서가 추가 되었다. 센서는 기존 USN 관측지에 50m 간격으로 9 포인트에 설치하였다. Fig. 179의 도면은 센서가 설치된 위치이다. Fig. 180은 온도프로파일 센서를 지중에 설치하는 과정이며, 장비를 사용하여 1m 깊이로 땅을 파고 센서 고정봉(Fig. 181)에 삽입한 센서를 묻는 과정이다.

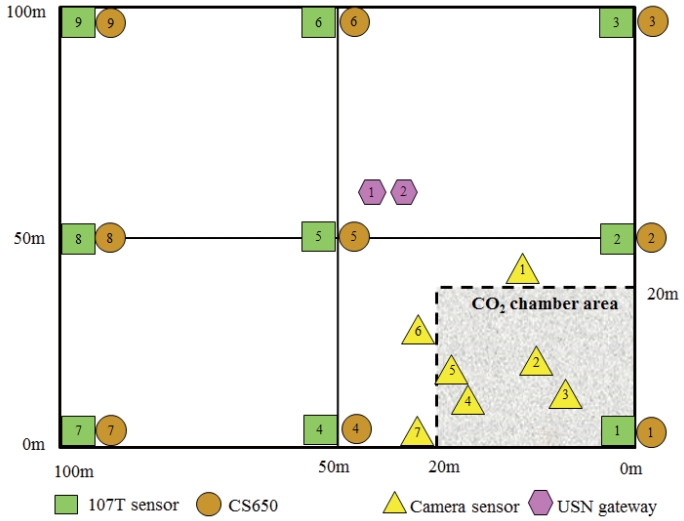


Fig. 179. Installed location of sensors for temperature profile in underground.

Fig. 180. Process of sensors installation.

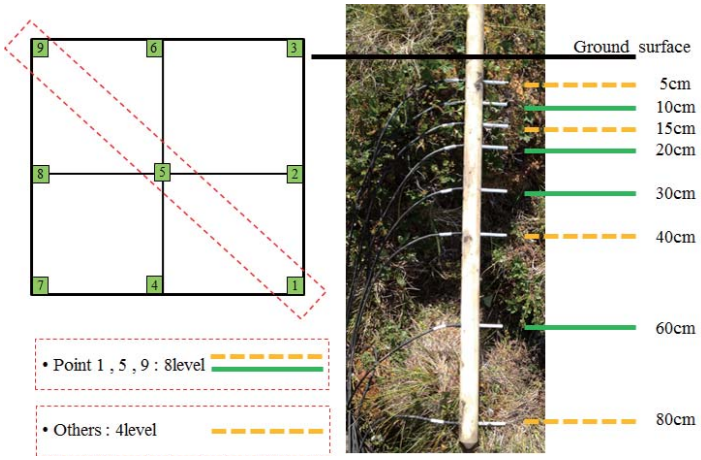


Fig. 181. Sensor fixation pipe.

센서는 Fig. 182와 같이 직경 4mm 써모커플 (ThermoCouple) 타입의 사용하였으며 10m PVC 케이블을 통해 USN 통신 모듈에 연결된다. 아래는 온도프로파일 센서를 센서 고정봉에 삽입한 모습으로 지중에 묻게 되었을 때 지면으로 부터의 깊이를 나타낸다. 설치 위치 9포인트 중 대각선 1, 5, 9 위치는 깊이 8레이어, 나머지는 4레이어로 설치하였으며 센서봉은 충격, 마모에 강한 MC 나일론 재질을 사용하였다.

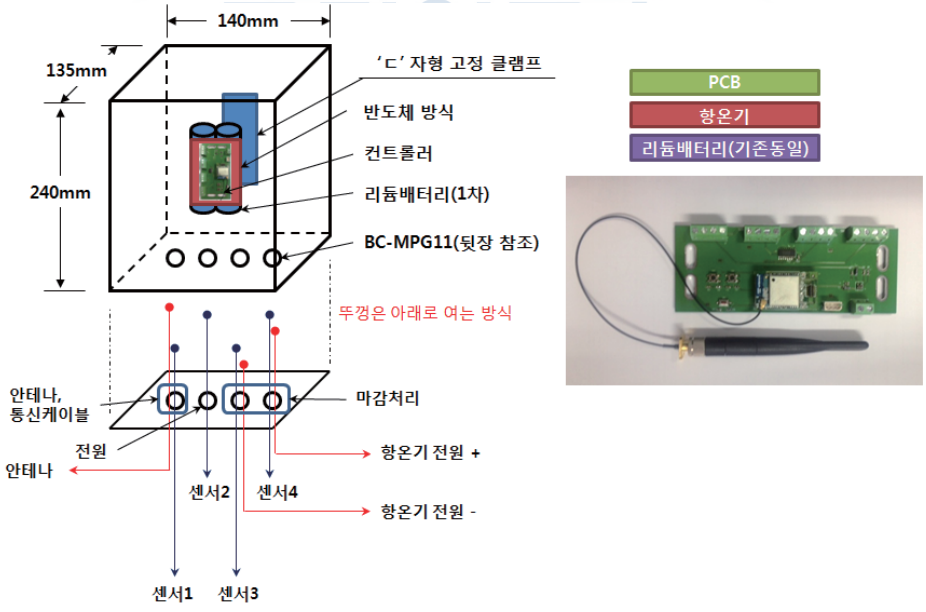


Fig. 182. Case structure(left) and controller(right).

라. USN 시스템 실내 시험 결과 분석

극지역은 극한 기후의 변화로 관측지에 신뢰성 있고 안정적인 시스템을 구축하기가 매우 어려운 환경이다. 이런 문제로 본 연구에서는 극지역의 방수·방한·결빙·결로 등 환경적 요인으로 수집 시스템을 안정적으로 운영하기 위해 연구 활동에 필요한 양질의 환경 정보의 안정적 수집, 분석을 위해 극지 환경에서 나타날 수 있는 환경적 요인에 강하고, 수년간 극지의 극한 환경에서 안정적인 동작을 보장하기 위한 USN 시스템용 항온, 항습 기구 구조를 설계하고 제작하였다. 외부 온도의 고저 현상에 대응하는 항온, 항습, 유지 기술을 바탕으로 설계되어 신뢰성 있는 시스템을 구축하는데 크게 기여할 것으로 기대한다. 또한 성능 평가를 위해 Fig. 183, 184와 같이 케이스 내부에 부품들을 배치하여 -40℃까지 제어할 수 있는 대형 실내 시험을 수행하였다.

극저온 챔버 시스템을 이용한 테스트 방법과 결과를 설명하면 Fig. 185에서 Fig. 187와 같다. 컨트롤러는 USN 시스템을 구성하는 센서 제어용 보드로 케이스 내부 온도를 측정하여 반도체 방식의 항온기(Heating)를 동작 시킨다. 케이스 바닥면의 4개의 홀은 지중 프로파일 온도센서와 안테나 등을 연결하기 위한 것이다.

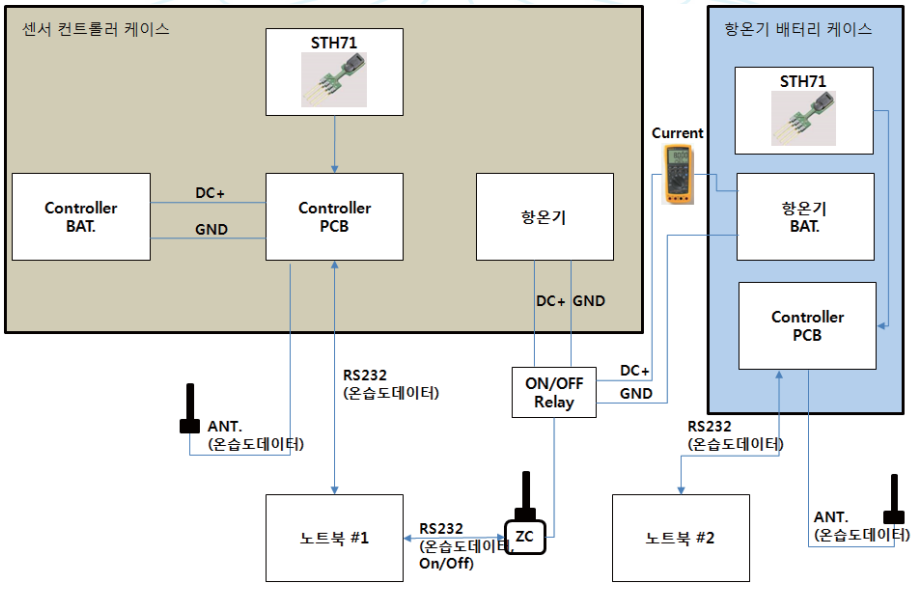


Fig. 183. Block diagram of cryogenic chamber test(1).

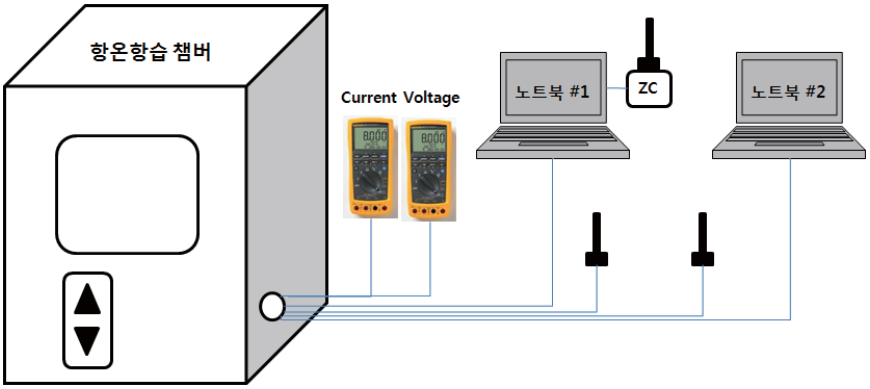


Fig. 184. Block diagram of cryogenic chamber test(2).

Fig. 183와 184는 극저온 항온항습 테스트를 위한 시스템 연결모습이다. 위에서 간략하게 설명했듯이 컨트롤러는 케이스 내부의 온습도를 측정하여 노트북에 연결되어 있는 지그비 코디네이터(ZC)로 측정된 값을 전송한다. 실제 관측지에 설치될 시스템에서는 컨트롤러가 직접 항온기의 동작을 제어 하겠지만 테스트 시스템에서는 저온에서의 컨트롤러 동작 불량 발생과 항온기 동작 온도 설정값을 자유롭게 변경등을 고려하여 노트북을 통해 지그비 코디네이터(ZC)로 제어 되도록 하였다. 저온에 따른 동작 불량으로 무선 통신이 안 될 경우를 대비하여 RS232 케이블을 사용하여 유선으로도 연결하였다.

Fig. 185는 챔버 내부에 테스트 시스템을 구성한 모습과 챔버 내부 온도 변화에 따른 항온기 제어 알고리즘을 설명하기 위한 것이다. 그림과 같이 설치하여 챔버 내부, 센서 컨트롤러 케이스 내부, 항온기 배터리 케이스 내부의 온습도를 측정하였다. 센서 컨트롤러로 사용되는 지그비 통신 모듈의 온도 성능을 보다 정확하게 확인 하기 위해서 케이스 없이 챔버내부에 설치하여 챔버 내부 온습도 변화를 측정하도록 하였으며, 시스템의 전원으로 사용될 배터리도 같이 넣어 온도 특성을 관찰하였다.

항온기 동작 알고리즘은 저온과 고온 문턱 값을 설정하여 항온기가 온도 변화에 따라 ON/OFF 가 반복되지 않도록 하였다. 즉, 저온 문턱 값보다 케이스 내부 온도가 낮을 경우 항온기를 ON 시키고 고온 문턱 값보다 높아진 경우 항온기를 OFF 시킨다. 항온기가 ON 된 경우의 소비 전력을 측정하여 배터리 용량을 산정 할 수 있도록 하였다.

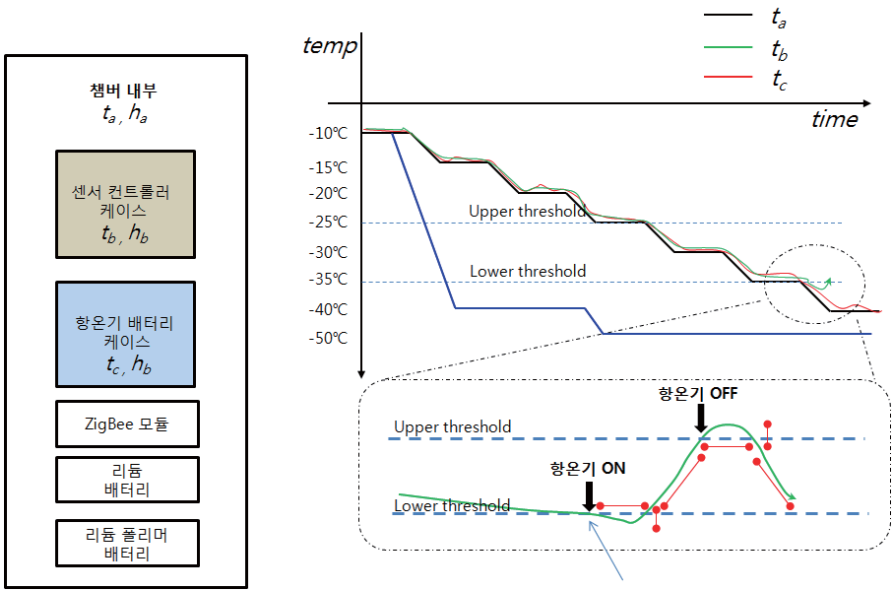


Fig. 185. Algorithm of pyrostat movement.

Fig. 186은 제작한 시제품이 온도를 유지하는 성능을 평가하기 위한 실험의 결과이다. 결과와 같이 케이스 내부는 저온에서 평균 150분의 온도 지연을 갖는다. 또한 알루미늄 케이스 내부 항온기를 ON 시켜 케이스 내부 온도 변화를 관찰한 것이다. 3.7V6.3AH 리듐포리머 배터리를 사용하여 항온기를 ON한 순간 부터 166분간 항온기를 동작시켰다. 이는 평균 6W의 전력으로 동작한다. 온도는 최도 30℃까지 상승하였으며 다시 챔버 설정온도인 -40℃로 냉각 되는 데는 278분이 소요되었다. 스텐레스 케이스 내부 항온기를 케이스 내부 온도 변화에 따라 ON/OFF 시켜 케이스 내부 온도 변화를 관찰하였다. 저온 문턱 값은 -35℃, 고온 문턱 값은 -20℃로 설정하였다. 그래프와 같이 설정된 온도 범위 내에서 케이스 내부 온도가 유지되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 187은 컨트롤러 부품인 오실레이터의 저온 동작 온도가 -20℃인 부품으로 교체하여 위의 실험을 반복 수행한 결과이다. 위 실험과 같이 스텐레스 케이스 내부 항온기를 케이스 내부 온도 변화에 따라 ON/OFF 시켜 케이스 내부 온도 변화를 관찰하였다. 저온 문턱 값은 -15℃, 고온 문턱 값은 -5℃로 설정하였다. 그래프와 같이 설정된 온도 범위 내에서 케이스 내부 온도가 유지되는 것을 확인 할 수 있다. 온도가 유지되는 상황에서 강제적으로 항온기를 OFF 시켰다. 이때 -20℃이하로 케이스 내부 온도가 낮아지자 통신이 제대로 이루어 지지 않는 것을 확인 할 수 있다. 통신이 되지 않는 상황에서 항온기를 강제 적으로 ON 하여 케이스 내부 온도를 높이자 컨트롤러가 정상 동작하는 것을 확인 하였다. Fig. 188은 항온 케이스 및 USN 통신 모듈이 결합된 형태를 나타낸다.

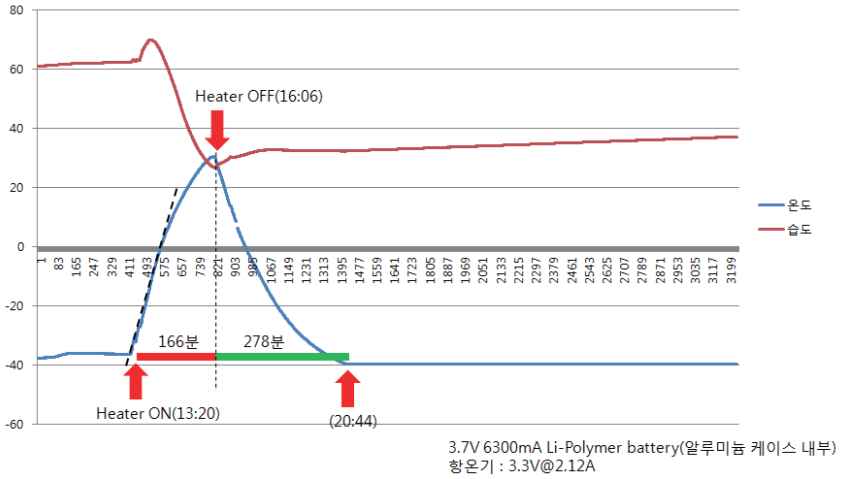


Fig. 186. Result of cryogenic chamber test(1).

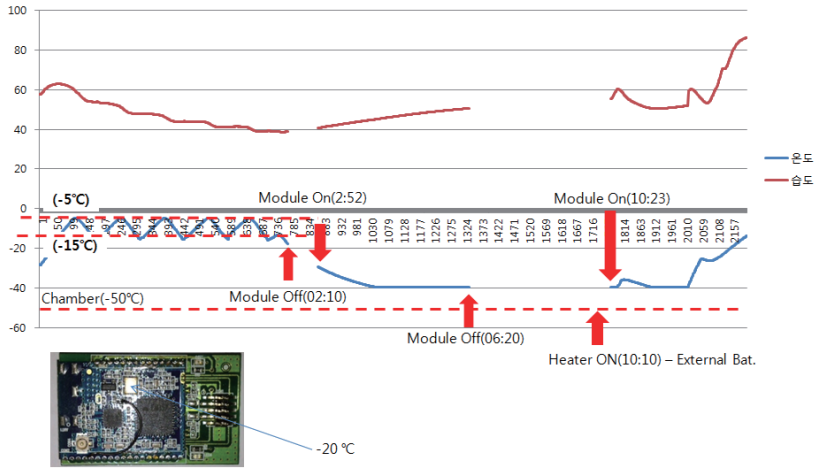


Fig. 187. Result of cryogenic chamber test(2).

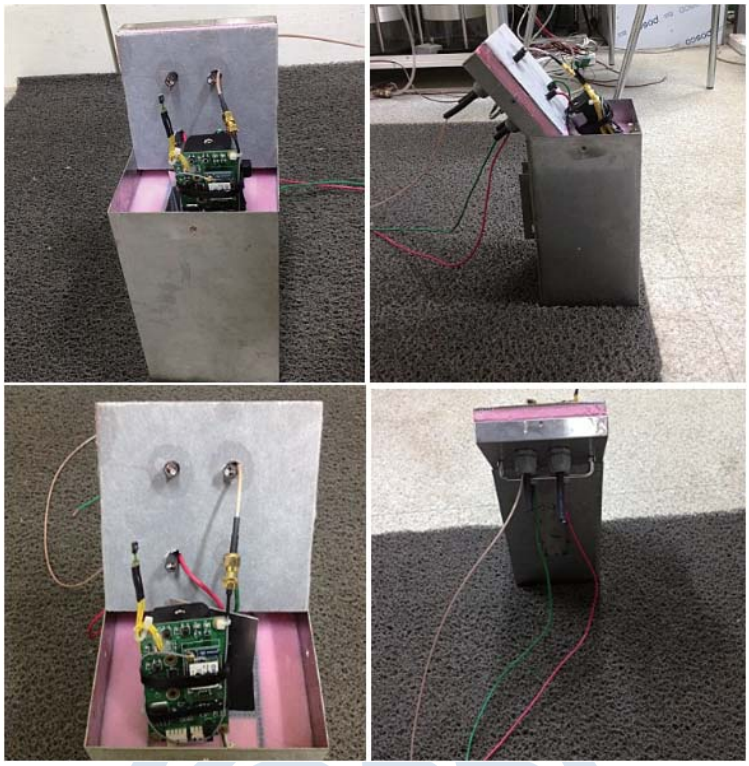


Fig. 188. Photos of pyrostat case and USN module.

KOPRI
극지연구소

마. USN 시스템 현장 관측 결과 분석

(1) 기온 및 상대습도

토양 표면 주변 기온과 수분은 2012 DOY 189부터 2013년 DOY 27 동안 16지점에서 관측되었으나, 센서의 오류와 연결(확인) 등의 문제로 처음부터 자료가 없거나 초반에 자료 집록이 끊긴 두 지점(No. 1, 7)과 자료가 거의 없는 No. 13을 제외한 13 곳에서 관측된 결과를 비교하였다(Fig. 189, 190). 온도의 경우 전 기간에 대해서는 차이를 보이지 않고 ($P > 0.05$; ANOVA), 5% 전후의 Coefficient of variation (CV)를 보였으나 영하 20도 이하로 떨어지는 시기에는 최대 30% CV를 보이면서 큰 공간 변동을 보였다. 상대습도의 경우에는 전 기간 동안 차이가 없었고($P > 0.05$; ANOVA), 평균 3% CV로 공간변동은 거의 없었다. 비교 기간 동안 각 지점의 평균값을 이용하여 공간에 따른 차이를 살펴보았다(Fig. 191). 평균 기온은 -0.4 도에서 -2.1도 범위에서 지점별 공간변동을 보였다. 상대습도는 85%에서 87% 범위에서 거의 차이가 없었다.

(2) 토양 온도 및 수분의 공간 분포 분석

토양에서 방출되는 이산화탄소 플럭스에 영향을 미치는 토양 온도와 수분의 분포를 확인하기 위하여 10지점에서 토양 온도와 토양 수분을 동시에 관측하였다. 토양 온도 결과는 10지점 중 1, 3번을 제외한 같은 깊이(10～30cm)에서 관측된 8곳 중 자료가 연속적으로 존재하는 7지점(No. 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10)의 결과를 분석하였다(Fig. 192a) 비교 기간은 2012 DOY 258부터 2013년 DOY 27 기간 동안 7지점의 토양 온도 결과 비교에서 차이를 보였다 ($P < 0.05$; ANOVA). 공간변동을 설명하는 CV는 9월에 25% 가량을 보이다가, 온도가 점점 낮아지는 시기인 11, 12, 1월 동안에는 40% 가량의 변동을 보였다.

토양수분 결과는 10지점 중 1, 3번을 제외한 8곳의 같은 깊이(10-30cm) 중 자료가 연속적으로 존재하는 4 (No. 2, 4, 5, 10)지점의 결과를 분석하였다(Fig. 192b). DOY 254부터 DOY 309 기간은 No. 1을 제외한 결과가 강수로 인하여 0.5가 넘는 값을 보이며 관측되지 못하였다. 관측기간 중 DOY 309이후, 모든 센서의 값이 갑작스럽게 떨어지는 것을 확인할 수 있는데 이러한 현상은 토양온도가 영하로 떨어지면서 토양 내부가 어는 시점을 알려주는 지표가 된다. 따라서 TDR 방식의 센서 작동이 어려운 토양이 언 상태의 SWC 값은 제외하였다. 2012 DOY 198- 254 동안의 결과 비교에서 차이를 보였으며 ($P < 0.05$; ANOVA), CV 값은 비교 기간 동안 30-40% 결과로 큰 변동을 보였다.

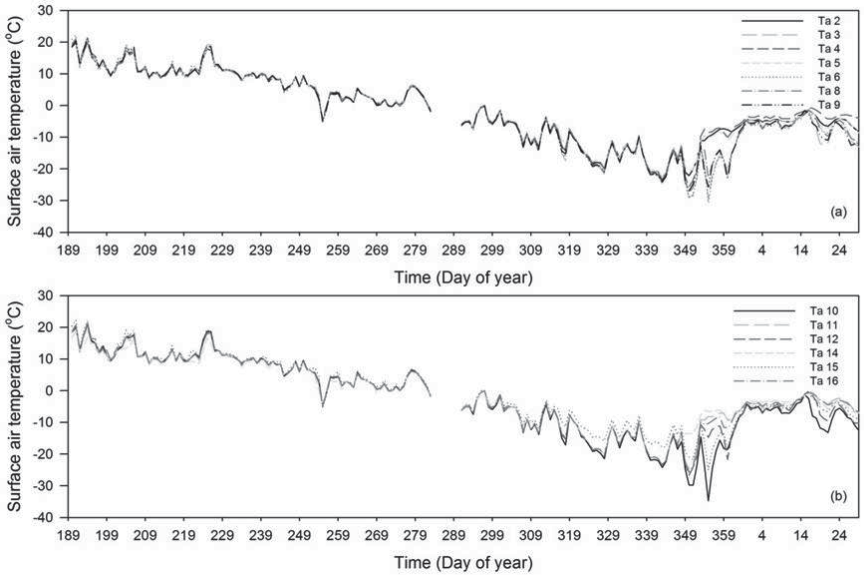


Fig. 189. 13 points of measured site(a; 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, b; No.10, 11, 12, 14, 15, 16) temperate at 0.1m high (from 2012. 7. 7 to 2013. 1. 27).

KOPRI

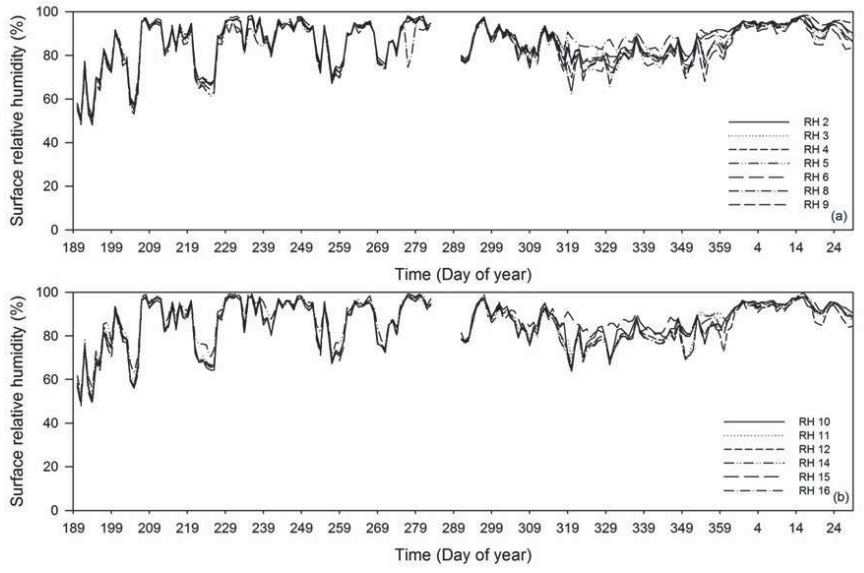


Fig. 190. 13 points of measured site(a; 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, b; No.10, 11, 12, 14, 15, 16) relative humidy at 0.1m high (from 2012. 7. 7 to 2013. 1. 27).

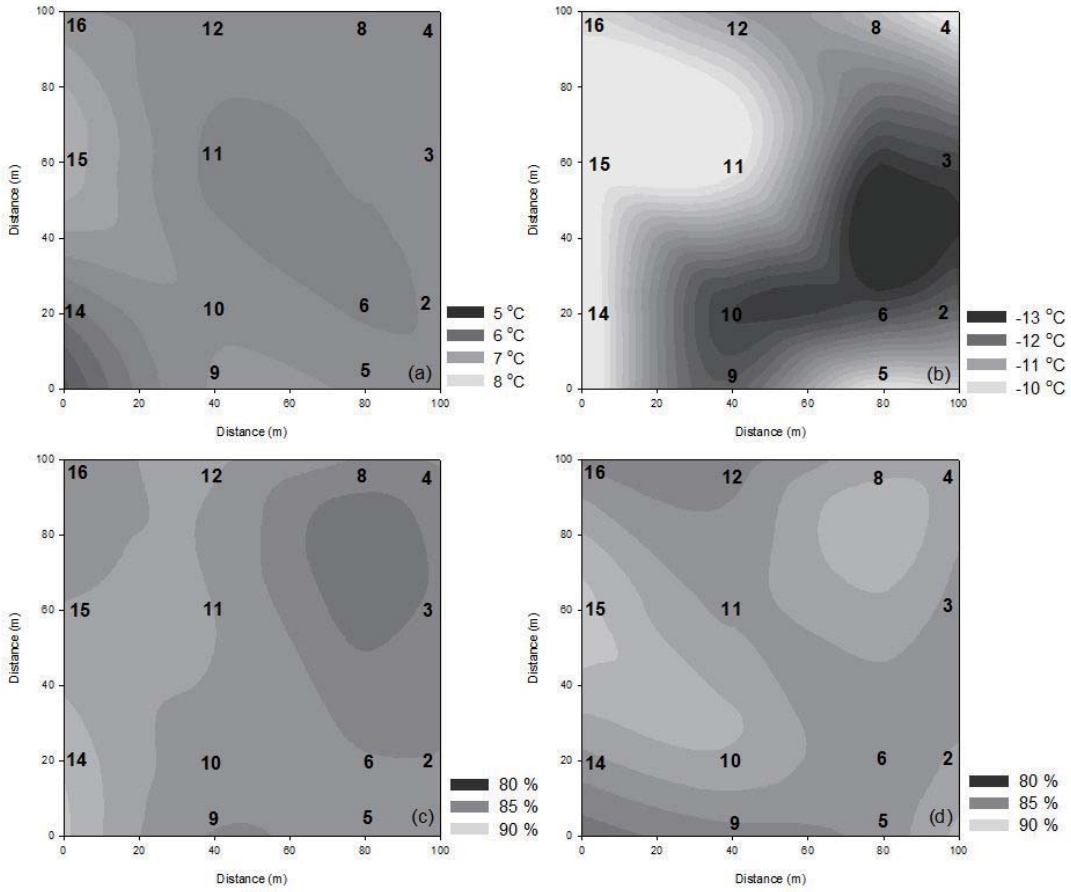


Fig. 191. 13 points of measured site; spatial distribution of temperature(a; 2012. 7～10, b; 2012. 11～ 2013. 1) and relative humidity (c; 2012. 7～10, d; 2012. 11～ 2013. 1).

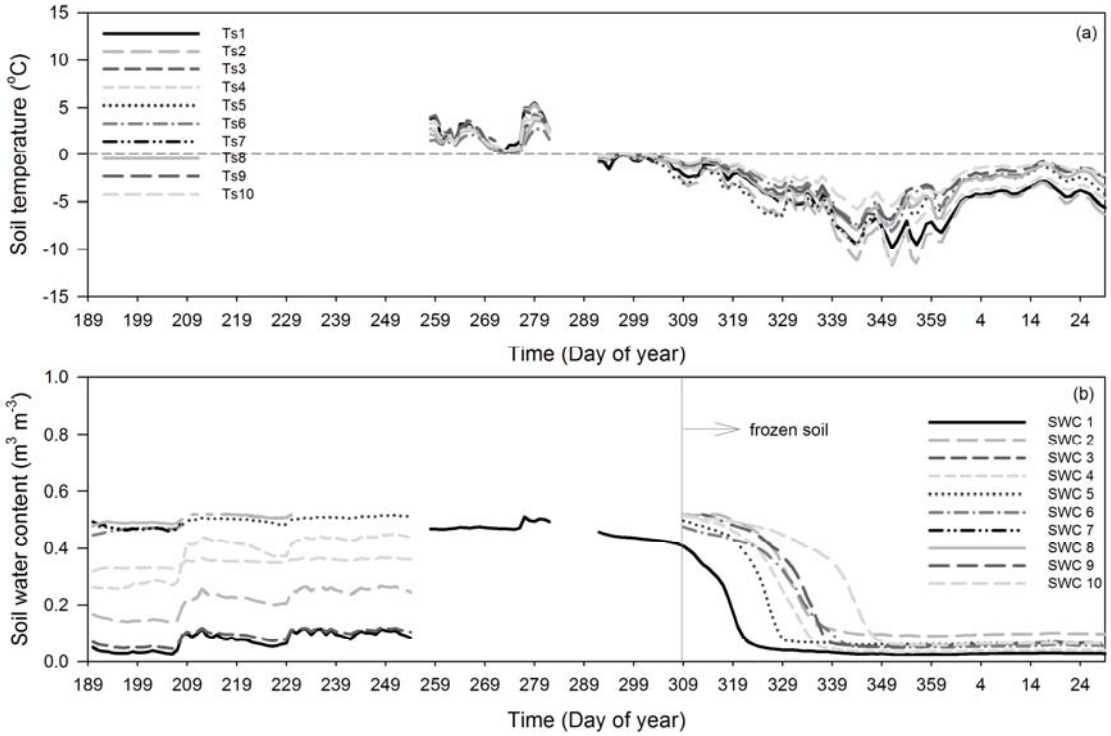


Fig. 192. 10cm depth soil temperature at 2 sites (No. 1, 3)와 10 ~ 40cm depth soil temperature at 8 sites(No. 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)(a, 2012. 9. 4 ~ 2013. 1. 27) and 10cm depth soil moisture at 2 sites(No. 1, 3)(2012. 7. 7 ~2013. 1. 27), and 의 5 ~ 35 cm depth soil moisture(2012. 7. 7~9. 10) and 10 to 40cm depth soil moisture (2012. 9. 14 ~ 2013. 1. 27)(b) at 8 sites(No. 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10).

비교 기간 동안 각 지점의 평균값을 이용하여 공간에 따른 차이를 살펴보았다(Fig. 193a, 193b). 토양 온도는 -1.3 도에서 -3.5도 범위에서 지점별 공간분포를 보였다. 토양 수분은 21%에서 50% 범위를 보였으나, 4지점만으로 전체 공간 분포를 설명하기는 어려웠다.

USN 기술을 이용하여 영구동토 지역의 큰 이슈인 탄소 순환 이해에 필수적인 환경 인자들을 관측하였다. 10지점 또는 16지점에서 관측된 각각의 변수들은 대략 80%의 자료 회수율을 보이며 정상적으로 관측되었다. 토양온도와 토양 수분의 경우는 공간변동이 매우 큰 변수로 공간 확장에 따른 결과가 매우 중요하다. 시간 변화에 따른 CV의 결과에서 확인할 수 있는 것과 같이 토양온도와 토양수분에 대한 큰 공간 변동을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 사용한 USN 기반의 관측 시스템은 이러한 토양 내 변수들의 공간 변동에 대한 정확한 정보를 획득할 수 있다는 것이 매우 큰 장점중의 하나이

다. 아울러 장기간 연속 관측이 가능하므로 시간 변화에 따른 나아가 연 변동까지 관측할 수 있을 것이다. 지면 가까이 설치된 기온자료에서는 겨울철 동안 공간별 차이를 통하여 적설에 따른 정보를 추정할 수 있는 지표 자료로 활용할 수 있었다.

KOPRI
극지연구소

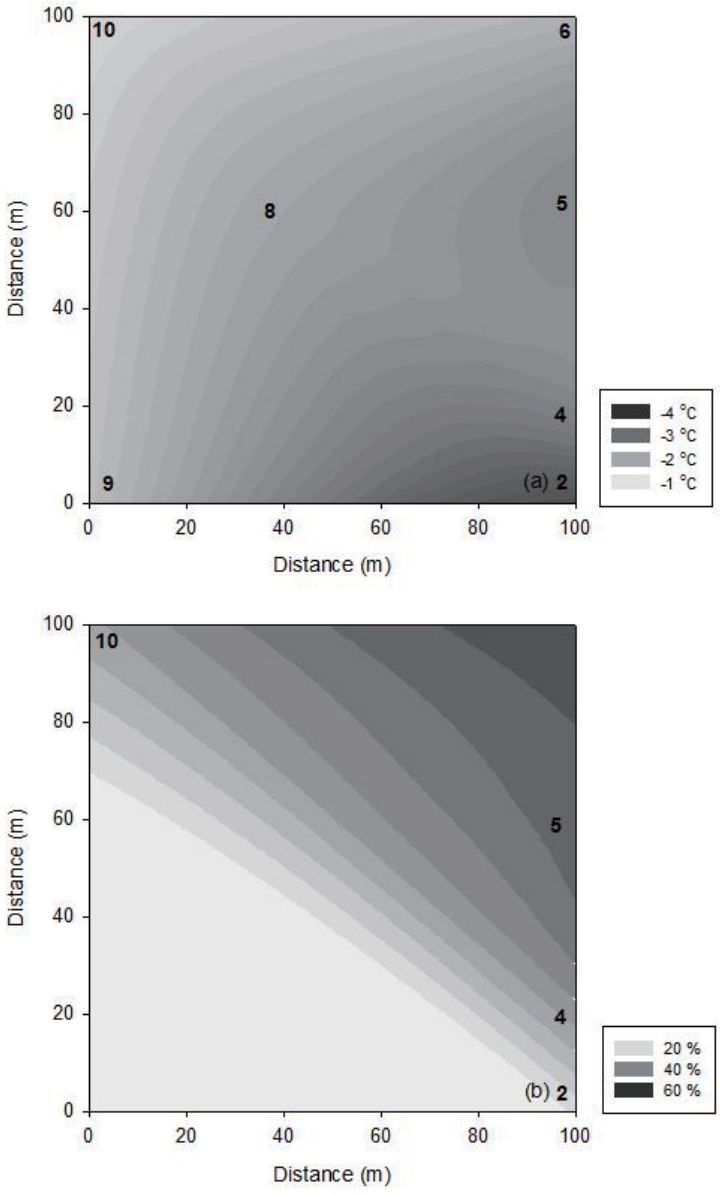


Fig. 193. Spatial distribution of 7 sites soil temperature at measuring area (a; 2012. 9. 14～2013. 1. 27) and relative humidity at 4 sites (b; 2012. 7. 7～9. 10).

(3) 지중 온도 프로파일 센서 데이터

Fig. 194에서 195는 2014년 9월부터 2016년 5월 까지 수집된 온도 데이터이다. 대부분 5월 중순이후에 활동층이 발생하였으며 10월 초순에는 점차 표면까지 동토가 되는 과정을 반복하였으며 깊이에 따라 온도의 편차가 줄어듦을 알 수 있다.

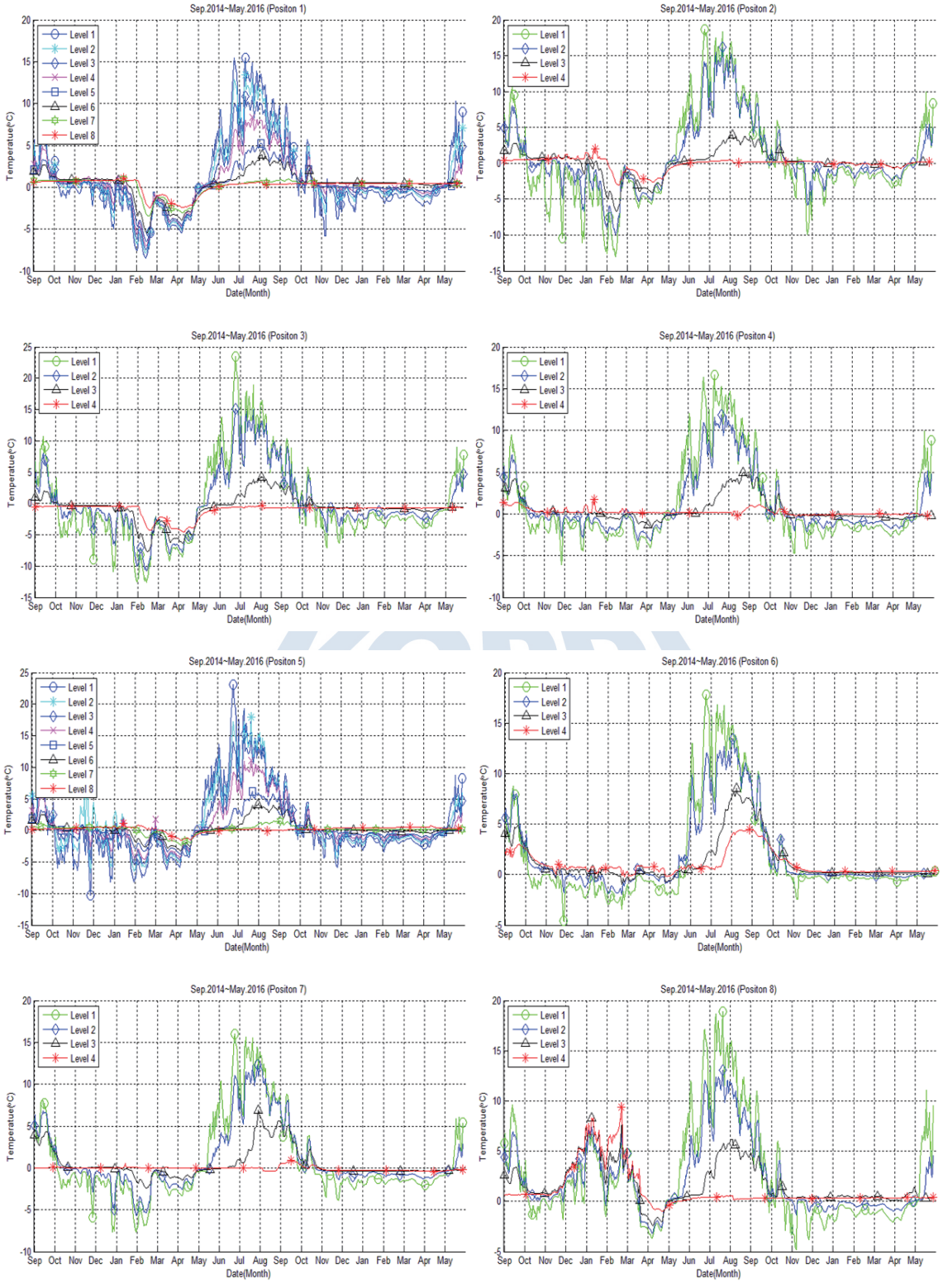


Fig. 194. Measured data of underground temperature profile at sites(1,2,3,4,5,6,7,8).

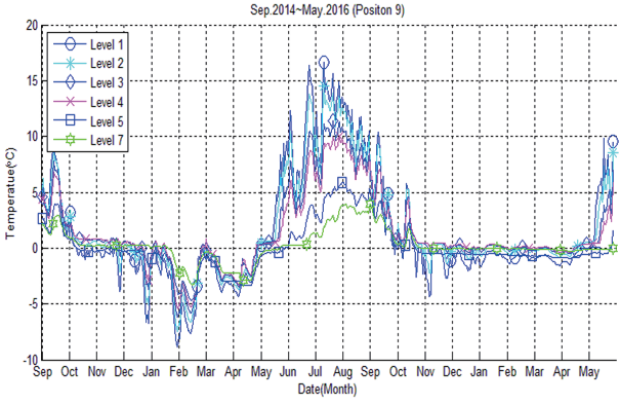


Fig. 195. Measured data of underground temperature profile at point 9.

(4) 지중 수분 함량 센서 데이터

Fig. 196은 2014년 9월부터 2015년 8월 까지 수집된 CS650 센서에서 획득한 온도 및 수분함량 데이터이다. CS650에서 측정된 온도의 경우도 Fig. X-47 및 X-48와 같은 변화 양상을 보이고 있었다. 특히 CS650에 나타난 함수비의 경우 활동층이 발생하는 5월에서 9월까지의 함수비가 급득함을 알 수 있었다.

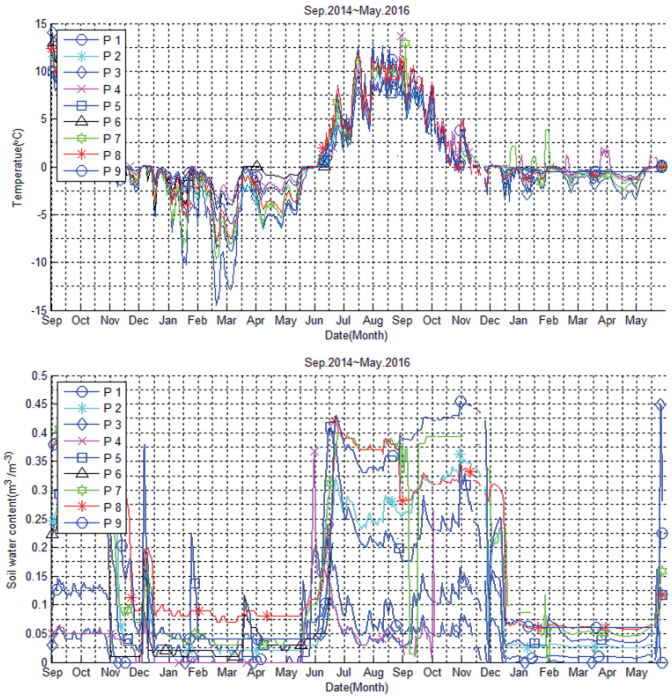


Fig. 196. Underground temperature data (above) and moisture data(down) at sites(1~9).

6. 러시아 동토 기반 거점 구축

가. 러시아 북극권 동토 기반 한-러 공동연구의 중요성

○ 러시아의 북극지역 개발과 과학연구 관심 증대

- 러시아의 신 개념 북극정책 추진 계획(‘2020 북방국가안보전략(National Security Strategy to 2020’ , 2009년 발표)
- 러시아 연방정부 차원에서 과학기술 발전 및 장비개발, 지리적 탐사활동 강화, 지역경제 활성화 등 주제로 향후 5년 동안 약 2,220억 루블(한화 약 3조 6천억원) 투자 계획 중
- 북극 과학연구 수행 기술 및 장비개발에 박차 : 전용 슈퍼원자력 쇄빙선 및 전담 헬기 개발 중, 환경변화에 따른 북극해 및 동토층 심층 탐사(대륙붕 석유조사, 고환경 분석, 지질, 대기, 생태 분야 등) 계획 중

※ 블랙카본 배출량 저감 ‘Valdai 프로젝트’ , ‘Tundra 프로젝트’ 개시(2015)

※ 러-중 대규모 북극공동프로젝트(천연자원 생산, 환경연구 등) 계획 중

- 북극권 동토 기반 관측망 구성, 생태계 보호, 북극항로 이용 등 중점 수행, 2015년 볼세비키 섬에 Veranova 기지 구축 중이며, 미국, 독일과 함께 북극권 환경변화 종합연구 수행 중

○ 우리나라의 ‘북극정책기본계획’ (2013년 발표) 실천 및 한-러 북극연구 강화

- 우리나라의 효과적이고 체계적인 북극연구 및 국제협력 강화 계획에 따라, 북극이사회 국가 중 최대의 북극해 연안과 동토 지역을 갖고 있는 러시아와의 협력 강화 필요
- 우리나라가 현실적으로 북극항로개발이나 북극자원개발을 추진하기 위해 러시아와의 북극 지역개발, 자원개발, 환경변화의 과학적 연구 등에 대한 체계적이며 효과적 접근 방안 마련과 실질적 과학 연구 기반 조성 필요
- 과학적 측면에서는 러시아 AARI (Arctic and Antarctic Research Institute)가 운영주체인 북극 관측소를 공동 활용 및 관측 거점을 확보하며, 북극 동토지역 환경변화 연구 등 한-러 공동연구 수행 필요

나. 추진경과(진행 사항 등)

○ 극지연구소(KOPRI)-AARI 연구자간의 공동연구 주제 및 방법에 관한 논의 기 완료 (부록 1) 및 기관간 MoU 문건 작성중 (부록 2)

※ 러시아 전문가 초청 한-러 북극 과학연구 논의

- 제 1차 회의, 2015년 1월 : 극지연구소
- 제 2차 회의, 2015년 5월 : 극지연구소
- 제 4차 회의, 2016년 5월 : 극지연구소
- 러시아 극지연구 동향 소개
- KOPRI-AARI 간 북극권(남극 포함) 공동연구 논의
- 러시아 북극기지 공동활용 및 상호 인력교환 등 논의

※ 극지연구소 연구원 AARI 방문 공동연구 논의 및 MoU 문건 작성

- 제 4차 회의, 2016년 6월 : 러시아 St. Petersburg

※ 러시아 '국제북극자원및연안연구' 컨퍼런스 참석(2015. 9, 아르항겔스크)

- 대한민국 극지연구 동향 소개
- 한-러 간 북극공동연구 논의 등

○ AARI의 입장은 대한민국정부의 요청에 의한 한-러 정부간 공식 논의가 선결 조건임을 강조하며, 국내과학자의 현장 방문 등 구체적 연구활동의 시작을 유보하고 있는 단계임

○ AARI 관련 러시아 정부 기관 :

(1) Ministry of Education and Science of the Russian Federation
(2) Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation
(3) Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation

KOPRI 극지연구소

다. 러시아의 북극연구활동 현황

○ AARI 는 3개의 북극 기지 운영 중 (부록 3)

○ 연구 후보지 1순위로 논의된 Baranova 기지(부록 3중 지도 표시 1번)는 북극해의 볼쉐비키섬에 위치하고 있으며 북극기후변화 국제공동연구기지로 활용을 시작하는 단계임

라. 공동연구 제안서 주요 내용

○ AARI 운영중인 Baranova 기지 (또는 Tiksi, Samoylovsky 관측소) 공동활용(우리나라의 러시아 북극 연안 동토층 관측 거점으로 확보)

○ 북극 동토-대기간 에너지, 온실기체 교환 및 환경오염 한-러 공동 연구 수행

마. 기대효과

○ 한-러 양국 과학자간 북극 동토 공동연구의 구체적인 시작

○ 우리나라의 러시아 동토 지역 관측 거점 확보 및 러시아 북극 관측소의 공동 활용으로 글로벌 이슈인 북극 동토층 환경변화 연구의 주제-지형적 영역 확대(시베리아 환경변화에 따른 한반도 기후 파급효과 예측 강화)

○ 우리나라의 북극해 북서항로개발시 과학적 기초자료 확보 및 제공 가능

KOPRI
극지연구소

<부록 1 : KOPRI-AARI 간 공동연구 주제 및 방법에 관한 논의>

Korea(KOPRI)-Russia(AARI) cooperative climate change studies in the Arctic
대한민국 극지연구소 - 러시아 남북극연구소 간 북극 동토기반 공동연구 (안)

1. 파트너 : AARI (Arctic and Antarctic Research Institute)
   Prof. Alexander Makshtas (maksh@aari.ru)
   Dr. Sergey Priamikov (priamiks@aari.nw.ru)
   Dr. Petr Bogorodskii (bogorodski@aari.ru)
   Dr. Alexander Makarov (makarov@aari.ru)

   KOPRI (Korea Polar Research Institute)
   Dr. Young Jun Yoon (yjyoon@kopri.re.kr)
   Dr. Yoo Kyung Lee (yklee@kopri.re.kr)
   Dr. Bang Yong Lee (bylee@kopri.re.kr) : CAPEC Project Manager

2. 연구분야 : 러시아 북극 기지 공동활용 및 신규 확보를 통한 북극 동토기반 공동연구 수행 제안 중
3. 관측후보지 : 러시아 북극 기지(Baranova 기지, Tiksi, Samoylovsky 등 : 별첨 2)
4. 연구 제안 내용 : 아래 참고

Korea(KOPRI)-Russia(AARI) cooperative climate change studies in the Arctic

A. Suggestions for framework of joint studies

Among variety of processes and parameters influencing the Arctic climate, Korea Polar Research Institute (KOPRI) will focus on the three research themes as the first step for cooperative studies with the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI).

- Observing climate, and water and energy exchange processes between permafrost and the atmosphere
- Characterization and quatificatiion of greenhouse gas emissions from the permafrost
- Examining microbial activity and soil organic carbon along the permafrost thawing gradient

B. Background

About a quarter of the northern hemisphere can be defined as permafrost and large quantities of organic carbon are stored in permafrost within Arctic regions. Based on

some recent modeling studies, a large part of the postglacial atmospheric CO2 rise can be attributed to mobilization of material stored in permafrost. Up to now, there are still substantial uncertainties about the sensitivity of the carbon cycle. In order to understand how permafrost react in the future Arctic warming, it is important to identify and quantify key processes influencing and controlling changes in the heat and water budget, the vulnerability of soil oranic carbon through the degradation of the Arctic permafrost. Furthermore, terrestrial ecosystem responds rapidly to climate change in the Arctic. Potential influence of altered ecosystem functioning and soil C dynamics to climate-carbon feedbacks should be tackled

C. Specific targets/actions

- KOPRI will set up instruments observing climate, fluxes of energy and carbon in sequence at a site
- To assure quality and continuity of measurements, KOPRI will provide the necessary support for routine maintenance and calibration (spare parts, gas standard etc.).

D. Work programmes from KOPRI

The cooperation programme aiming to implement and operate a site for Artic climate research, three *WPs* are suggested at the site considering

WP1 - Monitoring of radiation and thermal properties of active layer
Energy exchanges between the atmosphere and permafrost

This WP1 aims to collect or share basic data including radiation budget at the surface, albedo, soil temperature and soil water content at some depths to monitor environment change at, above and beneath the interface and to help understanding of key processes between the atmosphere and permafrost.
Eddy covariance system will be installed to characterize and quantify sensible and latent heat fluxes between the atmosphere and permafrost. Combining them with basic data, AARI-KOPRI team will diagnose current state of permafrost in terms of the energy exchanges and related environment change. In addition, turbulent processes for different periods of the year and for different atmospheric stability conditions will be addressed and ameliorate parameterisation at the site.

WP2 - Characterization and quantification of Greenhouse gas exchange

Fast response gas analyser will be added to the eddy covariance system to measure fluxes of carbon (ex. methane) between the atmosphere and permafrost. Annual budget of carbon will be quantified and its inter-annual variation will be evaluated

using key parameters including microbial activity. To this end, year round operation is required to evaluate annual budget, especially in winter.

WP3 – Investigating the microbial activity changes and organic carbon transformations along the thawing gradient in tundra

Microbial responses to climate change and their climate feedbacks remain little understood in the Arctic. KOPRI will examine the changes in microbial activity and community composition at multiple depths in arctic permafrost. The greenhouse gas emission by microbial activity will be further inferred by investigating organic carbon transformations along the thawing gradient. In addition, vulnerability of soil organic carbon will be assessed by characterization of soil organic carbon.

E. Research schedule proposed by KOPRI

Year 1: Joint research planning
Visits to AARI arctic stations (Tiksi, Baranova, etc)

Year 2: AARI-KOPRI joint workshop (research planning)
1st field campaign at the agreed site(Energy flux system)

Year 3: 2nd field campaign at the agreed site(Greenhouse gas flux system)

Year 4: AARI-KOPRI joint workshop (joint field study and data policy planning)
3rd field campaign at the agreed site(ecological field study)

Year 5 – onwards
- AARI-KOPRI joint workshop every 2 years
- Intermediate visits to the agreed research site
- Joint publication, etc

KOPRI 극지연구소

<부록 2 : KOPRI-AARI 간 작성중인 기관간 MoU (안)>

MEMORANDUM OF UNDERSTANDING
BETWEEN
THE KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE (KOPRI)
AND
THE ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH INSTITUTE OF ROSHYDROMET (AARI)
ON COOPERATION IN RESEARCH AND LOGISTICS IN POLAR REGIONS

The State Science Center of Russian Federation – The Arctic and Antarctic Research Institute of ROSHYDROMET (AARI) and **The Korea Polar Research Institute (KOPRI)** (hereinafter referred to as the"Parties") as the leadagencies for the national polar programs of the irrespective countries,

NOTING the past and ongoing cooperation between the Parties in a range of subjects and on a number of occasions;

CONFIRMING their mutual interest in further developing and strengthening their cooperation in polar research and operation on the basis of this Memorandum of Understanding (hereinafter "MOU");

RECOGNIZING that this MOU establishes a framework for this cooperation in join research and exchanges on the subjects of mutual interest;

RECOGNIZING the importance of maximizing efficiency and effectiveness through shared access to infrastructure resources and complementary expertise;

HAVE COME to the following understanding:

ARTICLE 1
PURPOSE
KOPRI and AARI are committed to jointly developing a close working relationship in order to achieve the following aims:
1. Cooperate in the study of polar environments and their variability by coordinating and sharing resources and data
2. Coordinate and integrate mutual intellectual activities to enable more efficient operations and better utilization of resources
3. Explore opportunities for cooperation and collaboration in logistics in Polar Regions

ARTICLE 2

COOPERATIVE RESEARCH AND EXCHANGE OF PERSONNEL

To advance these aims, both Parties have formally acknowledged the following commitments:

1. Both Parties endeavor to facilitate the exchange of personnel, data and other resources in areas of mutual interest
2. Both Parties strive to integrate research programs where appropriate and cost effective
3. Both Parties agree opportunities for cooperation in polar operation and logistics for their mutual benefit

ARTICLE 3

ADMINISTARIVE ARRANGEMENTS

1. Both Parties agree to the establishment of appropriate mechanisms to advance these commitments
2. Both Parties agree to report to their national communities on their progress in advancing these aims

ARTICLE 4

ITEMS OF COOPERATION

To further these commitments in this MOU it is proposed to develop individual relating to specific research ventures or logistic cooperation. Such annexes will be implemented following approval by both Parties.

ARTICLE 5

PERIOD OF VALIDITY AND DISCONTINUATION

Both Parties agree to review this Memorandum of Understanding from time to time to ensures it remains relevant, and may do so at the request of either party. .

Cooperation under this MOU will continue unless terminated at the request of either of the parties from the date of its signature by both Parties.

Two copies of this Memorandum of Understanding are issued in English. Each party shall retain one copy of the originals.

FOR THE KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE OF THE REPUBLIC OF KOREA	**FOR THE ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH INSTITUTE OF ROSHYDROMET OF RUSSIA**

KOPRI 극지연구소

ANNEX TO MEMORANDUM OF UNDERSTANDING

BETWEEN

THE KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE (KOPRI)

AND

THE ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH INSTITUTE OF ROSHYDROMET (AARI)

This Annex is derived from the Memorandum of Understanding between THE KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE (KOPRI) and THE ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH INSTITUTE OF ROSHYDROMET (AARI), which is signed together on the same date and outlines cooperative measures that will be taken for the joint studies on the impact of climate changes on permafrost and ecosystems and its effect in atmosphere in the area of Severnaya Zemlya archipelago and around the research base “Cape Baranova” (Bolshevik Island) in particular.

1. KOPRI will install research equipment with support from Russian personnel and utilize AARI’s Arctic observatory to undertake collaborative research on the monitoring of climate change impacts.
2. Data generated from the KOPRI’s research equipment installed at the AARI observatory will be provided to KOPRI, and will be used for joint research purposes.
3. Principal Investigators of KOPRI and AARI will share field data in an equal and fair manner.
4. KOPRI will bear the cost for using the AARI observatory and all expenses from shipping, installation and maintenance of the research equipment.
5. The Parties will coordinate the overall protocol and arrange cooperation in the production, analysis, and publication of data via mutual consultation and agreement between the Principal Investigators (PIs) nominated to represent his or her respective Party.
6. The Parties will endeavor to promote the exchange of expertise and to further develop cooperative efforts in research and education.
7. This Annex is issued in English, and will take effect upon signature by both Parties. Any amendment of this Annex will require written approval of both Parties.

FOR THE KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE OF THE REPUBLIC OF KOREA	**FOR THE ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH INSTITUTE OF ROSHYDROMET OF RUSSIA**

KOPRI 극지연구소

<부록 3 : AARI 운영 북극 기지 현황>

1. Baranova 기지

○ 운영주체 : AARI

○ 현지 인력 : 운영인력이 연중 7-8인 상주하며, 하계기간중 추가 방문 연구수행

○ 운영기간 : 구소련 붕괴 후 운영중지, 2013년 Drifting North Pole station 과학자들을 Baranova 기지로 이동시키면서 재가동 시작함

○ 위치 : Severnaya Zemlya archipelago 의 Bol´shevik 섬에 위치 (그림 (1) 참고)

- AARI가 현재 Tiksi 관측소를 예로 들면서, 북극해 제 2 국제기지로 개발 중
- 연구대상 : 지표 열수지, 구름-에어로졸, 온실기체, 동토 변화, 해빙, 빙하 등의 연구 개발 중
- 이동 경로 : 항공기, 헬기 이용 (St. Petersburg에서 기지까지 편도 약 5일 소요)

2. Tiksi Observatory

○ 운영주체 : Yakutia Hydrometeorological Observatory (사하공화국)

○ 현지 인력 : 현지 고용된 운영 인력이 상주함

○ 운영기간 : 2005년 ~ 현재

○ 과학 프로그램 운영 주체 및 국제협력 :

- 운영 기관 : AARI (위치 : 그림 (??) 참고)
- 국제협력 : 미국 해양대기국 (NOAA), 핀란드 기상연구소 (FMI), 일본 극지연구소 (NIPR)

- 연구대상 : 에어로졸, 기상관측, 지표 복사, 구름연구, 오존모니터링, 에너지-온실기체 수지연구, 대기오염, 온실기체 농도 등

3. Samoylovsky 기지

- 운영주체 : Russian Academy of Science
- 운영기간 : 1998부터 AWI와 공동으로 'Russian-German expedition'
- 위치 : Tiksi 관측소에서 약 80 km 거리, 이동수단 배, 또는 트럭 (그림 1 참고)
- 연구대상 : 레나강 델타지역의 지형변화, 동토 변화, 에너지 수지 연구 등 델타-동토-대기 융합연구 수행

4. Drifting Stations

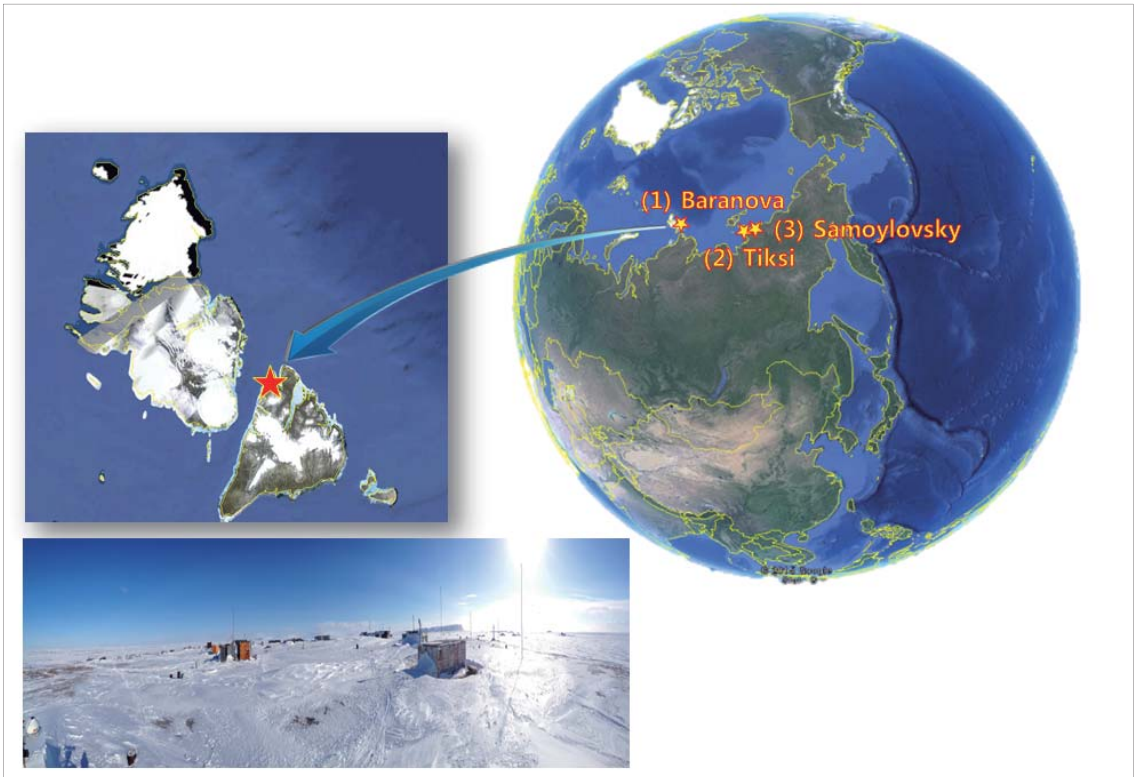
- 운영주체 : AARI
- 운영기간 : 1935년 ~ 2012년까지 약 40 차례의 expedition
- 북극 해빙위에서 Camp 등 현장관측 시스템 운영
- 연구대상 : 기상, 해빙, 에어로졸, 존데, 무인 항공기관측, 태양 및 지구 복사, GPS study, 해양관측 등

** 극지연구소(KOPRI)의 한-러시아 공동 북극 연구 거점 후보지 비교**

구분	Baranova 기지	Tiksi 관측소	Samoylovsky 기지
공동 연구 가능 분야	• 온실기체-에너지 등플럭스 연구 • 빙하 물리 구조, 지질 등 지구물리 연구 • 기지 중심의 해빙, 해양 수송 등에 관한 연구	• 온실기제 실시간 플럭스의 공간적 변화 • 온실기체 거동에 영향을 주는 토양과 미생물 연구	• 온실기체 실시간 플럭스의 공간적 변화 • 온실기체 거동에 영향을 주는 토양과 미생물 연구 • 델타 중심의 수문 연구, 지형변화 연구
장점	• 현재 기지를 활용한 연구주제 개발단계이므로 극지연구소-AARI 간 공동연구 용이 • 현지 상주인력 활용 가능 • 대기-지구물리-해빙 등 모든 분야에 대해 연구주제 선점 가능 • AARI가 국제 연구 파트너를 모색 중이므로 시작단계에서 AARI의 협조 용이	• 접근성 양호	• 접근성 상대적 양호
단점	• 접근성 원활하지 않아 연구원 파견, 하계연구에 애로 예상 • AARI 가 기지의 본격적인 재가동을 시작하는 단계이지만, AARI의 정책적 결정에 공동연구가 영향을 받을 수 있음	• 동토-대기 상호 영향에 관한 광범위한 연구가 이미 수행중임 • 러시아-미국-핀란드-일본 등 국가들의 환북극 연구 활발, 우리나라의 수월성 확보 미흡 예상	• 동토-대기 상호 영향, 델타 수문-지형 변화 등에 관한 광범위한 연구가 이미 수행 중, 우리나라의 수월성 확보 미흡 예상

※ 미래부 환북극 동토층 환경변화 연구 사업에서 추진하려는 거점 1순위 Baranova 기지, 2순위 Tiksi 관측소. 단, 러시아 동토층은 타 지역에 비해 상대적으로 넓기 때문에 상기 2곳 모두 거점으로 활용 추진할 수도 있음

KOPRI 극지연구소



<Baranova station, Bolshevik Island>

AARI의 북극 동토 기반 관측소 위치: (1) Baranova 기지, (2) Tiksi 관측소, (3) Samoylovsky 기지

극지연구소

7. 북극 에어로졸의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성에 관한 연구 (광주과학기술원 위탁과제)

가. 연구 요약

총 11,937 km에 달하는 아라온의 항로 구간을 따라 북극해와 태평양 상에서 변화하는 에어로졸의 다양한 물리화학적 특성들을 DMPS (differential mobility particle sizer), CPC (condensation particle counter), HVTDMA (hygroscopicity and volatility tandem differential mobility analyzer), TEM/EDS (transmission electron microscopy/energy dispersive spectroscopy), Aethalometer 등 다수의 측정 장비를 이용하여 연속 측정하였다. 그리고 Ny-Ålesund (78.6° N, 11.6° E), Svalbard Island에 위치한 Gruvebadet 대기관측소에서 Nano-SMPS (scanning mobility particle sizer)를 이용하여 3 nm 에서 60 nm 범위의 에어로졸 크기에 따른 수농도 분포특성을 실시간 연속 모니터링 하였고 TEM/EDS를 이용한 형태학적 및 화학적 원소 구성성분 특성 연구를 수행하였다. 다양한 에어로졸의 물리화학적 특성 측정 데이터들을 HYSPLIT MODEL (air mass back trajectory)을 이용하여 획득한 장거리이동 에어로졸 특성 데이터들과 비교분석하였으며 에어로졸의 발생원, 생성기작, 이동경로, 기후변화 영향을 연구하였다.

나. 연구결과

극지연구소 쇄빙연구선 아라온호에 (ARAON) 아래 그림(Fig. 197)과 같이 DMA (differential mobility analyzer), RH conditioner, heated tube, CPC 3010, NI board, computer로 구성된 HVTDMA system과 Aethalometer, CPC 3772, CPC 3776, 그리고 TEM sampler등을 이용하여 다양한 물리화학적 에어로졸 특성 데이터들을 획득하였다.

KOPRI 극지연구소

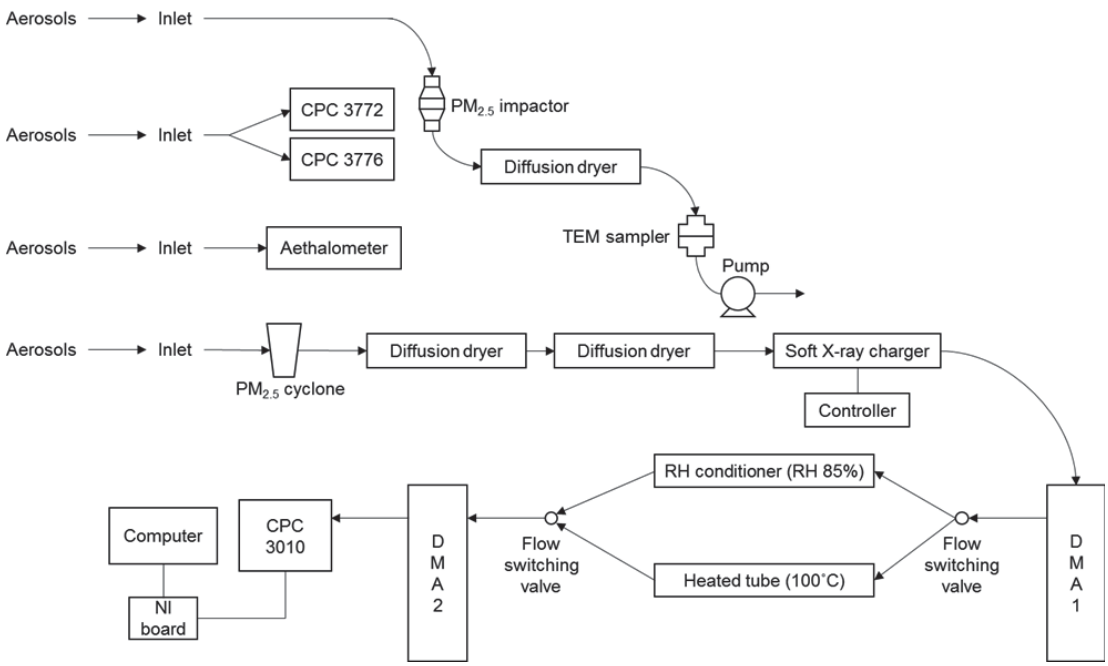
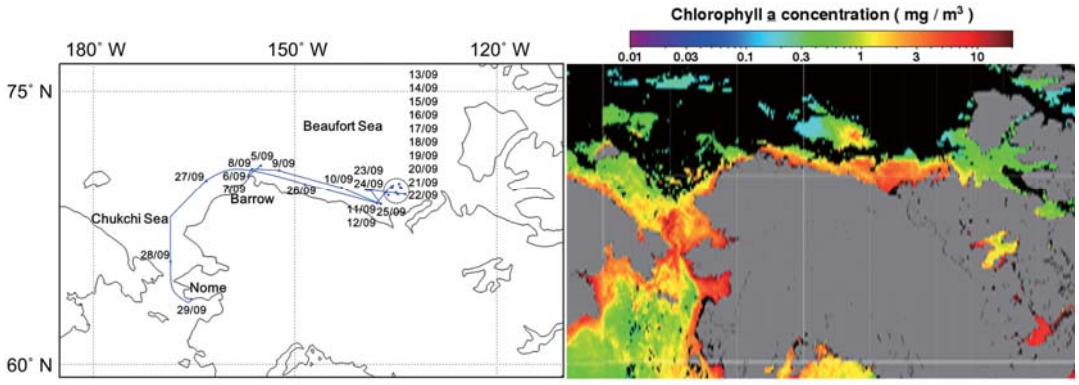


Fig. 197. Systematic diagram of aerosol measuring system on ARAON installed.

아라온의 항로는 각각 Cruise 1 (북극해: 2013년 9월 7일~2013년 9월 29일)과 Cruise 2 (태평양: 2013년 9월 29일~2013년 10월 13일)로 구분하였다. Cruise 1의 항해거리는 5,862 km이며 Cruise 2의 항해거리는 6,075 km로 총 11,937 km에 달하는 아라온의 항로를 따라 북극해와 태평양 상에서의 에어로졸 특성 변화들을 측정하였다(Fig. 198). 아라온은 Cruise 1 구간에 Barrow를 출발하여 Beaufort Sea와 Chukchi Sea를 거친 뒤 Nome에 도착하였고 Cruise 2 구간에서는 Nome을 출발하여 Bering Sea, Sea of Okhotsk, East Sea를 지나 대한민국 광양항에 도착하였다. 아라온의 항해구간과 함께 나타낸 Biological activity의 척도로 사용할 수 있는 Chlorophyll-a 농도 위성데이터를 (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/) 바탕으로 Cruise 2와 비교하였을 때 Cruise 1 구간에서 상대적으로 강한 Biological activity 상태를 확인하였다.

(a)



(b)

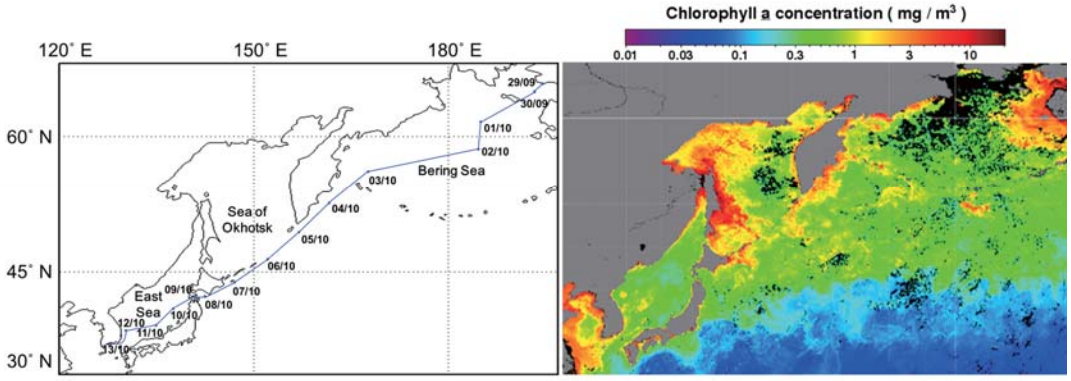


Fig. 198. ARAON cruise line at (a) Arctic Ocean (cruise 1) (b) Pacific ocean (cruise 2), and satellite data of chlorophyll-a (mg/m^3).

입자생성 이벤트는 (nucleation event) 두 대의 CPC를 (CPC 3772, CPC 3776) 이용하여 모니터링 하였다. 측정에 사용된 CPC 3776은 크기가 2.5 nm 이상의 에어로졸 수 농도를 측정할 수 있으며 반면 CPC 3772는 크기가 10 nm 이상의 에어로졸 수 농도를 측정할 수 있다. 따라서 위 두 대의 CPC 수농도 측정결과 차이는 크기가 2.5 nm에서 10 nm 범위의 에어로졸 수농도를 의미하며 nucleation event를 확인할 수 있는 데이터로 활용하였다. 대기 중 BC (black carbon) 농도를 (ng/m^3) 측정하기 위해서 Aethalometer (AE22, Magee Scientific Co., USA)를 사용하였으며 풍향과 풍속 자료와 함께 Ship emission 혹은 Anthropogenic source의 영향을 판단하는 자료로써 활용이 되었다.

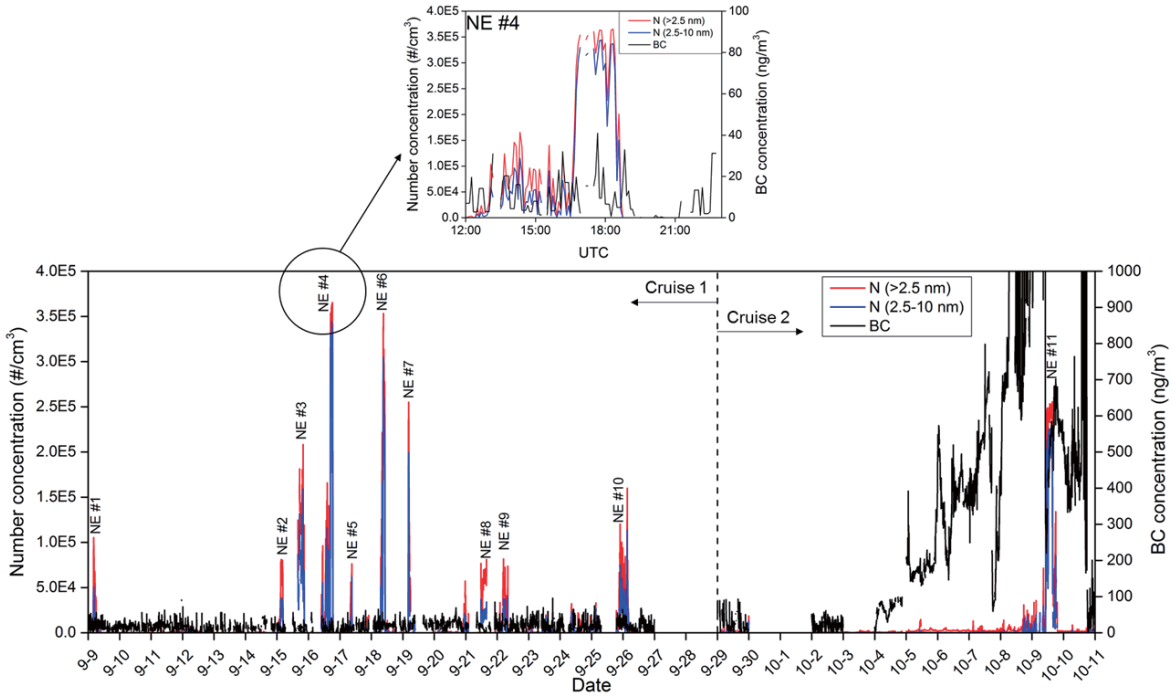


Fig. 199. Aerosol number concentration(#/cm^3) and BC concentration (ng/m^3) range from 2.5 nm～10 nm and 2.5 nm～10 μm during measurement period.

Fig. 199는 관측기간 동안 2.5 nm 이상의 에어로졸 수농도와 2.5 nm～10 nm 범위의 수 농도 그리고 BC 농도의 변화를 나타낸 자료이다. Cruise 1 구간에서 급격한 2.5 nm와 10 nm 사이의 에어로졸 수농도 증가를 확인할 수 있으며 이는 cruise 1 구간에서의 빈번한 Nucleation event를 의미한다.

Cruise 1 구간에서 상대적으로 낮은 BC 평균 농도가 (20 ng/m^3) 측정되었는데 이는 Anthropogenic source로 인한 영향이 매우 적기 때문으로 사료된다. 선행연구에서는 Remote marine 지역보다 Coastal 지역에서 입자생성 이벤트가 자주 발견이 되며 (Heintzenberg, Leck *et al.* 2004;Yoon, O'Dowd *et al.* 2006;Modini, Ristovski *et al.* 2009;Whitehead, McFiggans *et al.* 2009) Remote marine 지역에서는 Iodine compounds와 Sulfuric acid에 의한 입자생성과 성장은 가능하지만 일부분만 큰 입자로 성장이 가능하다고 밝히고 있다 (Vuollekoski, Kerminen *et al.* 2009). 측정기간 동안 Remote marine 지역에서 관측된 Nucleation event들은 해당 구간에서의 (Cruise 1) 활발한 Biological activity와 관련된 것으로 판단된다. 활발한 Biological activity에 의한 Organic matter의 경우 입자생성과 성장에 기여할 수 있으며 특히 이러한 입자들은 구름형성 응축핵 (CCN) 발생에 있어서도 중요한 역할을 할 수 있다.

Cruise 2의 경우 Cruise 1 (Marine influence)과 달리 빈번한 Continental influence가

관찰되었고 오직 1회의 Nucleation event가 관측되었으며 Continental/anthropogenic influence에 의해 에어로졸 질량과 BC 농도가 점차 증가하였다(Table 14, 15).

Table 14. Summary of characteristics of weather, sea water, and aerosol on Cruise 1 and 2

Cruis	Cruise 1	Cruise 2
Date	9/7/2013-9/29/2013	9/29/2013-10/13/2013
Major locations	Arctic Ocean (Barrow, Beaufort Sea, Nome, and Chukchi Sea)	Pacific Ocean (Nome, Bering Sea, Sea of Okhotsk, East Sea, and Gwangyang)
Average ambient temperature	-0.1 ± 1.1°C	13.1 ± 3.1°C
Average RH	91 ± 5%	73 ± 9%
Average wind speed	8.8 ± 2.0 m/s	12.9 ± 3.1 m/s
Average wind direction	5.9 ± 23.4°	4.0 ± 23.6°
Average seawater temperature	2.6 ± 1.0°C	15.4 ± 3.5°C
Average chlorophyll-a concentration	3.4 ± 1.1 mg/m^3	1.0 ± 0.4 mg/m^3
Average number concentration of particles larger than 10 nm	4,971 ± 5,987 #/cm^3(CPC3772)	3,648 ± 3,812 #/cm^3(CPC3772)
Average number concentration of particles larger than 2.5 nm	11,910 ± 19,360 #/cm^3(CPC3776)	9,159 ± 17,780 #/cm^3(CPC3776)
Average mean particle size	193 ± 72 nm	197 ± 24 nm
Average black carbon concentration	20 ± 9 ng/m^3	502 ± 531 ng/m^3

KOPRI 극지연구소

Table 15. Measured data of aerosol number concentration, BC concentration, and sea water temperature under Nucleation event

Date	Time	Air mass type	N(>2.5 nm) (#/cm^3)	N(2.5-10 nm) (#/cm^3)	N(2.5-10 nm)/N(>2.5 nm) (%)	BC (ng/m^3)	Seawater T (°C)
9/9/2013	04:00-06:30	Marine (Beaufort sea)	45,359 ± 12,881	16,390 ± 6,563	32 ± 5	22 ± 7	2.4 ± 0.1
9/15/2013	01:25-04:40	Marine (remote Arctic Ocean)	39,842 ± 13,696	16,172 ±6,446	39 ± 4	8 ± 3	3.2 ± 0.1
9/15/2013	16:05-21:00	Marine (remote Arctic Ocean)	114,357 ± 25,694	68,993 ± 19,168	56 ±7	11 ± 5	3.3 ± 0.2
9/16/2013	09:55-18:40	Marine (remote Arctic Ocean)	101,457 ± 58,995	77,481 ± 54,829	52 ±12	12 ± 5	2.5 ± 0.2
9/17/2013	07:40-09:25	Marine (remote Arctic Ocean)	31,188 ± 10,431	13,567 ± 7,479	40 ± 10	8 ± 4	2.4 ± 0.1
9/18/2013	07:35-10:50	Marine (Beaufort sea)	161,795 ± 58,771	124,705 ± 50,275	66 ± 9	22 ± 5	0.4 ± 0.2
9/19/2013	04:05-06:30	Marine (Beaufort sea)	108,572 ± 36,289	61,922 ± 31,699	46 ±11	16 ± 5	2.0 ± 0.1
9/21/2013	11:35-15:55	Marine (Beaufort sea)	53,383 ± 7,654	16,885 ± 3,802	30 ± 3	10 ± 4	0.9 ± 0.1
9/22/2013	04:10-08:05	Marine (Beaufort sea)	25,650 ± 12,063	10,876 ± 5,928	41 ± 9	26 ± 5	0.8 ± 0.1
9/25/2013 - 9/26/2013	20:55-04:45	Marine (remote Arctic Ocean)	48,462 ± 15,588	23,896 ± 10,178	45 ± 8%	26 ± 7	0.3 ± 0.1
10/9/2013	08:05-19:10	Continental (China and Japan)	161,296 ± 45,567	129,738 ± 45,708	66 ± 13	538 ± 52	21.3 ± 0.6

KOPRI 극지연구소

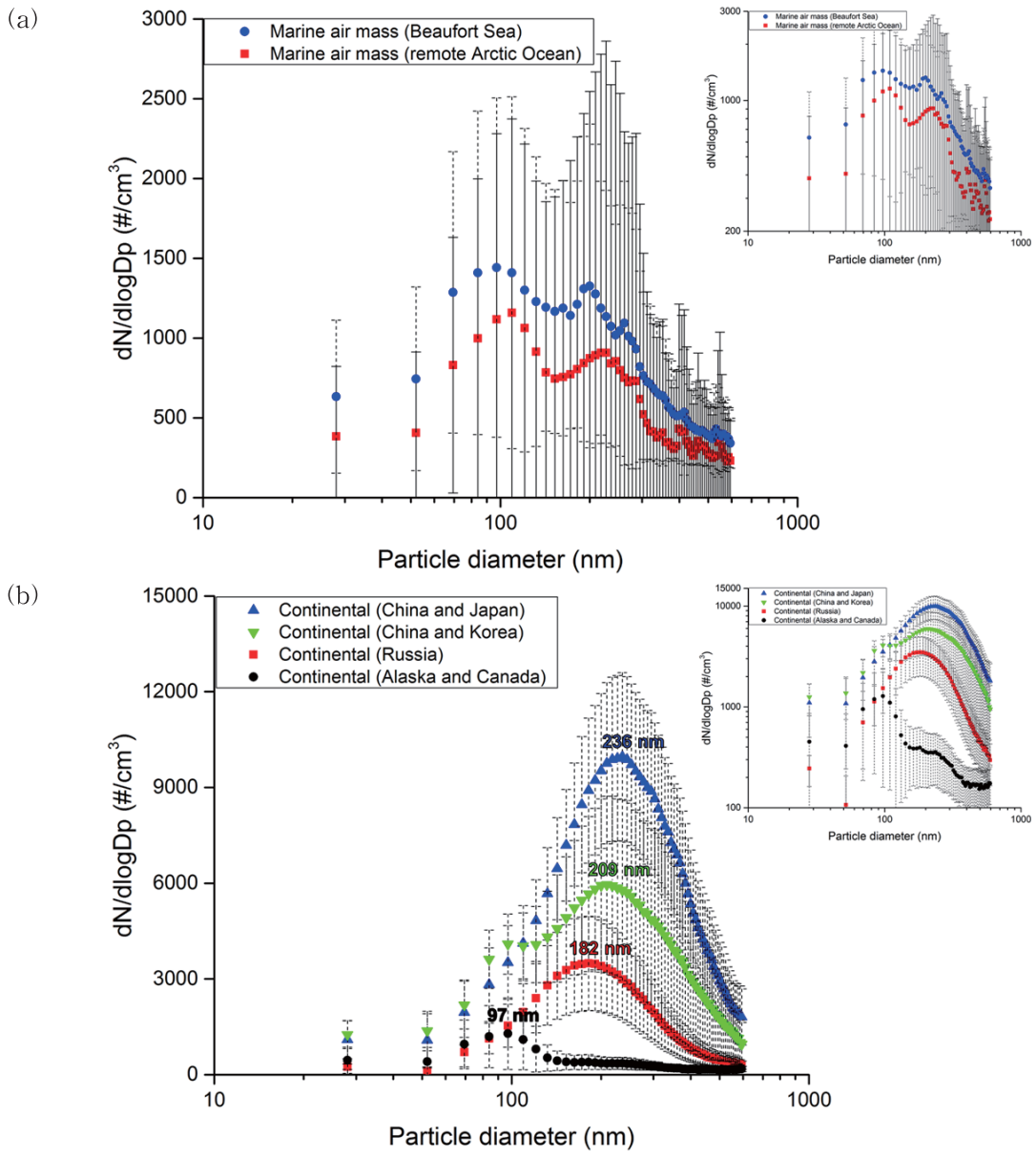


Fig. 200. (a) marine air mass from remote Arctic Ocean and Beaufort Sea and (b) number size distribution (30～600 nm) of continental air mass from Alaska, Canada, Russia, China, Japan.

그리고 DMPS를 이용하여 에어로졸 크기에 (30～600 nm) 따른 수농도 (#/cm^3) 분포 특성을 파악하였다(Fig. 200). 에어로졸의 평균 Number size distribution은 그림 5와 같으며 Air mass에 따라서 확연한 차이를 보이는 것을 알 수 있다. Marine influence에 의해 100～110 nm, 200～230 nm, 270～300 nm, 400～420 nm에서와 같이 Multiple mode가 관찰되었다. 이는 다양한 Marine aerosol 형성과정으로 (primary, secondary) 기인하는

것으로 사료된다. 반면 Continental air mass의 경우 수농도가 증가하고 Number size distribution 상에서는 단일피크가 발견되었으며 Air mass가 어디에서 기인하는지에 따라서 입자 크기의 Single dominant mode가 달라졌다 (100 nm: Alaska and Canada, 180 nm: Russia, 210 nm: China and Korea, 240 nm: China and Japan).

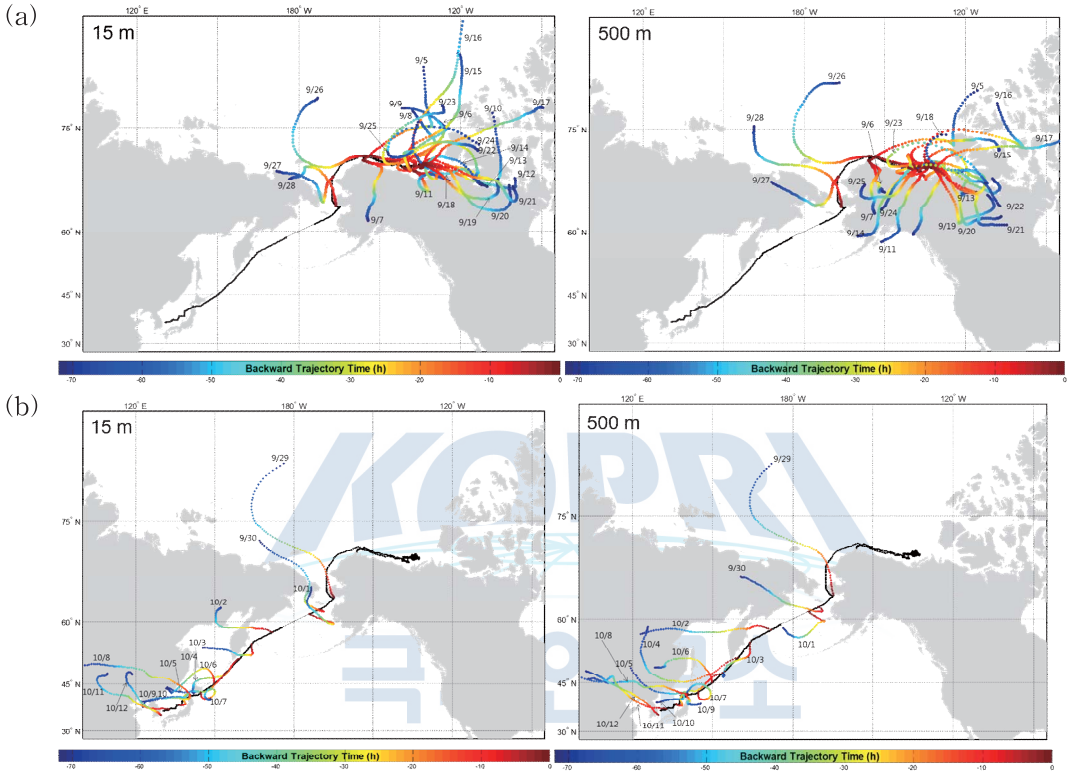


Fig. 201. Air mass trajectory analysis(15 and 500 m) on cruise 1(a) and cruise 2(b).

관측기간 동안 Air mass가 에어로졸 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 Air mass trajectory 데이터 분석을 하였다. 15 m와 500 m 상에서의 Air mass trajectory 데이터는 Fig. 201과 같으며 주요 Air mass type은 Table 16에 요약하였다. Air mass는 Marine air mass와 Continental air mass로 나누어지며 Air mass가 Ocean에서 기인하고 최소 72시간 동안 Land를 거치지 않았을 때 Marine air mass로 구분을 하였다.

Cruise 1 구간에서는 주로 Air mass가 Remote Arctic Ocean과 Beaufort Sea에서 기인하였으며 Cruise 2 구간에서는 Russia, Japan, Korea, China에 기인하는 것이 대부분이었다. Air mass에 따른 에어로졸 특성 측정 데이터들은 Table 16에 요약하였다. 아라온이 Land에 접근하거나 Continental air mass의 영향에 놓였을 때 BC 농도가 증가하는 것을 알 수

있으며 중국과 일본으로부터 기인된 Air mass의 영향이 있었을 때 가장 높은 BC 농도가 관측되었다. 이는 BC 농도가 Continental/anthropogenic source 영향의 지표로써 사용될 수 있음을 의미한다.

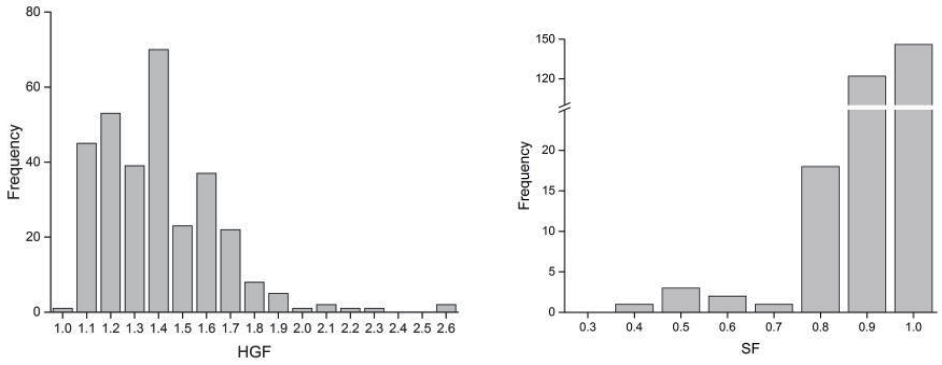
Table 16. Measured data of characteristic of aerosol with air mass type

Air mass type	Date	HGF	Volume fraction of volatile species (%)	N (>2.5 nm) (#/cm^3)	N (2.5-10 nm) (#/cm^3)	BC (ng/m^3)
Marine air mass (remote Arctic Ocean)	9/15, 9/16, 9/17, 9/25, 9/26, 9/28, 9/29	1.40 ± 0.14	24 ± 7	22,670 ± 28,920	14,820 ±23,660	17 ± 9
Marine air mass (Beaufort Sea)	9/8, 9/9, 9/10, 9/13, 9/18, 9/19, 9/20, 9/21, 9/27	1.32 ± 0.18	27 ± 6	10,390 ± 19,400	6,870 ± 15,600	18 ± 6
Continental air mass (Alaska and Canada)	9/11, 9/12, 9/14	1.31 ± 0.08	30 ± 9	777 ± 538	241 ± 282	16 ± 7
Continental air mass (Russia)	10/2-10/6	1.41 ± 0.07	7 ± 1	1,545 ± 705	190 ± 103	167 ± 73
Continental air mass (China and Japan)	10/8-10/10	1.46 ± 0.07	9 ± 2	24,970 ± 31,150	16,530 ± 25,980	947 ± 849
Continental air mass (China and Korea)	10/11-10/12	1.52 ± 0.06	15 ± 4	4,310 ± 2,744	595 ± 840	593 ± 360
Average during the whole sampling period	9/7/2013-10/13/2013	1.39 ± 0.09	19 ± 6	9,772 ±18,300	5,976 ± 14,860	188 ± 335

KOPRI 극지연구소

본 연구 과제를 통해서 개발된 HVTDMA system을 직접 이용하여 에어로졸의 흡습성, 휘발성, 혼합상태 특성들이 측정되었다. Ocean biological activity는 Remote ocean에서 Submicrometer 입자의 Organic, non-sea salt (nss)-sulfate, sea salt의 비율에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (O'Dowd, Facchini *et al.* 2004; Gantt and Meskhidze 2013). 선행연구에서는 상대습도 90% 조건에서 Ammonium sulfate, ammonium bisulfate, sea salts, water soluble organic matter (WSOM), water insoluble organic matter (WIOM)들은 각각 1.7, 1.8, 2.0, 1.2, 1.0의 Hygroscopic growth factor (HGF) 값을 가진다고 보고된 바 있으며 본 과제에서 사용이 된 HVTDMA system을 가지고 실험실에서 측정한 결과 마찬가지로 유사한 결과를 보였다. 실험실에서 Volatile, semi-volatile organic의 경우 100℃ 조건에서 증발되지만 Sulfate의 경우는 증발되지 않는 것을 확인하였으며 nss-sulfate과 Sea salt species는 Hygroscopic, non-volatile 하고 Organic species는 Less hygroscopic, volatile 한 특징을 가지고 있다. 50 nm～220 nm 사이의 특정 크기를 선택하여 측정된 에어로졸의 HGF (hygroscopic growth factor)와 SF (shrinkage factor) 값의 빈도분포는 Fig. 202와 같다.

(a)



(b)

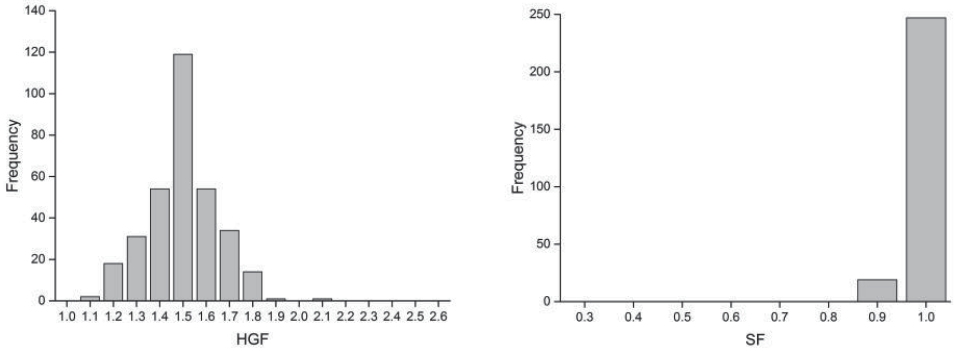


Fig. 202. Frequency distribution of aerosol HGF, SF on (a) cruise 1 and (b) cruise 2.

Cruise 1에서는 HGF 측정값들이 다양한 빈도분포를 보였고 (1.1-1.2, 1.4, 1.6) 상대적으로 많은 양의 Volatile species가 존재하는 것을 알 수 있었다. 1.4와 1.6의 HGF 값은 Sulfate과 다양한 Organic components량과 관계가 있으며 상대적으로 작은 HGF 값들은 Biological organic components (less hygroscopic)에 기인한다. 참고로 선행연구에서는 Sea water에 존재하는 Bacteria 농도가 증가함에 따라 SSA (sea salt aerosol)의 HGF 값이 감소한다는 것을 증명하여 발표하였다 (Prather, Bertram *et al.* 2013).

반면 Cruise 2의 HGF 빈도분포도에서는 측정값 1.5에서 단일 피크를 보였으며 Volatile species의 양도 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 본 과제를 수행하며 얻은 HGF와 SF 측정값은 Marine influence 조건에서 Volatile organic species가 Submicrometer 에어로졸의 생성과 성장에 중요한 역할을 할 수 있다는 것을 보여준다. 관측기간 동안 입자들은 Internal mixing 상태가 대부분이었으며 전체 관측 데이터 중에서 오직 2%만이 External mixing 상태였다. 이는 Hygroscopic (sea-salt) 입자들은 단독으로 존재하기 보다는 다양한 비율의 nss-sulfate, volatile/semi-volatile organics, sea salt 입자들이 Internal mixing 상태로 존재하는 경향성을 보여준다.

KOPRI
극지연구소

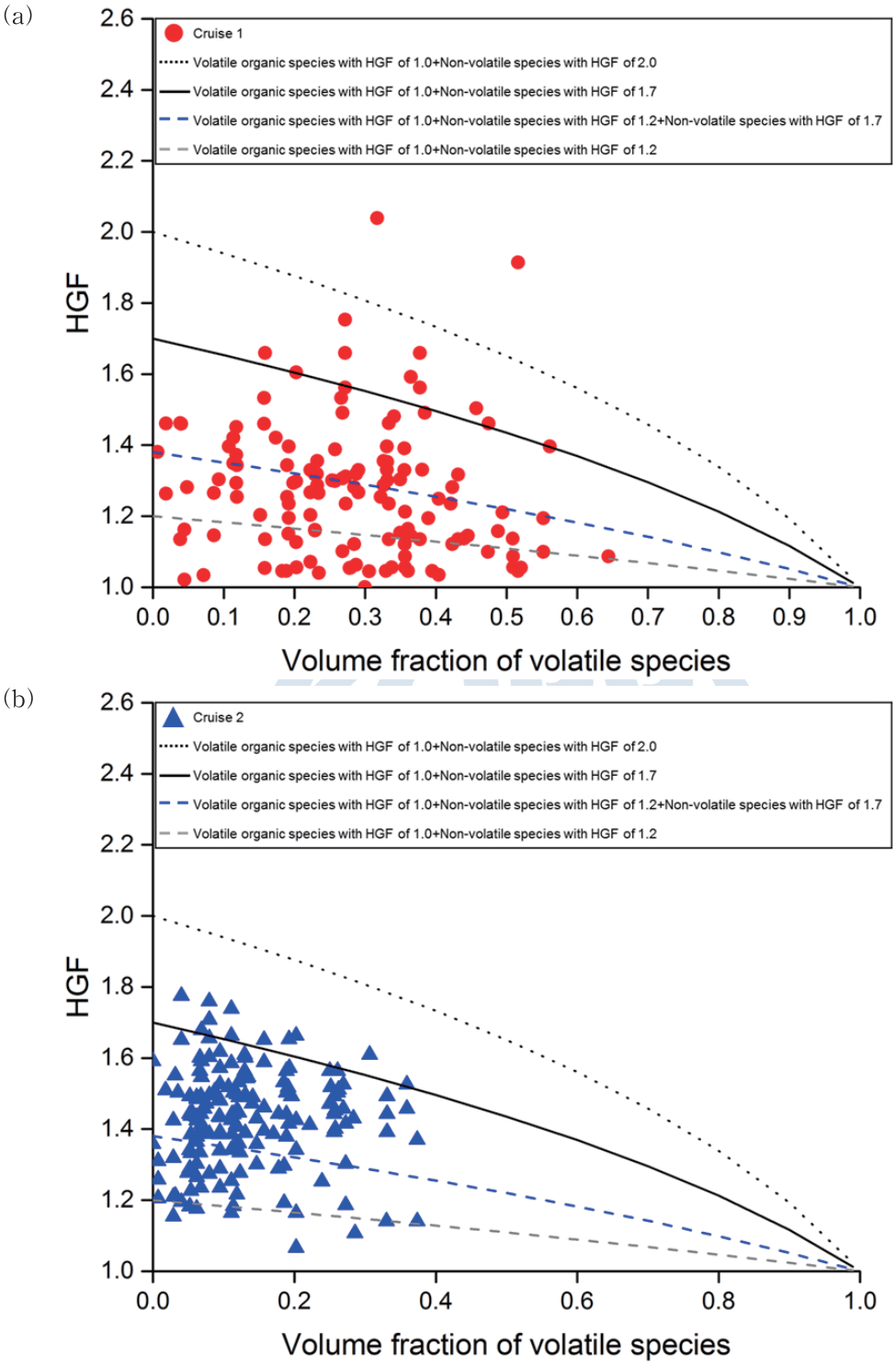


Fig. 203. HGF curves of multicomponent mixtures of measured HGF with volatile species volume fraction and Zdanovskii-Stokes-Robinson (ZSR) relationship on (a) cruise 1, (b) cruise 2

측정된 HGF와 Volatile species의 Volume fraction 데이터들과 Zdanovskii-Stokes-Robinson (ZSR) relationship을 이용하여 흡습성과 휘발성이 알려진 혼합된 물질들의 데이터들과 서로 비교하였다. Fig. 203에서 알 수 있듯이 Cruise 1과 Cruise 2를 비교하였을 때 Cruise 1 구간에서 측정된 에어로졸들은 상대적으로 많은 휘발성 물질로 구성되어 있을 뿐 아니라 다양한 Internal mixtures임을 알 수 있다. 반면 Cruise 2는 Cruise 1과 달리 상대적으로 에어로졸들의 HGF 측정 분포도가 집중되어 있고 Volatile species의 Volume fraction도 적은 것을 알 수 있다.

관측기간 동안에 간헐적으로 Heated tube의 온도를 20℃에서 250℃까지 단계적으로 올리면서 에어로졸의 휘발특성을 살펴보았다(Fig. 204). Volatile organic species는 100℃ 이전에 증발되기 시작하며 nss-sulfate과 Less volatile organic species들은 100℃를 넘어서 증발되고 250℃ 온도에서 대부분 증발이 된다. Cruise 1 (2013년 9월 11일)의 측정 자료를 살펴보면 앞에서 설명된 것처럼 상대적으로 많은 Volatile species가 존재하는 것을 알 수 있고 Cruise 2 (2013년 10월 10일)의 경우 100℃ 이전에 증발하는 Little volatile organic species 존재를 확인할 수 있었으며 150℃에서 증발하기 시작하는 nss-sulfate의 데이터는 Cruise 2 구간에서 상당한 양의 nss-sulfate이 존재한다는 것을 뒷받침 해주고 있다. nss-sulfate은 Anthropogenic source (anthropogenic SO2 conversion)와 Biogenic marine source (dimethyl-sulfide oxidation conversion)에서 모두 기인 될 수 있다. 그리고 Cruise 2 구간에 250℃ 조건에서 증발하지 않고 남아있는 에어로졸이 있었으며 이는 에어로졸이 Mineral과 Biological material과 같은 non-volatile species를 포함하고 있는 것을 의미한다.

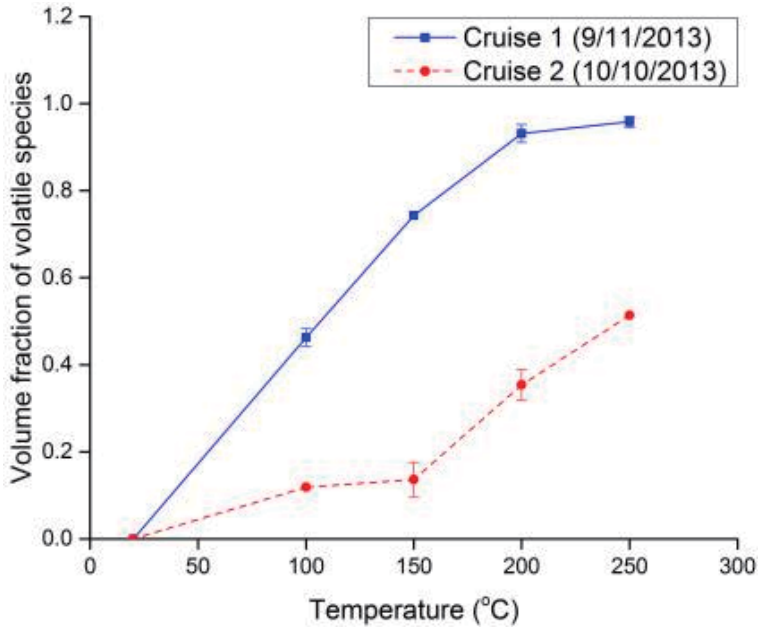


Fig. 204. Variation of volatile characteristic of aerosol with temperature.

에어로졸의 형태학적 특성 및 화학적 원소성분 분석을 위해서는 TEM/EDS가 이용되었다(Fig. 205). 총 257개의 에어로졸이 분석 되었으며 주로 C-rich (type 1), S-rich mixture (type 2), C/S-rich mixture (type 3), Na-rich mixture (type 4), C/P-rich mixture (type 5), mineral-rich mixture (type 6)으로 구분이 되었다. C/P-rich mixture (type 5)의 경우 대부분 cruise 1 기간에 관찰되었는데 이는 해당기간/구간에 상대적으로 강한 Biological activity에 의한 영향이라고 사료된다.

KOPRI 극지연구소

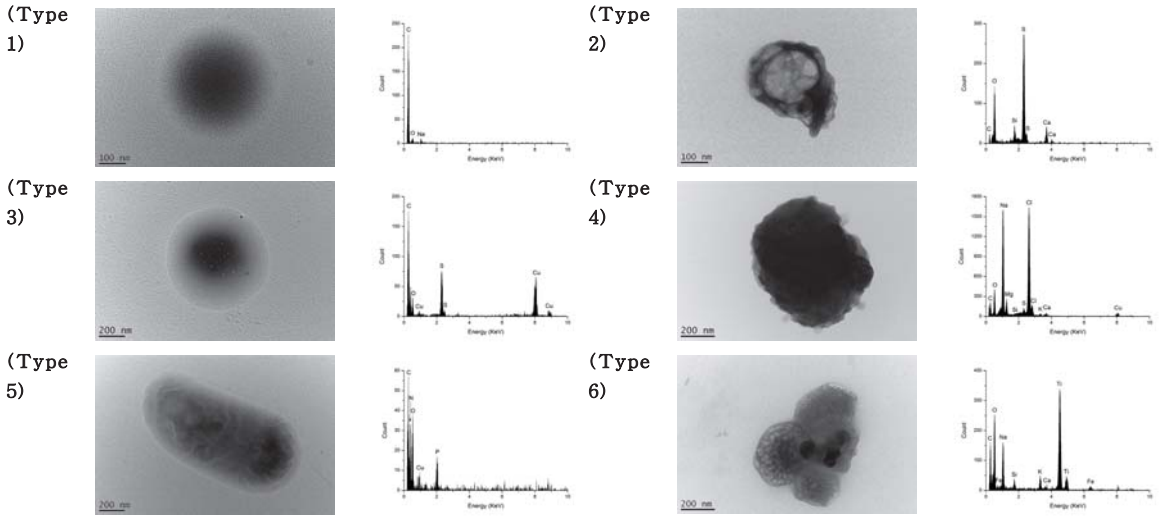


Fig. 205. TEM/EDS data of C-rich mixture (type 1), S-rich mixture (type 2), C/S-rich mixture (type 3), Na-rich mixture (type 4), C/P-rich mixture (type 5), mineral-rich mixture (type 6).

KOPRI
극지연구소

북극지역에서의 입자 발생원 및 생성 기작을 파악하기 위하여 스발바드 군도 (Svalbard Island) 내 나알슨(Ny-Ålesund; 78.6° N, 11.6° E)) 지역에 위치한 그루바뎃 (Gruvebadet) 대기관측소 (Fig. 206)에서 Nano-SMPS (scanning mobility particle sizer, DMA (Model 3085, TSI) - UCPC (Model 3776, TSI))를 이용하여 3 ~ 60 nm 입자의 크기별 수농도 변화를 관측하였다. 측정은 2015년 4월 1일부터 2015년 8월 31일까지 수행하였으며, 5월부터는 그루바뎃 관측소를 관할하는 이탈리아 연구팀의 도움을 받아 진행하였다 (Fig. 207).

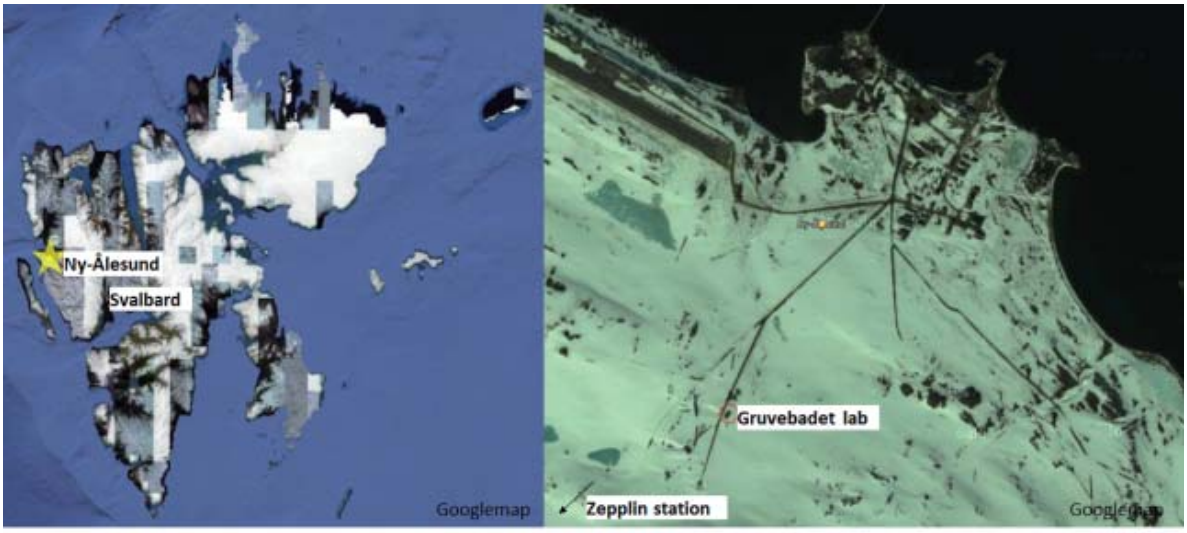


Fig. 206. Satellite images of Gruvebadet observatory in Ny-Alesund.

Fig. 207. Photos of sample inlet(left) of Nano-SMPS equipment and on-going measurement(right) on the roof at Gruvebadet observatory.

나노 에어로졸의 시간에 따른 입경별 수 농도 측정 결과를 아래 Fig. 208과 같이 나타내었다. 5월과 7월 전기 시설 점검으로 발생한 데이터 공백을 제외하고는 정상적인 측정이 이루어졌다. 측정 기간 중 5월(DOY: 121-152)에 새로운 입자 생성 이벤트가 가장 빈번히 발생하였다.

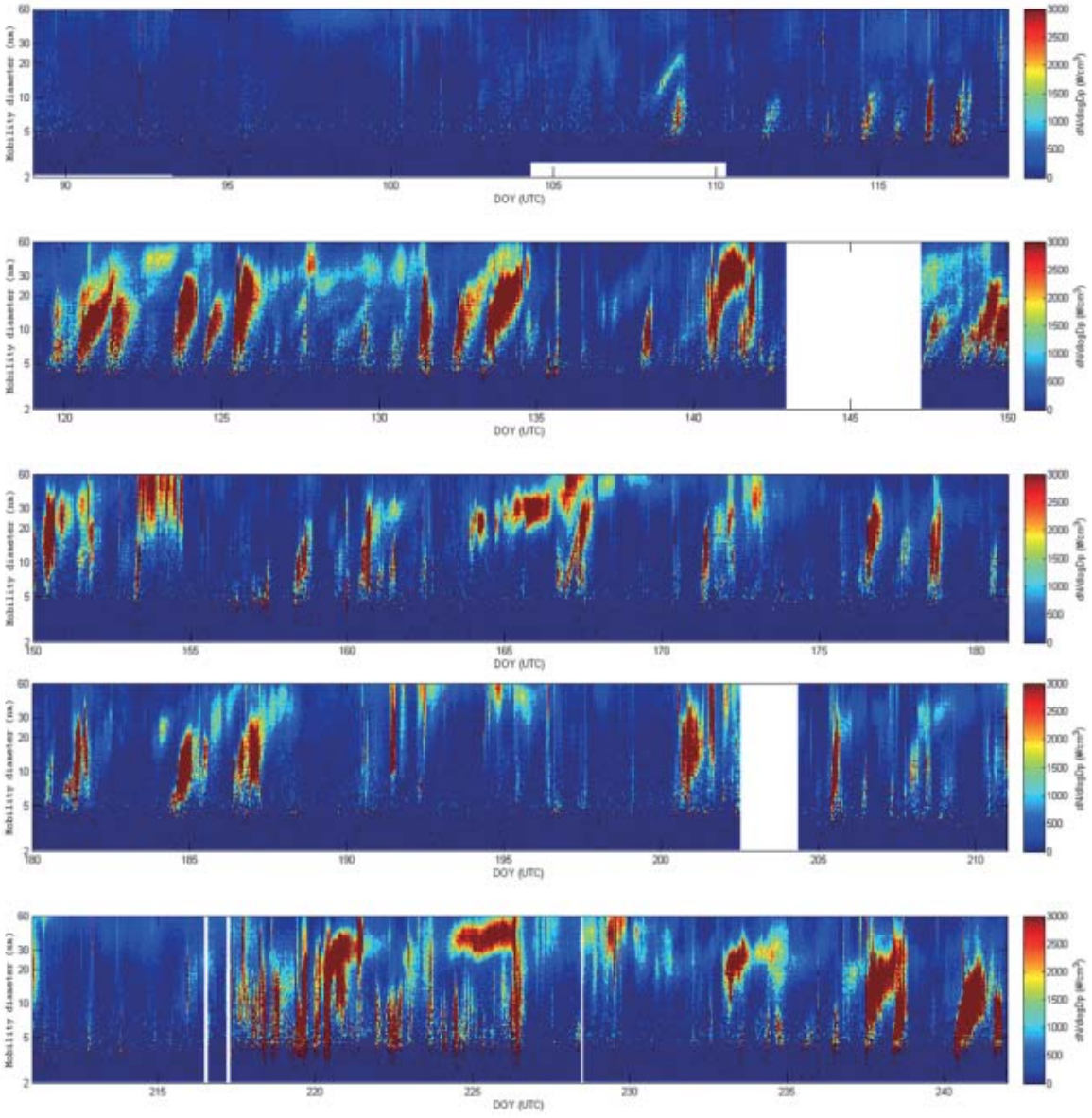


Fig. 208. Distribution of number concentration with inlet size.

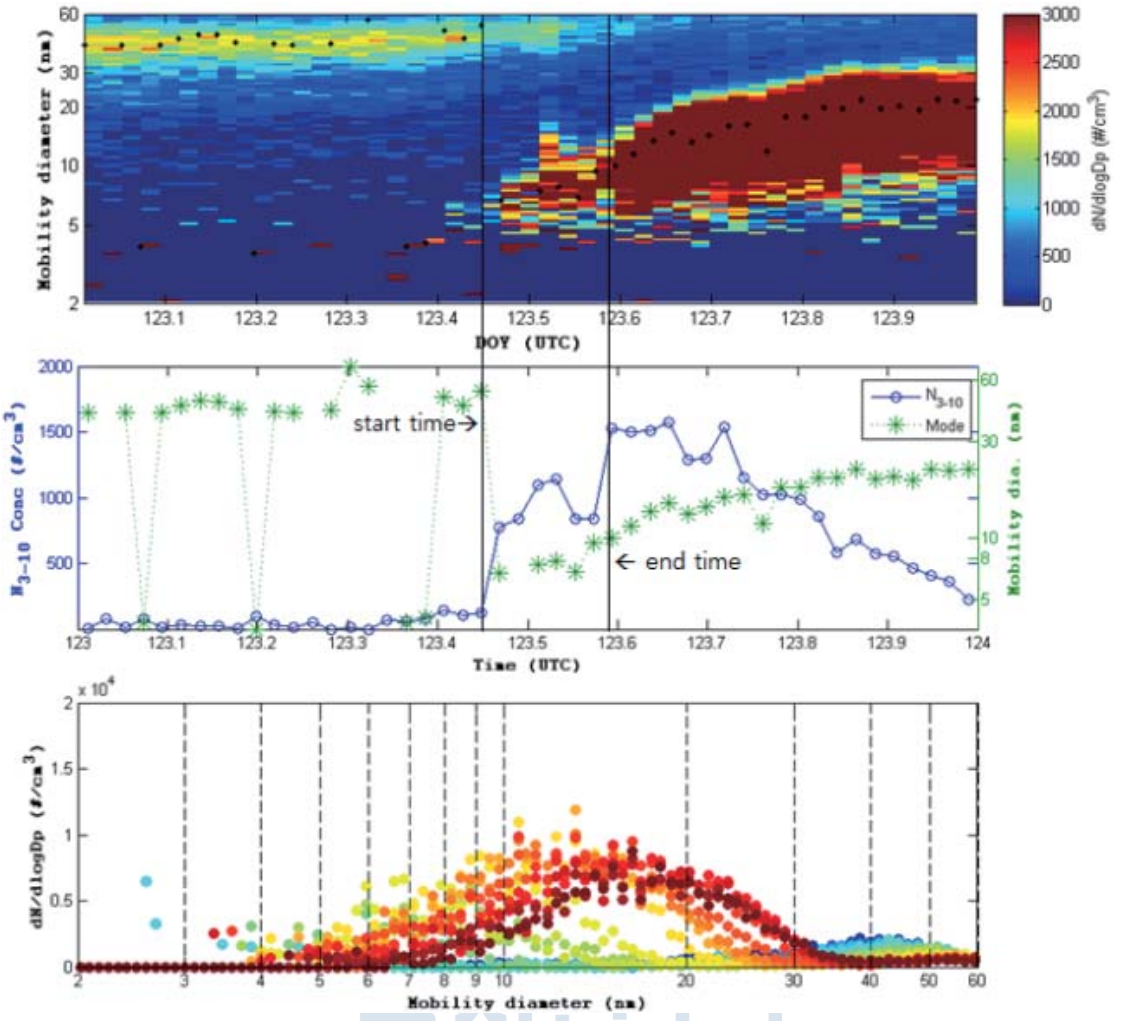


Fig. 209. Sample of NPF event using distribution with inlet size measured on 2015. 5. 2.

분석에 앞서, 새로운 입자 생성 (NPF, new particle formation) 이벤트를 정의하였다. Fig. 209에 나타낸 바와 같이 Nucleation mode (Dp < 10 nm)의 수농도가 급격히 증가하고, 뒤이어 모드 직경의 꾸준한 성장이 나타나는 경우를 NPF 이벤트로 정의하였다. 첫 번째 패널과 같이 시간에 따른 입경별 수농도 분포를 나타낸 도표에서는 바나나와 같은 모양으로 표현된다. Nucleation mode의 수농도 증가 시작과 종료지점 사이의 값을 이용하여 입자의 생성속도 (formation rate, #/cm^3 · s)을 계산하였고, 이벤트 기간 동안 시간에 따른 모드 직경의 변화를 이용하여 성장속도 (growth rate, nm/h)를 계산하였다. 계산식은 Kulmala *et al.*(2004)에 제시된 식을 이용하였다.

총 측정 기간 중 5월에 NPF 이벤트의 발생 빈도가 가장 높게 나타났다(Fig. 210). 봄철 기온상승으로 인하여 해양, 토양 및 해설로부터 NPF의 전구물질이 되는 SO2, VOC의 배출량 증가와 강한 태양복사에 의한 것으로 판단된다. 또한 여름철보다 더 빈번히 발생하는 이유는 5월의 대기가 정체되어 있기 때문으로 사료된다. 이는 NOAA Hysplit 모델을 이용한 120시간 Airmass 역궤적 분석 결과를 통해 확인하였다. Fig. 211에 나타낸 바와 같이 월별 Airmass의 Residential time 분석결과, 5월 중 Air mass가 가장 좁은 영역에 분포하고 대륙의 영향 또한 가장 적게 받는 것으로 나타났다.

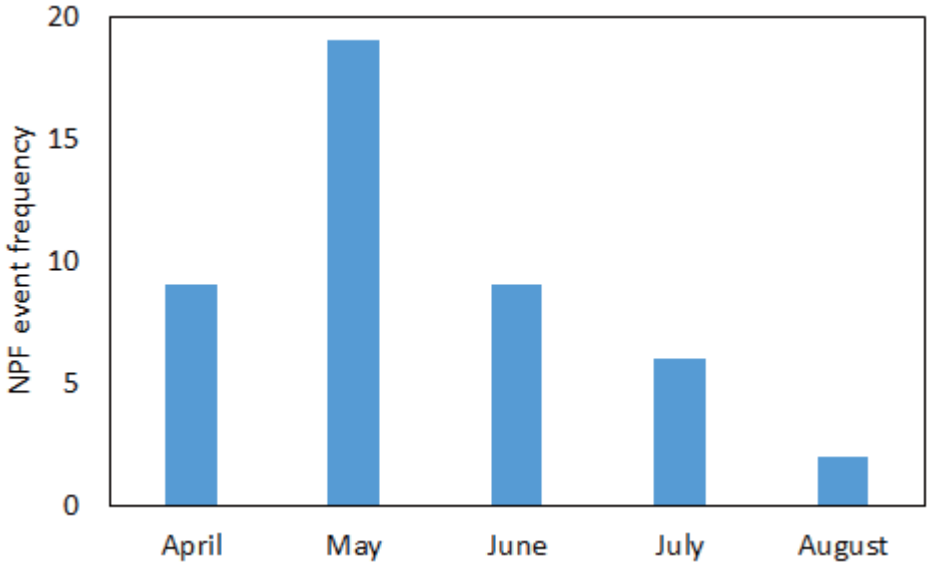


Fig. 210. Event frequency of monthly NPF.

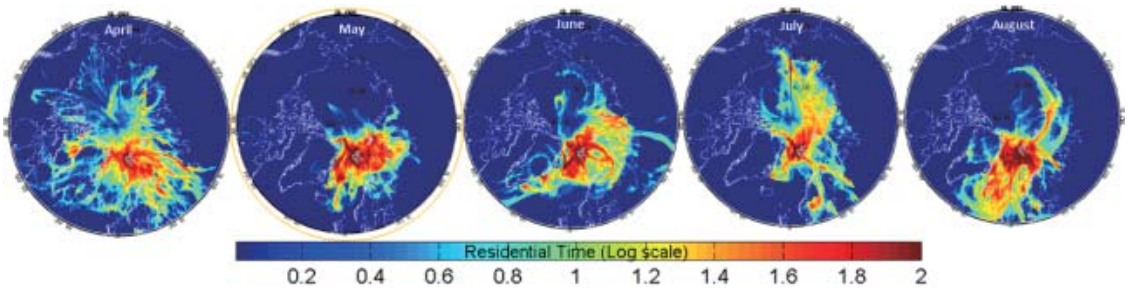


Fig. 211. Analysis of residence time of monthly air mass.

다. 연구개발성과

(1) 국외 전문학술지 (10건)

① Kim, G., Cho, H. J., Seo, A., Kim, D., Gim, Y., Lee, B. Y., Yoon, Y. J. and Park, K. (2015). Comparison of Hygroscopicity, Volatility, and Mixing State of Submicrometer Particles between Cruises over the Arctic Ocean and the Pacific Ocean. Environmental Science and Technology 49:12024-12035 (Impact Factor: 5.393).

② Park, K., Kim, G., Kim, J. S., Yoon, Y. J., Cho, H. J. and Ström, J. (2014). Mixing state of size-selected submicrometer particles in the arctic in May and September 2012. Environmental Science and Technology 48:909-919 (Impact Factor: 5.393).

③ Batmunkh, T., Kim, Y. J., Jung, J. S., Park, K. and Tumendemberel, B. (2013). Chemical characteristics of fine particulate matters measured during severe winter haze events in Ulaanbaatar, Mongolia. J. Air Waste Manag. Assoc. 63:659-670 (Impact Factor: 1.613).

④ Kim, J., Maskey, S., Yoon, Y. J. and Park, K. (2013). Mixing state of size-selected submicrometer particles during photochemical and combustion events measured with the tandem system. Aerosol Science and Technology 47:746-754 (Impact Factor: 1.953).

⑤ Park, J. Y., Lim, S. and Park, K. (2013). A new approach for determination of fouling potential by colloidal nanoparticles during reverse osmosis (RO) membrane filtration of seawater Nanotechnology for Sustainable Development. Journal of Nanoparticle Research 15 (Impact Factor: 2.101).

⑥ Kim, J. S. and Park, K. (2012). Atmospheric aging of Asian dust particles during long range transport. Aerosol Science and Technology 46:913-924 (Impact Factor: 1.953).

⑦ Tumolva, L., Park, J. Y. and Park, K. (2012). Combination of transmission electron and atomic force microscopy techniques to determine volume equivalent diameter of submicrometer particles. Microsc. Res. Tech. 75:505-512 (Impact Factor: 1.130).

⑧ Hossain, A. M. M. M. and Park, K. (2012). Exploiting potentials from interdisciplinary perspectives with reference to global atmosphere and biomass burning management. Aerosol and Air Quality Research 12:123-132 (Impact Factor: 2.393).

⑨ Park, K., Park, J., Lee, S., Cho, H. J. and Kang, M. (2012). Real time measurement of chemical composition of submicrometer aerosols at urban Gwangju in Korea by

aerosol mass spectrometer. Atmos. Environ. 62:281-290 (Impact Factor: 3.459).

⑩ Kim, J. S., Bais, A. L., Kang, S. H., Lee, J. and Park, K. (2011). A semi-continuous measurement of gaseous ammonia and particulate ammonium concentrations in PM 2.5 in the ambient atmosphere. Journal of Atmospheric Chemistry 68:251-263 (Impact Factor: 1.550).

(2) 국제 학술회의 발표 (8건)

① Kihong Park*, Gibaek Kim, Young Jun Yoon," Shipborne measurement of hygroscopicity and volatility of fine particles during the Artic cruise" , The 12th Annual UNU & GIST Joint Programme Symposium, Oct 27-29, DaNang, Vietnam, 2014.

② Gibaek Kim, Young Jun Yoon, Hee-joo Cho, and Kihong Park*, "Characterization of Arctic Aerosol Particles during the Arctic Ocean Expedition in 2013", American Association for Aerosol Research, Oct 20-Oct 24, Orlando, Florida, USA, 2014.

③ Gibaek Kim, Young-Jun Yoon, Hee-joo Cho, and Kihong Park*, "Hygroscopicity, Volatility, Morphology, and Elemental Composition of Ultrafine Particles during the Arctic Ocean Expedition in 2013" , International Aerosol Conference, Aug 28-Sep 2, Busan, Korea, 2014.

④ Kihong Park, Gibaek Kim, Jaesuk Kim, Young Jun Yoon, Heeju Cho, and Johan Ström," Hygroscopicity, volatility, and mixing state of submicrometer particles in the Arctic (Ny-Alesund, Svalbard)", Asian Aerosol Conference (AAC), 2-5 December, Sydney, Australia, 2013.

⑤ Kihong Park, Gibaek Kim, Jaesuk Kim, Young Joon Yoon, and Heeju Cho, "Mixing state ofsize-selected submicrometer particles in the Arctic (Ny-Ålesund, Svalbard) in the spring and fall of 2012", Americal Association for Aerosol Research, Sep 29-Oct 4, Portland, USA, 2013.

⑥ Kihong Park, Jaeseok Kim, "A Study on Mixing Structure of Atmospheric Ultrafine Particles by Using the Thermo-Denuder HTDMA System." , The 31st American Association for Aerosol Research, October 8-12, Hyatt Regency Minneapolis, Minneapolis, Minnesota, USA, 2012.

⑦ Jae-Seok Kim and Kihong Park, "Measurements of hygroscopicity and volatility of dust particles during Asian dust events", The 30th American Association for Aerosol Research, October 3-7, Rosen Shingle Creek Resort & Golf Club, Orlando, Florida,

USA, 2011.

⑧ Jinkwan Oh and Kihong Park, CCN activity of ultrafine particles in the atmosphere, The 9th UNU&GIST joint programme symposium, pp.46, October 11-13, GIST, Korea, 2011.

(3) 국내 학술회의 발표 (11건)

① 김기백, 윤영준, 박기홍, “선박관측을 통한 북극해와 태평양에서의 에어로졸 흡습성, 휘발성, 혼합특성 측정” Proceedings of the 58th Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 153, November 5-7, Yeosu Expo Convention, Korea, 2015.

② Kihong Park*, Gibaek Kim, and Young Jun Yoon, “Shipborne measurements of hygroscopicity and volatility of fine particles during the Arctic cruise“, 2014 UMS-GIST symposium, Sep 23-Sep 24, Gwangju, Republic of Korea, 2014.

③ 김기백, 윤영준, 박기홍 “레이저유도 플라즈마 분광분석 장치와 TEM/EDS를 이용한 북극 에어로졸의 원소성분 및 형태학적 분석”, Proceedings of the 14th Korean conference on Aerosol and Particle Technology, pp197, July 3-5, Yongpyung, Korea, 2013.

④ KaYan Chong, Kihong Park “CCN activity of mixed black carbon particles with core-shell structure”, Proceedings of the 14th Korean conference on Aerosol and Particle Technology, pp36, July 3-5, Yongpyung, Korea, 2013.

⑤ 김기백. 이희성. 윤영준. 박기홍 “북극 에어로졸의 흡습성, 휘발성 특성 측정 연구“ Proceedings of the 56th Korean Society for Atmospheric Environment. p115, September 5-6, BEXCO, Korea, 2013.

⑥ Shila Maskey, 박기홍 “Characterization of mixing state of laboratory-generated mixed inorganic and organic ultrafine aerosol particles“, Proceedings of the 55th Korean Society for Atmospheric Environment, pp100, October 25-26, Yeungnam University, Korea, 2012.

⑦ Ka Yan Chong, 박기홍 “Sulfuric acid로 코팅된 블랙카본의 구름형성응축핵 활성도 측정“, Proceedings of the 55th Korean Society for Atmospheric Environment, pp70, October 25-26, Yeungnam University, Korea, 2012.

⑧ Ka Yan Chong, 오진관. 박기홍, Measurments of Cloud Condensation Nuclei (CCN) activity of laboratory-generated particles and atmospheric particles“, Proceedings of the 13th Korean conference on Aerosol and Particle Technology, pp189, July 5-6, Yongpyung, Korea, 2012

⑨ 김재석, Shila Maskey, 박기홍 “대기 중 극초미세입자의 흡습성과 혼합상태에 관한 연구“, Proceedings of the 54th Korean Society for Atmospheric Environment, pp22, May 10-12, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea, 2012.

⑩ 김재석, 박기홍 “2010년 광주지역 황사기간 입자들의 흡습성과 휘발성 비교“, Proceedings of the 12th Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, pp. 32, June 30-July 2, Yongpyung, Korea, 2011.

⑪ 오진관, 박기홍 “구름형성응축핵 카운터를 이용한 유기물의 CCN activity 측정“, Proceedings of the 12th Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, pp. 109, June 30-July 2, Yongpyung, Korea, 2011.

KOPRI
극지연구소

8. 알래스카 카운실 사이트의 잎 특성, 식생군락의 구조와 기능 정량화 (서울대학교 위탁과제)

가. 측정과 샘플링 방법

(1) 알래스카 카운실 방문기간 : 2015년 7월 1~10일

(2) 장비: ASD (Analytic Spectral Devices Inc.) FieldSpec 4 (반사도를 이용한 정규화식생지수 측정), Licor-6400, LAI-2200 Plant Canopy Analyzer (엽면적지수 측정), GPS (Fig. 212)

(3) 정규화식생지수와 엽면적지수의 공간적 분포를 확인하기 위하여 Flux 타워를 기준으로 360m transcet 내에 20m 간격으로 2x2m의 총 18개의 공간을 나눔. 각 공간 별로 (Fig. 212. 우) 노란색 점)에서 ASD를 이용하여 정규화식생지수를 추정하고 LAI-2200를 이용하여 엽면적지수를 추정함.

(4) Transect A, B, C는 각 100m이며 1m간격으로 1 x 1m plot 속에 0.15 x 0.15m plot으로 구성됨

(5) 1x1m plot에서는 9번의 ASD를 이용한 반사도 관측과 6번의 LAI -2200를 이용한 엽면적지수를 추정함

(6) 0.15 x 0.15m plot에서 ASD관측을 이용하여 추정한 정규화식생지수와 LAI -2200을 이용한 엽면적지수 그리고 plot내의 잎을 모두 따고 스캔하여 얻은 엽면적지수와 비교함(Fig. 213)

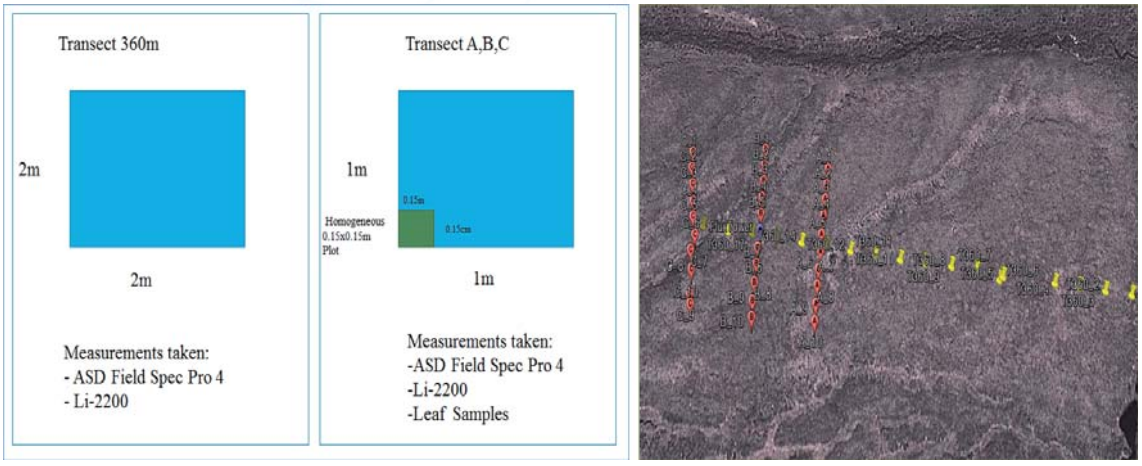
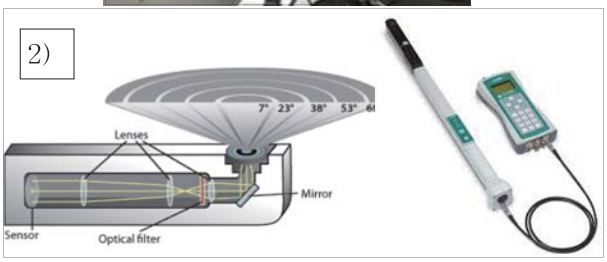


Fig. 212. Left) Data collection protocols across 360-m transect A, B, C, Right) Locations of plots across the transect.

1)

2)



3)

Fig. 213. 1) leaf scanning, 2) LAI-2200 instrument, 3) ASD-FieldSpec.

KOPRI 극지연구소

나. 잎 수준 관측

(1) 광합성 변수 (Vcmax, Jmax) 측정은 고압의 이산화탄소 실린더(Licor-6400)가 필요하지만 운송이 불가하여 관측하지 못함 (Fig. 214)

(2) 대기 중의 일정 이산화탄소 농도에서 광량을 변화 시켜 종별 최대 광합성량 Maximum Photosynthetic Assimilation Rate (Amax)을 측정함

(3) Maximum Photosynthetic Assimilation rate가 Betula Nana에서 7.9 umol $m^{-2}s^{-1}$으로 가장 높았으며 그 다음은 Cloudberry가 7.7 umol $m^{-2}s^{-1}$ 그리고 Blueberry가 5.2 umol $m^{-2}s^{-1}$였음 (Fig. 215)

Fig. 214. Measuring maximum photosynthesis rate (Amax) with ambient air form Li-6400 instrument.

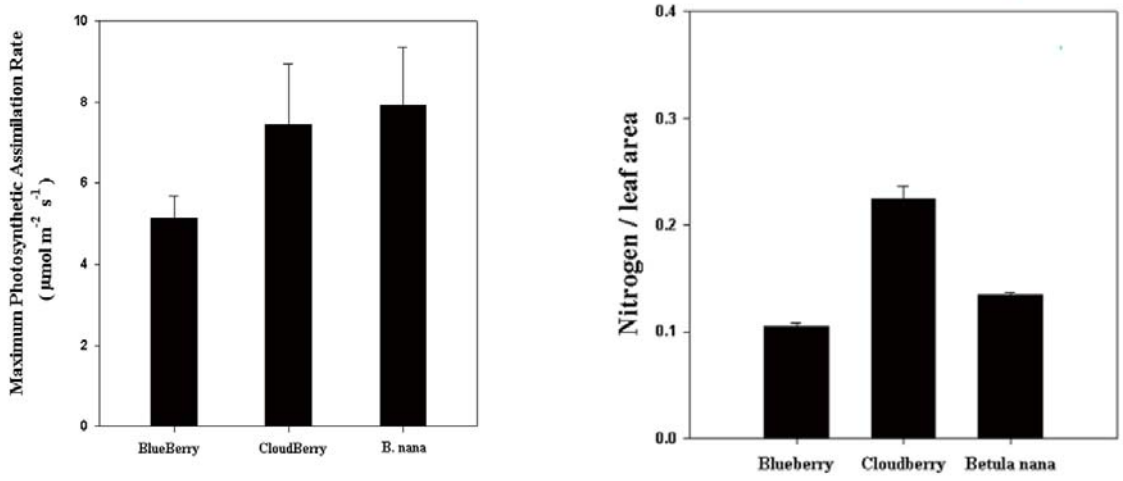


Fig. 215. Left) Amax of three species, Right) N/leaf area for three species.

다. 군락 수준 관측

(1) Transect 360m 결과

가) 정규화식생지수(NDVI)의 최솟값이 0.56, 최댓값이 0.72이며 평균은 0.64이다.

나) 엽면적지수(LAI)의 최솟값이 0.41, 최댓값이 1.95이며 평균은 0.96이다.

다) 정규화식생지수와 엽면적지수의 상관관계는 (R^2 =0.0672)이다 (Fig. 216).

라) 2 x 2m plot에서 관측된 식생지수들이 좋은 상관관계를 보이지 않아 1 x 1m와 0.15 x 0.15m plot에서 추가로 관측하였다.

(2) Transect A, B, C 결과

가) 1x1m내에서 정규화식생지수의 최솟값이 0.49, 최댓값 0.77이며 평균은 0.65이다.

나) 1x1m내에서 엽면적지수의 최솟값이 0.49, 최댓값 0.13이며 평균은 1.66이다.

다) 0.15x0.15m내에서 정규화식생지수의 최솟값이 0.38, 최댓값 0.82이며 평균은 0.66이다.

라) 0.15x0.15m내에서 엽면적지수의 최솟값이 0.08, 최댓값 3.45이며 평균은 0.68이다.

마) 0.15x0.15m내에서 직접 스캔하여 얻은 엽면적지수의 최솟값이 0.16, 최댓값 2.16이며 평균은 0.76이다.

바) 1 x 1m (Fig. 217. 파란색 점)에서 측정된 정규화식생지수와 엽면적지수의 상관관계는 (R^2 =0.058)이다.

사) 0.15 x 0.15m (Fig. 217. 빨간색 점)에서 측정된 정규화식생지수와 엽면적지수의 상관관계는 (R^2 =0.027)이다.

아) 0.15 x 0.15m (Fig. 218)에서 측정된 스캔한 엽면적지수와 정규화식생지수의 상관관계는 (R^2 =0.34)이다.

(3) 배경 반사도

가) 식생 밑에 깔려있는 이끼, 지의류, 그리고 낙엽의 분광 반사도 측정하였다.

나) 서로 다른 배경 마다 분광 반사도가 달랐다. (Fig. 219～223) 정규화 식생지수의 값 또한 다른 것을 확인 할 수 있었다.(Table 17).

다) 주황색과 초록색 배경 반사 도는 Bubier *et al.* (1997)의 이끼 분광 반사도과 비슷하다.

KOPRI 극지연구소

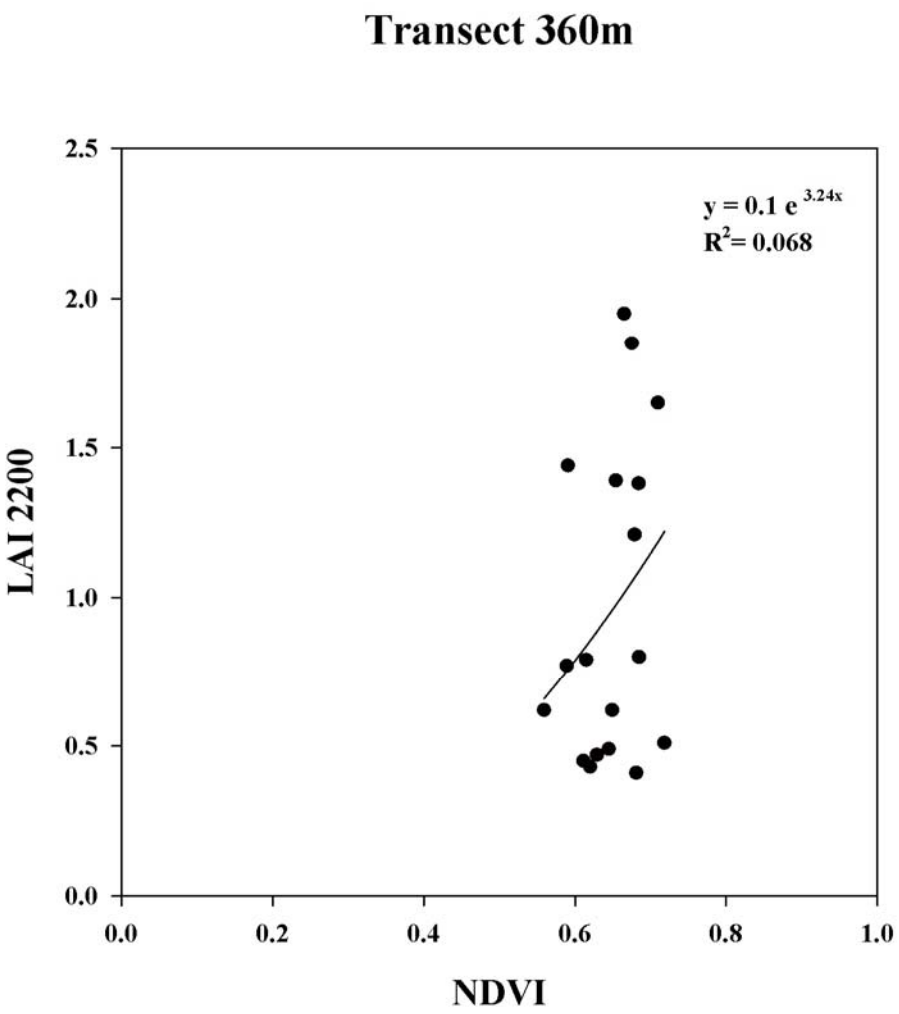


Fig. 216. Relationship between NDVI and LAI-2200 derived LAI at the 360 m transect.

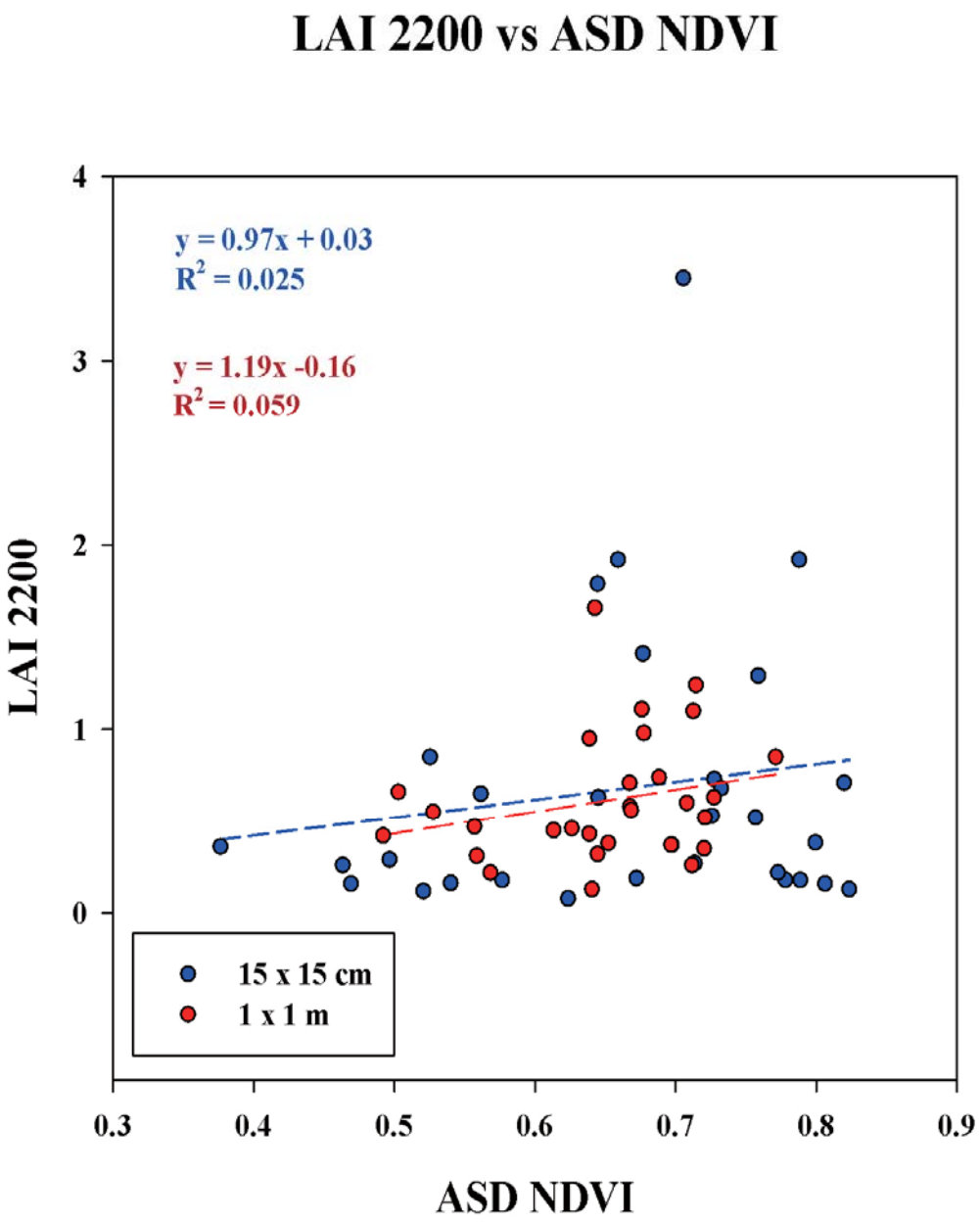


Fig. 217. Relationship between ASD-derived NDVI and LAI-2200 derived LAI 1 by 1 m plots and 15 by 15 cm plots.

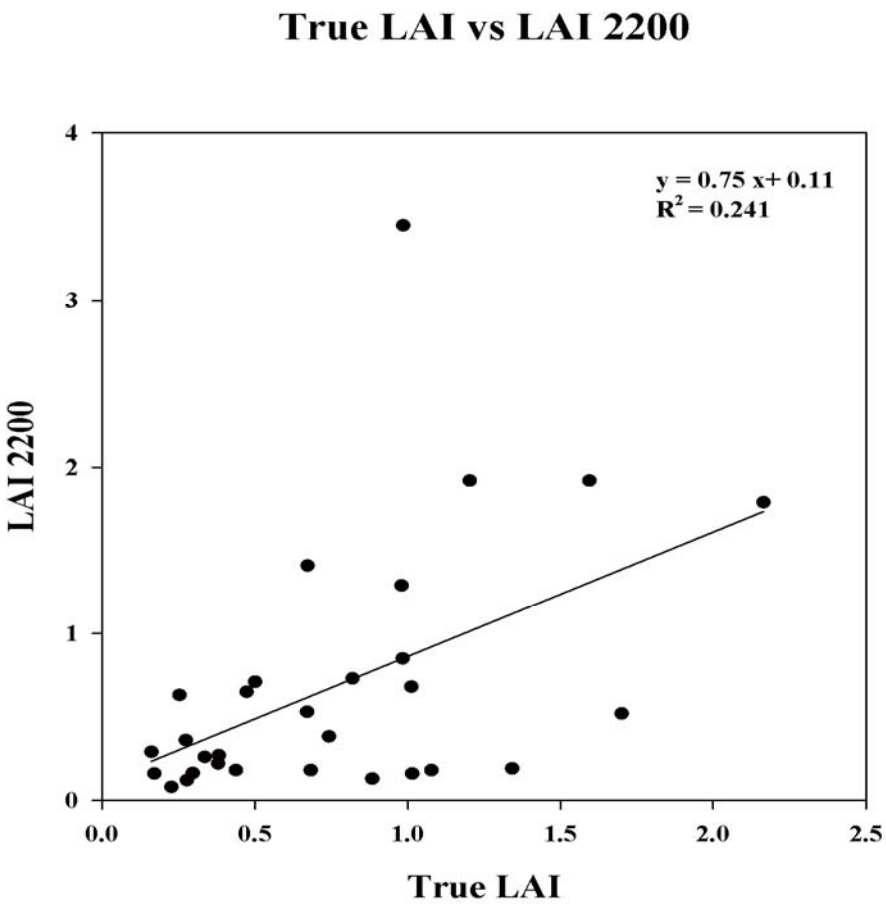


Fig. 218. Relationship between scanned true LAI and LAI-2200 derived LAI.

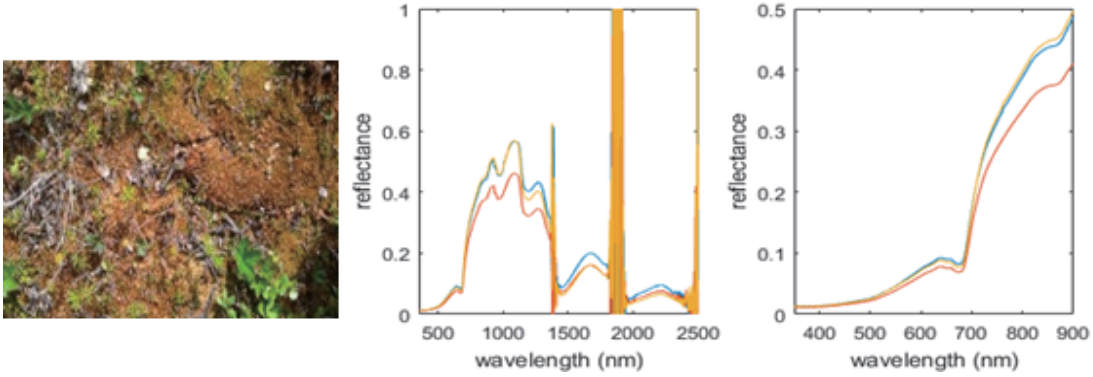


Fig. 219. Hyperspectral reflectance of orange color moss.

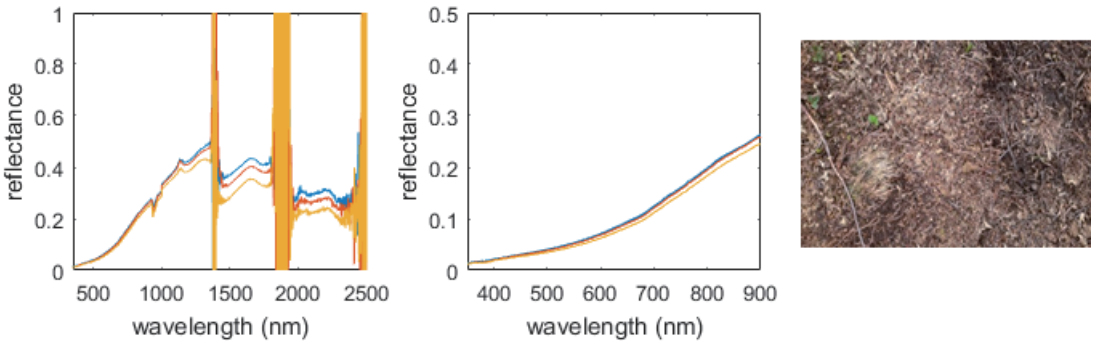


Fig. 220. Hyperspectral reflectance of litterfall.

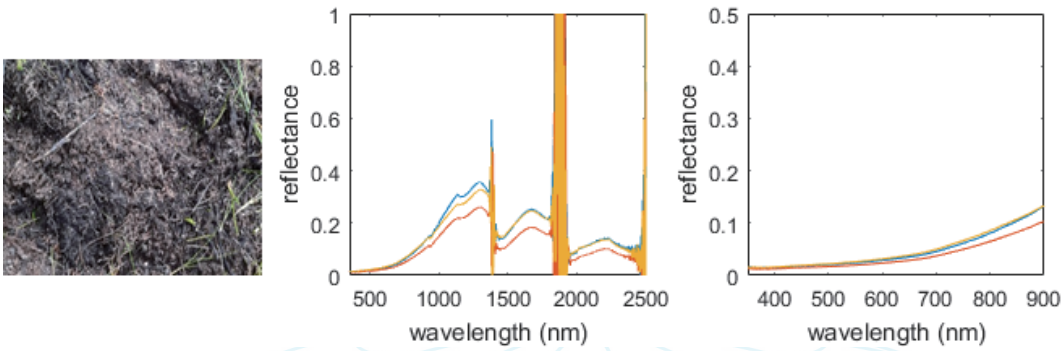


Fig. 221. Hyperspectral reflectance of dark soil.

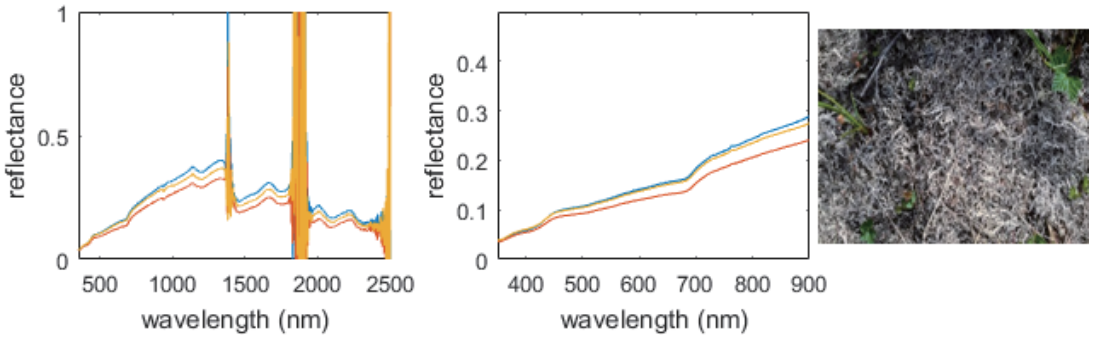


Fig. 222. Hyperspectral reflectance of lichens.

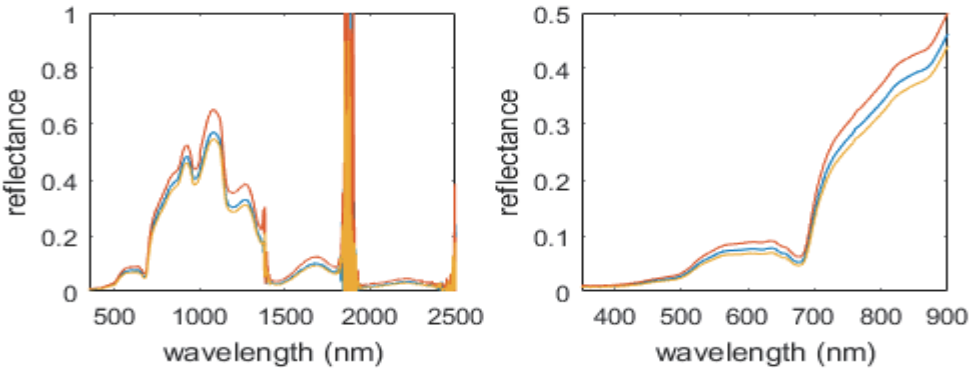


Fig. 223. Hyperspectral reflectance of green color moss.

Table 17. Background NDVI values

Background reflectivity	NDVI
White (lichen)	0.270
Orange (moss)	0.670
Brown (fallen leaves)	0.453
Black (soil)	0.502
Green (Control)	0.696

KOPRI 극지연구소

Fig. 224. LED spectral sensor (white circle) to measure NDVI.

(4) Near-Surface Remote Sensing

가) 2014년도에 설치한 LED센서가 생물 계절과 snow dynamics을 측정 한다 (Fig. 225).

나) MODIS와 LED의 NDVI비교 했을 때 유사함을 보여준다 (Fig. 225).

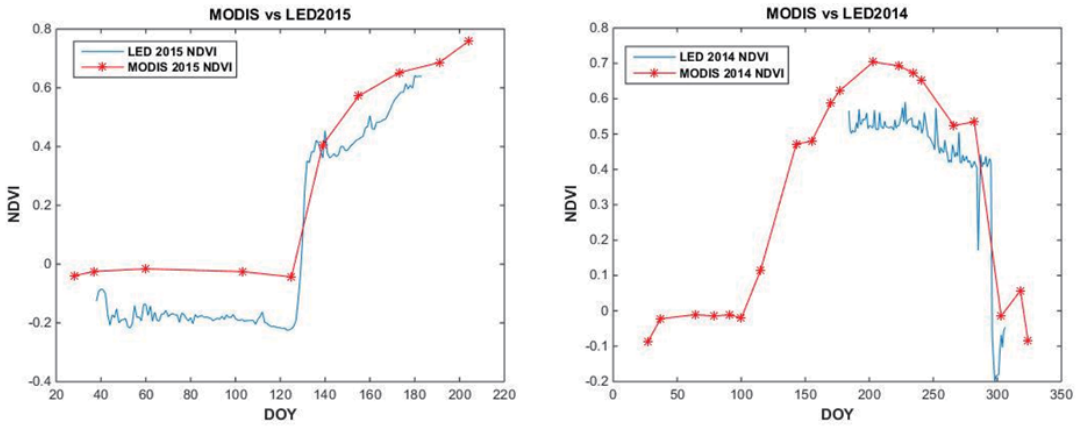


Fig. 225. Comparison of NDVI between LED and MODIS.

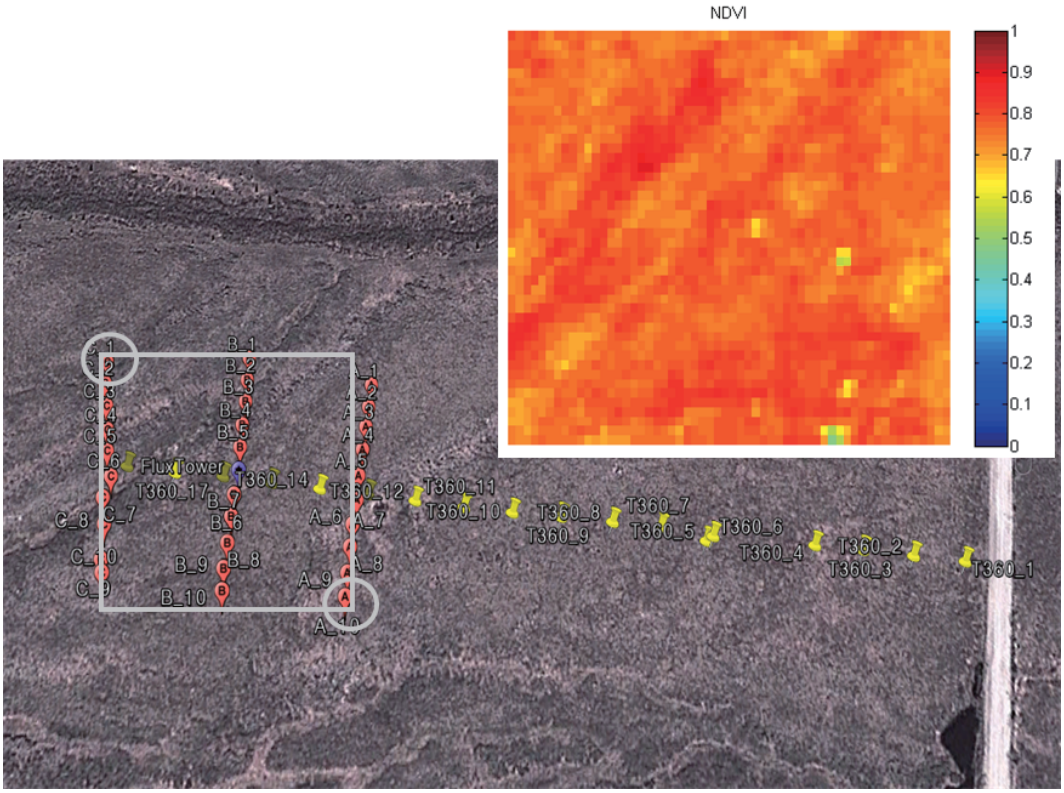


Fig. 226. NDVI map derived from WorldView II satellite image.

(5) 위성 Remote Sensing - WorldView II

가) 8월 4일에 찍힌 WorldView II (WVII) 위성 영상은 해상도는 2m로 8개의 다중분광 밴드가 (Coastal blue, yellow, red edge, NIR1, NIR2, Red, green, blue) 있다.

나) 영상을 pre-processing과정을 거친 후, digital number를 top-of-atmosphere radiance 로 변경하여, 6S 모델로 surface reflectance로 변환한다. 변환된 Surface reflectance 값으로 정규화 식생 지수를 계산했다 (Fig. 226).

다) 현장 측정 날짜와 위성 영상을 얻은 날짜가 달라 upscale 가능하지가 않았지만 transect A, B, 그리고 C의 지역을 확대하여 살펴봤다 (Fig. 227). 본 연구에서 사용한 기장비의 내용은 Table 18과 같다.

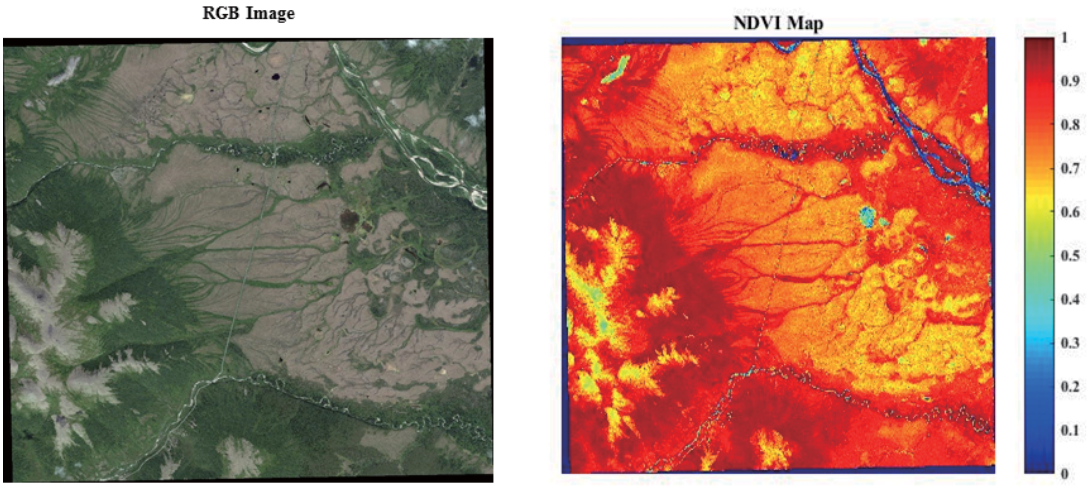


Fig. 227. Left) WorldViewII RGB image, Right) WorldViewII NDVI map.

Table 18. Equipments used in this study

Equipment	Period	Spatio-Temporal Resolution
ASD-FieldSpec	July 3-7, 2015	~30 cm
LAI-2200		148°(field-of-view)
LED	2014 (half-hourly) ~	~1 m
WorldView-II	4 Aug, 2015	2 m
Landsat	1982 (16-daily) ~	30 m
MODIS	Since 2000 (daily) ~	250 m

본 과제를 수행함에 있어서 2015년도 7월에 알레스카 카운실 사이트를 방문하여, 예상치 못한 문제들을 겪었다.

1. 광합성 측정 불가능

: 공항에서 이산화탄소 실린더를 비행기로 미리 운송하지 못하였다.

- 광합성 파라미터 (Vcmax, Jmax) 관측이 불가능하게 되었다.
- 대안으로, Maximum photosynthetic Assimilation Rate을 측정하였다.

2. LAI-2200과 ASD분광계로 측정한 엽면적의 낮은 상관관계 (van Wijk *et al.*, 2005 논문 기반)

: 다발 식물체와과 다각 구조체로 인한 평평하지 않은 지역이 LAI-2200 관측에 불확실성을 높였다.

3. 수고가 높지 못해, LAI-2200 사용 시 한계가 있었다

: LAI-2200의 30° 각도에 들어오는 잎의 넓이의 최소 4배의 거리에서 관측 되어야 한다.

4. NDVI 측정의 불확실성

: 이끼, 지의류, 낙엽 그리고 standing water가 배경 반사도에 영향을 미친다.

5. Footprint의 불일치

: LAI-2200과 ASD 센서의 Footprint를 정확하게 일치하는 것은 불가능하였다.

- NDVI-LAI 상관관계가 낮은 원인이 될 수 있다.
- 수집된 데이터의 시공간해상도 (spatial and temporal scale) 다 다르며 integration하는 필요하다.

KOPRI 극지연구소

제 2 절
북극권 동토층의 환경변화 특성 규명(세부과제 2)

1. 알래스카 토양 및 미생물 특성

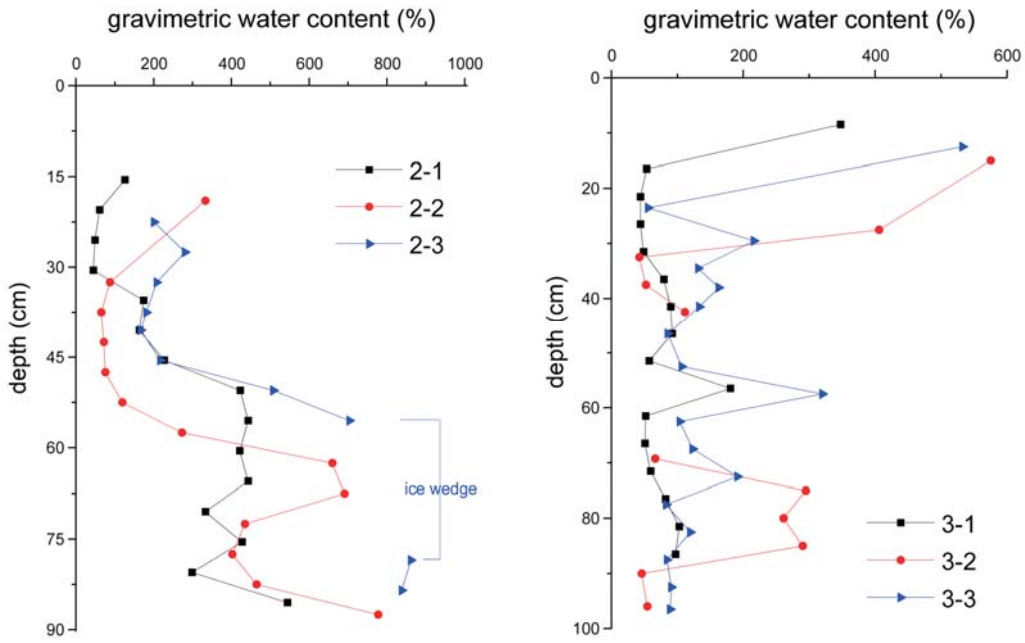
가. 활동층과 영구동토층을 포함한 유기물과 미네랄 토양 코어 시료 (2012년)

(1) 토양 특성

2012년 활동층과 영구동토층을 포함한 약 1 m 깊이의 코어 시료의 물리적 특성을 분석하였다. 코어 2는 얼음쐐기(ice wedge)가 있는 지역에서 샘플링한 시료로서, 토양층 깊이 들어가면서 중량수분함량(gravimetric water content)이 증가하는 것을 볼 수 있었다(Fig. 1). 코어 2-3의 경우 58-76 cm 깊이에서 얼음쐐기가 존재하는 것을 확인하였다. 코어 3은 표층의 melted layer와 코어 상부의 중량수분함량이 매우 높게 나타났다. 이 지역은 이끼와 지의류가 우점하는 지역으로서 지형이 낮기 때문에 녹은 눈이 토양 표층에 고여 있었을 가능성이 있다. 코어 5는 미네랄 토양이 존재하는 지역으로 중량수분함량이 전반적으로 낮았으나, 5-4의 경우 75-85 cm 부근에서 중량수분함량이 매우 높아지는 것을 볼 수 있었다. 토양 가밀도의 경우 코어마다 일정한 패턴을 보이지 않았으나, 유기물이 많은 코어 2와 3은 1.0 g cm^{-3} 이하였고 코어 5는 1.0 g cm^{-3} 보다 큰 값을 나타내었다(Fig. 2).

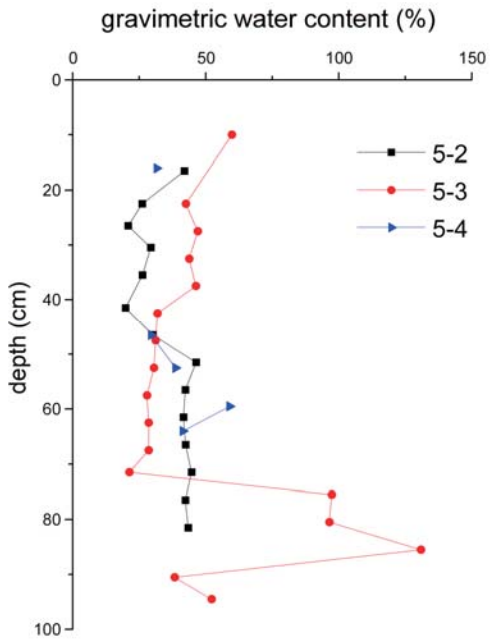
용적수분함량(volumetric water content)의 경우 코어 2는 약 30 cm 깊이까지 35% 정도로 감소하다가 다시 증가하는 패턴을 보여 60-70% 정도의 값을 나타내었다(Fig. 3). 코어 3에서 용적수분함량이 감소하는 패턴을 보였으나, 특정 깊이에서는 높게 나타나기도 하였다. 코어 5의 용적수분함량은 다른 코어에서보다 낮게 나타났고, 토양 깊이에 따라 감소하는 패턴을 보였으나, 5-3의 경우 다시 증가하기도 하였다.

KOPRI 극지연구소

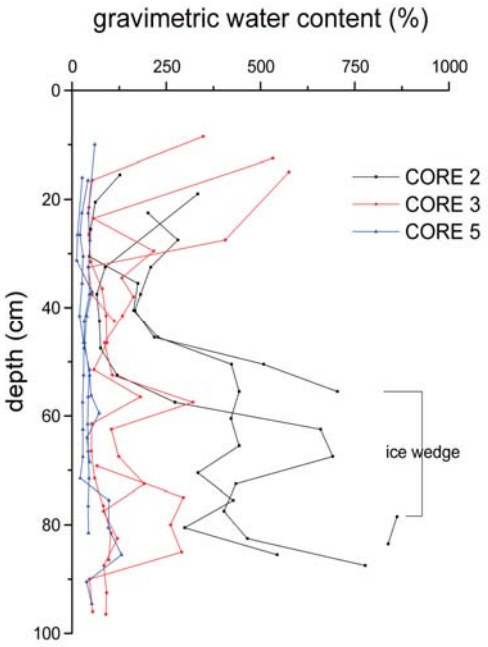


(a) Core 2

(b) Core 3

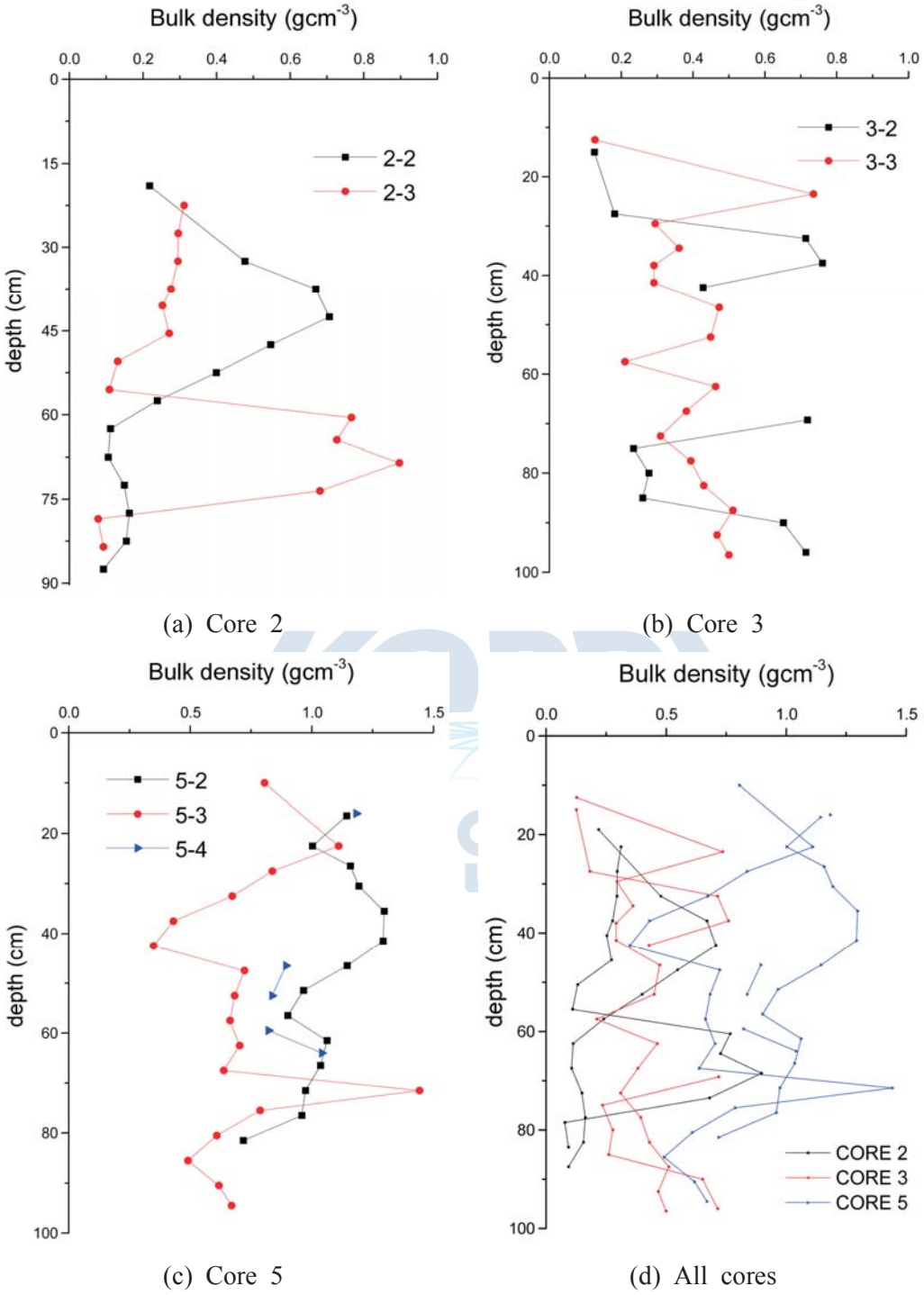


(c) Core 5



(d) All cores

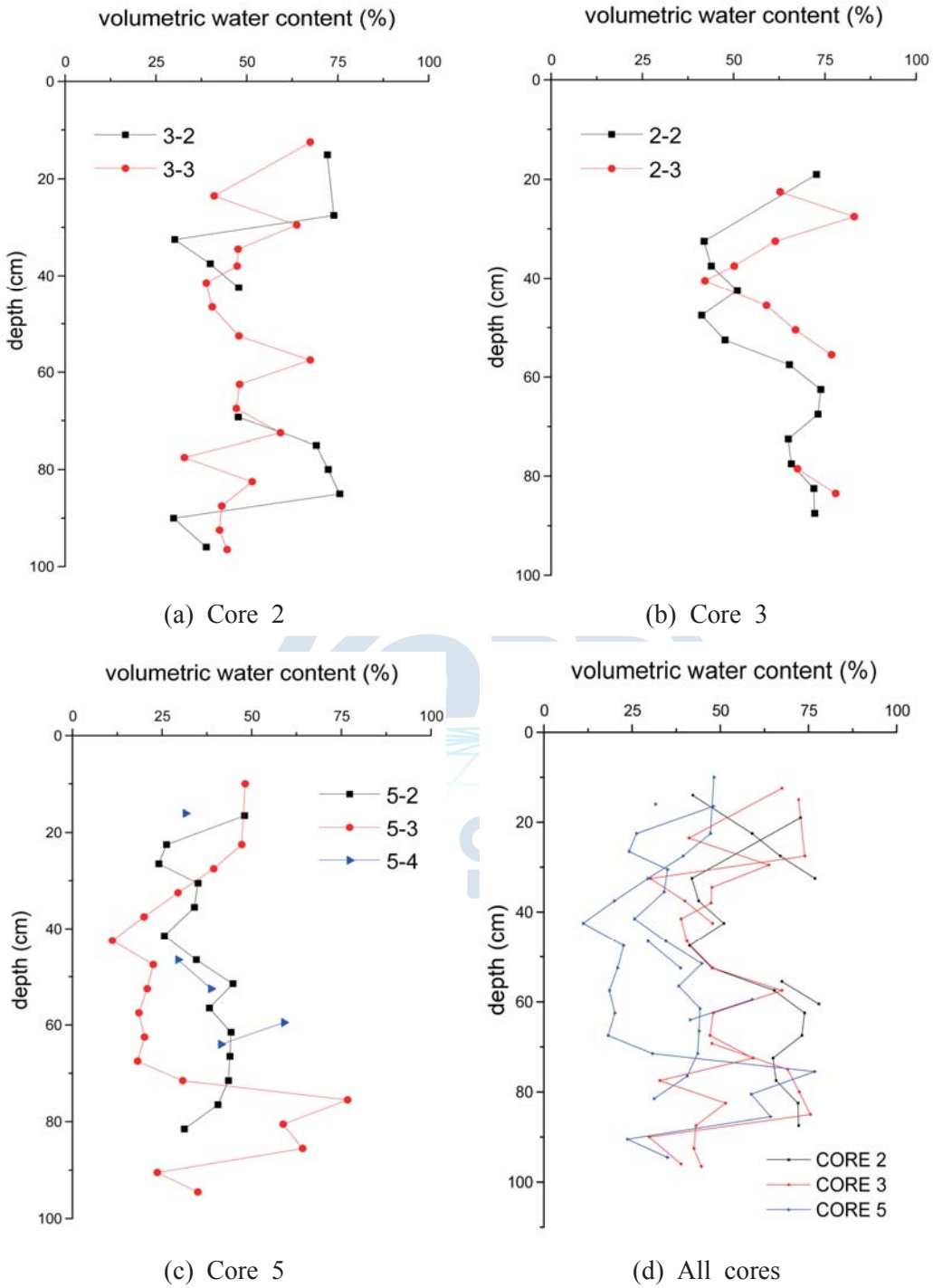
Fig. 1. Depth distribution of gravimetric water content in the cores.



(a) Core 2 (b) Core 3

(c) Core 5 (d) All cores

Fig. 2. Depth distribution of bulk density in the cores.



(a) Core 2 (b) Core 3

(c) Core 5 (d) All cores

Fig. 3. Depth distribution of bulk density in the cores volumetric water content.

토양 pH는 3개의 코어에서 4-5.5 사이의 산성을 나타내었고, 유기물이 많은 표층 토양에서 pH 3.8 정도로 낮았으나, 깊은 곳에서는 pH 5-5.5 사이의 값을 보였다(Fig. 4). 반면 미네랄 토양은 표층에서 유기물 토양보다 pH가 약 0.5-1 이상 높았다. 3개의 코어 모두 깊이가 깊어지면서 토양 pH가 증가하는 경향을 보였다.

전기전도도의 경우, 코어 2에서는 토양 유기탄소 분포 패턴과 유사하게 표층에서 높았고, 얼음쐐기가 있는 아래층에서 높게 나타났다(Fig. 5). 그러나 코어 3과 5에서는 깊이에 따른 특별한 패턴이 나타나지 않았으나, 미네랄 토양에서 전기전도도가 가장 낮게 측정되었다.

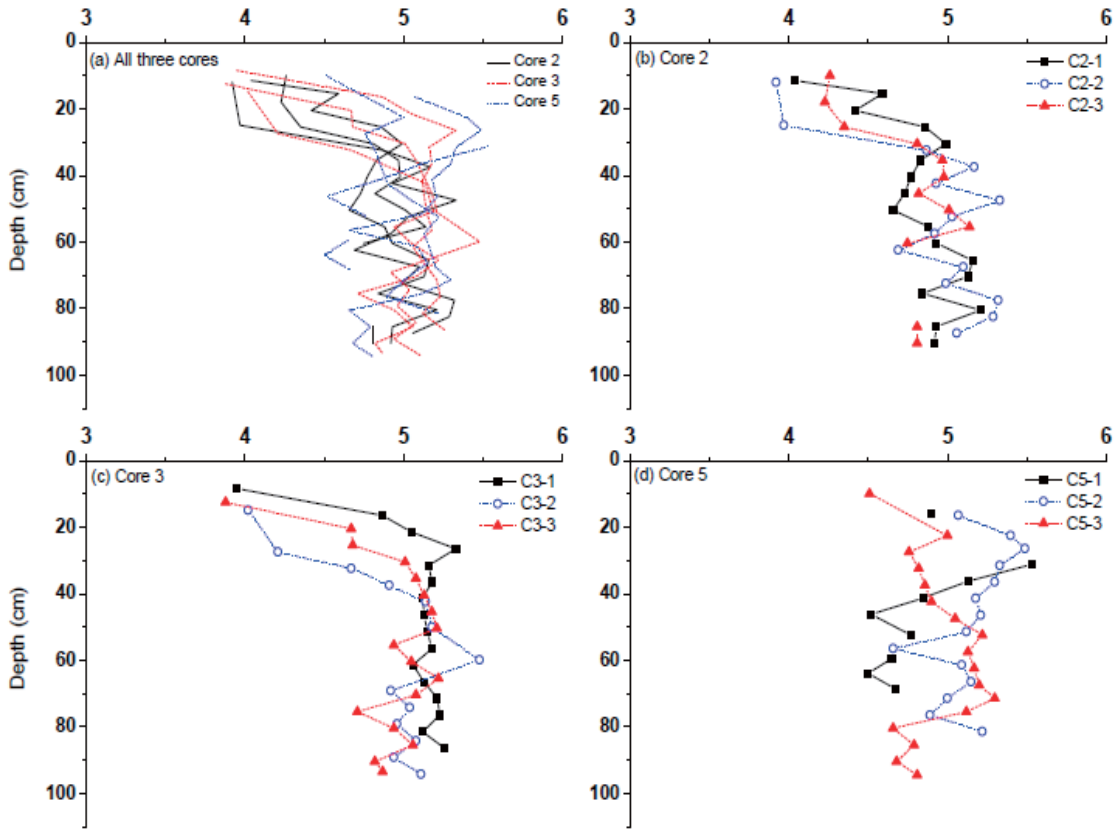


Fig. 4. Depth distribution of soil pH in the cores.

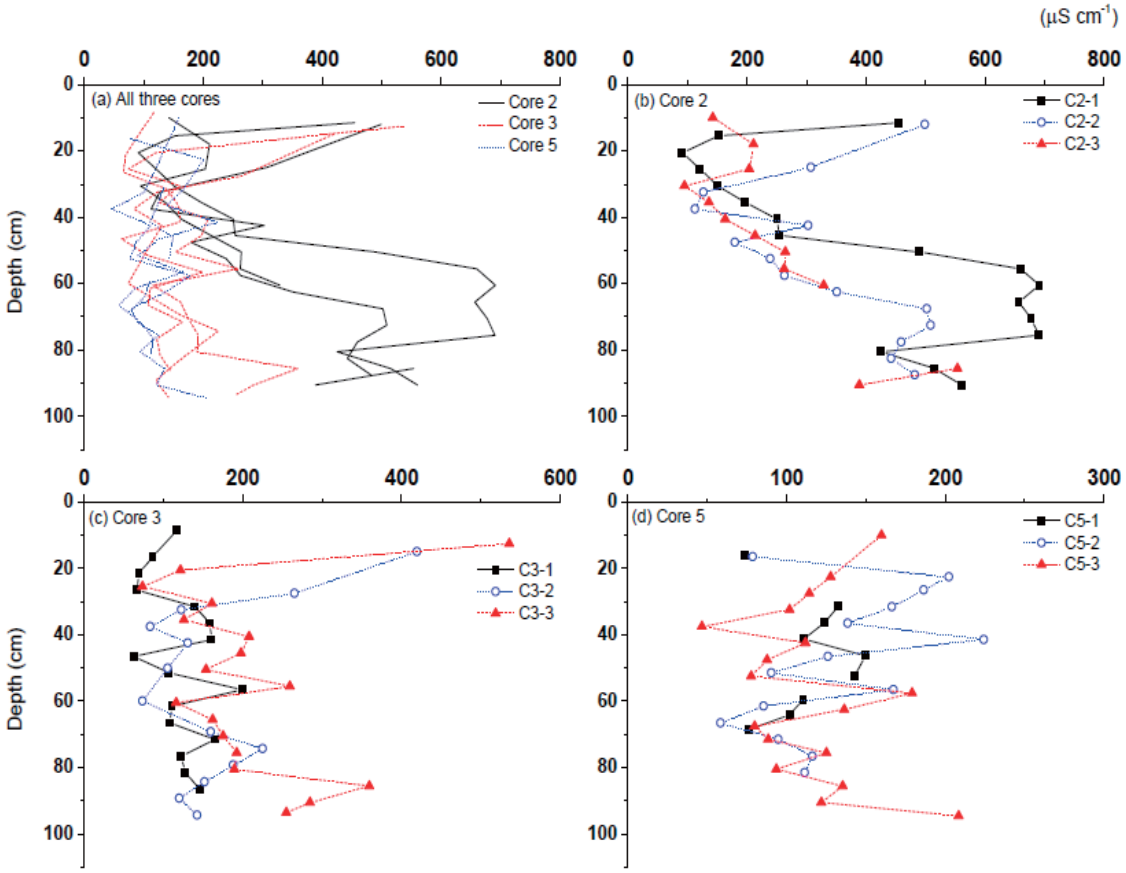


Fig. 5. Depth distribution of soil electrical conductivity in the cores.

극지연구소

산성 토양에서 토양 내 총탄소 함량은 유기탄소로 간주할 수 있다. 온대지역에서 토양 유기탄소가 깊이에 따라 감소하는 패턴을 보이는 반면, 알래스카 토양에서 유기탄소 함량은 전반적으로 깊이에 따른 일정한 패턴을 보이지는 않았다(Fig. 6). 얼음쐐기가 있는 코어 2에서는 50cm 깊이 이하에서 탄소 함량이 높게 나타났다. 반면, 유기물이 많다고 판단하였던 Core 3에서는 60 cm 이하 깊이에서 탄소 함량이 낮아졌다. 미네랄 토양인 코어 5는 다른 지점보다 확연히 탄소 함량이 낮았다. 깊이에 따른 탄소 분포는 동일 사이트 내 에서도 코어마다 다른 특성을 보여 일반화하기 어려움이 있었다. 토양 내 총질소의 패턴은 탄소 분포와 유사하였다(Fig. 7). 토양 탄질비(C/N)는 전반적으로 20-30 사이의 값을 나타내었고, 코어 2에서 30-50 cm 깊이에서 값이 높아지는 패턴을 나타내었다(Fig. 8). 코어 3은 토양 표층에서 매우 높은 탄질비를 나타내었으나, 깊이가 깊어질수록 감소하다가 60-80 cm 구간에서 다시 증가하였다가 감소하는 경향을 나타내었다. 코어 5는 코어마다 서로 다른 패턴을 나타내었다.

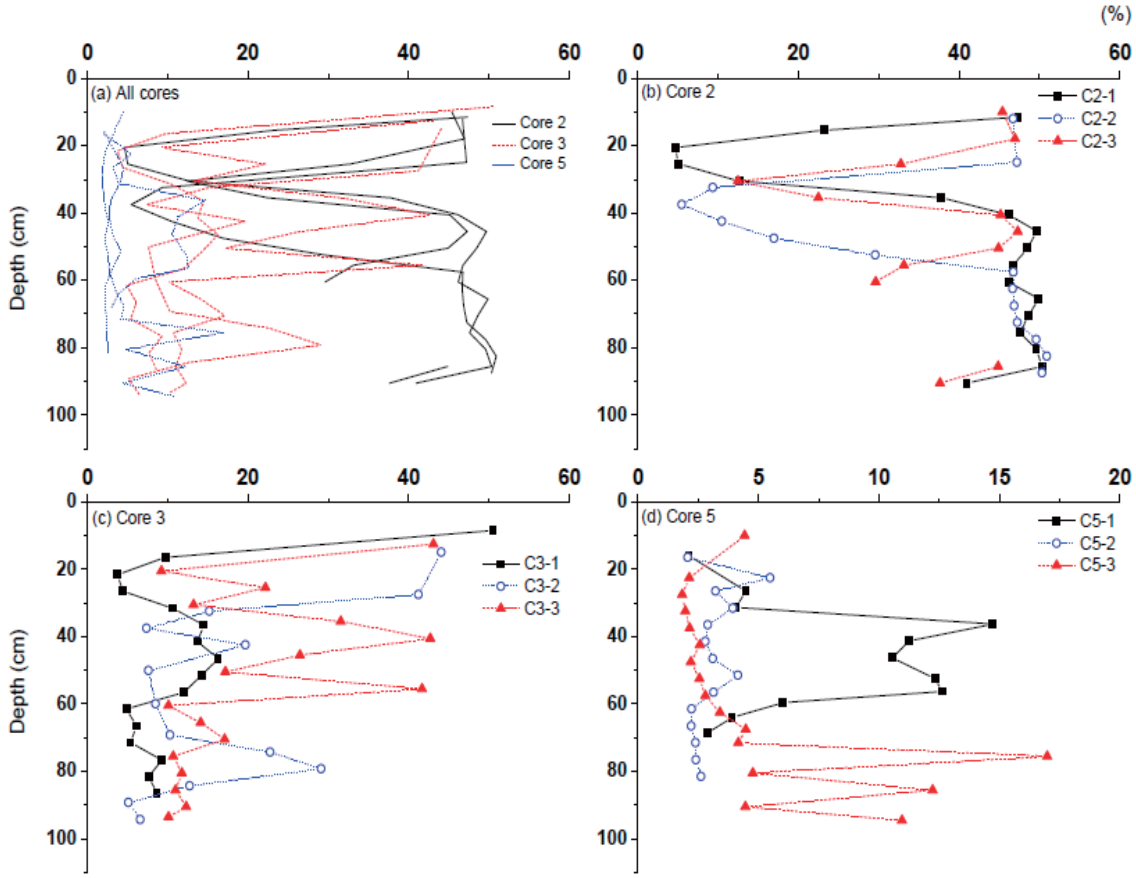


Fig. 6. Depth distribution of soil organic carbon content in the cores.

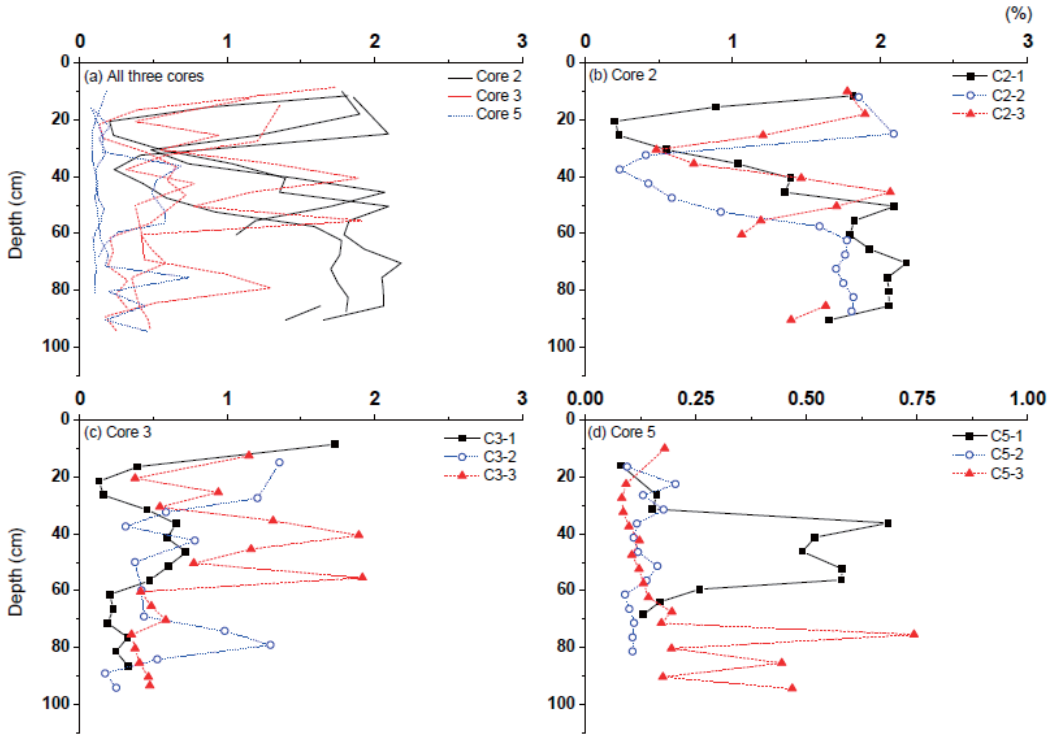


Fig. 7. Depth distribution of total nitrogen content in the cores.

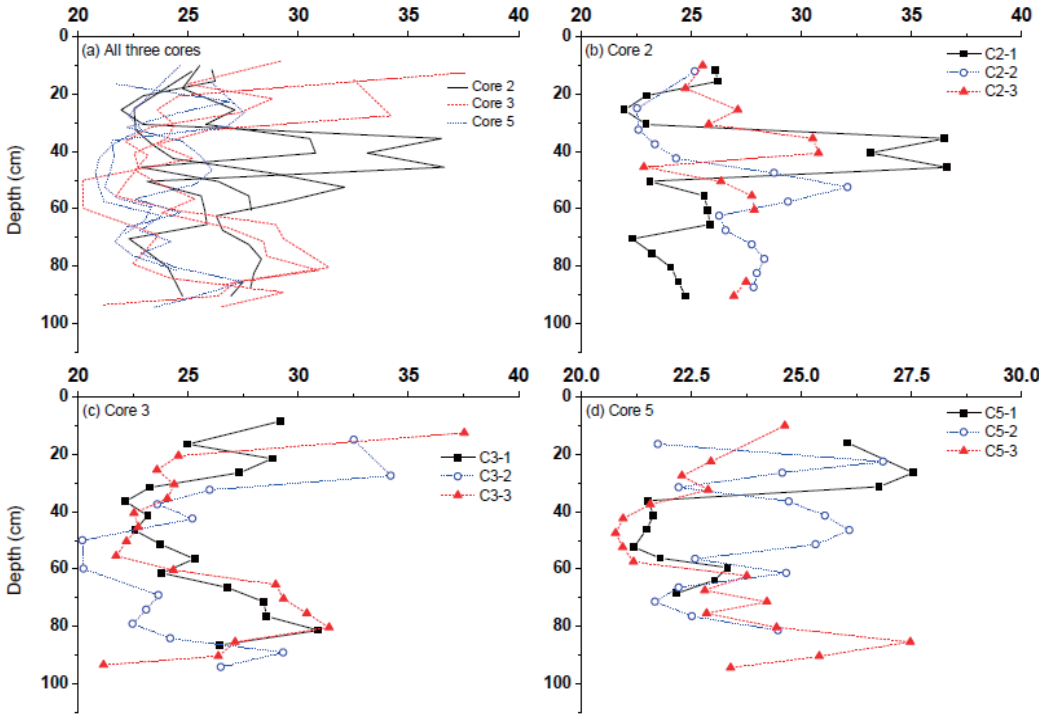


Fig. 8. Depth distribution of soil C/N ratio in the cores.

토양 내 암모늄 이온 농도는 표층에서 매우 미량이 측정되었으나, 60-80 cm 깊이에서 급격히 증가하는 현상이 관측되었다(Fig. 9). 이 깊이는 활동층과 영구동토층의 경계라 생각된다. 코어 2에서 가장 높은 농도의 암모늄 이온이 측정되었고, 미네랄 코어인 5번 코어에서 가장 낮은 양이 측정되었다. 질산이온은 동일한 지점이라도 코어에 따라 편차가 있었고, 깊이에 따른 일정한 패턴을 설명하기 어려웠다(Fig. 10). 질산이온은 매우 농도가 낮아, 전체 무기태 질소의 대부분은 암모늄 이온으로 구성되어 있어, 무기태 질소의 깊이별 변화는 암모늄 이온의 변화 패턴과 동일하였다(Fig. 11).

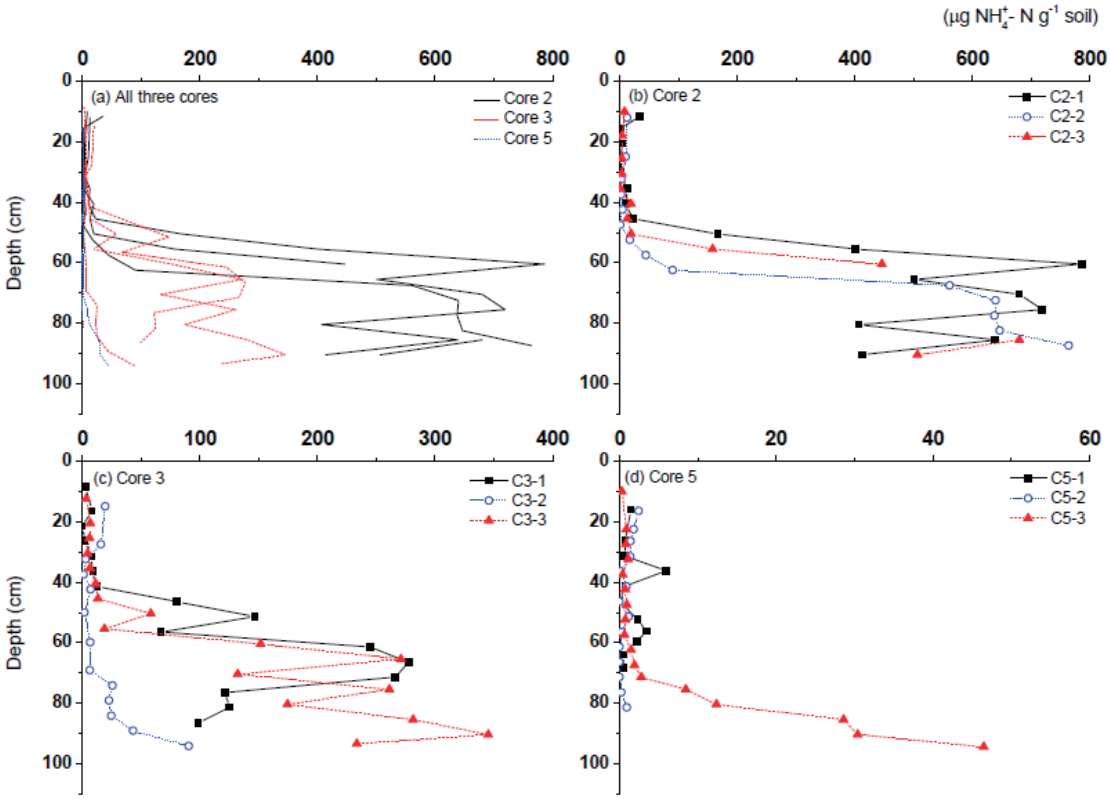


Fig. 9. Depth distribution of NH_4^+-N content in the cores.

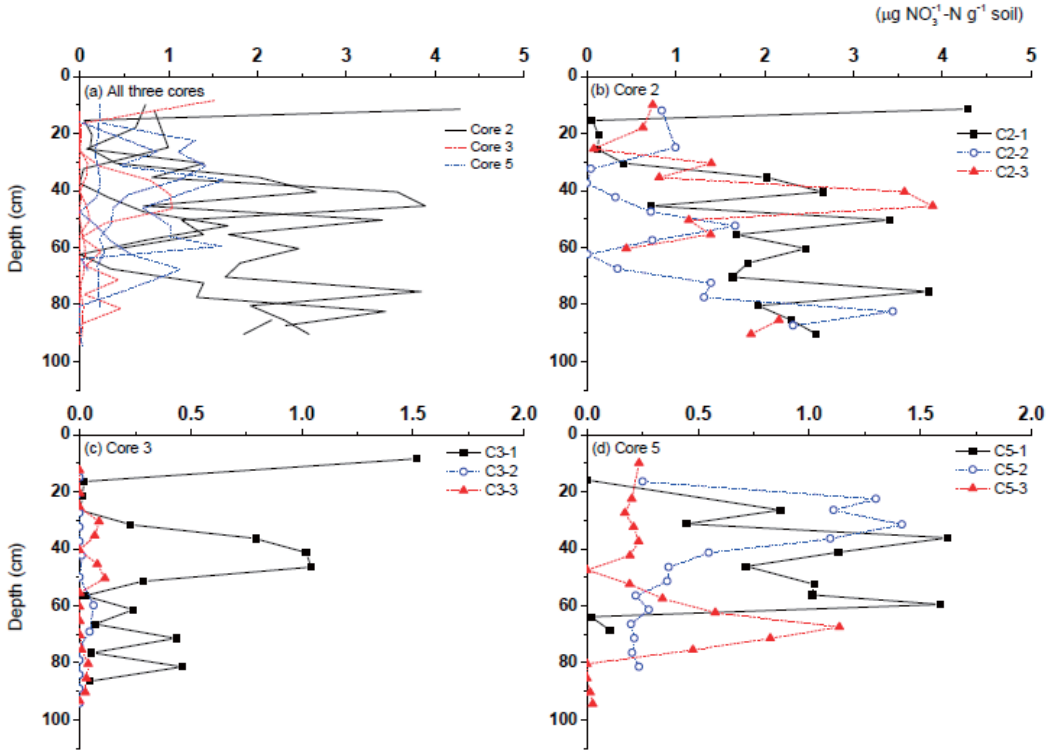


Fig. 10. Depth distribution of NO_3^--N content in the cores.

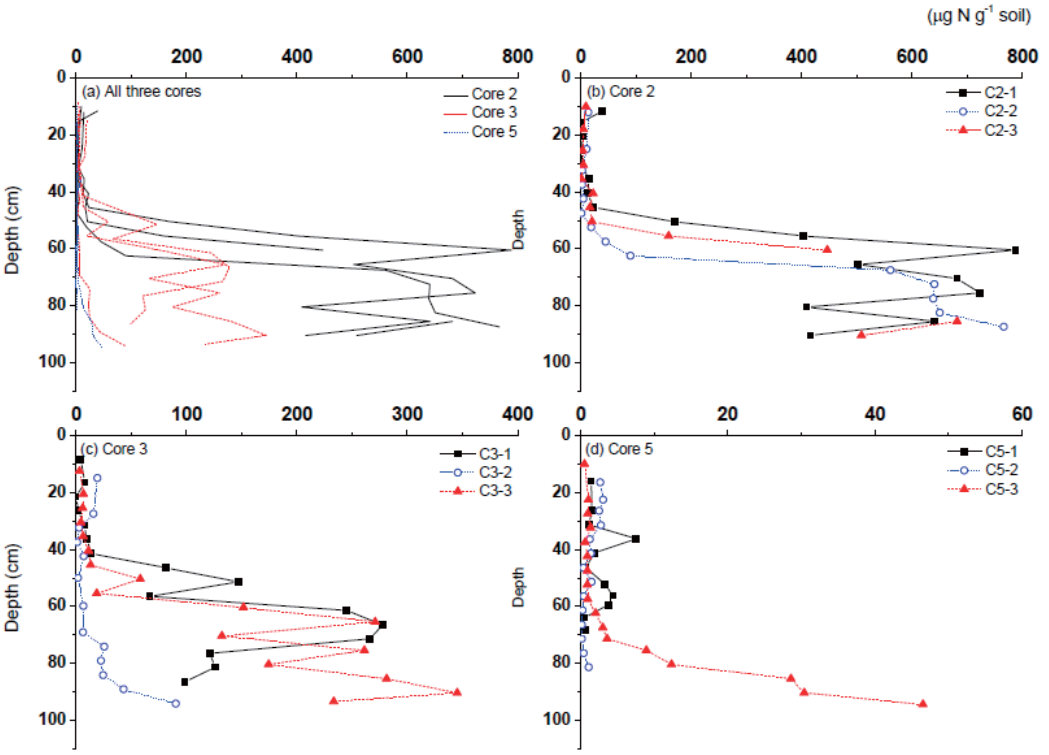


Fig. 11. Depth distribution of inorganic nitrogen content in the cores.

총 인, 나트륨, 칼륨, 마그네슘, 칼슘을 분석한 결과 코어마다 매우 큰 차이를 보였고, 깊이에 따른 일정한 패턴을 나타내지 않는 경우도 많았다. 총인은 Core 2에서 표층에서는 매우 높고, 하층에서 1/2 또는 1/4수준으로 감소하였으나, Core 3에서는 깊이에 따른 패턴을 보이지도 않고 주로 150-600 mg/kg 의 범위에서 값의 변동이 컸다(Fig. 12). Core 5는 코어마다 깊이에 따라 다르게 변하여 패턴을 기술하기가 어려웠다. 나트륨 또한 깊이에 따른 패턴을 보이지는 않고 outlier로 간주될 값이 매우 높은 시료들이 있었다(Fig. 13). 칼륨은 총인의 패턴처럼, Core 2에서는 표층이 높고 깊이에 따라 감소하였으나, Core 3에서는 깊은 곳에서도 값이 높아지기도 하였고, 미네랄층으로 구성된 Core 5에서는 패턴이 나타나지 않았다(Fig. 14). 마그네슘은 Core 2에서 깊이에 따라 감소하였고, Core 3에서는 깊은 곳에서도 2-3개의 피크값을 보이는 패턴을 보였으며, Core 5는 패턴 변화가 나타나지 않았다(Fig. 15). 칼슘은 나트륨처럼 일부 지점에서 outlier로 의심될만한 높은 값을 나타내었다(Fig. 16).

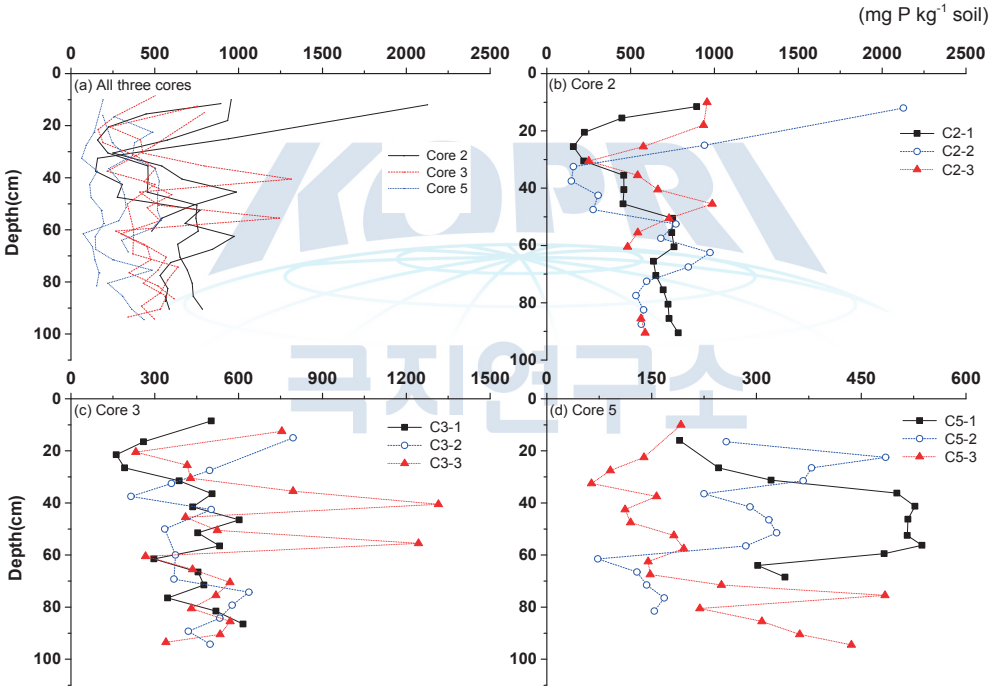


Fig. 12. Depth distribution of total phosphorus content in the cores.

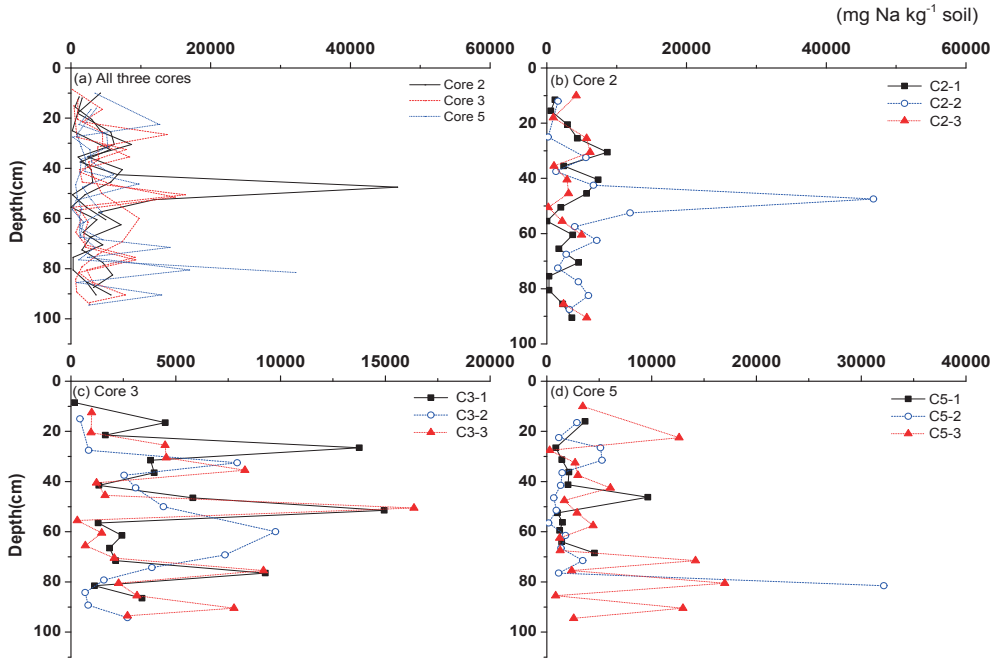


Fig. 13. Depth distribution of total Na content in the cores.

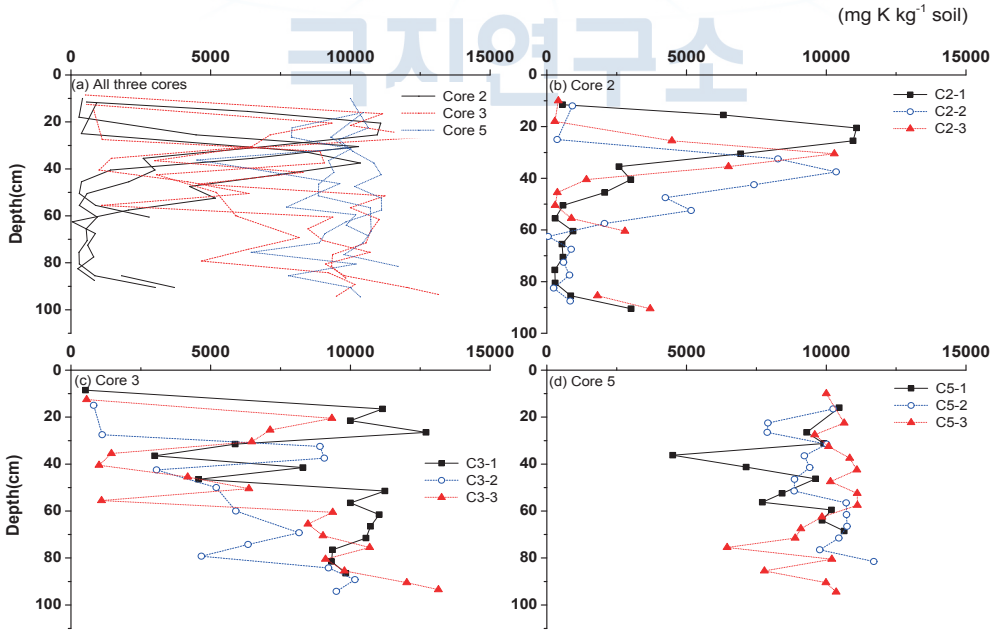


Fig. 14. Depth distribution of total K content in the cores.

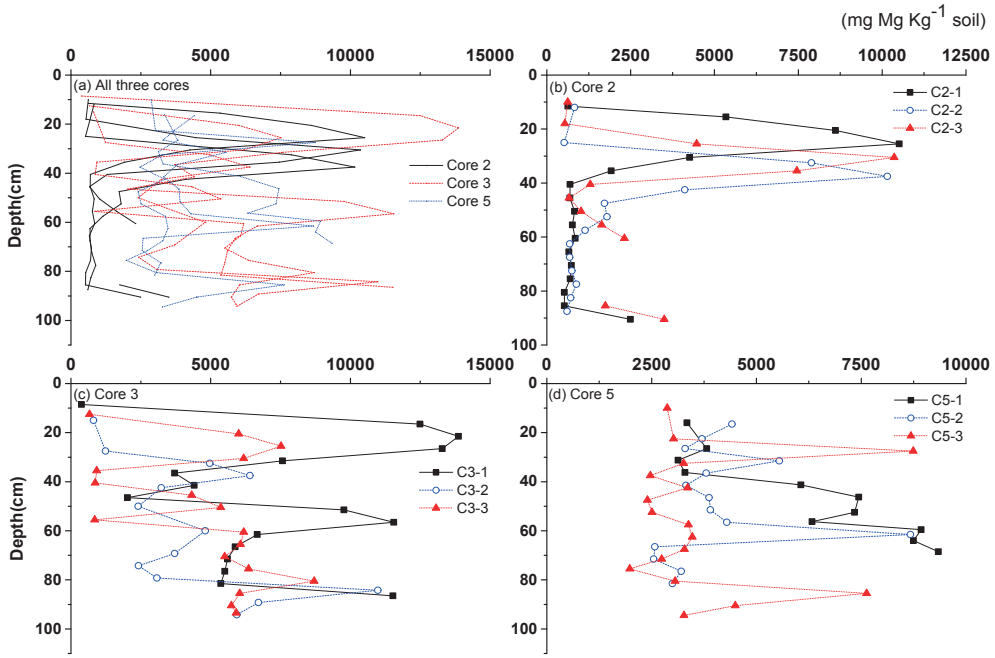


Fig. 15. Depth distribution of total Mg content in the cores.

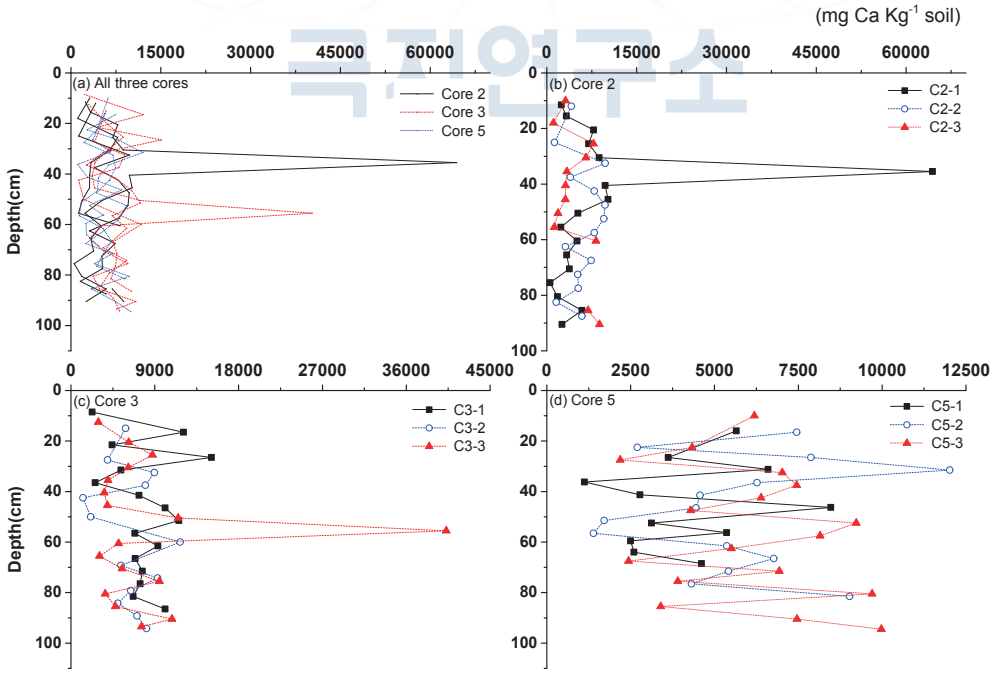


Fig. 16. Depth distribution of total Ca content in the cores.

주 원소 분석 결과, 깊이나 코어에 따른 패턴을 해석하기에 어려움이 있었다. 모든 데이터를 취합하여 원소들 간 상관관계를 분석한 결과, 질소와 인 사이에 강한 양의 상관관계(r = 0.769)가, 질소와 칼륨 사이에 강한 음의 상관관계(r = -0.928)가 나타났다 (Fig. 17).

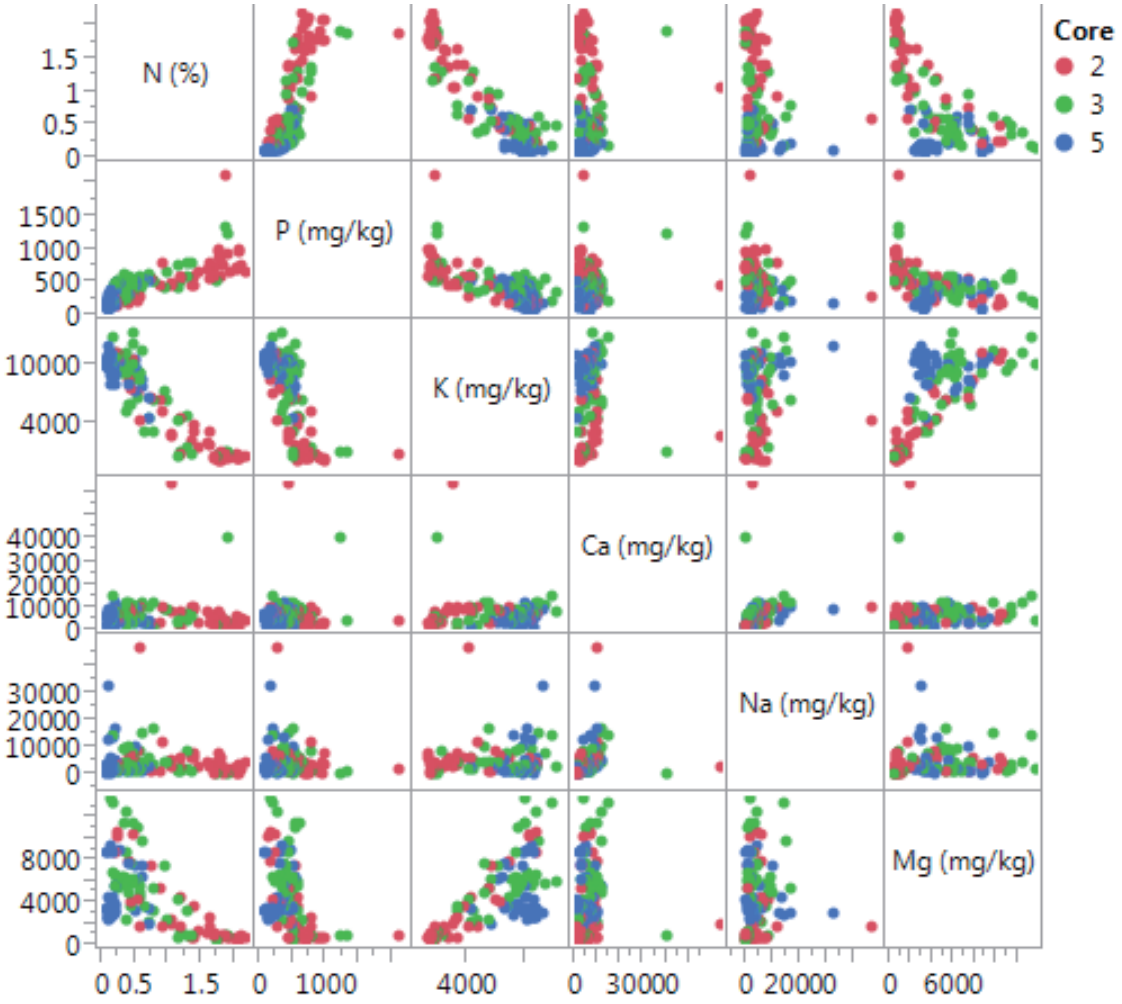


Fig. 17. Scatter plots between contents of major elements in soil.

(2) 미생물 특성

박테리아 군집은 코어 2와 3이 유사한 경향을 보였고 코어 5는 이들과 다소 차이를 보였다(Fig. 18a). 모든 코어 시료에서 *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, AD3 및 *Chloroflexi*가 우점하는 양상을 보였으나 코어별로 이들의 상대우점양상은 다르게 나타났다(Fig. 19). 전반적으로 *Acidobacteria, Alphaproteobacteria, Gammaproteo- bacteria*, *Planctomycetes* 및 AD3는 깊이에 따라 감소하는 경향을 보였으며, *Chloroflexi*, *Betaproteobacteria*, *Verrucomicrobia*, *Firmicutes* 및 TM7은 증가하는 경향을 보였다(Fig. 20). 이들 박테리아 군집은 활동층과 동토층에서 서로 다른 군집 양상을 보였으며 통계적으로 유의한 차이(P≈0.05)를 보였다(Fig. 21, 22). Mantel test 결과, 주요 박테리아 그룹은 토양의 다양한 물리 화학적 특성과 밀접한 상관관계를 보였다(Table 1).

고세균의 경우, PCoA 분석 결과 고세균은 코어 시료간 차이를 보이지 않았다(Fig. 18b). 코어 2와 3은 상층부에 *Methanobacteria*가 상대적으로 많이 분포하고 있고 깊이에 따라 *Methanomicrobia*가 높아지는 경향을 보였으며(Fig. 22a, b), 코어 5에서는 *Methanobacteria*가 중간층에서 나타나기 시작하여 깊이에 따라 감소하는 경향을 보였다(Fig. 22c). 고세균 또한 활동층과 동토층에서 서로 다른 군집 양상을 보였다(Fig. 23).

서로 이질적인 두 개의 코어(core 2, 5)를 대상으로 미생물(박테리아 및 고세균)의 개체수를 계수하여 깊이별 분포양상을 살펴본 결과, 유기물이 많은 코어 2의 개체수(0.05~3.5 x 10^8 cells/g)가 미네랄 성분이 많은 코어 5의 미생물 개체수(0.8~9.8 x 10^7 cells/g)보다 약 10배 더 많은 개체가 있는 것으로 산출되었다. 코어 2에서 미생물 개체수는 깊이에 따라 점차 감소하는 추세를 보인 반면, 코어 5의 개체수는 약 60 cm 부근에서 최대치를 보였고, 깊이에 따라 감소하는 경향을 보였다(Fig. 24).

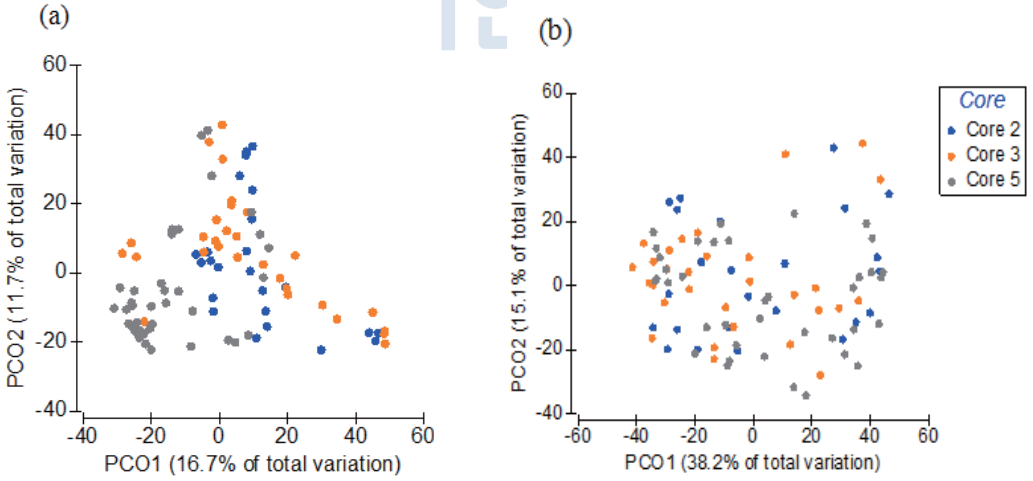


Fig. 18. PCoA result of (a) bacterial and (b) archaeal community structures.

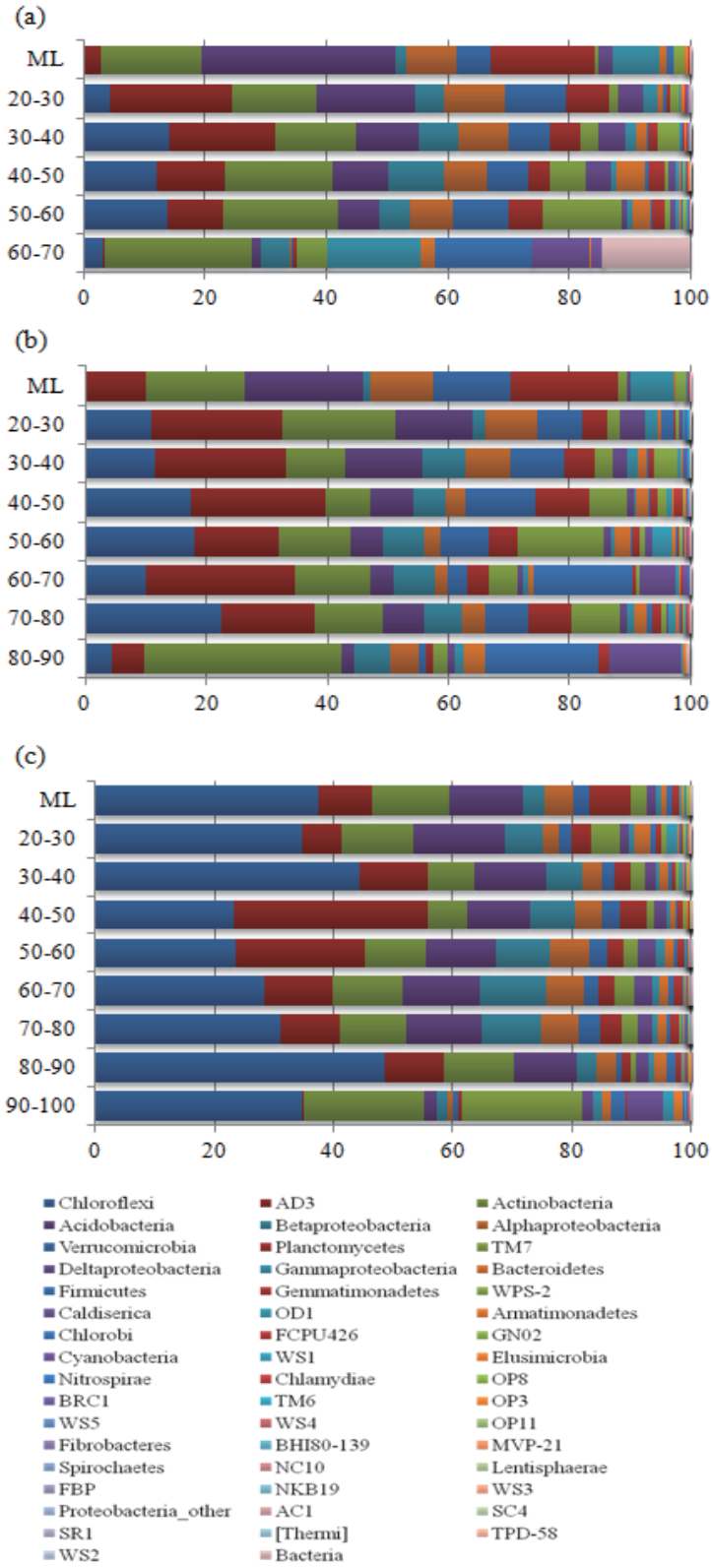


Fig. 19. Depth profile of bacterial phyla at (a) Core 2, (b) Core 3 and (c) Core 5.

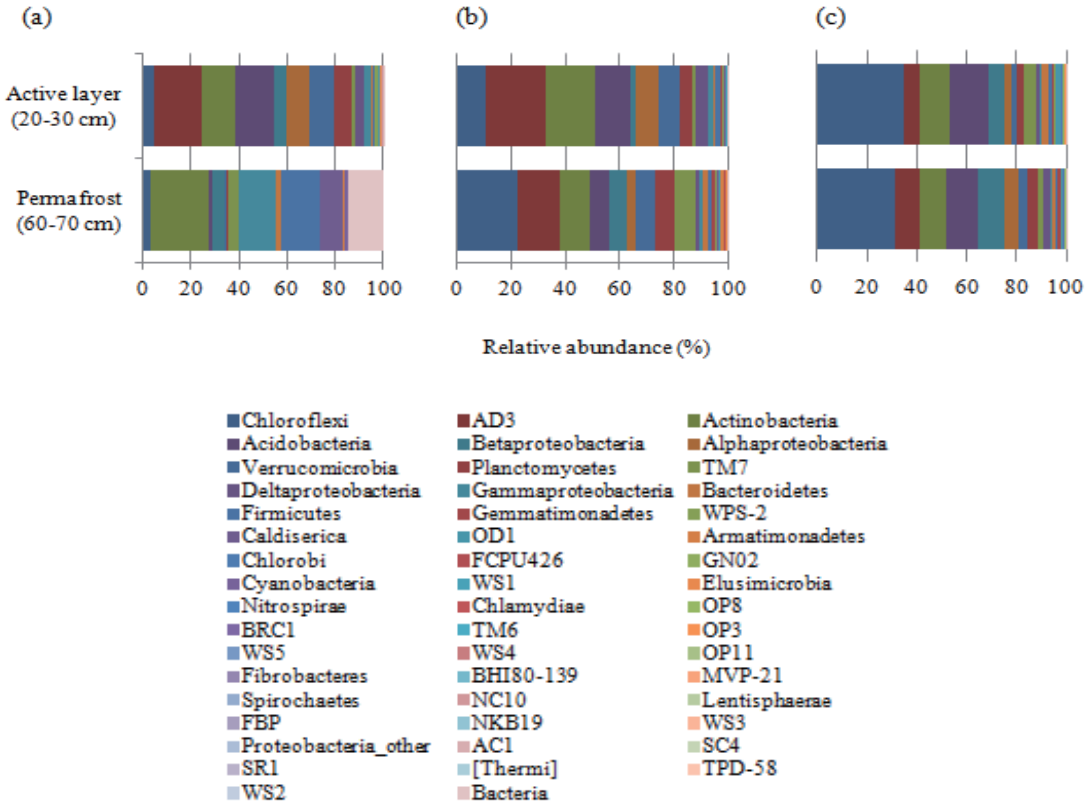


Fig. 20. Bacterial phyla distribution between active layer and permafrost at (a) Core 2, (b) Core 3 and (c) Core 5.

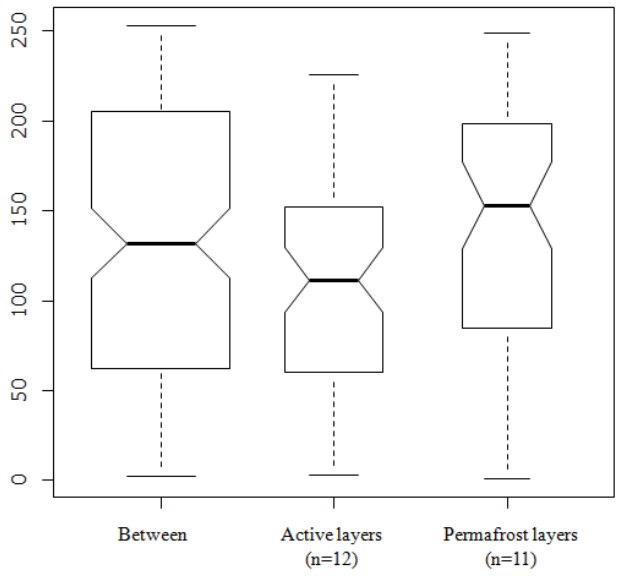


Fig. 21. ANOSIM result of bacterial community structure between active layer and permafrost (r=0.09, p=0.051).

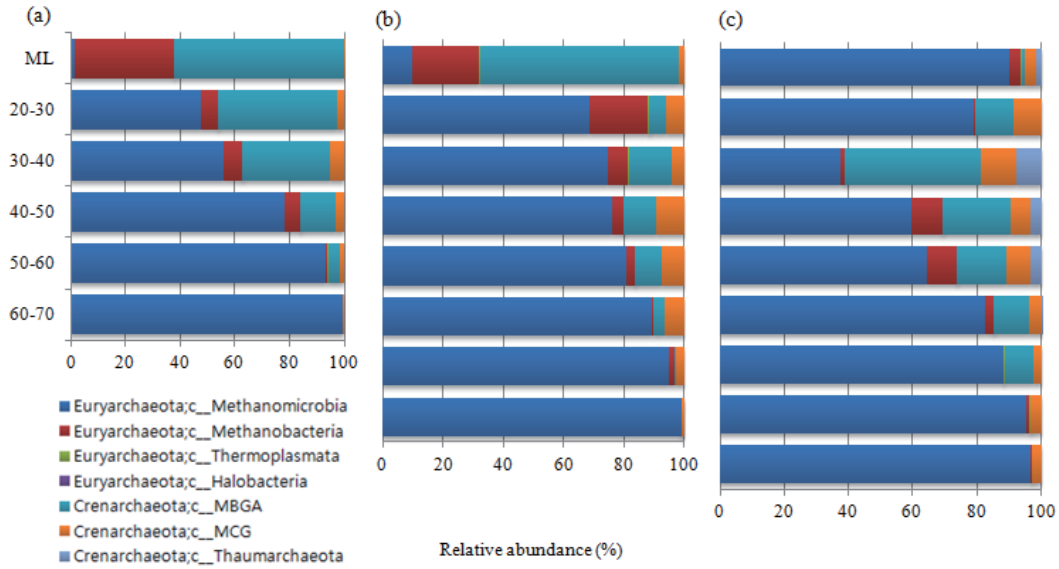


Fig. 22. Archaeal class distribution along soil depth at (a) Core 2, (b) Core 3 and (c) Core 5.

Table 1. Mantel test representing possible correlations between bacterial community structure and soil physicochemical properties

Taxa	Depth		pH		TC		TN		CN		NH_4^+		NO_3^-		IN		MC		EC	
	r	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*
Acidobacteria	0.371	**0.001**	0.273	**0.047**	0.204	0.061	0.217	**0.047**	0.167	0.120	0.521	**0.004**	0.120	0.159	0.519	**0.005**	0.273	0.056	0.287	**0.033**
Actinobacteria	0.018	0.407	0.049	0.329	0.159	0.087	0.133	0.111	0.055	0.305	0.316	**0.050**	0.008	0.415	0.315	0.062	0.049	0.307	0.182	0.119
Alphaproteobacteria	0.145	0.086	0.167	0.132	0.260	**0.024**	0.243	**0.030**	0.089	0.177	0.539	**0.033**	-0.047	0.492	0.537	**0.034**	0.167	0.127	0.294	**0.043**
Bacteroidetes	0.214	**0.030**	0.434	**0.019**	0.223	**0.042**	0.092	0.176	0.485	**0.005**	-0.013	0.426	0.058	0.260	-0.012	0.432	0.434	**0.018**	0.209	0.095
Betaproteobacteria	0.313	**0.006**	0.585	**0.002**	0.218	0.051	0.135	0.122	0.267	**0.040**	-0.148	0.905	0.073	0.267	-0.148	0.888	0.585	**0.002**	0.219	0.069
Chloroflexi	0.255	**0.017**	0.679	**0.001**	0.547	**0.001**	0.501	**0.001**	0.318	**0.033**	0.155	0.136	0.161	0.145	0.154	0.159	0.679	**0.002**	0.452	**0.008**
Firmicutes	0.156	0.065	0.060	0.304	0.113	0.146	0.103	0.138	0.280	**0.025**	0.377	**0.016**	-0.051	0.621	0.103	0.163	0.060	0.315	0.164	0.104
Gammaproteobacteria	0.105	0.143	0.530	**0.003**	0.508	**0.002**	0.455	**0.002**	0.206	0.088	0.371	0.056	0.034	0.319	0.371	**0.045**	0.530	**0.008**	0.523	**0.003**
Gemmatimonadetes	0.166	0.080	0.621	**0.003**	0.570	**0.001**	0.456	**0.001**	0.423	**0.007**	0.262	0.106	0.207	0.117	0.263	0.106	0.621	**0.001**	0.604	**0.001**
Planctomycetes	0.444	**0.001**	0.441	**0.002**	0.347	**0.011**	0.316	**0.011**	0.100	0.231	0.330	**0.046**	0.043	0.313	0.329	**0.035**	0.441	**0.003**	0.338	**0.023**
Verrucomicrobia	0.221	**0.017**	0.034	0.275	0.407	**0.001**	0.447	**0.001**	0.011	0.368	0.449	**0.012**	-0.081	0.734	0.448	**0.010**	0.034	0.290	0.236	0.051
AD3	0.191	0.056	0.104	0.226	0.192	0.056	0.230	**0.038**	-0.067	0.618	0.443	**0.038**	0.063	0.282	0.442	**0.028**	0.104	0.206	0.279	**0.038**
TM7	0.160	0.051	0.204	0.081	0.098	0.152	0.118	0.129	-0.020	0.476	0.103	0.203	0.206	**0.049**	0.103	0.213	0.204	**0.050**	0.154	0.101

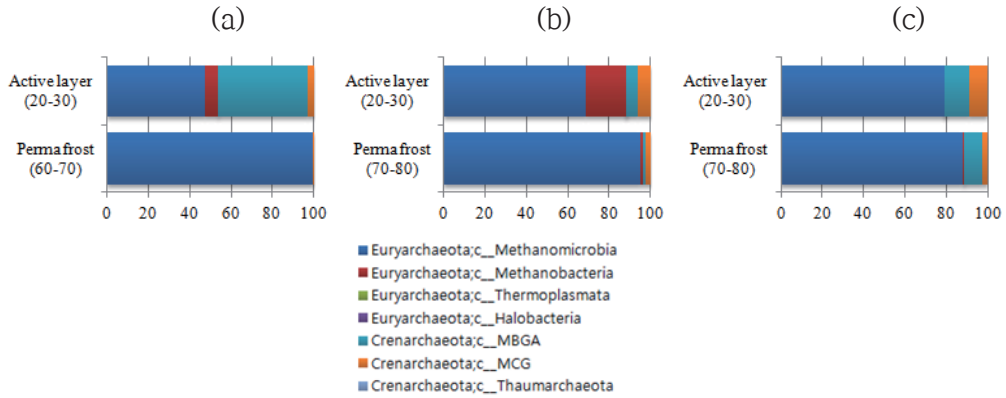


Fig. 23. Archaeal class distribution on active layer and permafrost at (a) Core 2, (b) Core 3 and (c) Core 5.

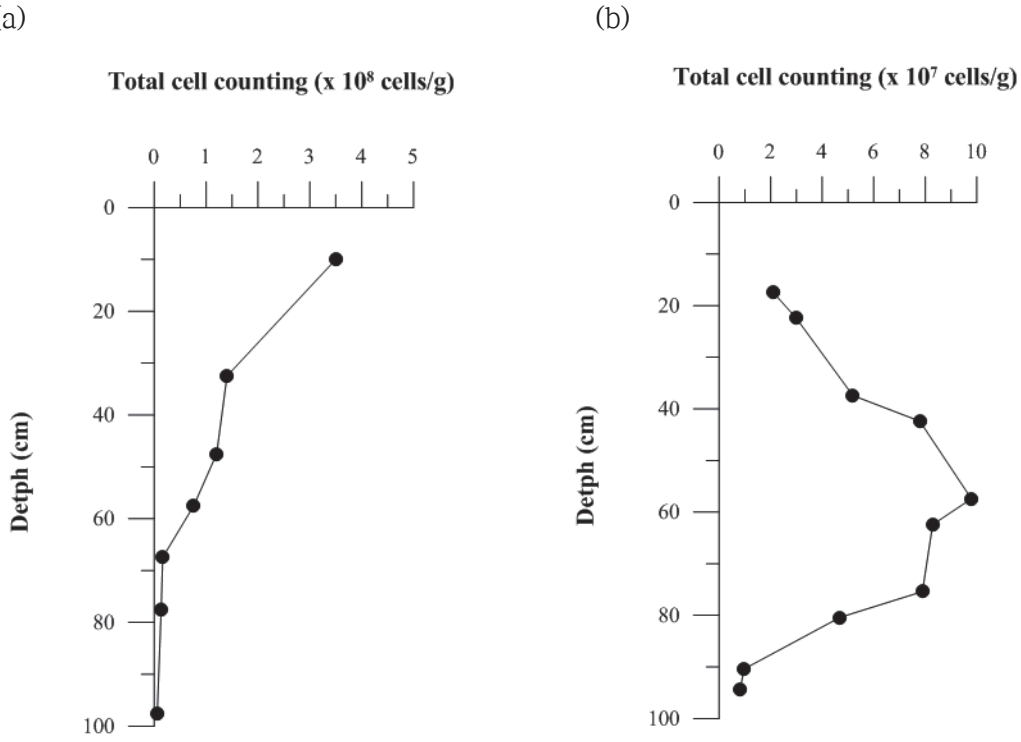


Fig. 24. Microbial cell numbers along soil depth at (a) Core 2 and (b) Core 5.

KOPRI
극지연구소

나. 알래스카 토양의 층위별 특성 비교 (2014년)

(1) 지구물리 탐사를 이용한 영구동토층의 물리적 특성 조사

(가) 서론

① 전기비저항 탐사

전기비저항 탐사는 지하수 단면도화, 광상 탐사, 도시 공학 탐사, 학술 연구 등 다양한 방면에서 널리 사용되고 있는 탐사 기법이다. 북극에서의 전기비저항 연구는 크게 토양의 물리적 성질과 관련된 연구와 장기적인 모니터링을 통한 변화를 관찰한다. 토양 내의 전기적 성질, 즉 수분 함량과 밀접한 관계가 있어 빙하, 토양 내 수분 함량 등의 연구에 적합하다. 자료 처리가 다른 탐사에 비해 간단하고, 자료 처리 과정 중에서 사용자의 주관적인 결과 반영이 적은 특성이 있다.

ABEM사의 SAS 300, 1000, 4000, LS 등 다양한 버전의 장비가 있으며, 전 세계적으로 널리 사용되고 있음. 남·북극에서 활발한 연구를 수행하는 미국 공병대의 극한지역을 연구하는 실험실(Cold Regions Research and Engineering Laboratory)에서 알라스카 지역의 영구동토층 연구를 수행한 바 있다(Fig. 25).

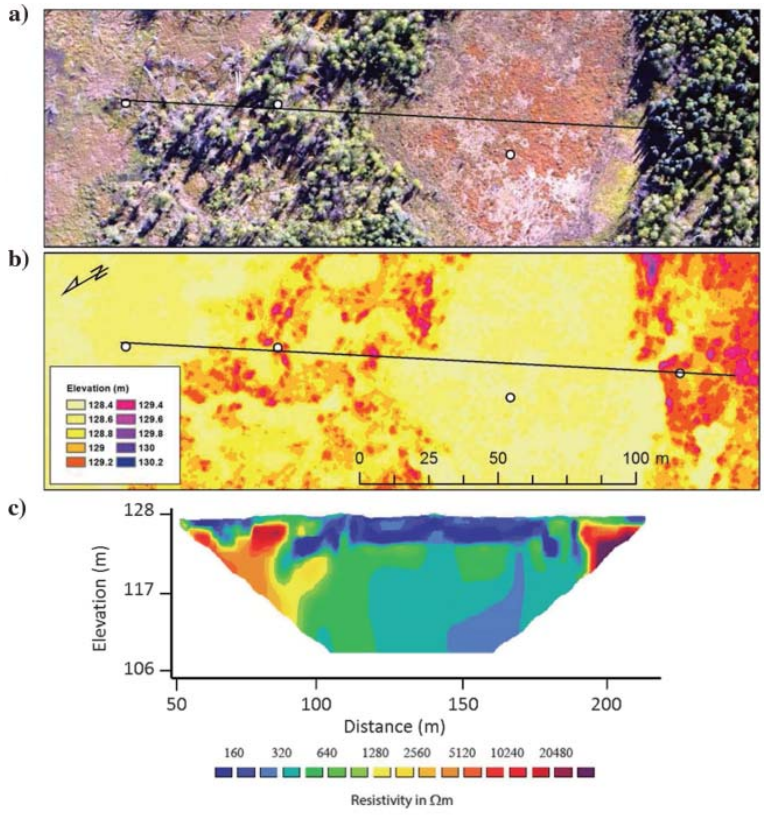


Fig. 25. (a) An aerial image of the 1930 fire scar. (b) Airborne LiDAR imagery, shaded by elevation, for the same region presented in the upper panel. (c) ERT survey results across the transect (Thomas *et al,* 2016).

영국 지리학·지구과학 연구소(Institute of Geography and Earth Sciences, UK)에서 네팔 빙퇴석 지역에 대한 연구를 수행하였다(Fig. 26).

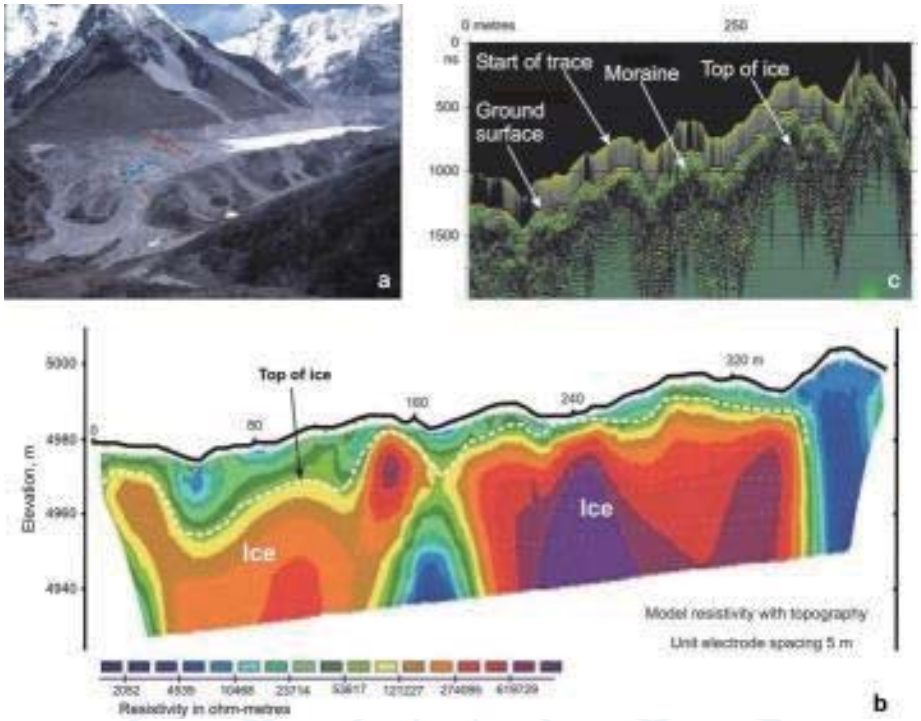


Fig. 26. (a) Imja Tsho, its debris-covered stagnant ice area and terminal and lateral moraines; (b) electrical resistivity; (c) ground-penetrating radar results along the profile line shown by dotted line in (a) (Hambrey, 2008).

매질에서 저항은 단면적과 거리에 따라 변함. 옴의 법칙에 따라 전위차와 전류의 비는 저항으로 정의되고, 매질과의 관계식을 이용하여 전기비저항을 구한다. 전극 막대를 이용해 지표면에 전기를 송신하면, 수신되는 다른 전극 막대에서 저항값을 측정한다(Fig. 27). 전극 막대간의 거리, 전극 막대 배열 방법에 따라 비저항(resistivity)으로 계산한다. 전기비저항의 역수는 전기전도도(conductivity)이다. 전기비저항 탐사 장비로는 ABEM사 Terrameter LS 시스템 등이 있다(Fig. 28).

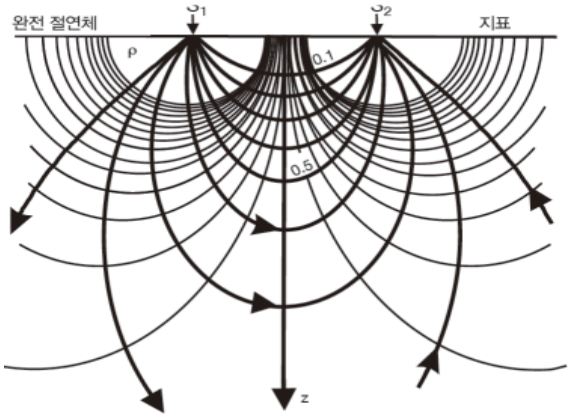


Fig. 27. Diagram of the electrical resistivity.

Fig. 28. Investigation system of the electrical resistivity (ABEM Inc. Terrameter LS) and cables.

② GPR(ground penetrating radar; 지하투과레이더) 탐사

북극에서의 지구물리 연구는 크게 토양의 물리적 성질과 관련된 연구와 장기적인 모니터링을 통한 변화를 관찰할 수 있다. 혹한의 기후가 장비의 배터리나 탐사 운영에 큰 영향을 미치지만 최근 개발된 장비는 남북극의 혹한을 극복할 수 있는 수준이므로 북극에서 활용하기에 크게 문제가 되지 않는다.

GSSI(Geophysical Survey Systems, Inc.)사 시스템의 경우, 남·북극에서 활발한 연구를 수행하는 미국 공병대의 극한지역을 연구하는 실험실(Cold Regions Research and Engineering Laboratory)에서 135MHZ 안테나를 이용한 알라스카 지역의 만년설 연구와, 남극에서 400MHz와 80MHz를 활용하여 빙하 연구를 수행한 바 있다. Sensors and Software사의 경우 100MHz와 200MHz가 남·북극의 빙하 연구에 주로 활용한다. Malå

GeoScience사의 시스템은 50과 100, 250MHz 안테나가 영구동토층의 변화, 만년설-얼음 변위영역(firn-ice transition zone) 등의 연구에 활용한다.

GPR 탐사 방법을 이용하여 지하의 기반암으로부터 반사된 반사파를 측정한다(Fig. 29). 레이더 파는 지하 구성 물질(암석, 눈, 얼음, 공기) 상태에 따라 유전율 차이로 인해 반사파를 생성한다. 반사파 신호에 따른 Active layer 및 기반암 탐지(Fig. 30)한다. 탐사 장비로는 MALÅ사 ProEx Shielded 500MHz Antenna 가 있다(Fig. 31).

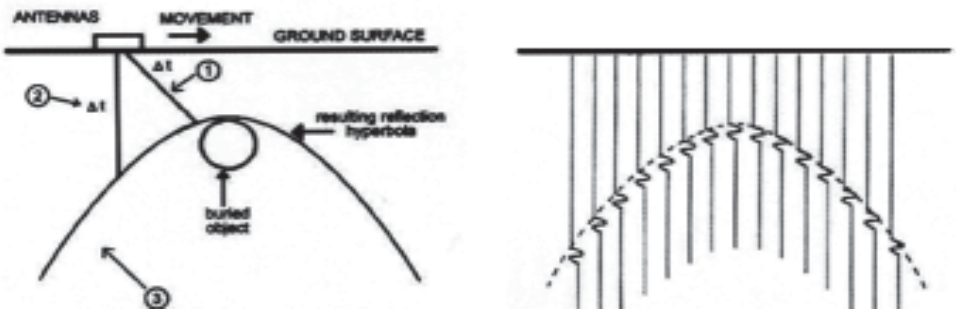


Fig. 29. The signal of GPR reflected from the object over diffracted wave principle.

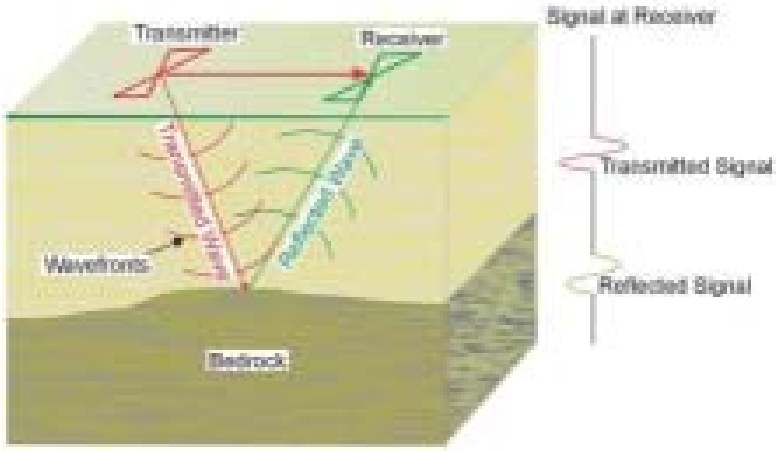


Fig. 30. The radar reflected wave from bedrock.

Fig. 31. Investigation system of ground penetrating radar (MALÅ Inc. ProEx Shielded 500MHz Antenna).

(나) 연구수행방법

영구동토층의 물리적 특성을 이해하기 위하여 비파괴적인 방법 중 지구물리 탐사 방법인 전기비저항, GPR(지하투과 레이더), EM(전자탐사)을 이용하여 카운실 기상관측 지점 주변에 4개의 측선(Table 2)을 설정하고 조사하였다(Fig. 32).

Table 2. Information on electrical resistivity survey

	측선 1	측선 2	측선 3	측선 4
전극 간격	1 m	1 m	1 m	0.5 m
측선 거리	41 m	41 m	41 m	20.5 m
측정 깊이	5 m	5 m	5 m	2.5 m

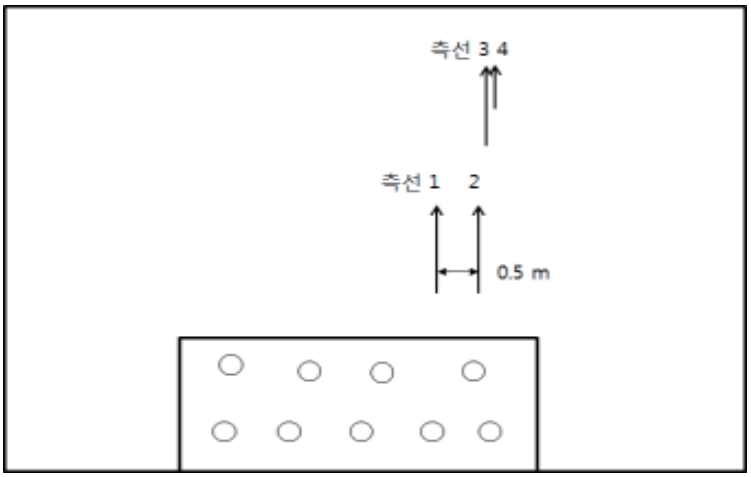


Fig. 32. Four electrical resistivity survey lines around automatic CO_2 flux chamber system (below box).

① 전기비저항 탐사 설계

- ABEM사 Terrameter LS 시스템 사용
- 전극 막대 42 채널(2×21) 사용
- 전극 간격 0.5 m, 1 m
- n=6까지 측정, 단면도 깊이 2.5 m (전극 간격 0.5m 기준), 단면도 깊이 5 m(전극 간격 1m 기준)
- 수직 분해능은 0.5 - 1 m, 수평 분해능은 1 m

② GPR(지하투과레이더) 탐사 설계

- MALÅ사 ProEx Shielded 500MHz Antenna를 이용
- 측정 간격 0.1 m (step mode)
- 중합 32 회
- Time windows 50 ns, 깊이 3.3 m (속도 0.13 m/ns)
- 수직 분해능 0.26 m

③ 전자(electromagnetic; EM) 탐사 설계

- Geonics사 EM38-MK2 전자 탐사 장비를 이용
- 측정 간격 0.1 m (step mode)

KOPRI 극지연구소

(다) 연구 결과

① 전기비저항 탐사

㉮ 자료처리

자료 처리는 대상의 물체를 유한개의 요소로 분할하여 각기 영역에 관하여 계산하는 방법인 유한요소법(FEM; finite elements method) 역산을 사용하였다.

㉯ 탐사결과

쌍극자배열로 전극 간격 1 m, 42채널(2×21)로 하여 전기비저항 탐사를 수행하였다. 측선 1과 2는 0.5 m 간격으로 떨어져 있다. 측선 3과 4는 같은 지점이지만 측선 4는 측선 3의 21-42 m 구간의 해상도를 높이기 위해 쌍극자배열로 전극 간격 0.5 m, 42채널(2×21)로 탐사를 수행하였다. 결과분석은, DIPROfWin 프로그램을 사용하여 유한요소법(Finite Elements Method)으로 5개의 층을 가정하여 7회 역산을 실시하였다. 비저항에 따라 구분을 A (비저항이 높은 지역), B (중간 지역), C (낮은 지역)으로 표시하였다(Fig. 33-36). 비저항의 역수는 전기전도도이므로 비저항이 높은 A 지역은 전기전도도가 낮고, 비저항이 낮은 C 지역은 전기전도도가 높다. 즉, A 지역보다 C 지역의 토양 내 얼지 않은 수분 함량이 많다고 볼 수 있다. 그러나 토양 내 수분 함량이 많아도 얼어 있다면 A지역처럼 비저항이 높다.

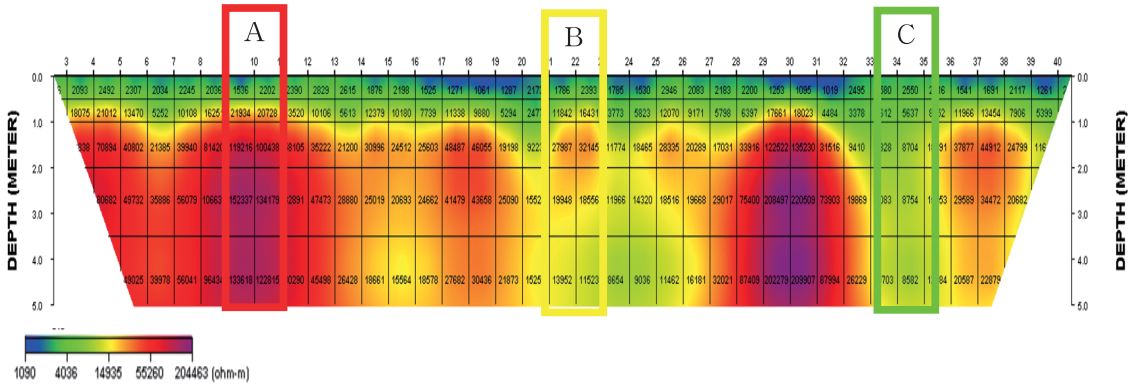
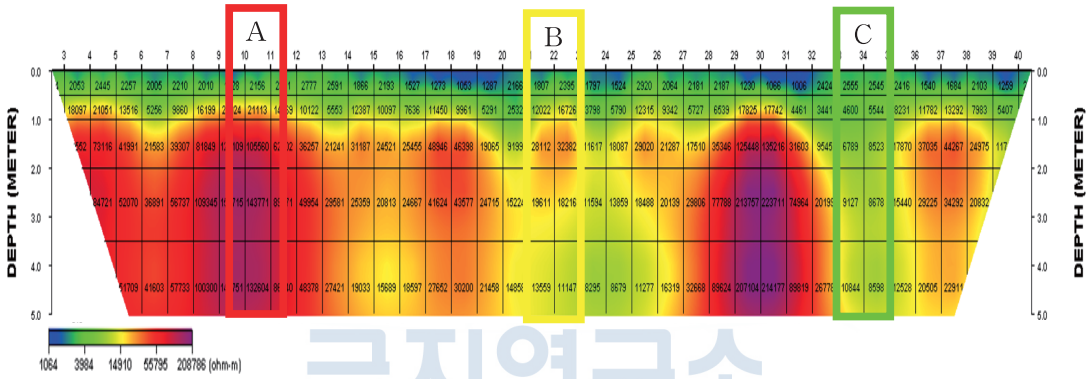


Fig. 33. Section of the electrical resistivity survey data of line 1. A area is a low electrical conductivity, high electric conductivity area C.



극지연구소

Fig. 34. Section of the electrical resistivity survey data of line 2. A area is a low electrical conductivity, high electric conductivity area C.

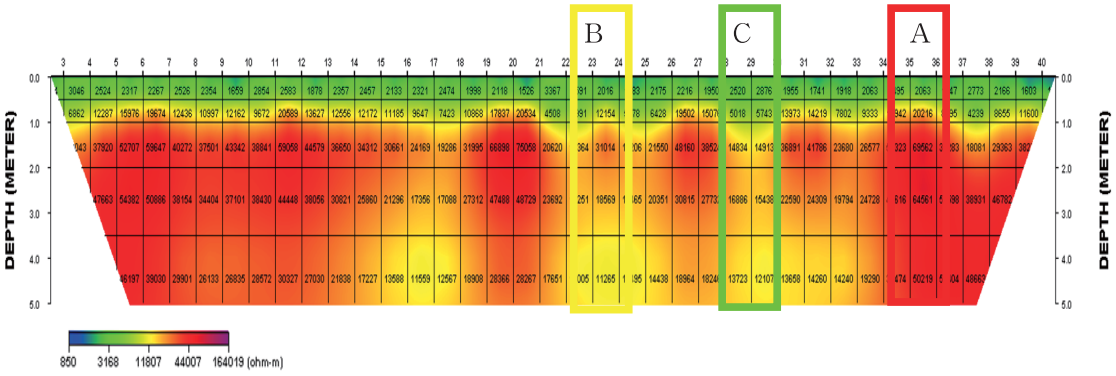


Fig. 35. Section of the electrical resistivity survey data of line 3. A area is a low electrical conductivity, high electric conductivity area C.

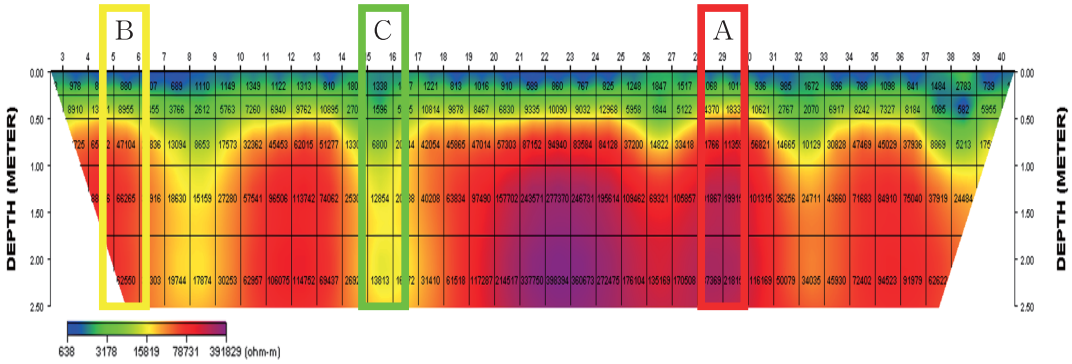


Fig. 36. Section of the electrical resistivity survey data of line 4. A area is a low electrical conductivity, high electric conductivity area C.

실제 A, B, C 지역에서 토양 시추를 하여, 전기비저항 결과와 비교 확인하였다. 비저항이 높은 A에서는 건조하고, 비저항이 낮은 C에서는 지하수의 유입이 많았다(Fig. 39). 실제 지층기둥 시추 후 토양 잔해의 수분함량을 보았을 때, A에서 C로 갈수록 수분의 함량이 높아지는 것을 볼 수 있었다.

Fig. 37. Soil after soil coring in line 1.

① GPR(ground penetrating radar; 지하투과레이더) 탐사

㉮ 자료 처리

- 자료형(RD3 -> RD4) 변환
- DC filter : 일정한 신호를 제거하는 필터로 전기적 잡음(60Hz) 등을 제거
- Background remove : 시스템 내부의 신호원과 내·외부 물체(내부 조직의 경계면)에 의해 발생하는 불필요한 잡음을 제거
- Bandpass filter : 어느 특정한 주파수 대역의 성분만을 통과시키는 필터로 잡음은 제거하고 특정 주파수 대역 신호만 통과시킴
- Amplitude correction : 신호를 기록할 때 시간과 거리에 따라 급격히 감소 하

는진폭을 증폭시키기 위하여 증폭기의 이득을 자동으로 조정

- Time-zero move : GPR 탐사의 경우 단면도 자료에서 0 ns가 실제 지표면 이 아닐 수 있으므로 시간을 조정

㉰ 탐사 결과

MALÅ사 ProEx 쉴드 500MHz 안테나 장비를 이용하여 측선 1에서 0.2 m 간격(Fig. 38), 측선 3에서 0.1 m 간격(Fig. 39)으로 step mode로 32번의 중합을 하여 자료의 정확도를 높여 측정하였다. 두 자료의 단면도에서 깊이 약 0.8 m 부근에서 강한 반사파가 나타나는 것을 확인하였으며, 이 부근에서 활동층(active layer)이 있을 것으로 사료된다.

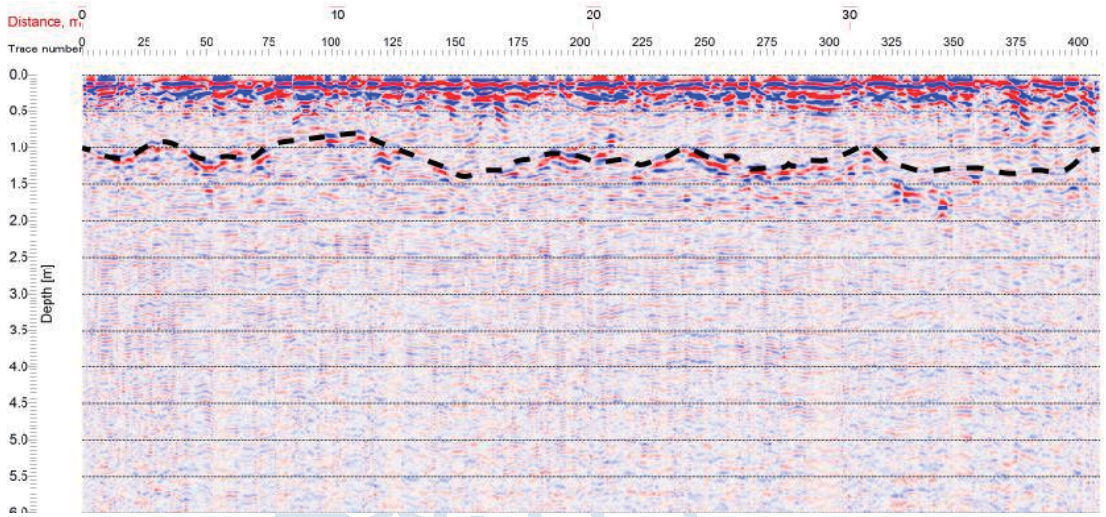


Fig. 38. GPR survey results section to 0.2 m intervals from line 1.

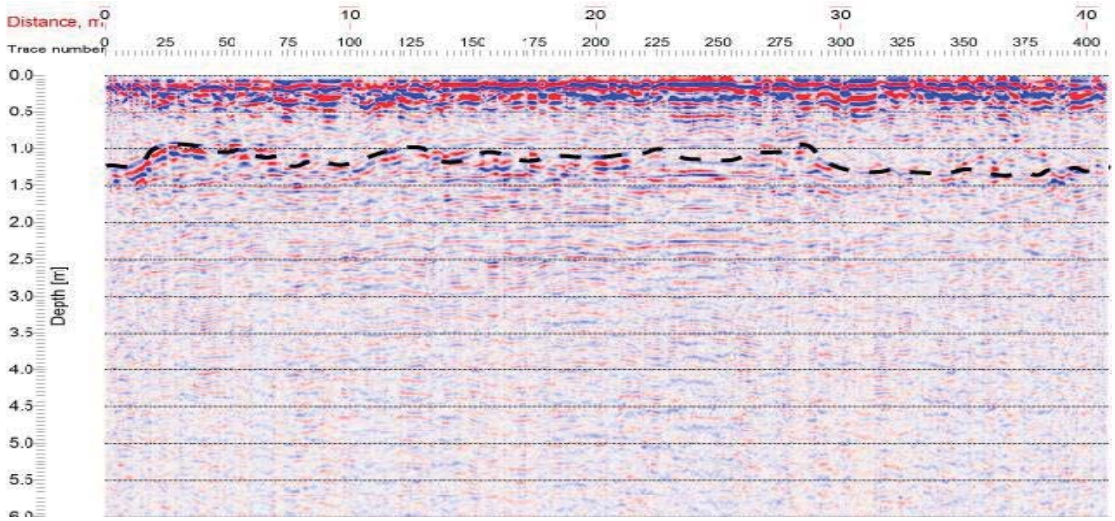


Fig. 39 GPR survey results section to 0.1 m intervals from line 3.

(라) 결론

① 전기비저항-GPR상관관계

전기비저항 탐사 결과 비저항(ρ)이 높은 구역(red box)에서 GPR의 활동층의 깊이가 상대적으로 얕다. 전기비저항 결과에서 비저항이 높은 구역(red box)은 저항값이 높으므로, 매질이 전기 흐름을 방해한다. 전기 흐름을 방해 하는 요소로는 상대적으로 토양 내 수분 함량이 적거나, 토양 내 수분이 결빙 상태로 볼 수 있다. 특히, 겨울철 토양 내 수분이 결빙될 경우 이온의 활동성이 떨어져 전기가 흐르기 힘든 매질 상태가 되어 저항이 크게(여름철 기준 $\times 10^2$배) 증가한다(Fig. 40, Soňa *et al.*, 2016). 활동층의 경우 기온 상승으로 토양의 해빙으로 인해 그 깊이가 점점 깊어진다. 그러나 비슷한 토양 환경 내에서도 매질의 상태에 따라 열전도도가 달라 온도 차이가 발생하여 활동층의 깊이가 일정하지 않게 나타난다(Fig. 38, 39).

전기비저항 결과를 통해 토양 내 수분 함량 및 상태를 유추할 수 있으며, GPR 결과를 통해 활동층의 깊이를 알 수 있다.

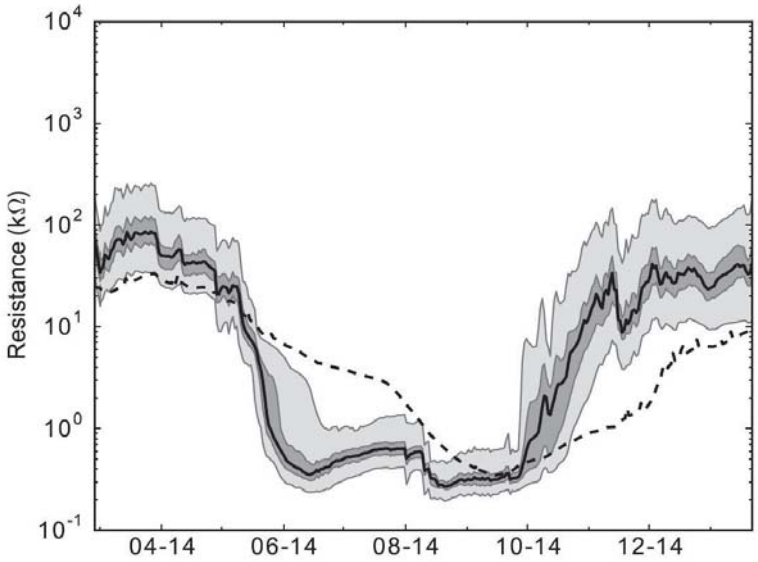


Fig. 40. Time series of measured resistances (grounding resistances) observed for 1 year for the monitoring station in Greenland.

토양의 밀도, 수분함량에 의해 열전도도(k)가 달라진다(Fig. 41, 손병후, 2012). 토양의 공극률(ϕ)이 증가할수록 밀도가 감소하고, 열전도도가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 토양의 수분포화도(S)가 높아질수록 전기와 열전달의 매질 역할을 수행하므로 전기전도도(C)와 열전도도가 높아진다. 열전도도는 수분함량, 밀도와 비례하고, 비저항과는 반비례하는 관계를 가진다(식 1).

$$k \propto \frac{S \cdot \phi}{\rho \cdot C} \tag{1}$$

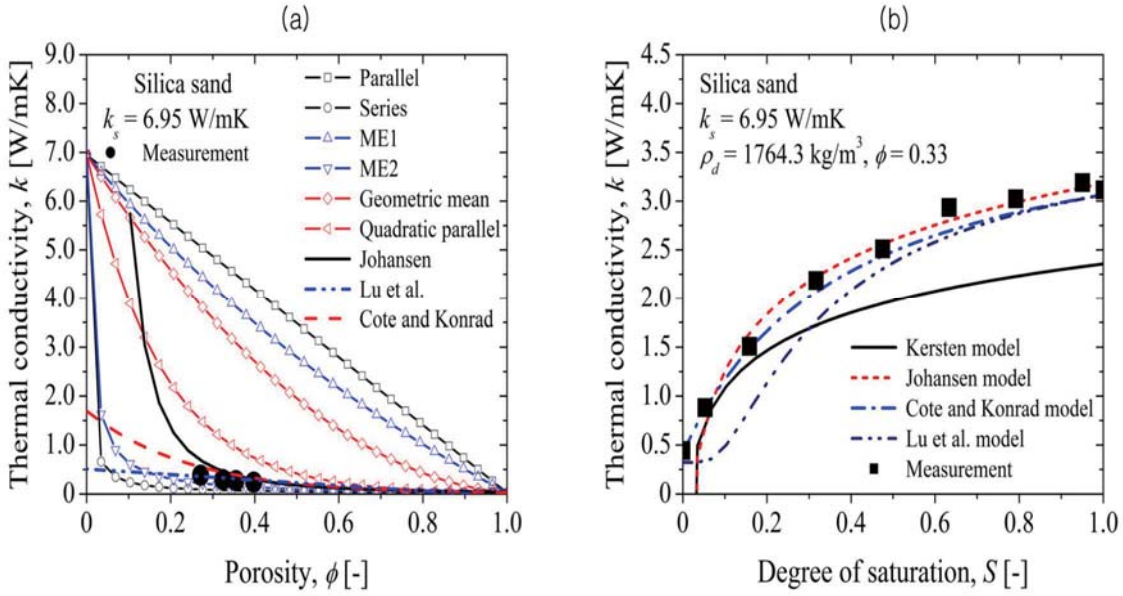


Fig. 41. (a) Relationship between thermal conductivity and porosity for dry sands, (b) thermal conductivity of soils with degree of saturation and dry density.

동일한 토양 매질에서 밀도(ϕ), 수분함량(S), 전기전도도(C), 열전도도(k), 비저항(ρ)이 다르다는 것을 GPR과 전기비저항 두 결과로 살펴보았다(Fig. 42, 43).

반사 강도(R)는 매질의 속도(v)와 밀도(ϕ)와 관련이 있다. 활동층에서 나타나는 반사파는 토양 상태에 따라 밀도가 다르므로 반사강도(R)가 다르다(식 2). 비저항이 높은(A) 지점에서는 매질의 물성차이가 크므로 반사 강도가 크다. 이를 Hilbert 변환을 이용해 진폭으로 계산하여 나타내었다(Fig. 44, 45). 측선 1, 3에서 둘 다 비저항이 높은(A) 지점에서는 강한 진폭(21.01, 12.29)이, 비저항이 낮은(C) 지점에서는 약한 진폭(1.20, 2.65)이 계산되었다.

$$R = \frac{v_2\phi_2 - v_1\phi_1}{v_2\phi_2 + v_1\phi_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \tag{2}$$

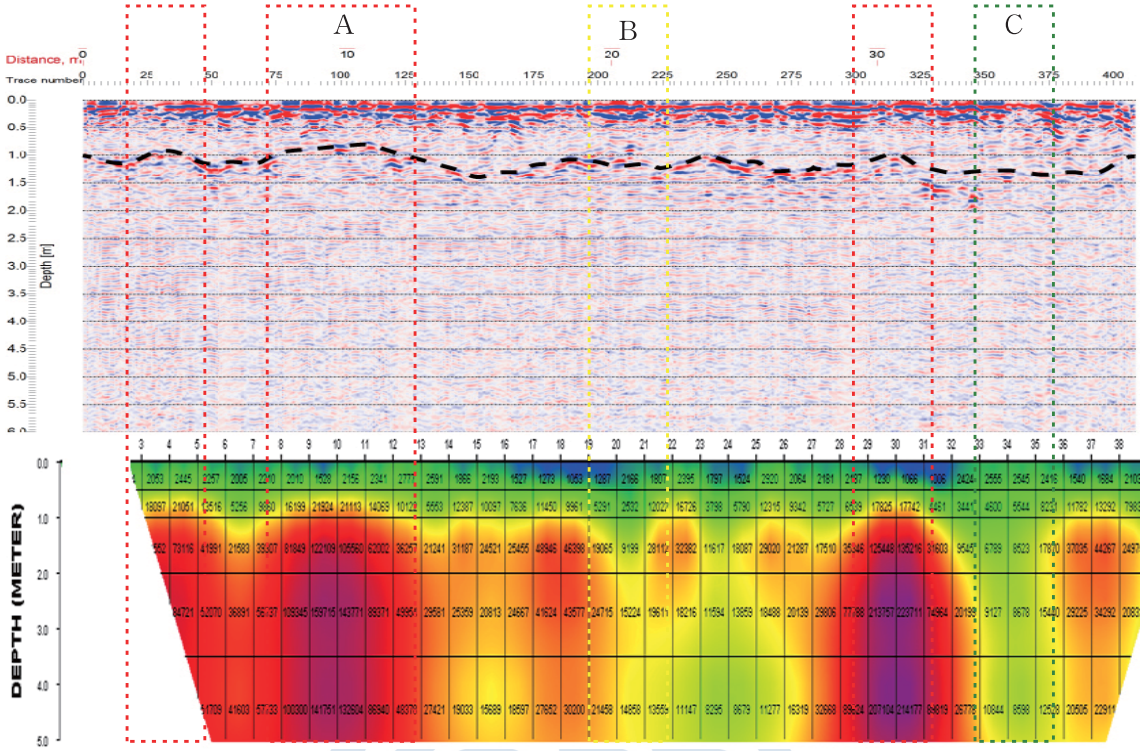


Fig. 42. Relationship between electrical resistivity and GPR data of line 1.

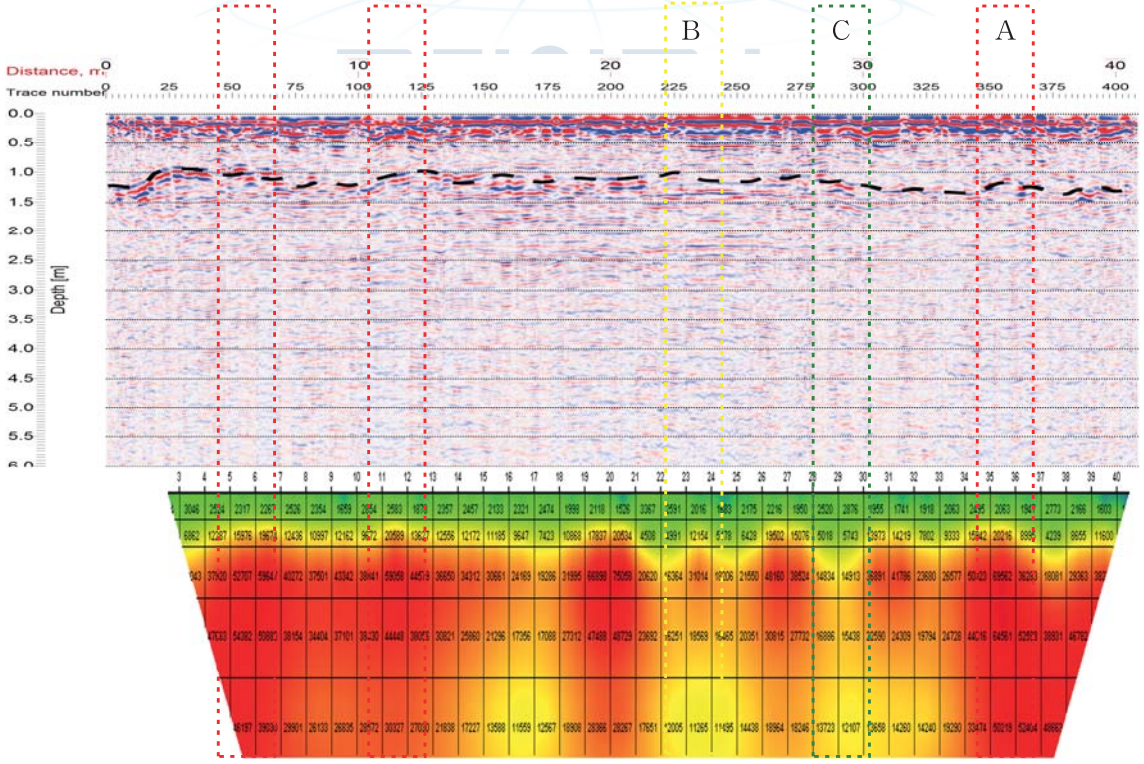


Fig. 43. Relationship between electrical resistivity and GPR data of line 3.

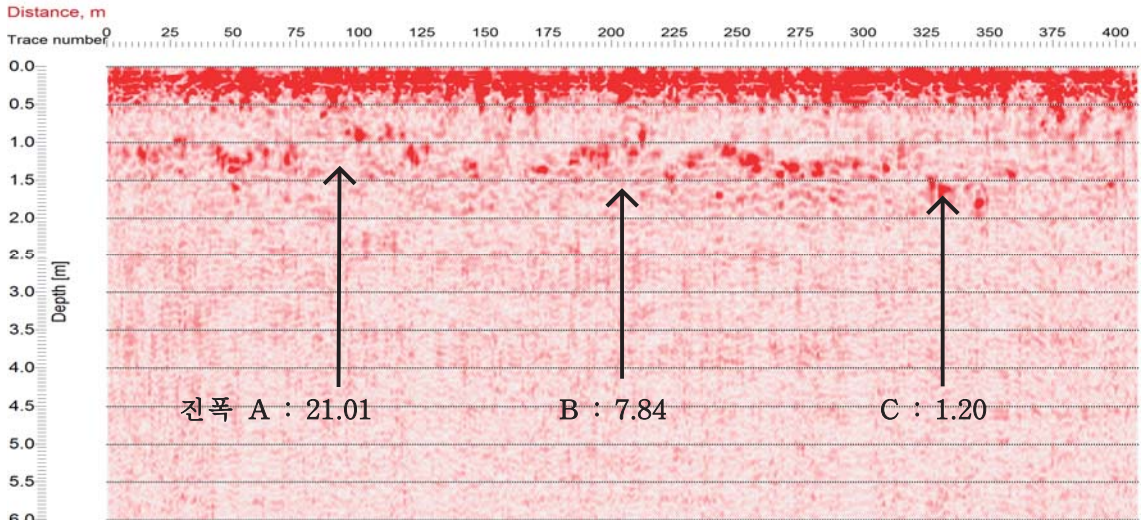


Fig. 44. Hilbert transform processed section of the GPR data of line 1.

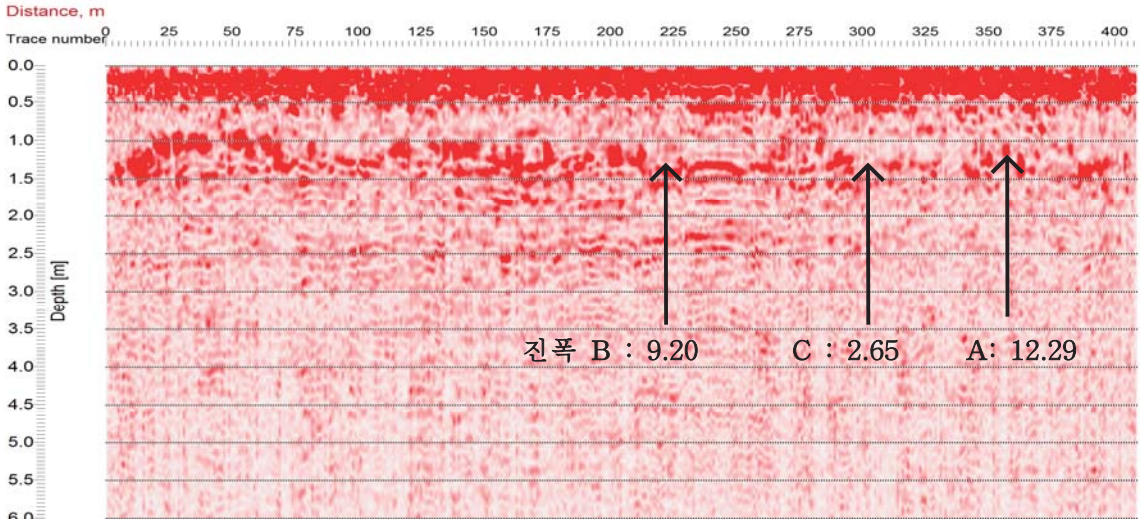


Fig. 45. Hilbert transform processed section of the GPR data of line 3.

(2) 토양의 층위별 특성

2014년에는 알래스카에서 코어를 획득 후, 층위별 구분을 하였다. 코어 간 층위 분포의 차이가 약간씩 존재하였지만, 전반적으로 Oi, Oe, A층으로 구분되었고, Oe와 A층 사이에 전이구간으로서 AO, OA 층이 나타나기도 하였고, 유기물 함량이 다시 높아지는 Oa와 Oe 층이 나타나기도 하였다. 깊이 채취된 코어에서는 A 층 이후에 AC 또는 C 층이 관찰되기도 하였다. 층위별 비교를 위해, 모든 토양 코어를 Oi, Oe, A 층으로 구분하였고, 처음 나타나는 Oe 다음부터 A층이 나타날 때까지의 층들을 묶어 transitional layer (Trans)로 분류하였다(Table 3). AC와 C층의 경우는 깊이 채취된 일부 코어에서만 관찰되었기 때문에 층위 간 비교에 사용하지 않았다.

Table 3. Profile determination along the soil depth in each soil core

	Core 1			Core 2			Core 3		
Layer	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
Oi	litter	litter	litter	litter	litter	litter	litter	litter	litter
Oe	0-20	0-35	0-20	0-30	0-45	0-45	0-20	0-20	0-50
Trans	20-55	35-50	20-50	30-55	45-70	45-70	20-90	20-70	50-70
A	55-100	50-90	50-100	55-90	70-80	70-100	90-130	70-75	70-115
AC	100-105			90-95	80-85	100-105			
C			100-105						

9개의 모든 코어에서 공통적으로 나타난 층인 Oi, Oe, Trans, A층을 대상으로 층위 간 비교 분석을 실시하였다. 측정항목 모두 층위 간 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(Table 4). Tukey ‘s HSD 테스트로 사후분석 결과(Table 5) 토양 수분함량은 Oi, Oe, A, Trans층의 순으로 낮아졌고, Oi층은 다른 층에 비해 유의하게 높은 수분함량 값을 나타내었다. NO_3^-이온은 약 1 μg N g^{-1} soil 내외의 값으로 NH_4^+이온에 비해 매우 낮은 값을 나타내지만, 대기와 근접하여 산소 공급이 원활한 Oi층에서 다른 층들보다 유의하게 높았으며, NH_4^+의 경우 반대로 가장 깊은 A층에서 O층보다 유의하게 높은 값을 나타내었다. 토양 pH는 Trans층에서 가장 높았고, 식물체 litter가 분포하는 Oi층에서 4.1로 가장 낮은 값을 보였다. 토양 전기전도도는 pH와 반대로 Oi층에서 Trans와 Oe층의 4-5배로 높은 값을 나타내었다. TC와 TN 농도는 Oi와 Oe층에서 다른 층보다 유의하게 높았으나, C/N ratio는 Oe층에서 낮아져, Oi층만 43.5로 유의하게 높게 나타났다.

Table 4. A result of one-way ANOVA to compare several soil properties among soil layers

Parameter	DF	SS	F Ratio	Prob > F
MC	3	642020	22.5	<0.001
NO3-	3	4.3	13.9	<0.001
NH4+	3	11206	8.8	<0.001
pH	3	7.1	24.4	<0.001
EC	3	1090838	4.4	0.010
TC	3	8622	59.2	<0.001
TN	3	7.5	21.1	<0.001
C/N ratio	3	3076	35.0	<0.001

KOPRI
극지연구소

Table 5. Soil properties in each layer of cores samples (n = 9)

	Layer	Oi	Oe	Trans	A
MC (%)	Mean	444.4[a]	234.8[b]	103.6[c]	133.3[bc]
	SD	172.5	65.7	49.9	39.5
	Min	253.8	155.8	51.9	70.8
	Max	801.9	342.6	204.2	197.9
NO_3^--N (μg N g^{-1} soil)	Mean	1.08[a]	0.32[b]	0.24[b]	0.29[b]
	SD	0.59	0.12	0.17	0.15
	Min	0.30	0.10	0.00	0.10
	Max	2.20	0.50	0.50	0.50
NH_4^+-N (μg N g^{-1} soil)	Mean	15.0[b]	5.1[b]	27.9[ab]	52.2[a]
	SD	13.1	3.5	19.8	33.4
	Min	4.3	1.5	6.7	15.1
	Max	45.0	13.3	72.5	105.4
pH	Mean	4.1[c]	5.0[ab]	5.3[a]	4.8[b]
	SD	0.3	0.2	0.1	0.5
	Min	3.5	4.7	5.1	4.0
	Max	4.5	5.3	5.4	5.3
EC (μS cm^{-1})	Mean	551[a]	141[b]	112[b]	294[ab]
	SD	500	41	49	271
	Min	207	79	61	89
	Max	1860	207	223	739
TC (%)	Mean	41.4[a]	28.3[b]	8.4[c]	2.8[c]
	SD	2.9	12.9	4.3	1.2
	Min	37.0	7.1	2.9	1.8
	Max	45.7	46.4	13.9	4.5
TN (%)	Mean	1.00[a]	1.24[a]	0.32[b]	0.14[b]
	SD	0.21	0.63	0.17	0.05
	Min	0.60	0.30	0.10	0.10
	Max	1.40	2.40	0.60	0.20
C/N ratio	Mean	43.5[a]	23.4[b]	25.8[b]	19.3[b]
	SD	9.4	2.7	3.9	2.3
	Min	29.3	19.3	21.0	15.8
	Max	64.5	26.3	34.3	23.6

Trans: Transitional layer from O to A layer; MC: moisture content; EC: electrical conductivity; TC: total carbon; TN: total nitrogen

KOPRI 극지연구소

동일 층위에서 각 코어별 물리·화학적 특성 차이가 있는지 확인하기 위하여 일원분산 분석을 실시하였다(Table 6). Oi. Oe, Trans층에서는 모든 항목에서 유의한 차이가 나타나지 않았다. 그러나, A층에서는 NH_4^+이온, pH, EC, TN content에서 코어간 유의한 차이가 있는 것으로 나타났고, MC와 TC의 경우에도 p=0.1이하에서 유의한 차이가 나타났다. 이러한 유의한 차이는 모두 Core 1, 2와 Core 3의 차이로 나타났다(Table 7). Core 3에서 NH_4^+이온 농도, EC, TN농도가 가장 높았고, pH가 가장 낮은 특성을 보였다. Core 3의 경우, 다른 코어들보다 O층의 두께가 깊은 특성을 보였다(Table 7). 동일 시기에 측정한 전기비저항탐사 결과, Core 3 (측선 4의 A)은 저항값이 가장 높았고, Core 2 (측선 4의 B)는 저항값이 가장 낮은 지점이었다(Fig. 36). 따라서 두꺼운 유기물층으로 인하여 활동층의 깊이가 낮고 토양이 얼어있는 상태로 유지되는 깊이가 깊어 저항값이 높게 나타났을 것으로 사료된다. 이와 더불어 깊은 유기물층이 NH_4^+이온 농도와 TN 농도가 높고, pH가 낮은 것에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

KOPRI
극지연구소

Table 6. One-way ANOVA result to compare soil properties among cores

Layer	Parameter	DF	SS	F ratio	Prob > F
Oi	MC	2	60777	1.03	0.41
	NO_3^--N	2	1.0	1.64	0.27
	NH_4^+-N	2	107.7	0.26	0.78
	pH	2	0.2	1.98	0.22
	EC	2	628655	1.38	0.32
	TC	2	0.2	0.01	0.99
	TN	2	0.1	0.60	0.58
	C/N ratio	2	137.3	0.71	0.53
Oe	MC	2	3209	0.31	0.75
	NO_3^--N	2	0.0	0.47	0.65
	NH_4^+-N	2	32.6	1.48	0.30
	pH	2	0.1	2.19	0.19
	EC	2	3345	1.02	0.42
	TC	2	186	0.49	0.64
	TN	2	0.7	0.82	0.48
	C/N ratio	2	25.7	2.40	0.17
Trans	MC	2	12412	4.94	0.05
	NO_3^--N	2	0.1	2.88	0.13
	NH_4^+-N	2	1289	2.09	0.21
	pH	2	0.0	0.08	0.92
	EC	2	632	0.10	0.90
	TC	2	69.3	2.67	0.15
	TN	2	0.1	4.07	0.08
	C/N ratio	2	12.2	0.33	0.73
A	MC	2	7645	4.76	**0.06**
	NO_3^--N	2	0.02	0.27	0.77
	NH_4^+-N	2	7458	15.08	**<0.01**
	pH	2	2.1	51.72	**<0.001**
	EC	2	556273	51.94	**<0.001**
	TC	2	6.5	4.71	**0.06**
	TN	2	0.0	7.00	**0.03**
	C/N ratio	2	1.0	0.07	0.93

KOPRI 극지연구소

Table 7. Comparison of soil properties among cores under the same soil layers in Council, Alaska

	Layer	Oi				Oe				T				A			
	Core	1	2	3		1	2	3		1	2	3		1	2	3	
MC	Mean	329.4	487.3	516.5	ns	243.4	208.6	252.3	ns	63.2	94.7	152.8	ns	93.4	144.3	162.2	ns
	SD	76.1	144.6	248.8		90.1	52.1	69.6		15.5	27.6	52.6		34.6	15.9	31.0	
	Min	253.8	349.0	345.6		166.7	155.8	178.2		51.9	73.5	99.1		70.8	128.8	143.3	
	Max	405.9	637.5	801.9		342.6	259.9	316.2		80.8	125.9	204.2		133.2	160.5	197.9	
NO_3^-	Mean	0.93	0.77	1.53	ns	0.33	0.27	0.37	ns	0.17	0.17	0.40	ns	0.30	0.23	0.33	ns
	SD	0.38	0.50	0.70		0.06	0.21	0.06		0.06	0.15	0.17		0.17	0.12	0.21	
	Min	0.50	0.30	0.80		0.30	0.10	0.30		0.10	0.00	0.20		0.20	0.10	0.10	
	Max	1.20	1.30	2.20		0.40	0.50	0.40		0.20	0.30	0.50		0.50	0.30	0.50	
NH_4^+	Mean	19.6	11.3	14.1	ns	4.3	3.3	7.8	ns	18.7	20.3	44.8	ns	28.3 ^{b}	35.7 ^{b}	92.7 ^{a}	
	SD	22.0	6.1	10.5		2.7	1.0	5.0		17.0	7.4	24.1		13.5	20.3	12.1	
	Min	5.8	4.3	5.3		1.5	2.2	3.7		6.7	11.9	28.1		18.6	15.1	81.3	
	Max	45.0	14.9	25.8		6.9	3.9	13.3		38.2	25.8	72.5		43.8	55.7	105.4	
pH	Mean	3.9	4.2	4.1	ns	4.9	5.2	4.9	ns	5.2	5.3	5.3	ns	5.2^a	5.1^a	4.1 ^{b}	
	SD	0.3	0.2	0.0		0.3	0.1	0.1		0.1	0.1	0.2		0.2	0.2	0.1	
	Min	3.5	4.1	4.1		4.7	5.1	4.8		5.1	5.2	5.1		5.0	5.0	4.0	
	Max	4.1	4.5	4.1		5.2	5.3	5.0		5.3	5.3	5.4		5.3	5.3	4.2	

Table 7. Comparison of soil properties among cores under the same soil layers in Council, Alaska (Continued)

	Layer	Oi				Oe				T				A			
	Core	1	2	3		1	2	3		1	2	3		1	2	3	
EC	Mean	924	380	348	ns	140	118	165	ns	117	100	118	ns	108 b	128 b	645 a	
	SD	813	151	26		64	6	28		92	26	10		20	13	124	
	Min	389	207	329		79	111	148		61	82	111		89	114	504	
	Max	1860	477	378		207	124	198		223	130	129		129	140	739	
TC	Mean	41.6	41.4	41.3	ns	26.9	23.7	34.5	ns	5.2	8.0	12.0	ns	1.9	2.7	3.9	ns
	SD	4.0	4.1	1.3		17.8	9.6	12.7		2.9	4.6	3.1		0.1	1.2	0.7	
	Min	37.0	37.6	40.1		7.1	14.9	21.1		2.9	5.4	8.4		1.8	1.8	3.1	
	Max	44.1	45.7	42.6		41.5	34.0	46.4		8.5	13.3	13.9		2.0	4.1	4.5	
TN	Mean	0.90	1.00	1.10	ns	1.03	1.07	1.63	ns	0.17	0.33	0.47	ns	0.10 b	0.13 ab	0.20 a	
	SD	0.26	0.10	0.26		0.67	0.40	0.80		0.06	0.15	0.15		0.00	0.06	0.00	
	Min	0.60	0.90	0.90		0.30	0.70	0.80		0.10	0.20	0.30		0.10	0.10	0.20	
	Max	1.10	1.10	1.40		1.60	1.50	2.40		0.20	0.50	0.60		0.10	0.20	0.20	
C/N ratio	Mean	48.9	41.8	39.7	ns	25.8	22.0	22.4	ns	27.3	24.5	25.6	ns	18.9	19.7	19.2	ns
	SD	13.6	1.7	10.1		0.6	1.8	3.6		6.1	3.3	2.8		2.7	3.4	1.1	
	Min	40.3	40.6	29.3		25.2	20.2	19.3		22.9	21.0	22.5		15.8	17.4	17.9	
	Max	64.5	43.8	49.4		26.3	23.7	26.3		34.3	27.5	27.7		20.9	23.6	20.0	

(3) 알래스카 토양의 층위별 미생물 군집 분석

토양 내 genomic DNA(gDNA)는 MPbio사의 FastDNA® SPIN kit를 이용하여 제조사의 방법에 따라 추출하였다. 추출된 gDNA는 MOBIO사의 PowerClean® DNAclean-up kit를 이용하여 부식산과 같은 불순물을 제거하여 순도를 높였으며 정제된 gDNA는 박테리아 및 고세균의 16S rRNA 유전자 증폭을 위한 주형으로 이용하였다. 토양 내 박테리아의 16S rRNA 유전자를 증폭하기 위하여 프라이머 27F와 518R을 사용하였다 (Chun *et al.*, 2010). 고세균의 16S rRNA 유전자를 증폭하기 위하여 프라이머 A519F와 A1017R을 사용하였다(Klindworth *et al.*, 2013). 증폭된 DNA의 염기서열 분석은 Roche 454 GS-FLX Titanium pyrosequencer 장비를 사용하였다.

파이로시퀀싱 결과로 얻어진 염기서열들은 QIIME software package (ver. 1.9.1)를 이용하여 분석하였다 (Caporaso *et al.*, 2010). AmpliconNoise software (ver. 1.27)를 이용하여 키메라 및 자격미달의 시퀀스를 제거하여 고품질의 시퀀스 데이터를 얻었으며, UCLUST를 사용하여 97%의 염기서열 유사도를 기준으로 operational taxonomic units (OTUs)를 결정하였다. OTU들은 Greengenes database (release 13.5)를 이용하여 taxonomic assignment를 정리하였다.

전반적으로 모든 토양 코어 시료는 Oi, Oe, OA (또는 AO), A, AC, C층으로 구분되었다. 이 중 AC 및 C 층은 모든 코어에서 공통으로 나타나는 구간이 아니므로 미생물 군집 분석 비교 연구에서는 제외되었다.

활동층 및 동토층을 대상으로 박테리아 및 고세균의 다양성의 분포 양상을 살펴보았다. 박테리아는 활동층에서 종 풍부도 및 종 다양성이 높게 관찰되었고 동토층에서 감소하였다 (Fig. 46). 반면에 고세균은 활동층에 비해 동토층에서 종 풍부도 및 다양성이 높게 관찰되어 박테리아와 반대 양상을 보였다(Fig. 47). 토양 층위에 따른 미생물 군집 구조를 살펴본 결과 미생물 군집은 깊이에 따라 그 구조가 변하였다 (Fig. 48). 문(phylum) 수준에서 살펴본 박테리아 군집의 경우, *Alpha-proteobacteria*, *Acidobacteria*, *Gamma-proteobacteria*, *Planctomycetes* 및 *Verrucomicrobia*의 상대 수도(relative abundance)는 깊어질수록 감소하는 경향을 보였으며, *Actinobacteria*, *Bacteroidetes*, *Caldiserica* 및 *Firmicutes*의 상대 수도는 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 48). 이들 군집의 전반적인 깊이별 분포 외에도 층위에 따라 우점하는 그룹 또한 관찰되었다. 예를 들어, Oi 층에는 *Acidobacteria*, *Gamma-proteobacteria*, *Planctomycetes* 및 *Verrucomicriboa*는 상대적으로 많은 비율로 출현하였으며, Oe 층에는 AD3 가 높게 관찰되었다. OA 층에는 *Beta-proteobacteria*, *Chloroflexi* 및 *Gemmatimonadetes*가 높게 관찰되었으며 동토층의 O층에는 *Bacteroidetes*, *Caldiserica*, *Delta-proteobacteria*, *Firmicutes* 및 OD1이 상대적으로 높은 비율로 나탔다. 박테리아 군집의 유사도는 층위에 따라 구분되는 경향을 보였으며 (Fig. 49a), 이들 박테리아 군집은 활동층과 동토층간에 통계적으로 유의한 차이를 보였다(ANOSIM, Global R = 0.563, $p < 0.001$).

고세균 군집의 경우, 3개 문(*Crenarchaeata*, *Euryarchaeota* 및 candidatus *Parvarchaeota*)이 검출되었으며 박테리아에 비해 매우 단순한 군집 구조를 보였다.

*Crenarchaeota*가 모든 시료의 총 군집에서 약 80%를 차지하였으며 Oe층 이하에서 메탄생성균이 출현하였다. 깊이에 따른 고세균은 표층에서 Marine Benthic Group (MBGA) 대부분을 차지하면서 깊어질수록 감소하는 경향을 보였으며 Miscellaneous Crenarchaeotal Group (MCG)은 깊어질수록 증가하는 경향을 보였다. 고세균 또한 층위에 따라 군집 유사도가 달랐으며(Fig. 49b), 활동층과 동토층간에 통계적으로 유의한 차이를 보였다(ANOSIM, Global R = 0.19, $p < 0.001$).

활동층 및 동토층에 우점하는 미생물을 분석하기 위하여 Linear Discriminant Analysis Effect Size (LEfSe) 분석을 수행하였다. 전체에서 0.1% 이상 차지하는 우점 OTUs 중, 박테리아의 14개 OTUs와 고세균 5개 OTUs가 활동층에서 우점하였고 동토에는 박테리아 25개 OTUs와 고세균 7개 OTUs가 유의한 차를 보이며 우점하였다 (Fig. 50, 51). 활동층과 동토층의 비교시 통계적으로 유의한 차를 보이며 우점하는 이들 OTUs의 taxonomic assignments는 Table 8와 9에 정리하였다. 각 OTUs의 근연종의 physiological characteristics를 분석한 결과, 활동층에 우점하는 OTUs는 호기성, 내냉성, 포자 비형성 등의 특징을 보였다. 반면에 활동층에 우점하는 OTUs는 활동층과는 달리 복잡한 형태의 탄소 (e.g. methanol, methylamine, 및 formaldehyde) 분해능이 있어 bioremediation에 탁월하였으며 메탄생성균과 영양공생 관계를 맺는 OTUs (e.g. OTU_3836 및 OTU_2037)도 관찰되었다.

토양의 층위에 따라 박테리아와 고세균 군집이 토양 환경 요인과 어떠한 관계를 보이는지 Mantel test를 통해 확인하였다(Table 10). 박테리아와 고세균 모두 활동층에서 대부분의 토양 환경 요인과 밀접한 관련을 보이는 반면 동토층에는 고세균이 pH와 높은 상관관계를 보이는 것을 제외하고 대부분 어떠한 관계도 보이지 않았다. 아마도 동토층에는 본 연구에서 측정하지 않은 다른 환경 요인들, 예를 들어 온도, 염분도 및 토양 원소들에 의한 영향이 있을 것으로 보여 진다. 따라서 향후 동토를 대상으로 미생물과 환경 변수와의 관계를 살펴보고자 한다면 다양한 토양 환경 인자들을 조사해볼 필요가 있을 것 같다.

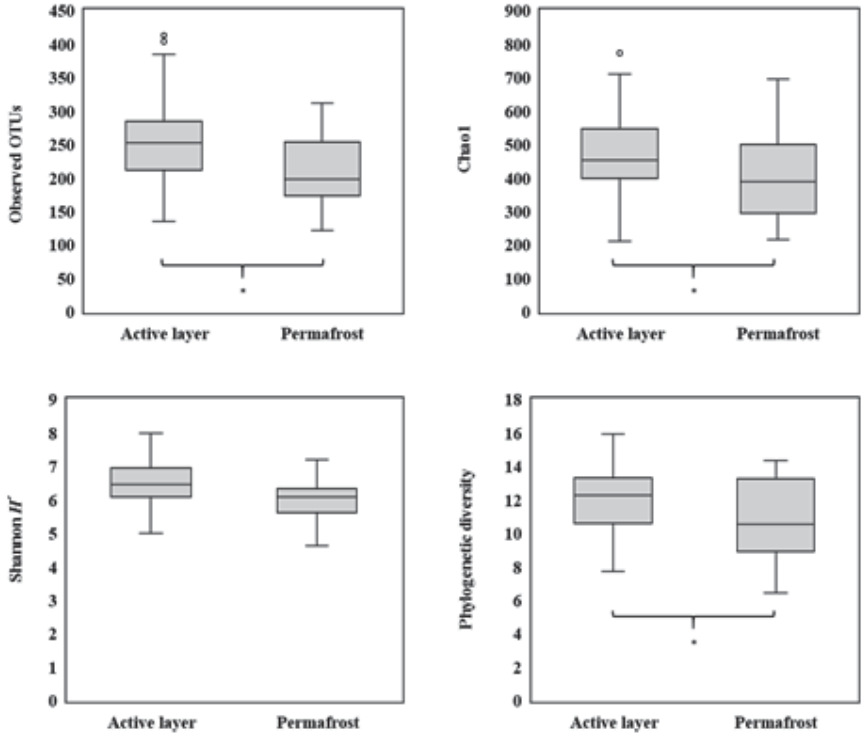


Fig. 46. Comparison of bacterial diversity between active layer and permafrost (*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$).

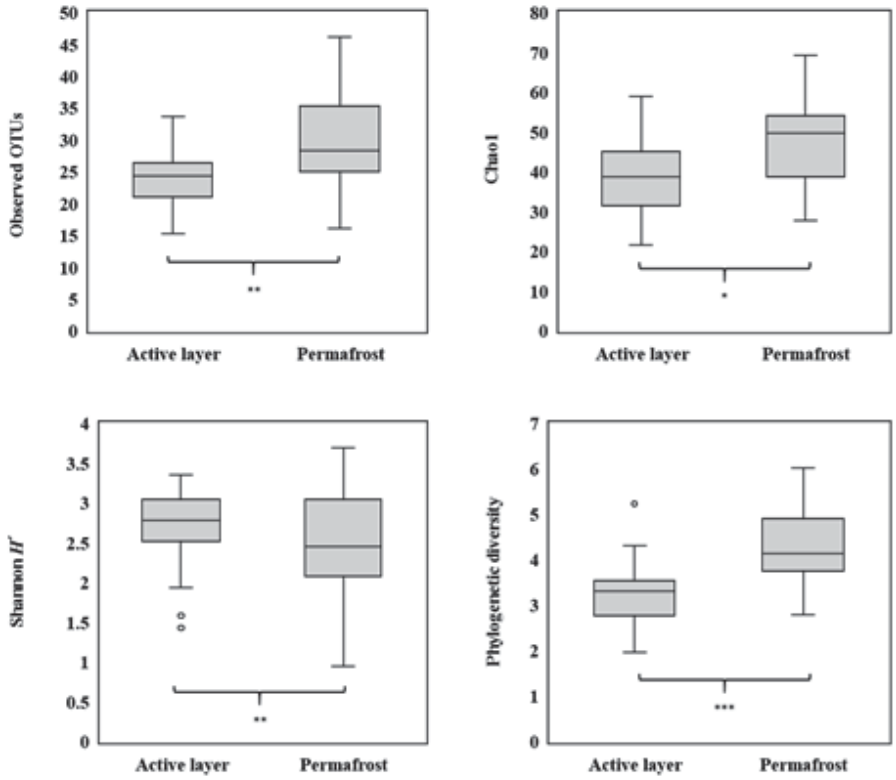


Fig. 47. Comparison of archaeal diversity between active layer and permafrost (*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$).

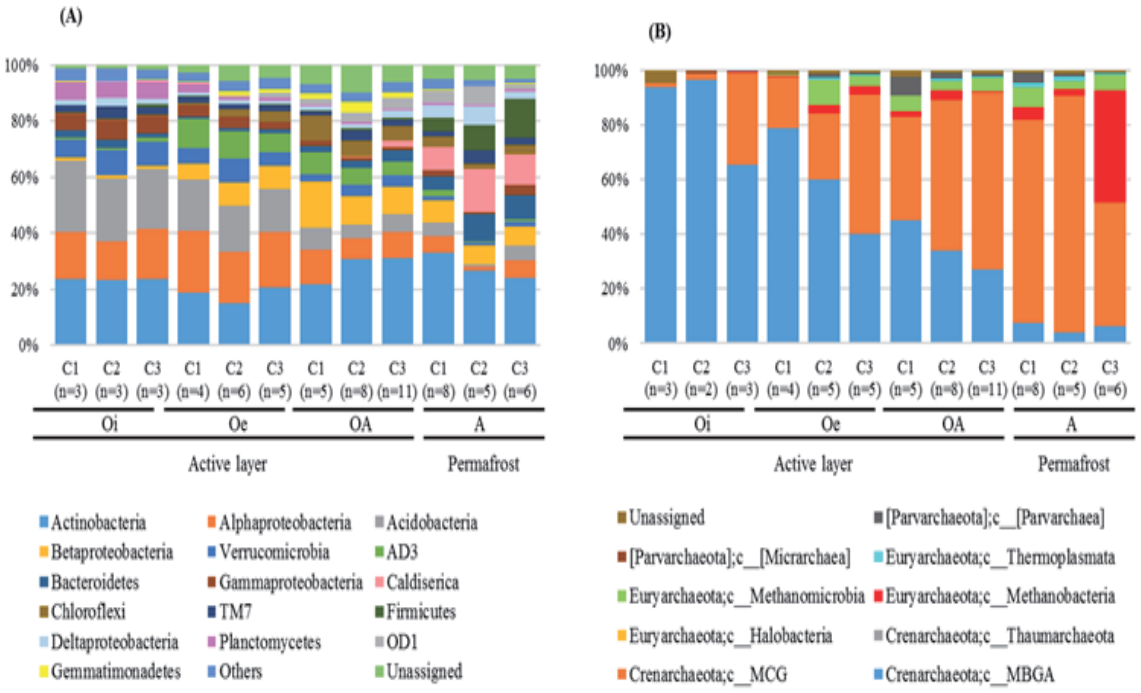


Fig. 48. Depth profile of (A) bacterial and (B) archaeal taxa compositions.

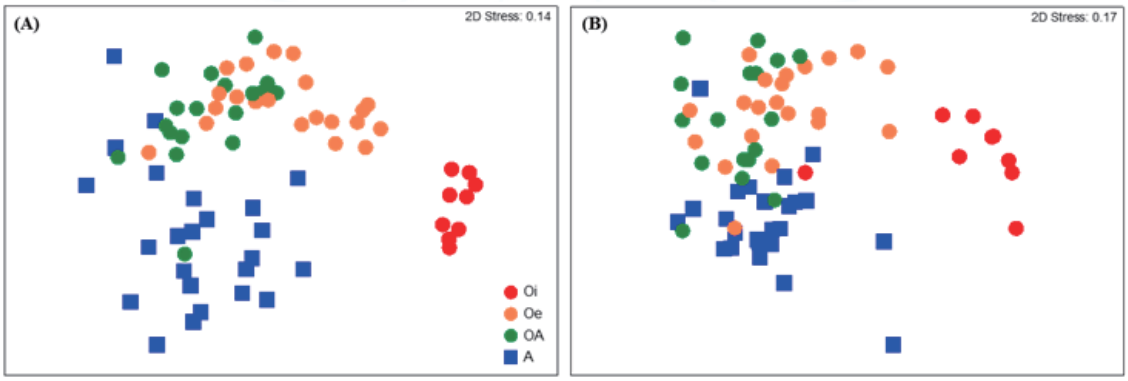


Fig. 49. NMDS plot of (A) bacterial and (B) archaeal community structures among different soil layers.

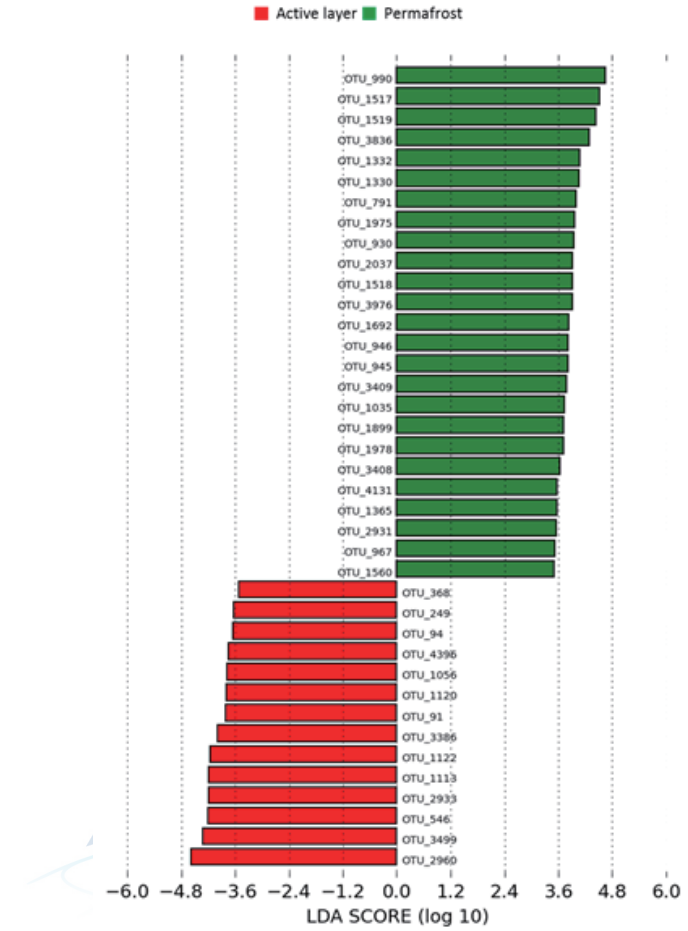


Fig. 50. Linear Discriminant Analysis Effect Size (LEfSe) representing dominant bacterial OTUs (all LDA scores >3.5) on each layer.

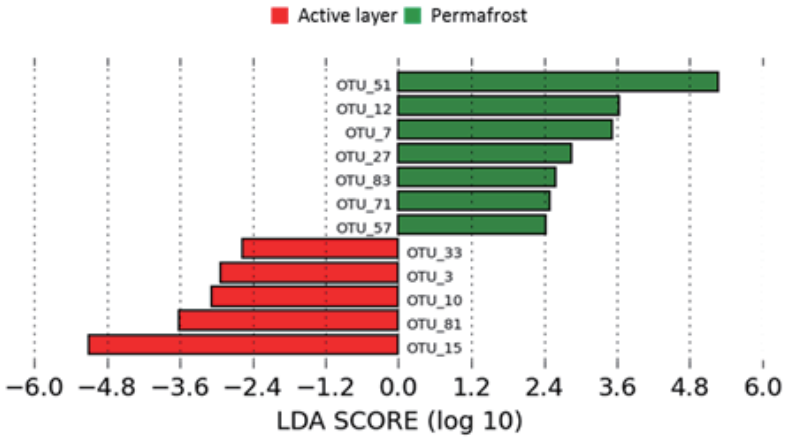


Fig. 51. Linear Discriminant Analysis Effect Size (LEfSe) representing dominant archaeal OTUs (all LDA scores >2.0) on each layer.

Table 8. Significantly different relative abundances of dominant bacterial OTUs between active layer and permafrost

OTU no.	Hierarchical taxonomic level *	*p*-value
Permafrost		
OTU_990	*Actinobacteria*; c_*Actinobacteria*; o_*Actinomycetales*; f_*Nocardiaceae*	$p < 0.001$
OTU_1517	*Caldiserica*; c_WCHB1-03; o_; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_1519	*Caldiserica*; c_WCHB1-03; o_; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_3836	*Deltaproteobacteria*; o_*Syntrophobacterales*; f_*Syntrophaceae*; g_*Syntrophus*; s_	$p < 0.001$
OTU_1332	*Bacteroidetes*; c_*Bacteroidia*; o_*Bacteroidales*; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_1330	*Bacteroidetes*; c_*Bacteroidia*; o_*Bacteroidales*; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_791	*Actinobacteria*; c_*Actinobacteria*; o_*Actinomycetales*; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_1975	*Firmicutes*; c_*Clostridia*; o_*Clostridiales*; f_*Peptococcaceae*; g_*Desulfosporosinus*; s_*meridiei*	$p < 0.001$
OTU_930	*Actinobacteria*; c_*Actinobacteria*; o_*Actinomycetales*; f_*Nocardiaceae*	$p < 0.01$
OTU_2037	*Firmicutes*; c_*Clostridia*; o_*Clostridiales*;f_*Ruminococcaceae*;g_;s_	$p < 0.001$
OTU_1518	*Caldiserica*; c_WCHB1-03; o_; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_3976	*Gammaproteobacteria*; o_*Oceanospirillales*; f_*Halomonadaceae*; g_*Halomonas*; s_	$p < 0.05$
OTU_1692	*Chloroflexi*; c_TK10; o_; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_946	*Actinobacteria*; c_*Actinobacteria*; o_WCHB1-81; f_At425_EubF1; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_945	*Actinobacteria*; c_*Actinobacteria*; o_WCHB1-81; f_At425_EubF1; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_3409	*Betaproteobacteria*; o_*Burkholderiales*	$p < 0.001$
OTU_1035	*Actinobacteria*; c_*Thermoleophilia*; o_*Gaiellales*; f_*Gaiellaceae*; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_1899	*Firmicutes*; c_*Bacilli*; o_*Bacillales*; f_*Bacillaceae*; g_*Anoxybacillus*; s_*kestanbolensis*	$p < 0.01$
OTU_1978	*Firmicutes*; c_*Clostridia*; o_*Clostridiales*; f_*Peptococcaceae*; g_*Desulfosporosinus*; s_*meridiei*	$p < 0.001$
OTU_3408	*Betaproteobacteria*; o_*Burkholderiales*	$p < 0.05$
OTU_4131	TM7; c_TM7-1; o_; f_; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_1365	*Bacteroidetes*; c_*Bacteroidia*; o_*Bacteroidales*; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_2931	*Alphaproteobacteria*; o_*Rhizobiales*; f_*Bradyrhizobiaceae*; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_967	*Actinobacteria*; c_OPB41; o_; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_1560	*Chloroflexi*; c_;o_; f_; g_; s_	$p < 0.001$
Active layer		
OTU_368	*Acidobacteria*; c_iii1-8; o_SJA-36; f_; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_249	*Acidobacteria*; c_DA052; o_Ellin6513; f_; g_; s_	$p < 0.01$
OTU_94	*Acidobacteria*; c_*Acidobacteriia*; o_*Acidobacteriales*; f_*Acidobacteriaceae*; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_4396	*Verrucomicrobia*; c_[Pedosphaerae]; o_[Pedosphaerales]; f_auto67_4W; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_1056	*Actinobacteria*; c_*Thermoleophilia*; o_*Solirubrobacterales*; f_; g_; s_	$p < 0.01$
OTU_1120	AD3; c_JG37-AG-4; o_; f_; g_; s_	$p < 0.01$
OTU_91	*Acidobacteria*; c_*Acidobacteriia*; o_*Acidobacteriales*; f_*Acidobacteriaceae*; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_3386	*Betaproteobacteria*; o_; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_1122	AD3; c_JG37-AG-4; o_; f_; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_1113	AD3; c_ABS-6; o_; f_; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_2933	*Alphaproteobacteria*; o_*Rhizobiales*; f_*Bradyrhizobiaceae*; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_546	*Actinobacteria*; c_*Acidimicrobiia*; o_*Acidimicrobiales*; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_3499	*Betaproteobacteria*; o_*Gallionellales*; f_*Gallionellaceae*; g_*Gallionella*; s_	$p < 0.05$
OTU_2960	*Alphaproteobacteria*; o_*Rhizobiales*; f_*Hyphomicrobiaceae*; g_*Rhodoplanes*; s_	$p < 0.001$

*c_; o_; f_; g_; s_ means class_;order_;family_;genus_;species_

Table 9. Significantly different relative abundances of dominant archaeal OTUs between active layer and permafrost

OTU no.	Hierarchical taxonomic level *	*p*-value
Permafrost		
OTU_51	*Crenarchaeota*; c_MCG; o_pGrfC26; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_12	[Parvarchaeota]; c_[Parvarchaea]; o_YLA114; f_; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_7	[Parvarchaeota]; c_[Parvarchaea]; o_WCHD3-30; f_; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_27	*Crenarchaeota*; c_MBGA; o_NRP-J; f_; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_83	*Euryarchaeota*; c_*Methanomicrobia*; o_*Methanosarcinales*; f_ANME-2D; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_71	*Crenarchaeota*; c_*Thaumarchaeota*; o_*Cenarchaeales*; f_*Cenarchaeaceae*; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_57	*Crenarchaeota*; c_MCG; o_pGrfC26; f_; g_; s_	$p < 0.001$
Active layer		
OTU_33	*Crenarchaeota*; c_MBGA; o_NRP-J; f_; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_3	[Parvarchaeota]; c_[Parvarchaea]; o_WCHD3-30; f_; g_; s_	$p < 0.001$
OTU_10	[Parvarchaeota]; c_[Parvarchaea]; o_WCHD3-30; f_; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_81	*Euryarchaeota*; c_*Methanomicrobia*; o_*Methanocellales*; f_; g_; s_	$p < 0.05$
OTU_15	*Crenarchaeota*; c_MBGA; o_NRP-J; f_; g_; s_	$p < 0.05$

*c_; o_; f_; g_; s_ means class_;order_;family_;genus_;species_

Table 10. Correlation between microbial community structure and soil physicochemical properties on active and permafrost layers

Domain	Soil properties	Active layer		Permafrost	
		r	*p*	*r*	*p*
Bacteria	pH	0.458	**0.001**	0.139	0.166
	TC	0.573	**0.001**	-0.079	0.663
	TN	0.274	**0.001**	-0.163	0.919
	C/N ratio	0.447	**0.001**	0.187	0.099
	MC	0.534	**0.001**	-0.027	0.624
Archaea	pH	0.233	**0.006**	0.494	**0.002**
	TC	0.281	**0.001**	0.180	0.123
	TN	0.071	0.144	0.095	0.232
	C/N ratio	0.420	**0.001**	0.261	0.085
	MC	0.209	**0.006**	-0.060	0.717

TC, total carbon content; TN, total nitrogen content, C/N, a ratio of carbon and nitrogen content; MC, moisture content.

세균 및 고세균 군집이 토양 층위별로 나누어짐에 근거하여 대표 층위별로 총 12개 토양 시료를 대상으로 shotgun 메타지놈 분석을 실시하였다. 시료 당 500 ng 이상의 gDNA를 이용하여 TruSeq library kit로 라이브러리 제작 후 Illumina HiSeq2500 2 x 150 bp로 염기서열 분석을 진행하였다. CLC Genomics Workbench (v.8.5)와 SPAdes (v.3.7..1) 이용하여 initial quality trimming 및 metagenome assembly를 수행하였고, Kaiju 프로그램을 이용하여 taxonomic classification을, gene prediction은 BLASTX 기반 DIAMOND 프로그램을 통해 수행하였다. 또한, 길이가 500 kb이상인 contig들에 대해 PROKKA를 이용한 gene annotation 작업을 수행하였다.

메타지놈 분석결과 알래스카 토양에서 추출한 gDNA는 크게 4개 도메인(박테리아, 고세균, 진핵생물 및 바이러스)으로 구성되었다(Fig. 52). 이 중 박테리아가 전체의 70% 이상을 차지하는 우점 도메인으로 나타났으며 깊어질수록 상대 도수가 증가하였다. 그 다음으로 진핵생물이 우점하는 양상을 보였으며 박테리아와는 반대로 깊어질수록 감소하는 경향을 보였다. 고세균은 미미한 수준(0.5~1.2%)으로 관찰되었으며 활동층 내에서 증가하는 경향을 보이다 동토층에서 감소하는 경향을 보였다. 바이러스는 모든 층위에서 약 0.2%정도 차지하였다.

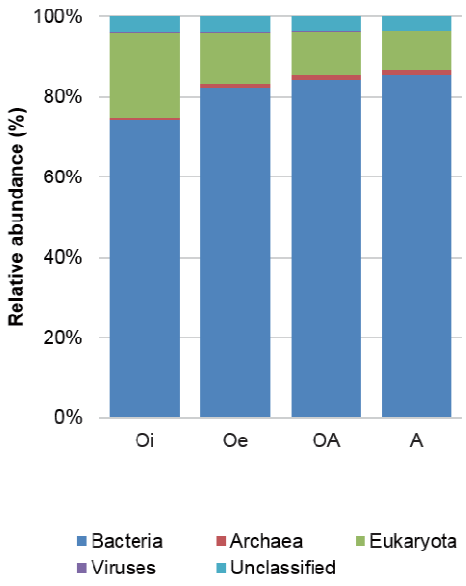


Fig. 52. Domain distribution based on metagenome data.

앞서 살펴본 16S rRNA gene PCR에 기반 한 군집구조와 메타지놈 결과에서 나온 미생물 군집구조를 비교해 보았다. 16S rRNA 유전자에 기반 한 군집구조는 세균과 고세균 모두 토양 층위에 따라 군집의 변화가 뚜렷이 관찰된 반면 메타지놈으로 살펴본 미생물 군집은 고세균의 경우 층위에 따라 군집의 변화가 뚜렷이 관찰되었으나 박테리아 군집은 층위에 따라 큰 변화를 보이지 않았다(Fig. 53). 먼저 박테리

아의 경우, 16S rRNA 유전자에 기반 한 군집에서 Actinobacteria, Alpha-proteobacteria 및 Acidobacteria가 전체 군집의 절반을 차지할 정도로 우점하는 경향을 보였으나 메타지놈 결과에서는 약 30% 정도 차지하였고 실제 우점하는 군집으로는 Chrysiogenetes, Fusobacteria 및 Deferribacteres가 전체의 50% 이상을 차지하며 우점하였다. 고세균 군집의 경우, 16S rRNA 유전자 증폭 결과는 Crenarchaeota에 속하는 Marine Benthic Group (MBGA)와 Miscellaneous Crenarchaeotal Group(MCG)가 전체 군집의 80% 가량을 차지하는 그룹으로 밝혀진 반면 메타지놈 결과는 Euryarchaeota에 속하는 Halobacteria 와 Methanomicrobia가 전체의 약 50%를 차지하는 우점 그룹으로 분석되었으며 Halobacteria는 깊어질수록 감소하며 Methanomicrobia는 증가하는 경향을 보였다(Fig. 54). 16S rRNA 유전자를 이용한 PCR기반 결과와 메타지놈 기반 미생물 군집조성에 차이를 보인 이유로는 primer mismatch, PCR bias, sequencing error, reference database 등 여러 가지 방법상의 원인들이 있을 수 있기에 향후 정확한 진단을 통해 확인할 필요가 있다.

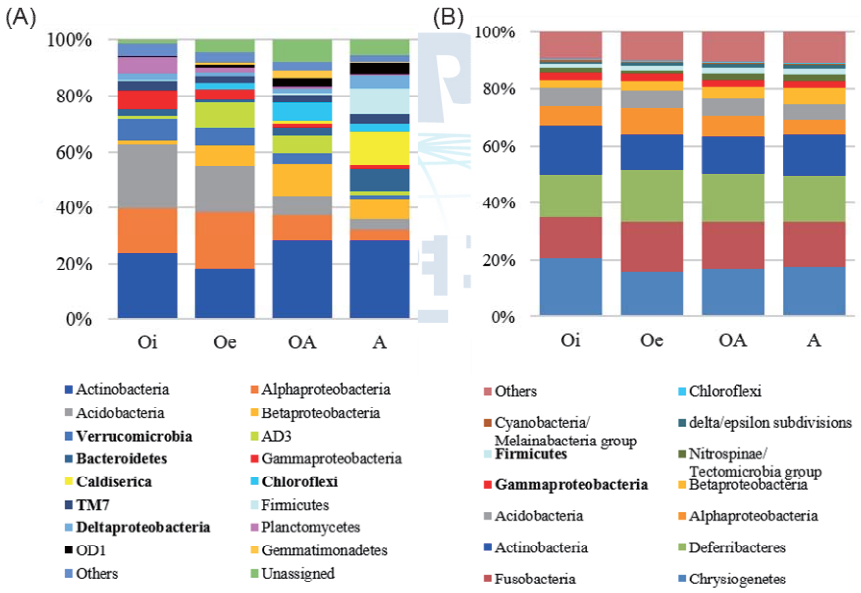


Fig. 53. Bacterial phyla distribution based on (A) 16S rRNA gene and (B) metagenome data.

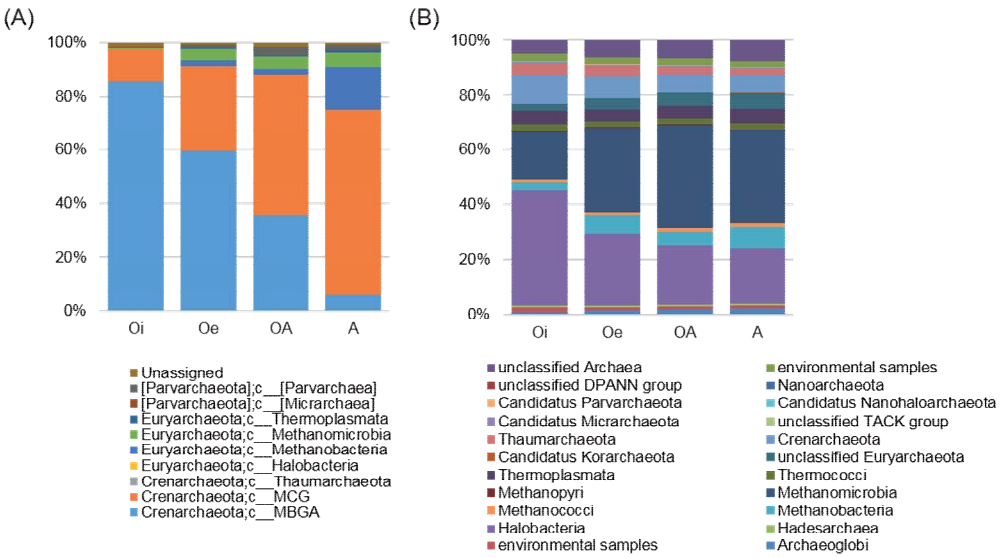


Fig. 54. Archaeal class distribution based on (A) 16S rRNA gene and (B) metagenome data.

메타지놈 데이터를 이용하여 미생물 군집조성과 더불어 토양 층위에 따른 기능성 유전자들의 종류 및 상대 수도의 변화 유무를 확인하였다. 단백질의 기능을 분류하는 COG(Clusters of Orthologous Groups) 방법을 이용했을 때, Level 1과 Level 2에서는 층위에 따라 차지하는 유전자의 출현 비율이 유사하였으나(Fig. 55), Level 3에서는 층위에 따라 다소 차이를 보였다. Level 3에서는 약 4,800여개의 기능이 분석되었으며 본 연구에서는 이들 중 지구온난화와 관련된 기능(메탄생성, 황환원, 질소고정 및 탈질작용)들에 한하여 기술하도록 하였다(Fig. 56~58). 전반적으로 이들 기능들은 활동층 내의 층위에 따라 상대도수가 증가하는 경향을 보였으며 동토층에서 다소 감소하는 경향을 보였다. 이는 활동층 상층부보다 활동층 기저면과 동토층과 같은 깊은 층에서 기능 유전자들이 발현될 potential이 더 높음을 알 수 있다.

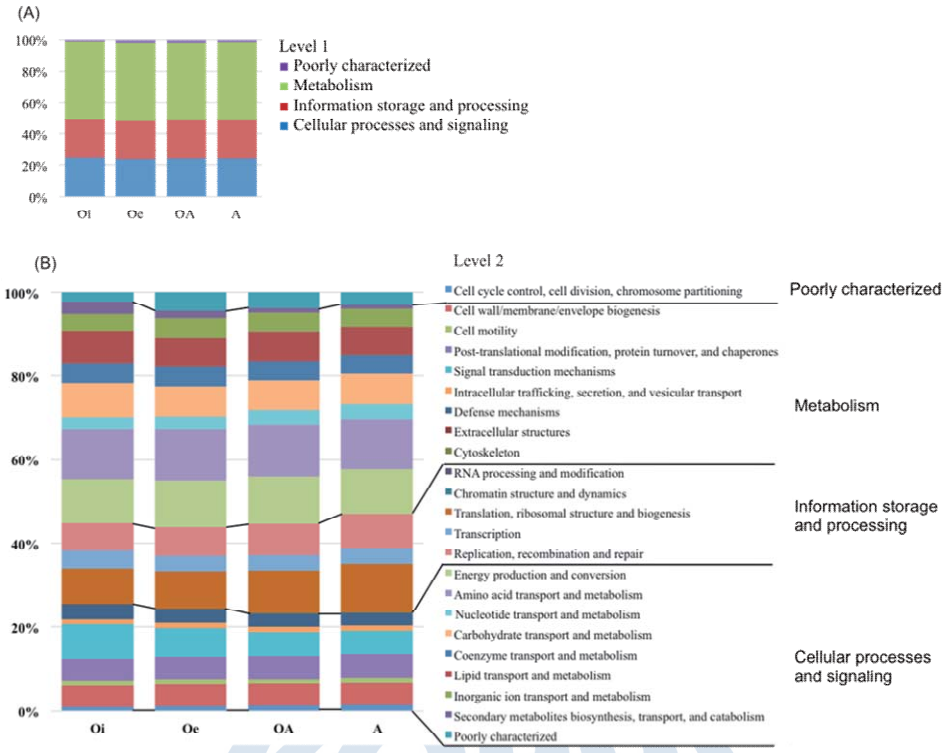


Fig. 55. Functional gene distribution based on COG annotation result.

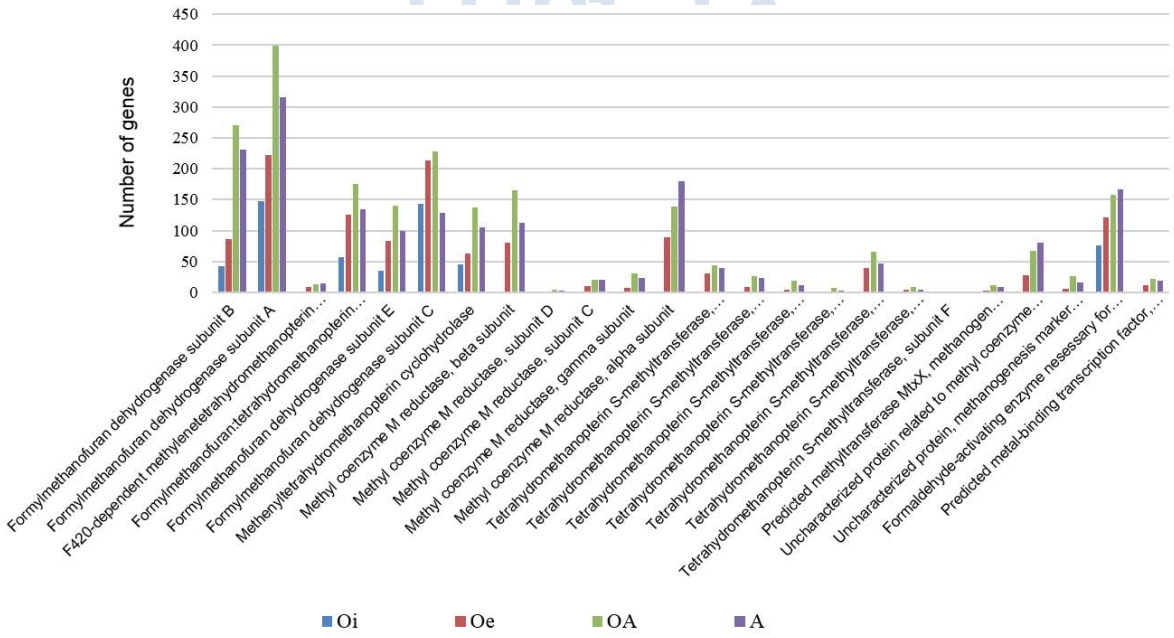


Fig. 56. Contents of methanogenesis function.

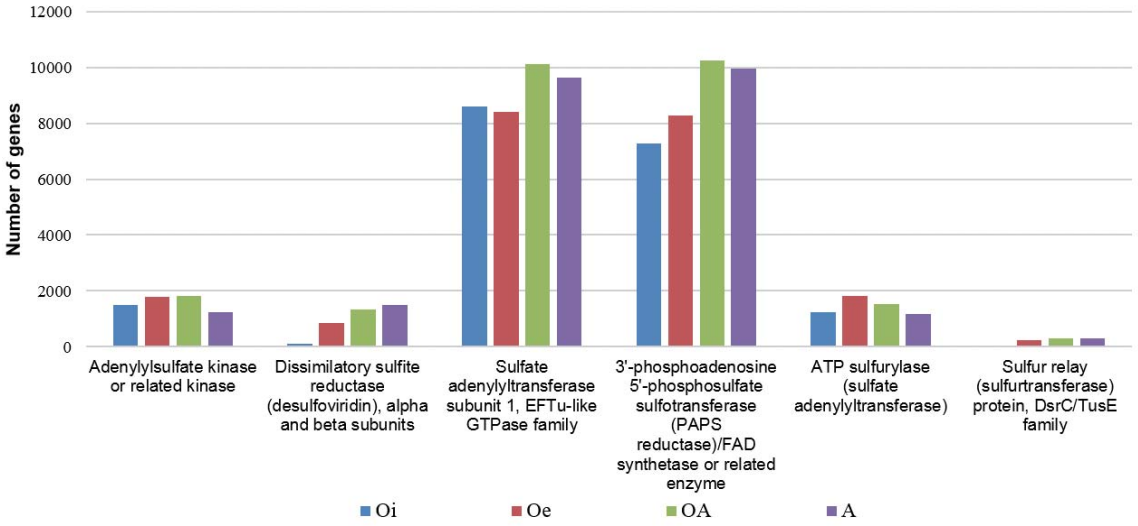


Fig. 57. Contents of sulfate reduction function.

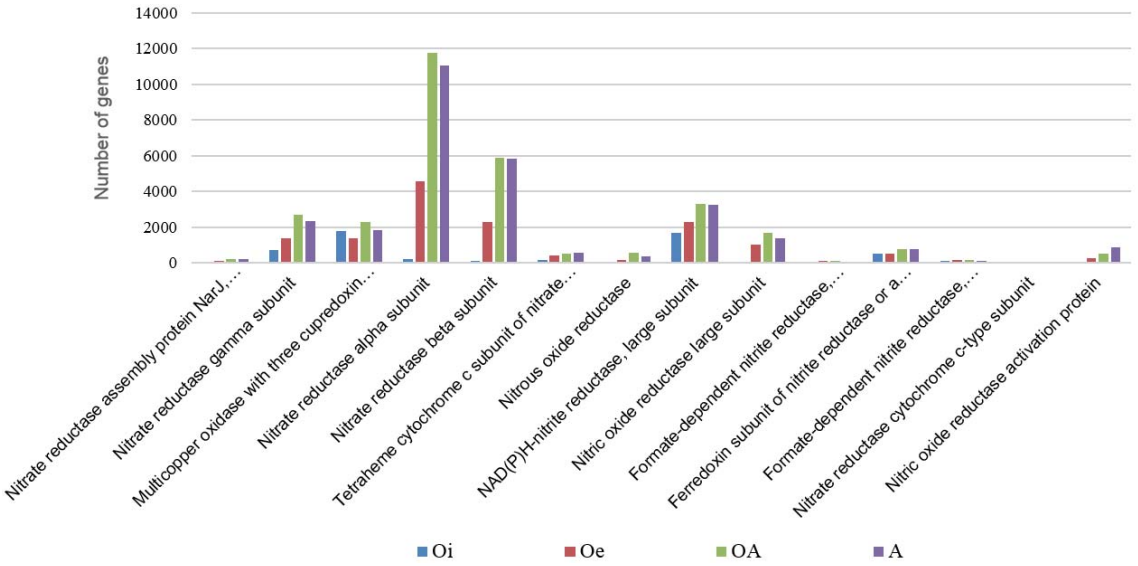


Fig. 58. Contents of denitrification function.

(4) 토양 유기물 특성과 환경요인과의 상관성 분석

(가) 카운실 지역의 토양 유기물 특성

36개 지점의 두 깊이 토양 (2011년 샘플)에서 pyrolysis-Gas Chromatography /Mass Spectrometry (py-GC/MS) 방법을 이용하여 토양 유기물 특성을 분석하였다. 10～20 cm 깊이의 토양을 채집 할 수 없었던 두 지점을 제외하고 70개 샘플(0～10 cm: 36개, 10～20 cm: 34개)을 분석하였다. Py-GC/MS 분석 결과 167개의 물질을 얻었으며, 각 물질들은 물질특성이나 기원물질에 따라 8개의 분류군으로 나누었다 (Table 11): Polysaccharide(Ps), Lipid(Li), Lignin(Lg), N-compound(N), Aromatic(Ar), Phenol(Ph), Alkyl compound(Al), Undetermined(Ud).

70개 토양의 유기물의 구성을 비교하고 특성을 분석하기 위해 스파스 주성분분석(Sparse Principle Component Analysis, sparse PCA)을 하였다. 주성분 1축(27.07%)과 2축(15.35%)은 전체 축의 변수의 42.42%를 설명하고 있으며, 주성분 1축을 기준으로 상층(0~10 cm)과 하측(10~20 cm)의 토양 유기물의 구조가 다른 것으로 나누어졌다(Fig. 59). 그리고 17번 지점은 유기물 토양인 다른 35개 지점들과 달리 유일하게 미네랄 성분이 많은 특성을 지닌 다른 지점이었는데, 토양 유기물 특성도 다른 지점들과 확연히 차이가 나고 있다.

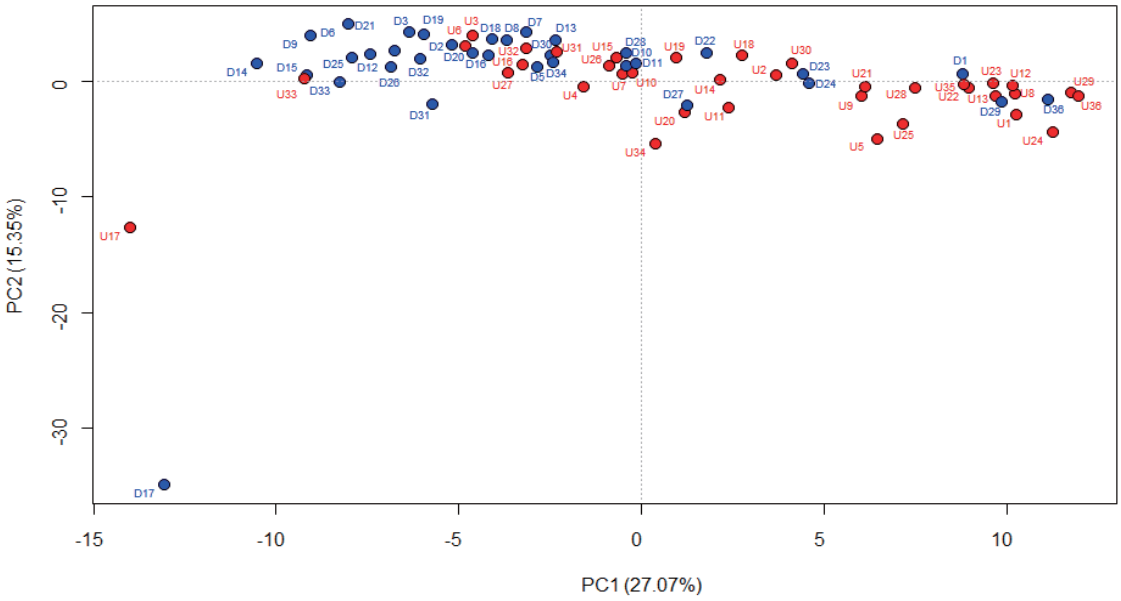


Fig. 59. A score plots of sparse PCA using pyrolysis products of soil organic matter (Red dots: 0 - 10 cm, blue dots: 10 - 20 cm).

Table 11. A total of 167 identified products through py-GC/MS analysis

Source	Compound	RT	MW	Major ions
Ps1	Isopropyl acetate	3.056	102	43, 61
Ps2	2-methylfuran	3.592	82	53, 82
Ps3	Glycol, monoacetate	4.031	104	43, 74
Ps4	2(5H)-Furanone	4.890	84	54, 84
Ps5	3-Furaldehyde	5.448	96	95, 96
Ps6	2-Furaldehyde [Furfural]	5.977	96	95, 96
Ps7	2-Cyclopentene-1,4-dione	6.251	96	42, 96
Ps8	Furan, 2-propyl	7.191	110	91, 110
Ps9	2-Propanone, 1-hydroxy-, acetate	7.334	116	43, 86
Ps10	2-Cyclopenten-1-one, x-methyl	8.418	96	67, 96
Ps11	Furan, 2-acetyl	8.590	110	95, 110
Ps12	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy	9.027	98	55, 98
Ps13	2-Furaldehyde, 5-methyl	10.160	110	109, 110
Ps14	2-Cylcolpenten-1-one, x-methyl	10.201	96	67, 96
Ps15	2H-pyran-2,6(3H)-dione	11.054	112	55, 112
Ps16	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl	11.884	112	112
Ps17	2,5-Furandicarboxaldehyde	13.326	124	123, 124
Ps18	3(2H)-Furanone, 2,5-dimethyl-4-hydroxy	13.459	128	43, 57, 72, 128
Ps19	Benzofuran, 2-methyl	14.010	132	131,132
Ps20	Levoglucosenone	14.041	126	68, 69
Ps21	4H-Pyran-4-one, 3-hydroxy-2-methyl [Maltol]	14.056	126	76, 126
Ps22	4H-Pyran-4-one, 2,3-dihydro-3,5,-dihydroxy-6-methyl	14.839	144	101, 144
Ps23	Sugar compound	15.449		60, 73
Ps24	1,4:3,6-dianhydro-alpha-D-glucopyranose	16.395	144	57, 69
Ps25	Benzofuran, 2,3-dihydro	16.515	120	91. 120
Ps26	Furfural, 5-hydroxymethyl	16.687	126	97, 126
Ps27	Sugar compound	19.610		60, 73
Ps28	D-allose	20.988	180	60, 73
Ps29	D-Glucopyranose, 1,6-anhydro	21.809	162	60, 73
N1	Pyrrole	3.500	67	67
N2	C1-Pyrrole	6.207	81	80, 81
N3	Benzonitrile	10.837	103	76, 103
N4	Pyridinone, 4-amino-2(1H)	10.842	110	82, 110
N5	N-Butyl-tert-butylamine	11.245	129	58, 114
N6	Pyrrolidine, 1-ethyl-2,2-dimethyl	11.631	127	84, 112
N7	Benzyl nitrile	14.746	117	90, 117
N8	4-Methyl-2-oxopentanenitrile	15.833	111	41, 43
N9	Indole	18.076	117	90, 117
N10	Indole, 3-methyl	19.897	131	130, 131

KOPRI 극지연구소

Source	Compound	RT	MW	Major ions
N11	3-Pyridinol, 6-methyl-, acetate	20.007	151	80, 109
N12	Diketodipyrrole	25.399	186	93, 186
Ar1	Toluene	3.862	92	91, 92
Ar2	Ethylbenzene	6.930	106	91, 106
Ar3	Dimethylbenzene / p-xylene	7.245	106	91, 106
Ar4	Dimethylbenzene / p-xylene	7.250	106	91, 106
Ar5	Styrene	7.963	104	78, 104
Ar6	Dimethylbenzene / p-xylene	7.974	106	91, 106
Ar7	Benzene, propyl	9.887	120	91, 120
Ar8	Benzene, 1-ethyl-x-methyl	10.113	120	105, 120
Ar9	Benzene, 1-ethyl-x-methyl	10.227	120	105, 120
Ar10	Benzene, 1-ethyl-x-methyl	10.593	120	105, 120
Ar11	Benzene, 1,2,4-trimethyl	11.046	120	105, 120
Ar12	Benzene, 1,2,3-trimethyl	11.776	120	105, 120
Ar13	Indane	12.114	118	117, 118
Ar14	Indene	12.382	116	115, 116
Ar15	Benzeneacetaldehyde	12.445	120	91
Ar16	Indane, 1-methyl	13.411	132	117, 132
Ar17	Benzene, 1-methyl-2-cyclopropen-1-yl	14.924	130	115, 130
Ar18	Indene, 2-methyl	15.111	130	115, 130
Ar19	Naphthalene	15.774	128	128
Ar20	1,2-Benzenediol	16.011	110	64, 110
Ar21	Naphthalene, 2-methyl	18.157	142	115, 142
Ar22	Benzene, 1,2-dicarboxylic acid	18.425	166	76, 104
Ar23	Naphthalene, 1-methyl	18.441	142	141, 142
Ar24	Biphenyl	19.801	154	76, 154
Ar25	Naphthalene, 2-ethyl	20.044	156	141, 156
Ar26	Naphthalene, x,x-dimethyl	20.509	156	141, 156
Ar27	Dibenzofuran	22.327	168	139, 168
Ar28	Fluorene	23.470	166	165, 166
Ar29	9H-Fluorene, 9-methylene	26.665	178	176, 178
Ph1	Phenol	10.720	94	66, 94
Ph2	Phenol, 2-methyl	12.677	108	107, 108
Ph3	Phenol, 4-methyl	13.214	108	107, 108
Ph4	Phenol, x-ethyl	14.642	122	107, 122
Ph5	Phenol, 2,4-dimethyl	14.948	122	107, 122
Ph6	Phenol, 4-ethyl	15.351	122	107, 122
Ph7	Phenol, 4-isopropenyl	18.252	134	119, 134
Lg1	Phenol, 2-methoxy [Guaiacol]	13.463	124	109, 124
Lg2	Phenol, 4-methyl-2-methoxy [4-Methylguaiacol]	15.866	138	123, 138

KOPRI 극지연구소

Source	Compound	RT	MW	Major ions
Lg3	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy [4-Ethylguaiacol]	17.662	152	137, 152
Lg4	Phenol, 4-vinyl-2-methoxy [4-Vinylguaiacol]	18.416	150	135, 150
Lg5	Phenol, 5-methyl-3-methoxy	18.611	138	138
Lg6	Vanilin	20.094	152	151, 152
Lg7	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl) [Isoeugenol]	21.035	164	164
Lg8	Ethanone, 1-(x-hydroxy-x-methoxyphenyl)	21.671	166	151, 166
Lg9	Ethanone, 1-(2,5-dimethoxyphenyl)- [2,5-Dimethoxyacetophenon]	22.997	180	165, 180
Lg10	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl) [Methoxyeugenol]	25.272	194	91, 194
Al1	Pristene	25.718		55, 69
Al2	Pentadecanal	27.106	226	57, 69
Al3	2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl	27.458	268	58, 71
Al4	1-Hexadecanol	28.050	242	55, 69
Al5	2-Nonadecanone	31.118	282	58, 71
Al6	1-Eicosanol	33.447	298	55, 83
Al7	Squalene	39.211	410	69, 81
Al8	C27:0 methylketone	40.211		58, 59
Al9	C28:0 methylketone	42.164		58, 59
Li1	n-C8:1	4.571	112	55, 69
Li2	C8:0 [Octane]	4.832	114	57, 71
Li3	n-C9:1	8.023	126	55, 69
Li4	C9:0 [Nonane]	8.307	128	57, 71
Li5	n-C10:1	11.043	140	55, 69
Li6	C10:0 [Decane]	11.286	142	57, 71
Li7	Fa(C7) [Heptanoic acid]	13.389	130	60, 73
Li8	C11:0 [Undecane]	13.838	156	57, 71
Li9	FA(C8) [Octanoic acid]	15.519	144	60, 73
Li10	n-C12:1	15.936	168	55, 69
Li11	C12:0 [Dodecane]	16.111	170	57, 71
Li12	n-C13:1	18.036	182	55, 69
Li13	C13:0 [Tridecane]	18.197	184	57, 73
Li14	n-C14:1	19.987	196	55, 69
Li15	C14:0 [Tetradecane]	20.123	198	57, 71
Li16	n-C15:1	21.819	210	55, 69
Li17	C15:0 [Pentadecane]	21.943	212	57, 71
Li18	n-C16:1	23.538	224	55, 69
Li19	C16:0 [Hexadecane]	23.665	226	57, 71
Li20	n-C17:1	25.183	238	55, 69
Li21	C17:0 [Heptadecane]	25.296	240	57, 71
Li22	n-C18:1	26.741	252	55, 69
Li23	C18:0 [Octadecane]	26.846	254	57, 71

KOPRI 극지연구소

Source	Compound	RT	MW	Major ions
Li24	n-C19:1	28.220	266	55, 69
Li25	C19:0 [Nonadecane]	28.317	268	57, 71
Li26	FA(C16) [Hexadecanoic acid]	29.147	256	60, 73
Li27	n-C20:1	29.635	280	55, 69
Li28	C20:0 [Eicosane]	29.723	282	57, 71
Li29	n-C21:1	30.991	294	55, 69
Li30	C21:0 [Heneicosane]	31.059	296	57, 71
Li31	n-C22:1	32.285	308	55, 69
Li32	C22:0 [Docosane]	32.359	310	57, 71
Li33	n-C23:1	33.531	322	55, 69
Li34	C23:0 [Tricosane]	33.596	324	57, 71
Li35	n-C24:1	34.722	336	55, 69
Li36	C24:0 [Tetracosane]	34.786	338	57, 71
Li37	n-C25:1	35.840	350	55, 69
Li38	C25:0 [Pentacosane]	35.919	352	57, 71
Li39	n-C26:1	36.972	364	55, 69
Li40	n-C27:1	38.044	378	55, 69
Li41	C27:0 [Heptacosane]	38.072	380	57, 71
Li42	n-C28:1	39.063	392	55, 69
Li43	C29:0 [Nonacosane]	40.088	408	57, 71
Li44	Stigmastan-3,5-dien	41.832	396	147, 207, 396
Li45	C30:0 [Triacontane]	41.973	422	57, 71
Li46	Cholest-5-en-3-one, 22,25-dihydroxy-	44.099	416	207, 414
Li47	Stigmasta-3,5-dien-7-one	45.236	410	174, 410
Ud1 - 24	24 unidentified compounds			

KOPRI 극지연구소

주성분 1축과 2축을 결정하는데 167개의 각 물질들이 어떻게 기여하였는지 보기위하여 loading 값을 확인하였다(Fig. 60). 주성분 1축을 결정하는 것에 탄수화물(Ps)과 지질(Li)이 가장 크게 영향을 주고 있으며, 두 분류군 사이는 역의 상관성을 보였다. 주성분 2축은 방향성물질(Ar)이 가장 크게 영향을 주었다. 주성분 1축에서 오른쪽에 위치하고 있는 토양은 탄수화물이 높게 나타나고 있다. 이끼가 쌓여있는 습지의 유기물은 탄수화물의 비율이 높은 것으로 알려져 있고(Treat *et al.*, 2014), 이끼의 한 속인 *Sphagnum*의 지표로 알려진 4-isopropenylphenol이 탄수화물 물질들과 함께 위치하고 있는 것을 보았을 때 주성분 1축을 기준으로 오른쪽에 위치하는 있는 토양 유기물은 이끼에서 유래한 것으로 추정할 수 있다(Stankiewicz *et al.*, 1997; Schellekens *et al.*, 2009). 여기에는 대부분의 상층 토양들이 속하고 있다(Fig. 60).

상층 토양에서 주성분 1축 왼쪽에 있는 것들은 주로 리그닌(Lg) 함량과 높은 상관성을 보이는데, 이 지점들은 토양유기물이 관목이나 초본의 영향을 받았을 것으로 추정된다(Kögel-Knabner, 2002). 주성분 1축에서 왼쪽은 지질기원 물질 중에서도 탄화수소 물질의 비율이 높게 나타나고 있으며, 특히 길이가 짧은 탄화수소가 높은 비율을 보이고 있다. 길이가 짧은 탄화수소는 미생물에서 유래된 것으로 알려져 있으므로 주성분 1축을 기준으로 왼쪽에 있는 토양은 분해가 진행된 토양 유기물로 생각되며(Buurman *et al.*, 2007; Kuhn *et al.*, 2010). 여기에는 대부분의 하층 토양들이 속하고 있다(Fig. 59). 17번 지점의 경우 방향족 물질들이 높은 비율로 나타나고 있다. 방향족 물질들이 많다는 것은 humification이 많이 진행되었거나 불에 타고 남은 물질들이 토양 유기물을 주로 구성하는 것을 의미한다(Knicker *et al.*, 2005; Kaal and Rumpel, 2009).

고려대학교 산학협력단 극지연구소

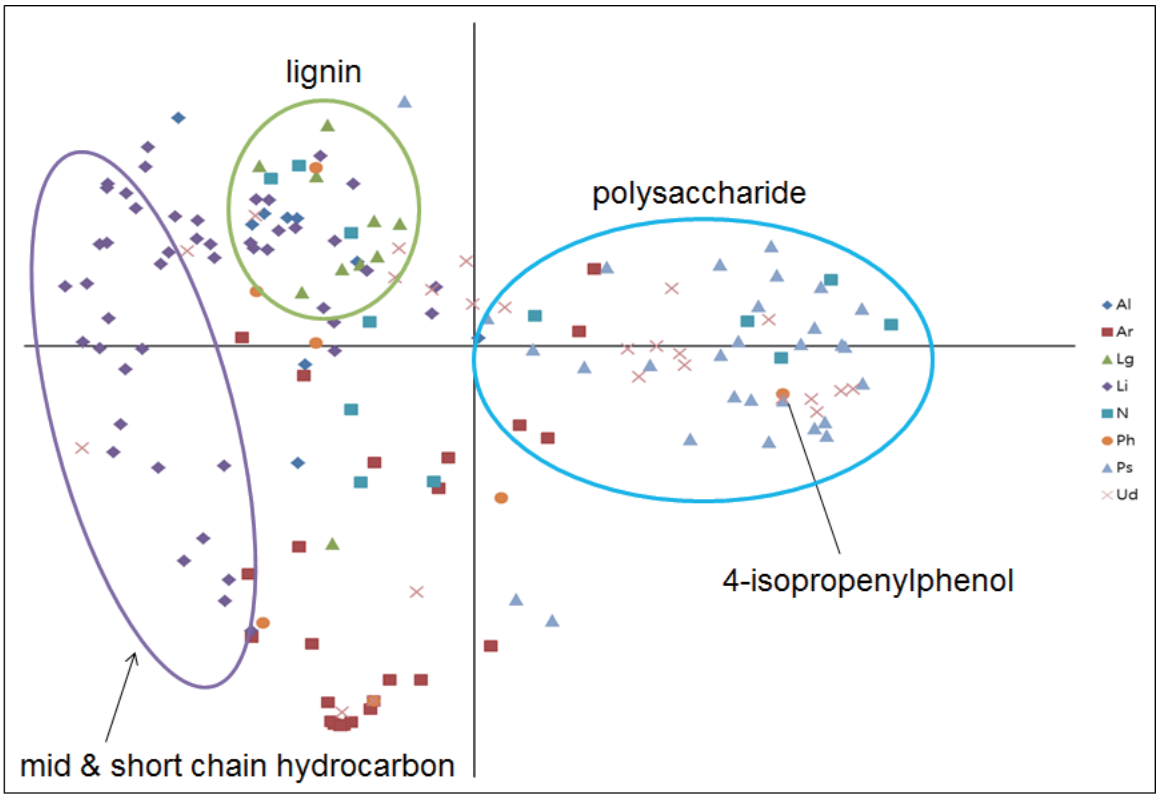


Fig. 60. A loading plot of sparse PCA using pyrolysis products of soil organic matter.

극지연구소

(나) 상층 토양 유기물 구조와 식생 피도 사이 관계 분석

일반적으로 식물 낙엽은 토양으로 유입되는 가장 주요한 유기물의 형태이다. 따라서 각 지점에서 서식하고 있는 식생이 토양 유기물의 구성에 영향을 줄 것으로 예상되어 분석을 진행하였다. 식생 군집이 토양 유기물 구성에 미치는 영향을 보기 위하여 동일 지점에서 상층 토양의 유기물 구성과 식생 피도 자료를 이용하여 다변량분석 중 하나인 RDA(Redundancy Analysis) 분석을 진행하였다(Fig. 61). 앞의 PCA에 결과에서 토양 유기물 구성성분이 이끼에서 유래한 것으로 추정되는 지점들은 이끼(Moss)와 진들딸기(Rub.)가 많이 있는 지점으로 나타났으며, 리그닌의 함량이 높은 지점들은 관목인 블루베리의 피도와 높은 상관성을 보였다(Fig. 60, 61). 따라서 토양 상층의 유기물 특성은 표층식생의 영향을 많이 받는 것을 확인 할 수 있었다.

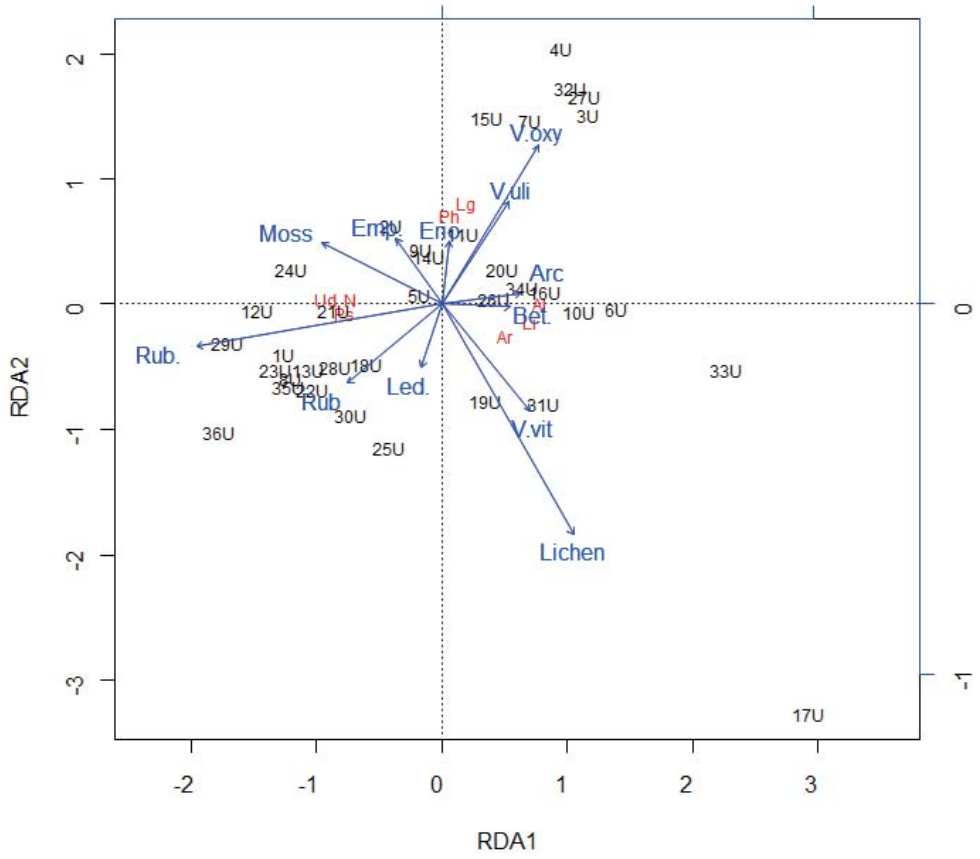


Fig. 61. Redundancy analysis with soil organic matter compositions and vegetation cover.

(다) 토양 유기물 특성과 토양 환경요인들 사이 상관성 분석

토양 유기물 특성과 토양 환경 요인 사이 상관관계를 보기 위하여 주성분 1축과 환경요인들 사이의 상관관계 분석을 하였다. 분석 결과, 주성분 1축과 상관성을 보이는 토양환경요인들로 pH, 수분함량, 탄질비(C/N ratio)가 있었다. pH는 주성분 1축과 음의 상관성(r=-0.685)을 보였고, 수분함량은 양의 상관성(r=0.781)을 나타내었다(Fig. 62a, b). 이끼(Sphagnum Moss)가 많이 분해되지 않고 쌓여있는 토양의 경우, pH가 4정도로 낮은 값을 나타내고, 분해가 진행되면서 pH는 증가한다. 앞서 유기물 특성과 식생군집과의 관계에서 보았듯이, 주성분 1축에서 양의 방향에 위치하고 있는 샘플들은 이끼에서 유래한 유기물이 있는 토양이다. 따라서, 토양 유기물의 분해정도와 이끼 유래 유기물이 많은 지점으로 나눠지는 주성분 1축에 대해 pH가 음의 상관성을 보이는 것으로 판단된다. 또한, 이끼의 높은 수분보유력(함수율)로 인하여, 이끼 유래 유기물이 많은 지점(주성분 1축 양의 방향)과 토양 수분함량 값이 양의 상관성을 보이는 것으로 판단된다(Gough *et al.*, 2000).

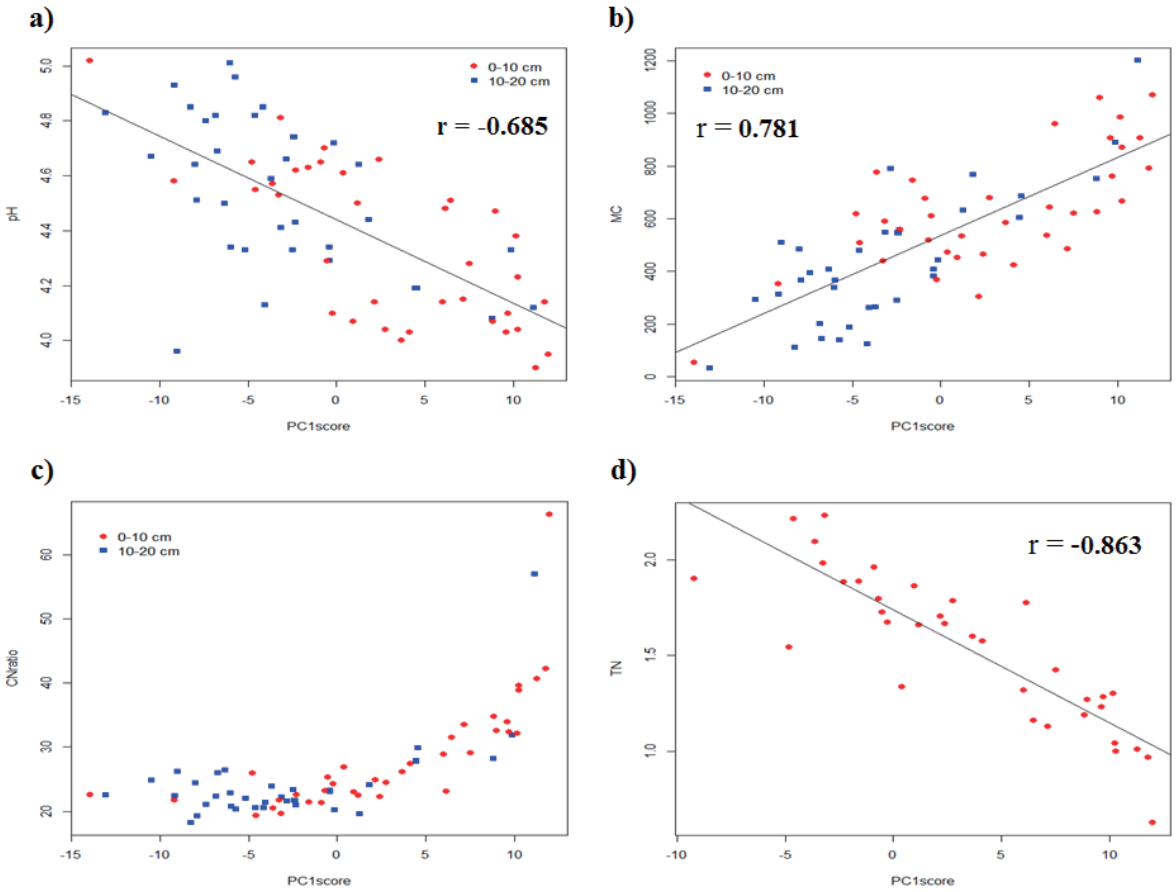


Fig. 62. Relationships between soil properties and PC1 from sparse PCA using pyrolysates, a) pH, b) moisture content, c) C/N ratio, d) total nitrogen (TN) content.

탄질비는 주성분 1축을 기준으로 음의 방향에 위치한 토양들은 약 20~30 사이의 값을 나타내고 있으며, 양의 방향으로 가면서 탄질비가 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 62c). 탄질비가 낮으면 분해가 많이 진행된 것으로 간주한다. 따라서, 이 지점들이 미생물로부터 유래된 토양 유기물 특성을 보이는 결과와 일치한다. 또한, 탄질비가 증가되는 경향을 보이는 것이 주로 상층 토양이므로, 상층 토양(17번 지점은 제외)의 주성분 1축 값과 탄소와 질소와의 상관성을 분석하였다. 탄소는 주성분 1축과 상관관계가 높지 않았으나, 질소는 높은 음의 상관관계(r=-0.863)를 나타내었다(Fig. 62d). 스패그넘 모스의 질소양이 매우 낮은 것으로 알려져 있어, 주성분 1축에서 양의 방향으로 갈수록 이끼류가 많은 지역에서 분해가 이루어지지 않은 유기물이 많기 때문에 나타나는 결과로 해석된다.

KOPRI
극지연구소

2. 캠브리지 베이 토양 특성 및 기후변화에 의한 토양 특성 변화

가. 기후변화 모사구 운영 및 시료 채취 개요

2012년 7월 초 설치된 기후변화 모사구는 매년 식물 생육 초기 OTC를 설치하고 물을 주기 시작하여, 눈이 와서 더 이상 식물이 생장하지 않은 시기에 운영을 종료하였다. 매년 6월 말 또는 7월 초에 OTC를 설치하였고, 9월 말-10월 초에 OTC를 회수하였다(Table 12). 강수량 증가 실험은 매주 방형구에 2 L의 증류수 (0.52 mm/wk)를 주고, 물을 주는 날 비가 오면 추가로 물을 주지 않았다. 기후변화 모사 실험구 운영 내용은 Table 13에 작성하였다. 현장에 설치된 기후변화 모사 실험구 배치도는 Fig. 63, 64 에 표시하였다.

Table 12. Terms used in this climate manipulation experiment

English	Korean	English	Korean
Monitoring	모니터링용 실험구	Destructive sampling	샘플링용 실험구
Block	집구	Treatment	처리구
Plot	방형구 (2 × 2 m 크기)	Point	지점

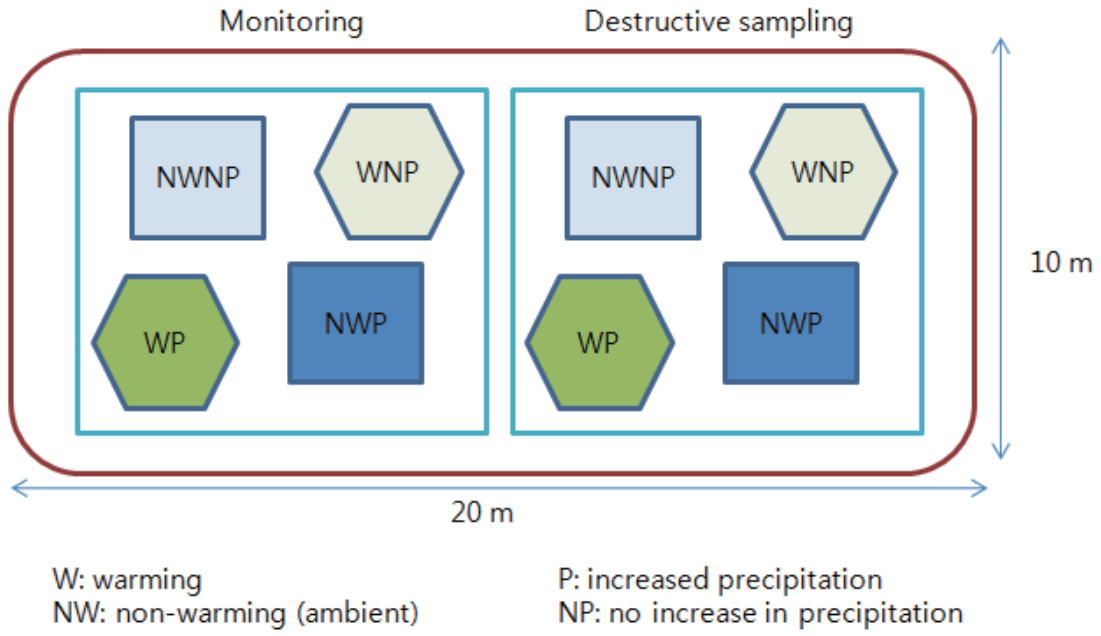


Fig. 63. Compositions of one block with four treatments in monitoring and destructive sampling plots.

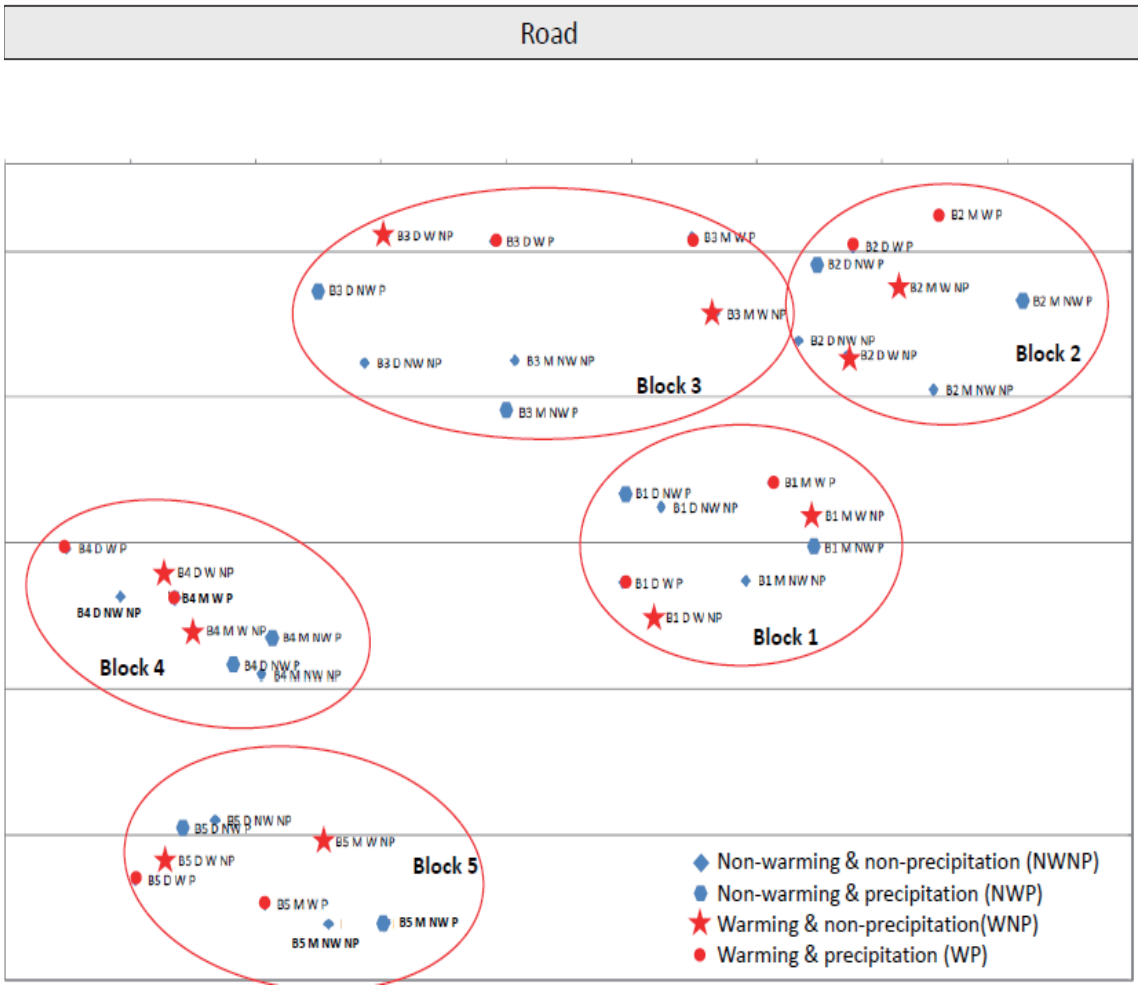


Fig. 64. A layout of experimental plots established in Cambridge Bay, Canada.

토양 시료 채취는 기후변화 모사 실험구 운영 전 2012년 6월 말에 0~5, 5~10 cm 깊이에서 시료 채취를 하였다 (Table 14). 기후변화 모사 효과를 확인하기 위해 1, 3년차에 추가로 토양 샘플링을 실시하였다. 2012년부터 2013년에는 0~5, 5~10 cm 깊이별 토양 시료 채취를 하였으나, 2015년부터는 organic과 mineral 층으로 구분하여 토양 시료를 채취하였다.

Table 13. Operation of climate manipulation plots

Year	OTC Installation	OTC Removal	Watering date
2012	7/10	10/6	7/27, 8/3, 8/10, 8/17, 8/31, 9/7, 9/21
2013	7/3	10/8	7/20, 7/26, 8/9, 8/15, 9/7, 9/13, 9/27 ※ 8/23-9/9 강풍으로 OTC가 제대로 운영되지 않음
2014	6/21	9/24	6/26, 7/3, 7/10, 7/24, 8/7, 8/14, 8/21, 8/28, 9/11
2015	6/27	9/24	7/3, 7/16, 7/30, 8/6, 8/13, 8/20, 8/27, 9/3, 9/11

Table 14. Soil sampling history in the climate manipulation plots

Year	Climate manipulation	Soil sampling record
2012	Initiation	At the end of June, right before OTC installation (T0 soil samples: 0-5, 5-10 cm depth)
2013	After one year	Early August soil sampling: 0-5, 5-10 cm depth
2014	After two years	No soil sampling
2015	After three years	Early August soil sampling: Organic and mineral layers

KOPRI 극지연구소

나. 기후 변화 모사에 따른 대기 및 토양 환경 변화 (2012~2015년)

(1) 캠브리지 베이 3년간의 환경 자료(2012년 7월 ~ 2015년 6월)

기후변화모사 실험구에서 아무 처리도 하지 않은 대조군의 20 cm 높이의 대기 온도 및 상대습도, 5 cm 깊이의 토양 온도 자료를 3년간 얻었다. 1시간 간격으로 자료를 얻었으며, 5개 대조군의 평균값을 이용하여 계산하였다. 캠브리지베이 20 cm 높이의 대기 온도는 최고 23.8℃(2013. 8. 12)에서 최저 -43.3℃(2013. 2. 17)이었다. 모두 8월에 기온이 가장 높았고, 1월말에서 2월말에 최저 기온을 보였다(Fig. 65). 눈이 쌓여 있는 동안 상대습도는 일교차가 거의 없지만, 눈이 없는 여름에는 30~100%까지 일변화가 크게 나타났다(Fig. 66).

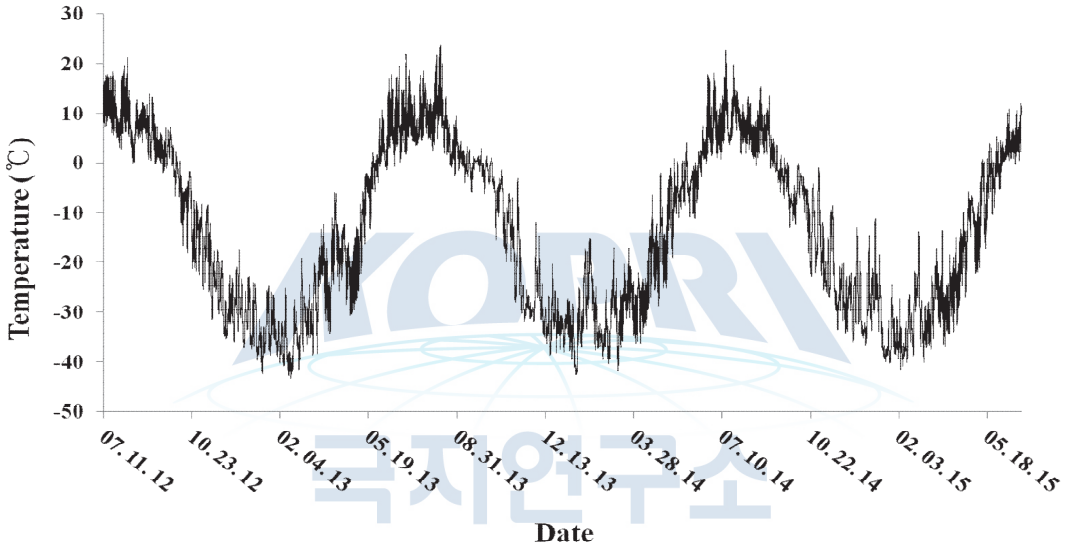


Fig. 65. Air temperature at 20 cm height in Cambridge Bay, Canada.

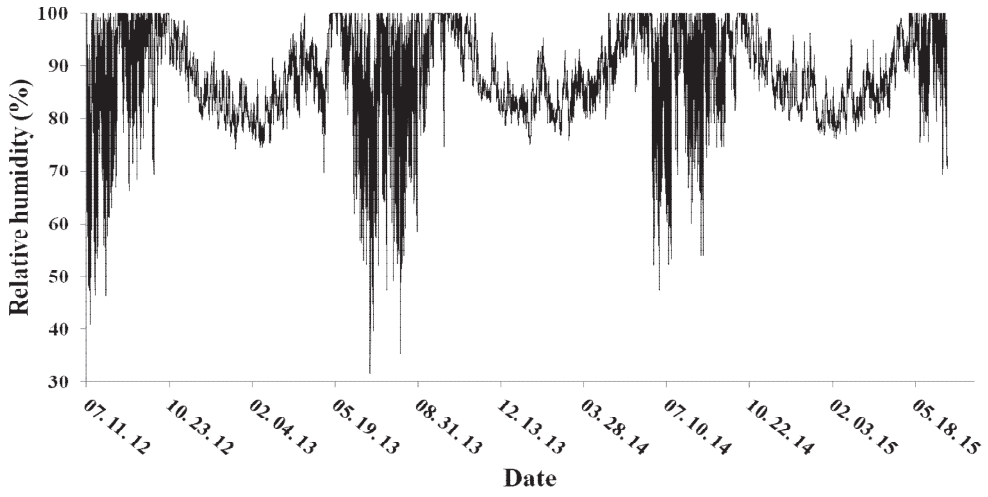


Fig. 66. Relative humidity at 20 cm height in Cambridge Bay, Canada.

기후변화모사 실험구에서 아무 처리도 하지 않은 대조군의 5 cm 깊이의 토양 온도를 1시간 간격으로 측정하고, 5개 대조군의 평균값을 이용하여 2년간의 토양 온도 자료를 얻었다. 대기 온도와 마찬가지로 8월(2013. 8. 12)에 최고 온도(14.7℃)가 나타났고, 최저 온도(- 29.7℃)는 2015년 2월 13일에 나타났다(Fig. 67). 토양 수분함량의 경우 센서가 있는 위치에 따라 편차가 커서 평균값으로 계산할 수 없었으며, 그림을 따로 나타내지는 않았다.

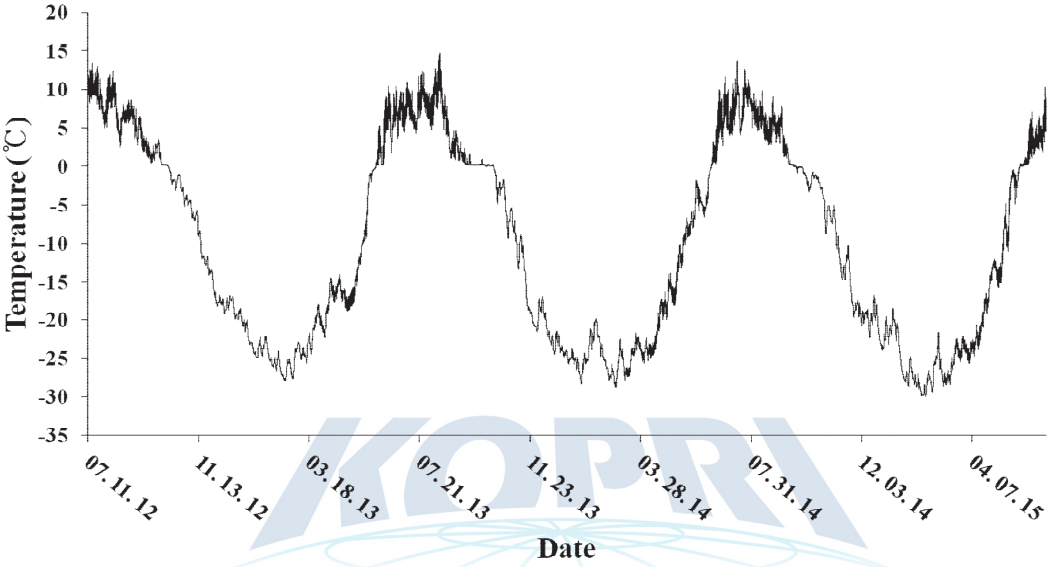


Fig. 67. Soil temperature at 5 cm depth in Cambridge Bay, Canada.

(2) 기후 변화 모사 처리에 따른 대기 및 환경 변화

기후 변화 모사 실험이 이루어진 기간 동안의 처리구 별 대기 및 토양 온도, 대기 상대습도, 토양 수분함량의 차이를 비교하여 보았다. 모든 자료는 같은 처리를 한 5개 지점의 값을 평균 한 후, 기후변화모사 실험기간 동안 평균값을 계산하였다(Fig. 68). 온도 상승 챔버를 설치를 한 기간 동안, 20 cm 높이의 대기 온도는 평균 0.5℃ 가량 더 높아졌다. 강수 증가에 따른 대기 온도의 변화는 관찰되지 않았다. 또한, 온도 상승과 강수 증가 같은 효과가 상대습도에 영향을 미치지 않았다(Fig. 69). 5 cm 깊이의 토양 온도는 온도 상승 챔버가 설치가 된 지역에서 평균 0.6℃가 (같은 강수 처리를 한 처리구를 비교하였을 때) 높아진 것을 확인할 수 있었다. 대기 온도와 달리 토양 온도는 강수에 따른 효과가 나타났다. 강수량을 증가 시켜 주었을 때 토양의 온도가 평균 0.2℃가 나타났다(Fig. 70). 강수량 증가에 따른 대기 상대습도와 토양 수분함량의 변화를 보기 위하여 물을 처리구에 뿌려준 날을 하루 정하여, 그 날짜 전후로 5 cm 깊이의 토양 수분함량의 시간별 변동을 확인해보았다. 하지만, 물을 뿌려준 이후에 특별히 5 cm 깊이의 토양 수분함량의 변화는 볼 수 없었다(Fig. 71). 다른 날짜들도 확인 해 보았으나 특별한 변화를 역시 볼 수 없었다.

KOPRI 극지연구소

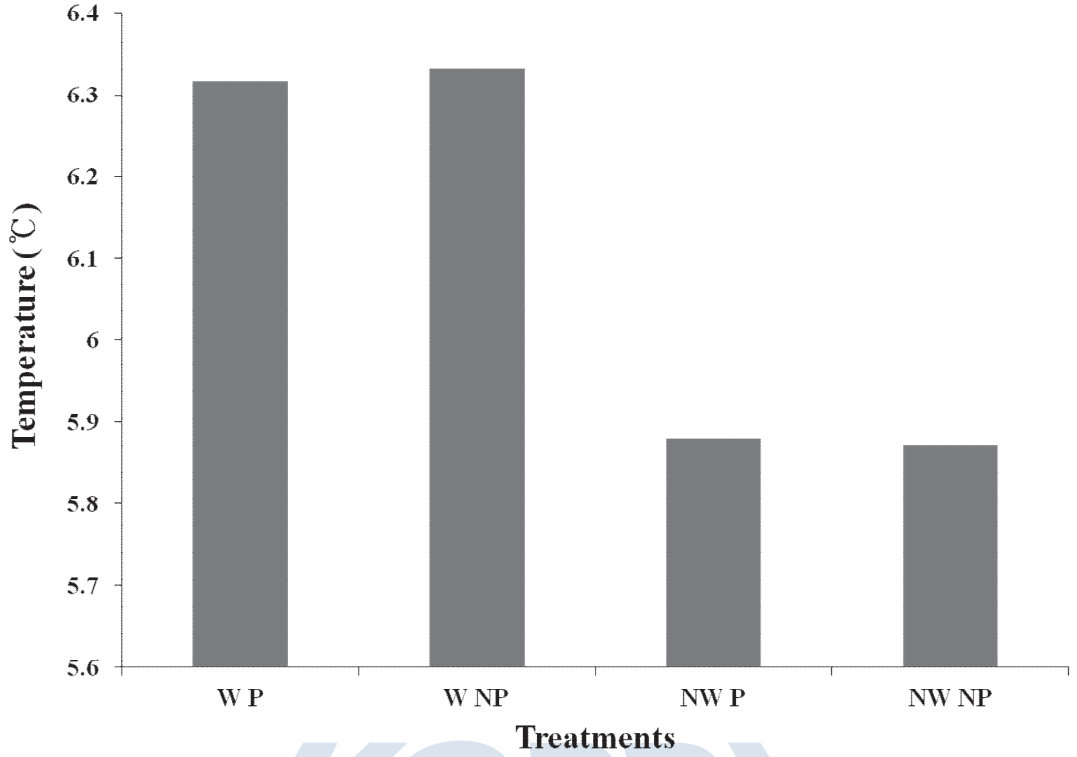


Fig. 68. Average air temperature at 20 cm height during OTC operation period.

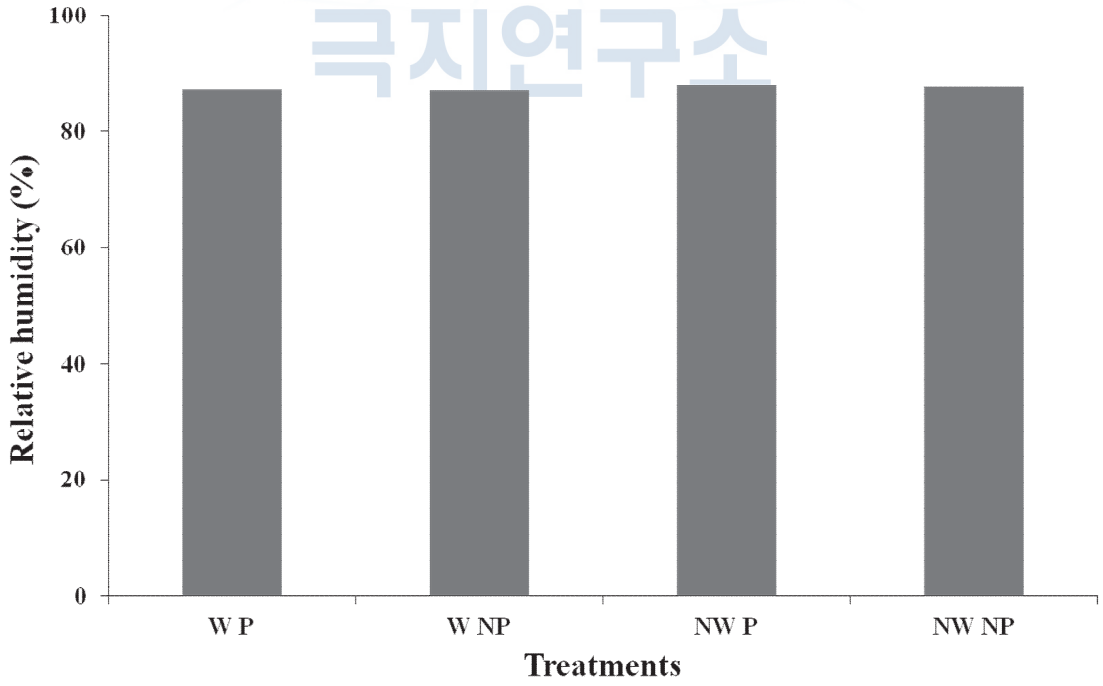


Fig. 69. Average relative humidity at 20 cm height during OTC operation period.

KOPRI 극지연구소

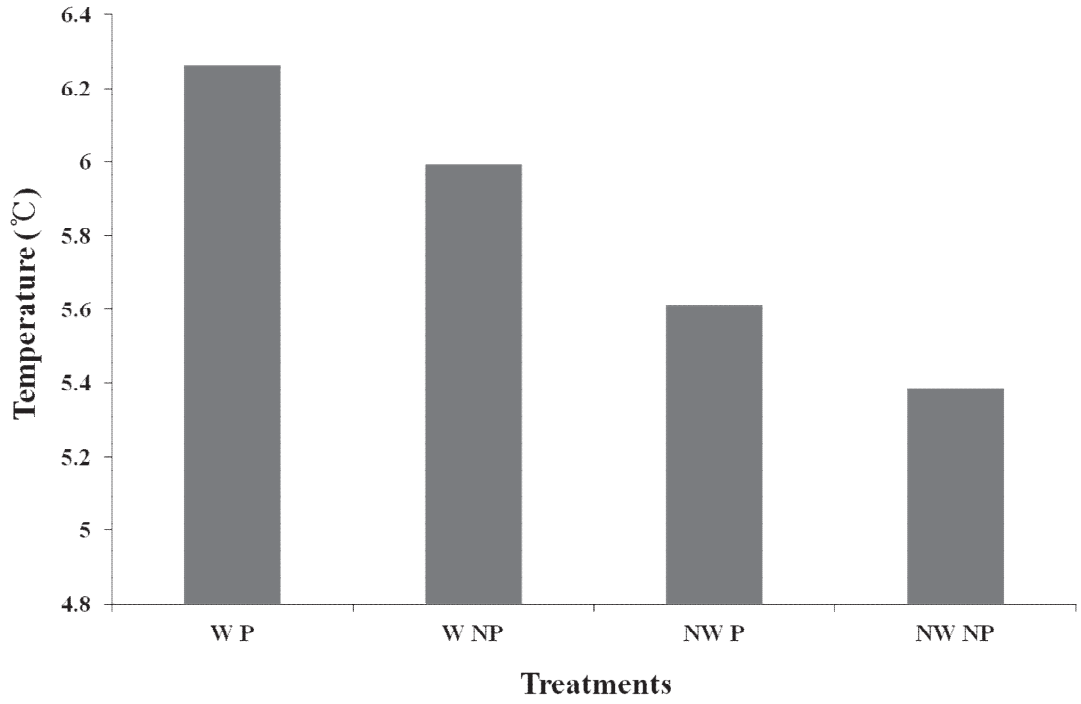


Fig. 70. Average soil temperature at 5 cm depth during OTC operation period.

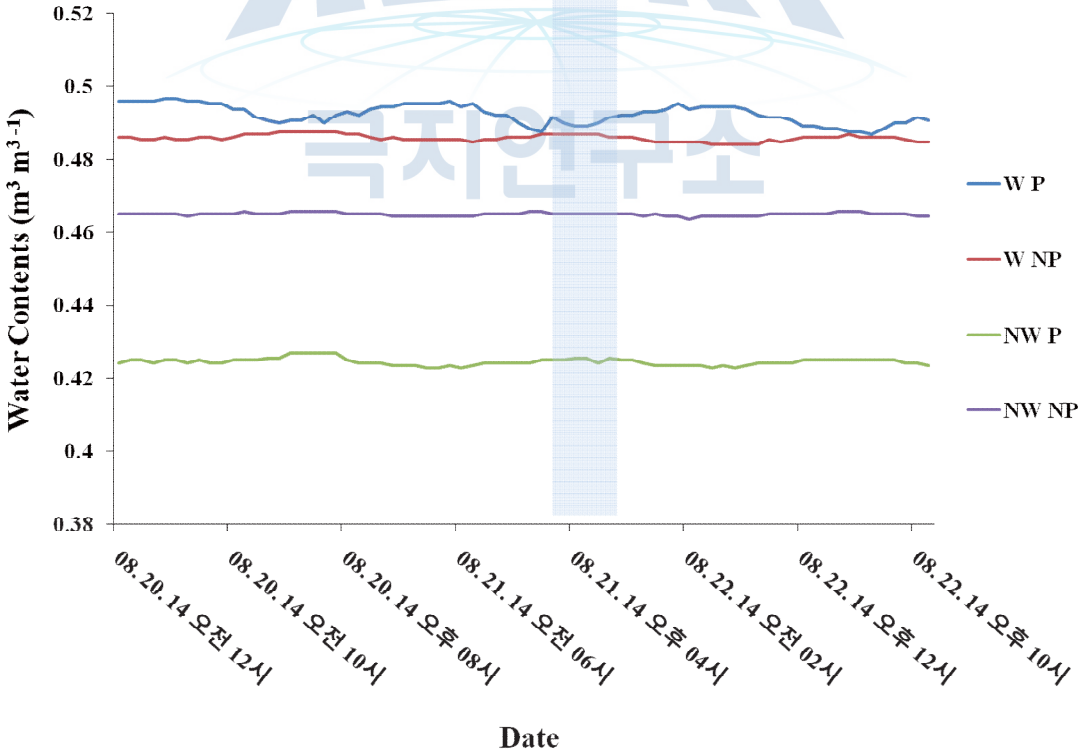


Fig. 71. Change in soil water content at 5 cm depth before and after precipitation (light blue bar).

다. 기후변화 전 토양 및 미생물 특성 (2012년)

(1) 기후변화 모사 처리 전(T_0, 2012년) 토양 특성

2012년 샘플링용과 모니터링용 실험구의 토양 탄소, 질소 분석 결과, 전반적으로 샘플링용 실험구에서 탄소, 질소 함량이 높게 나타났다(Table 15). 두 종류의 방형구들을 동일 집구 내로 설정을 하였음에도 이러한 초기값의 차이를 보여준 것은, 추후 동일 집구 내 모니터링용과 샘플링용 방형구들의 값이 서로 같다고 가정하기 어려움을 보여준다. 또한 온도 상승 및 강수 증가 처리구들 사이 탄소와 질소 값에 차이가 있는지 비교한 결과, 대부분의 방형구에서는 차이가 나지 않았으나, 모니터링용의 0-5 cm 깊이에서 TN, TC, TIC, SOC가 강수 처리구 사이 유의한 차이를 보였으며, 5-10 cm 깊이에서는 온도 상승 처리구 간 유의한 차이를 나타내었다(Table 16). 샘플링용 처리구에서는 TIC와 C/N ratio 값에서 집구들 사이 유의한 차이를 보였다. 즉 2012년 시료는 온도 상승 또는 강수 처리 이전 T_0값에 대한 분석임에도, 일부 시료에서 처리구간 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 이는 실험 사이트의 토양은 지점마다 이질적인 특성이 있음을 대변한다. 또한 탄소와 질소 함량과 같은 변수들은 실내 실험을 통해 측정하기 전에는 파악하기 어렵기 때문에 이와 같은 기대하지 않은 결과를 나타낼 수도 있다. 결론적으로 토양 특성 변이가 많은 이 지역에서 기후 변화 모사에 따른 생태계의 변화를 설명하기 위해서는 대조구와 처리구 간 비교보다는 한 지점의 시간에 따른 변화(T_0값과 몇 년이 지난 후 측정된 자료)가 처리 효과에 대해 정확한 판단을 내릴 수 있다고 생각된다.

KOPRI 극지연구소

Table 15. Carbon and nitrogen contents and C/N ratios of soil from destructive sampling and monitoring plots in 2012

Plot type	Depth	Parameter	Treatment			
			NWNP	NWP	WNP	WP
Destructive						
	0~5 cm	TC (%)	25.40(1.91)	26.34(1.17)	26.39(2.05)	27.95(1.79)
		TIC (%)	1.87(0.31)	2.06(0.36)	1.58(0.26)	1.42(0.22)
		SOC (%)	23.53(2.22)	24.28(1.5)	24.80(2.27)	26.53(1.98)
		TN (%)	2.10(0.23)	2.27(0.15)	2.22(0.21)	2.44(0.18)
		C/N ratio	11.35(0.25)	10.69(0.14)	11.55(0.5)	10.88(0.15)
	5~10 cm	TC (%)	16.09(2.28)	18.36(2.65)	19.25(1.77)	20.89(1.59)
		TIC (%)	3.45(0.16)	2.78(0.34)	2.92(0.36)	2.46(0.33)
		SOC (%)	12.64(2.43)	15.59(2.92)	16.33(1.96)	18.43(1.81)
		TN (%)	1.15(0.25)	1.44(0.3)	1.53(0.21)	1.72(0.17)
		C/N ratio	11.72(0.52)	11.59(0.67)	11.99(0.58)	11.09(0.3)
Monitoring						
	0~5 cm	TC (%)	25.02(1.49)	18.98(2.65)	23.37(2.21)	21.31(1.97)
		TIC (%)	1.48(0.48)	2.33(0.08)	1.63(0.23)	1.91(0.27)
		SOC (%)	23.54(1.91)	16.65(2.71)	21.74(2.27)	19.41(2.19)
		TN (%)	2.15(0.17)	1.48(0.29)	1.91(0.27)	1.68(0.21)
		C/N ratio	11.17(0.34)	14.18(2.75)	13.24(1.47)	13.06(0.89)
	5~10 cm	TC (%)	22.12(1.86)	21.4(2.32)	23.46(2.8)	23.07(2.16)
		TIC (%)	3.03(0.17)	2.75(0.41)	2.2(0.44)	2.42(0.37)
		SOC (%)	19.09(1.83)	18.66(2.7)	21.27(3.1)	20.65(2.48)
		TN (%)	1.81(0.18)	1.72(0.25)	2.01(0.31)	1.97(0.27)
		C/N ratio	11.2(0.36)	11.81(0.65)	11.02(1.17)	11.56(0.67)

Data: mean (SE); TC: total carbon; TIC: total inorganic carbon; SOC: soil organic carbon; TN: total nitrogen

KOPRI 극지연구소

Table 16. A result of two way ANOVA to examine warming and precipitation effects on soil carbon and nitrogen content in 2012

		Destructive plot								Monitoring plot							
		0~5 cm				5~10 cm				0~5 cm				5~10 cm			
	Source	DF	SS	F	prob	DF	SS	F	prob	DF	SS	F	prob	DF	SS	F	prob
TC	B	4	122.05	2.90	0.07	4	119.09	1.50	0.26	4	145.47	2.03	0.15	4	154.29	1.70	0.21
	W	1	8.46	0.80	0.39	1	40.36	2.03	0.18	1	0.56	0.03	0.86	1	11.31	0.50	0.49
	P	1	7.82	0.74	0.41	1	19.12	0.96	0.35	1	81.88	4.57	0.05	1	1.54	0.07	0.80
	W*P	1	0.48	0.05	0.83	1	0.50	0.02	0.88	1	19.86	1.11	0.31	1	0.13	0.01	0.94
TIC	B	4	3.56	3.21	0.05	4	0.97	0.44	0.78	4	3.09	2.24	0.13	4	7.65	7.69	0.00
	W	1	1.07	3.87	0.07	1	0.92	1.66	0.22	1	0.10	0.28	0.61	1	1.71	6.86	0.02
	P	1	0.00	0.00	0.97	1	1.61	2.91	0.11	1	1.60	4.64	0.05	1	0.01	0.02	0.89
	W*P	1	0.15	0.55	0.47	1	0.06	0.11	0.75	1	0.41	1.19	0.30	1	0.32	1.30	0.28
SOC	B	4	164.52	3.08	0.06	4	130.56	1.30	0.32	4	164.99	1.94	0.17	4	218.43	2.11	0.14
	W	1	15.56	1.17	0.30	1	53.46	2.14	0.17	1	1.12	0.05	0.82	1	21.80	0.84	0.38
	P	1	7.69	0.58	0.46	1	31.85	1.27	0.28	1	106.39	5.02	0.04	1	1.37	0.05	0.82
	W*P	1	1.17	0.09	0.77	1	0.90	0.04	0.85	1	25.99	1.23	0.29	1	0.04	0.00	0.97
TN	B	4	1.46	2.80	0.07	4	1.36	1.27	0.33	4	2.01	2.36	0.11	4	2.38	2.43	0.11
	W	1	0.10	0.81	0.39	1	0.56	2.11	0.17	1	0.00	0.00	0.95	1	0.25	1.04	0.33
	P	1	0.19	1.48	0.25	1	0.30	1.11	0.31	1	1.02	4.79	0.05	1	0.02	0.10	0.76
	W*P	1	0.00	0.02	0.89	1	0.01	0.04	0.84	1	0.25	1.16	0.30	1	0.00	0.01	0.93
C/N ratio	B	4	1.17	0.59	0.67	4	15.46	6.08	0.01	4	86.13	2.05	0.15	4	17.57	1.78	0.20
	W	1	0.19	0.38	0.55	1	0.07	0.11	0.75	1	1.13	0.11	0.75	1	0.23	0.09	0.77
	P	1	2.20	4.48	0.06	1	1.34	2.10	0.17	1	9.99	0.95	0.35	1	1.66	0.67	0.43
	W*P	1	0.00	0.00	0.98	1	0.74	1.16	0.30	1	12.76	1.22	0.29	1	0.01	0.00	0.96

DF: degree of freedom; SS: sum of square: F: F ratio; prob: probability >F; TC: total carbon; TIC: total inorganic carbon; SOC: soil organic carbon; TN: total nitrogen; B: block; W: warming; P: precipitation

2012년 샘플링용과 모니터링용 실험구에서 토양 입자 크기 분포를 측정하였다. 측정은 유기탄소 함량이 17% 이하인 시료를 미네랄 층으로 간주하여, 분석 시료로 선택하였다. 유기물의 농도가 17% 이상인 경우, 유기물 층으로 간주되어 토성분석을 실시하지 않았다. 평균 모래 함량은 65.5%, 미사 25%, 점토 9.5%로 측정되어 모래가 많은 양토(사질 양토)로 분류되었다(Table 17).

2012년 채취한 시료를 대상으로 총인(TP), Na, K, Mg, Ca 원소분석을 실시한 결과, 0-5 cm에서 측정된 값이 5-10 cm 보다 높았다(Table 18, 19). 각 처리구 내 분석값 대한 편차가 매우 크게 나타났다. 2012년 기후변화 모사 실험 전이므로, 기후변화에 대한 효과가 없어야 하나, 이원분산분석을 실시하였을 때, 일부 측정 원소의 경우 처리구간 차이가 나타났다. 그러나, 기후 변화 모사 실험 전 데이터를 확보하였으므로, 추후 이 값이 기후변화 모사에 대한 영향인지를 판단할 수 있는 근거 자료로 이용될 수 있으리라 생각된다.

원소분석 결과를 이용한 주성분 분석을 실시한 결과, 1축과 2축이 전체 70%의 변이를 설명하였다. 토양 유기탄소와 무기태 탄소 관련 인자가 1축을 주로 설명하고 있었다. TC, SOC, TN의 상관관계가 높았고, Ca와 Mg의 경우 TIC와 상관관계가 높게 나타났다. 또한, 각 처리구간 loading plot을 보았을 때, 각 플랏이 그룹으로 묶이지 않고, 임의적으로 분포하고 있는 것으로 보아, 기후변화 모사 전 처리구간 토양 환경에 일정한 패턴이 나타나지 않음을 보여주고 있다(Fig. 72).

KOPRI 극지연구소

Table 17. Particle size distribution from 2012 soil in climate manipulation plots

Name	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Name	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
D B1 NWNP C1D2	57.3	31.5	11.2	D B4 W NP C2 D2	64.5	26.1	9.4
D B1 NW P C2 D2	66.0	23.2	10.8	D B4 W NP C3 D2	63.8	28.1	8.1
D B1 NW P C3 D1	71.4	13.0	15.6	D B5 NWNP C1 D2	65.0	24.7	10.3
D B1 NW P C3 D2	60.4	29.2	10.4	D B5 NWNP C2 D1	61.2	29.2	9.6
D B1 W NP C2 D1	68.6	22.4	9.0	D B5 NWNP C2 D2	67.5	24.8	7.7
D B1 W NP C2 D2	68.9	20.9	10.1	D B5 NWNP C3 D2	76.0	12.1	12.0
D B1 W P C1 D2	65.7	24.3	10.0	D B5 NW P C1 D2	51.5	36.7	11.8
D B1 W P C2 D1	52.5	34.6	13.0	D B5 NW P C2 D2	58.9	27.7	13.4
D B1 W P C2 D2	55.1	33.5	11.4	D B5 W P C3 D2	67.7	24.6	7.7
D B2 NW NP C1 D2	62.9	26.7	10.4	M B1 NWNP C2 D2	78.6	15.2	6.2
D B2 NW NP C2 D2	72.3	20.3	7.3	M B1 NW P C1 D2	78.9	14.0	7.1
D B2 NW NP C3 D2	72.7	19.5	7.7	M B1 W P C1 D2	74.3	17.5	8.3
D B2 NW P C1 D2	72.2	20.4	7.4	M B2 NWNP C1 D2	75.2	18.3	6.5
D B2 W NP C3 D2	67.6	24.0	8.3	M B2 NWNP C2 D2	67.1	24.7	8.1
D B3 NW NP C1 D2	70.1	22.5	7.3	M B2 NW P C1 D2	68.8	28.1	3.1
D B3 NW NP C2 D2	67.1	24.3	8.6	M B2 NW P C3 D2	66.2	25.1	8.7
D B3 NW P C1 D2	67.2	22.6	10.2	M B3 W P C1 D1	44.2	38.5	17.3
D B3 NW P C2 D2	64.3	27.9	7.9	M B3 W P C2 D1	61.5	25.1	13.4
D B3 NW P C3 D2	75.3	17.9	6.8	M B3 W P C2 D2	77.3	20.5	2.1
D B3 W NP C2 D1	66.2	26.0	7.8	M B4 NW P C2 D1	44.3	36.8	18.9
D B3 W NP C2 D2	67.8	24.7	7.5	M B5 NWNP C3 D1	53.2	40.6	6.2
D B3 W P C2 D2	71.0	20.8	8.2	M B5 NW P C1 D1	55.8	27.2	17.0
D B3 W P C3 D2	70.2	20.9	8.9	M B5 NW P C1 D2	61.8	32.3	6.0
D B4 W NP C1 D2	72.8	20.4	6.8	M B5 NW P C3 D1	55.6	30.7	13.7

KOPRI 극지연구소

Table 18. TP, Na, K, Mg, K content analyzed from 2012 samples in monitoring plots

TRT		NW NP		NW P		W NP		W P	
Depth		D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
TP	Mean	940	604	663	680	746	628	849	633
(mg Kg^{-1})	Min	488	306	306	351	359	310	531	284
	Max	1245	1053	1158	1221	1116	1098	1120	1123
Na	Mean	364	340	349	304	374	318	338	295
(mg Kg^{-1})	Min	274	249	218	250	207	202	205	215
	Max	549	503	506	357	621	475	698	426
K	Mean	813	820	833	885	777	712	826	736
(mg Kg^{-1})	Min	704	628	693	597	658	338	650	548
	Max	982	1079	1215	1160	962	859	1231	927
Mg	Mean	22637	35758	27233	34557	19346	35063	21904	33969
(mg Kg^{-1})	Min	7215	11861	7596	8419	7776	6572	6406	7110
	Max	40345	52099	38200	49368	36439	45608	43014	52277
Ca	Mean	57837	73915	61625	71260	54283	71566	57499	74998
(mg Kg^{-1})	Min	37128	41959	40826	45070	35899	34660	36561	47899
	Max	79640	100871	73670	92203	73479	86474	81831	98032

KOPRI 극지연구소

Table 19. TP, Na, K, Mg, K content analyzed from 2012 samples in destructive sampling plots

TRT		NW NP		NW P		W NP		W P	
Depth		D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
TP	Mean	736	547	808	678	975	696	876	637
(mg Kg^{-1})	Min	330	269	220	289	314	228	70	346
	Max	1279	963	1171	1164	1472	1240	1157	1186
Na	Mean	326	288	370	331	337	349	360	315
(mg Kg^{-1})	Min	253	235	268	249	256	243	250	242
	Max	436	339	500	479	508	911	505	500
K	Mean	854	867	835	821	873	835	886	847
(mg Kg^{-1})	Min	639	704	716	590	700	606	697	598
	Max	1013	1164	1006	1448	1298	1242	1179	1266
Mg	Mean	27641	44179	26198	40035	22821	35026	22342	37733
(mg Kg^{-1})	Min	9589	30311	10771	14313	10758	6821	9726	12086
	Max	49784	54360	45148	52235	56071	52784	46279	54407
Ca	Mean	64502	84310	63296	80577	58471	73352	58152	76761
(mg Kg^{-1})	Min	46134	72212	45639	50119	41976	40887	41965	46318
	Max	90937	98390	84495	100090	100092	95629	84743	100227

KOPRI 극지연구소

(a) (b)

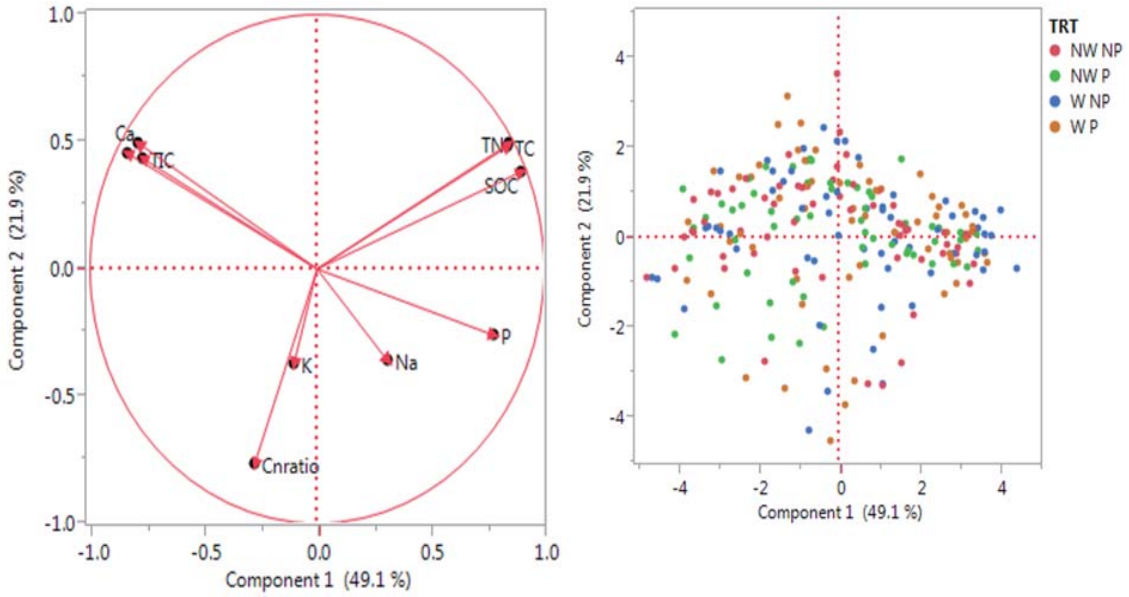


Fig. 72. A result of principle component analysis using elements (a) score plot, (b) loading plot.

KOPRI
극지연구소

(2) 기후변화 모사 처리 전(T_0, 2012년) 토양 세균 군집구조 분석

전체 실험구의 초기 값 확보를 위한 각 사이트별 3반복으로 토양 샘플링을 수행하고, 토양 DNA추출 및 454 pyrosequencing을 위한 barcoded PCR을 수행하였다. 모니터링용 실험구(monitoring plot) 120개와 샘플링용 실험구(destructive plot) 120개, 총 240개의 시료에 대해 샘플 당 0.5g의 토양을 사용하여 FastDNATM SPIN Kit for Soil DNA Extraction (MP Biomedicals)방법으로 추출하였다. DNA를 추출한 후 각 사이트별 3반복으로 추출된 토양 DNA는 하나로 합쳐 composite DNA sample을 만들었다. 세균 특이적인 16S rRNA V1-V3 region (27F/518R)을 타겟으로 barcoded PCR를 수행한 후 454 pyrosequencing 분석을 수행하였다. 얻어진 raw data에 대한 생물정보학적 분석은 기본적으로 454 SOP (mothur)에 따라서 수행하였으며, 세균 종 수준의 분류 단위인 operational taxonomic unit (OTU)는 97% 16S rRNA gene 유사도를 적용하여 sequence clustering을 수행하였다.

기후변화 모사 실험을 수행한 캐나다 캠브리지 베이 토양의 세균 군집은 Proteobacteria (40.46%), Actinobacteria (17.80%), Acidobacteria (16.72%), Planctomycetes (5.07%)가 전체적으로 우점하는 양상을 보였다(Fig. 73). 그 외에도 Chloroflexi, Bacteroidetes, Verrucomicrobia, Firmicutes, Chlorobi, Elusimicrobia, Cyanobacteria, Armatimonadetes, Fibrobacteres와 Candidate phylum인 WS3, OD1, TM6, TM7, OP3, GN02가 조사되었다. Proteobacteria에서는 Alphaproteobacteria 강(Class)의 우점도가 가장 높게 나타났다.

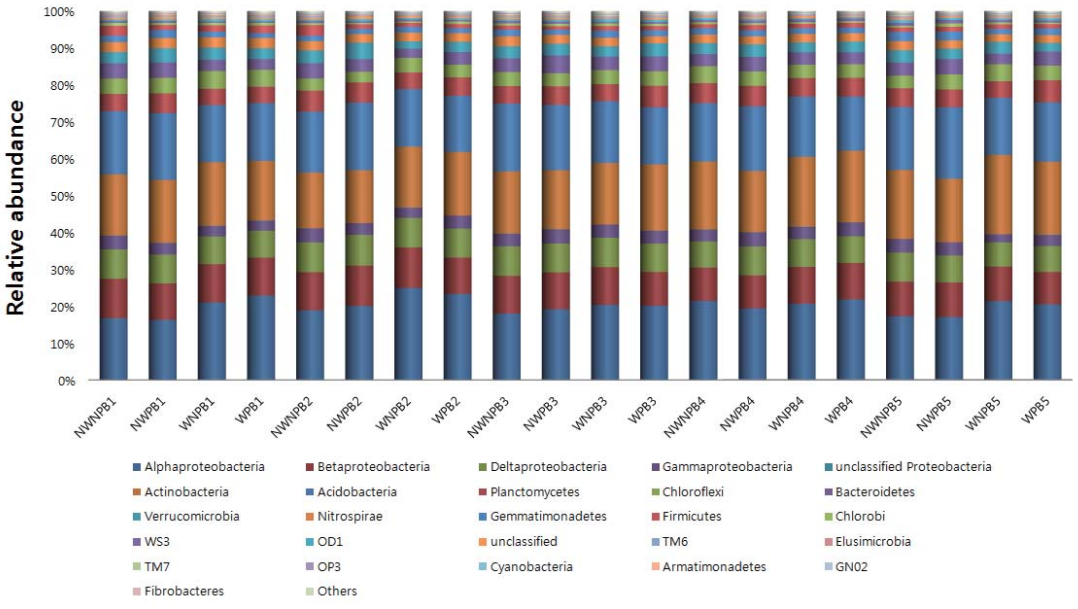


Fig. 73. Comparison of bacterial phylum composition between different treatment and block samples.

기후변화 모사실험을 수행하기 전 각 사이트 간 세균 군집구조가 얼마나 다른지 알아보기 위하여 각 처리구 설치 예정 사이트 간, replicate으로 사용될 5개 집구(block) 간 세균 군집구조를 비교해보았다. 전체적으로 monitoring plot과 destructive plot 모두 세균 군집구조가 랜덤으로 분포하는 경향을 보였다(Fig. 74). 다만, monitoring plot에서 block1 집구의 세균 군집이 다른 block들에 비해 통계적으로 유의한 차이를 보였다 (PERMANOVA, $P<0.01$). 이를 통해 식물 군집, 미세 지형이 최대한 유사한 지역을 택해 기후변화 모사 실험구 설치 지역을 선정하였음에도, 세균 군집구조가 기후변화 모사 전에도 차이가 있는 지점이 있음을 보여주고 있다. 따라서 향후 monitoring plot에서의 처리구 간 세균 군집구조 변화분석 시 이 차이를 감안해서 해석해야 할 것이다.

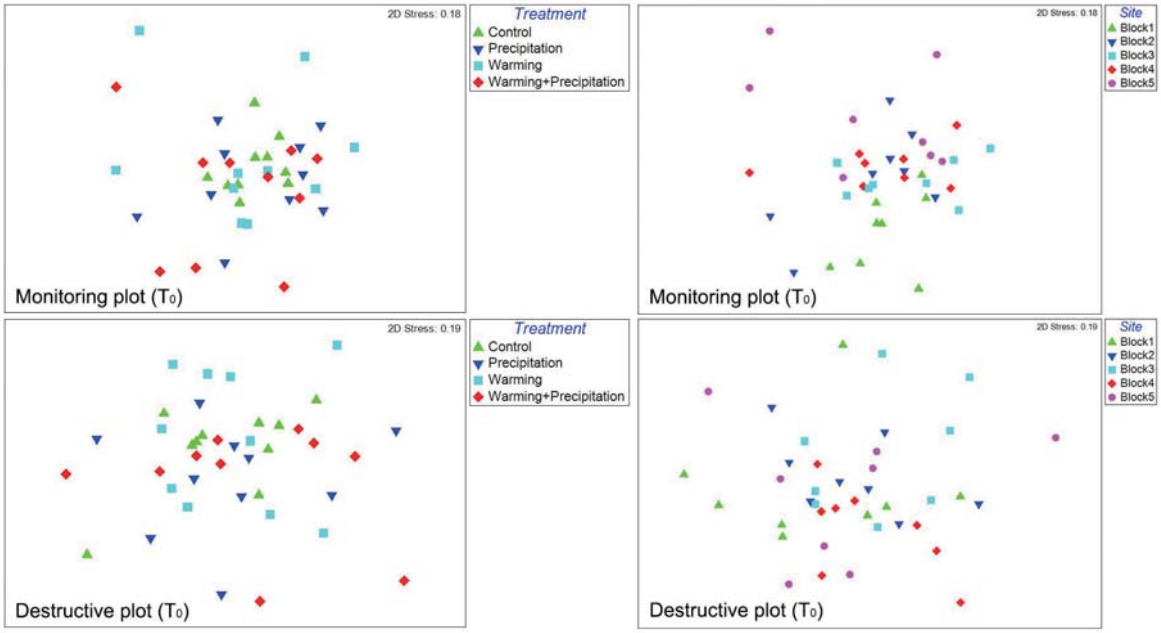


Fig. 74. Comparison of bacterial community structure between different treatments and blocks prior to climate manipulation experiment (T_0, 2012).

라. 기후변화 모사 처리 1년차(T_1, 2013년) 토양 및 미생물 특성

(1) 기후변화 모사 1년 후 (2013년) 토양 특성

2013년에는 온도 상승과 강수 증가 처리 후 1년이 지난 뒤 측정한 시료에서 토양 유기탄소와 총질소 함량을 측정하였다. 분산분석 결과 토양 유기탄소 및 총질소 함량은 0~5, 5~10 cm 깊이 모두 처리구간 유의한 차이가 나타나지 않았다(Table 20). 처리구 내에서의 표준편차가 매우 커서, 온도 상승과 강수 효과에 의한 탄소 및 질소의 미세한 변화를 감지하기 어려운 것으로 생각된다. 단, 0~5 cm에서 탄소와 질소 농도는 5~10 cm보다 유의하게 높게 나타났다(Table 21).

Table 20. A two-way ANOVA examing the effects of warming and precipitation on soil organic carbon, total nitrogen, and C/N ratio from destructive sampling plots in 2013

		0~5 cm				5~10 cm			
	Source	DF	SS	F	prob	DF	SS	F	prob
SOC	B	4	569.36	2.46	0.10	4	419.56	0.96	0.46
	W	1	65.49	1.13	0.31	1	38.61	0.35	0.56
	P	1	16.51	0.28	0.60	1	1.82	0.02	0.90
	W*P	1	18.30	0.32	0.58	1	2.28	0.02	0.89
TN	B	4	3.21	1.74	0.21	4	3.47	0.97	0.46
	W	1	0.50	1.07	0.32	1	0.36	0.41	0.53
	P	1	0.04	0.09	0.77	1	0.02	0.02	0.90
	W*P	1	0.04	0.08	0.78	1	0.02	0.03	0.87
C/N ratio	B	4	0.86	0.28	0.89	4	2.40	3.99	0.03
	W	1	0.00	0.00	1.00	1	0.00	0.02	0.89
	P	1	0.35	0.45	0.51	1	0.05	0.30	0.59
	W*P	1	0.52	0.67	0.43	1	0.14	0.93	0.35

DF: degree of freedom; SS: sum of square: F: F ratio; prob: probability >F; SOC: soil organic carbon; TN: total nitrogen; B: block; W: warming; P: precipitation

KOPRI 극지연구소

Table 21. Soil organic carbon and total nitrogen content and C/N ratio from destructive sampling plots in 2013

Depth	Parameter	Treatment			
		NWNP	NWP	WNP	WP
0~5 cm	SOC (%)	26.47	30.20	32.01	31.91 ns
		(6.85)	(9.24)	(10.78)	(8.24)
	TN (%)	2.19	2.37	2.59	2.60 ns
		(0.60)	(0.65)	(0.92)	(0.75)
	C/N ratio	12.13	12.72	12.45	12.39 ns
		(0.38)	(1.01)	(1.00)	(0.61)
5~10 cm	SOC (%)	13.93	15.21	17.38	17.31 ns
		(11.70)	(4.18)	(13.54)	(9.70)
	TN (%)	1.18	1.31	1.52	1.51 ns
		(1.00)	(0.35)	(1.26)	(0.91)
	C/N ratio	11.88	11.62	11.69	11.76 ns
		(0.42)	(0.38)	(0.51)	(0.69)

Data: mean (SD); SOC: soil organic carbon; TN: total nitrogen

2013년에는 온도 상승과 강수 증가 처리 후 1년이 지난 뒤 측정한 시료에서 토양 수분 함량과 무기태 질소 함량을 측정하였다. 분산분석 결과 토양 수분함량은 0~5, 5~10 cm 깊이 모두 처리구간 유의한 상관관계가 나타나지 않았다. 반면 무기태 질소 중 NH_4^+ 이온 함량은, 5~10 cm 깊이에서 온도 상승에 의해 증가하는 결과를 나타내었다. NO_3^- 이온 또한 온도 상승에 의해 NH_4^+ 이온의 농도가 증가하였으나, 값은 통계적으로 유의하지 않았다.

KOPRI 극지연구소

Table 22. Effects of warming on inorganic nitrogen contents from destructive sampling plots in 2013

	Depth	NW		W	
		Mean	SE	Mean	SE
NH_4^+ (μg g^{-1})	0~5 cm	7.25	(0.72)	7.08	(0.67) ^{ns}
	5~10 cm	3.18	(0.35)	4.25	(0.5)*
NO_3^- (μg g^{-1})	0~5 cm	1.16	(0.16)	1.32	(0.16) ^{ns}
	5~10 cm	0.54	(0.07)	0.76	(0.07) ^{ns}

SE: standard error; '*' denotes statistically significant differences between NW and W treatments ($p < 0.05$); ns: not significant

Table 23. Effects of precipitation on inorganic nitrogen contents from destructive sampling plots in 2013

	Depth	NP		P	
		Mean	SE	Mean	SE
NH_4^+ (μg g^{-1})	0~5 cm	7.10	(0.56)	7.23	(0.81) ^{ns}
	5~10 cm	3.51	(0.42)	3.92	(0.5) ^{ns}
NO_3^- (μg g^{-1})	0~5 cm	1.20	(0.18)	1.28	(0.14) ^{ns}
	5~10 cm	0.59	(0.09)	0.71	(0.06) ^{ns}

SE: standard error; ns: not significant

Table 24. Effects of warming on moisture contents from destructive sampling plots in 2013

	Depth	NW		W	
		Mean	SD	Mean	SD
MC	0~5 cm	147.9	(49.2)	155.6	(59.5) ^{ns}
	5~10 cm	79.8	(32.5)	100.1	(54.1) ^{ns}

SD: standard deviation; ns: not significant

Table 25. Effects of precipitation on moisture contents from destructive sampling plots in 2013

	Depth	NP		P	
		Mean	SD	Mean	SD
MC	0~5 cm	153.9	(55.2)	149.6	(54.2) ^{ns}
	5~10 cm	89.1	(55.8)	90.8	(33.0) ^{ns}

SD: standard deviation; ns: not significant

KOPRI 극지연구소

(2) 기후변화 모사 처리 1년차(T_1, 2013년) 토양 세균 생물량 변화 및 군집구조 분석

2013년 캐나다 캠브리지의 기후 모사 실험 1년 후(T_1) 토양 미생물 군집구조 변화 분석을 위하여 destructive plot을 대상으로 5개 집구(block)내의 샘플링용 실험구의 4개의 각 처리구에서 토양을 채취하였다. 각 시료는 2개의 깊이(0～5cm, 5～10cm)에서 3개 코어로부터 토양을 채취하였으며 총 120개의 샘플을 얻었다.

토양 시료 중 0.5g을 채취하여 FastDNATM SPIN Kit for Soil DNA Extraction (MP Biomedicals)방법을 이용하여 토양 미생물의 gDNA를 추출하였으며 이후 3개 코어를 pooling하여 총 40개 샘플에 대해 PCR과 파이로시퀀싱을 수행한 결과 총 198,630 reads, 샘플 당 평균 4,966개의 16S rRNA gene 염기서열이 확보되었다(Table 26). 이 염기서열들을 Ez-Taxon DB를 이용하여 계통분석한 결과 총 51개의 세균 문(phylum)으로 분류되었으며 이 중 Proteobacteria, Acidobacteria, Actinobacteria가 전체의 70%이상을 차지하며 대부분의 시료에서 우점하는 양상을 보였고 그 외에도 Planctomycetes, Bacteroidetes, Verrucomicrobia, Chloroflexi, Nitrospirae 및 Gemmatimonadetes이 모든 토양 샘플에서 우점하는 세균 문으로 나타났다(Fig. 75). 모든 샘플에서 각 세균 문의 상대적인 비율이 일정하게 유지되는 경향을 보였으며 생물다양성 지수 분석결과에서도 유의한 차이를 나타내지 않았다. 이러한 결과들은 1년 동안 진행된 기후변화 모사 실험에 의해 토양 세균 다양성 및 문 수준의 변화가 야기되지 않았음을 의미한다.

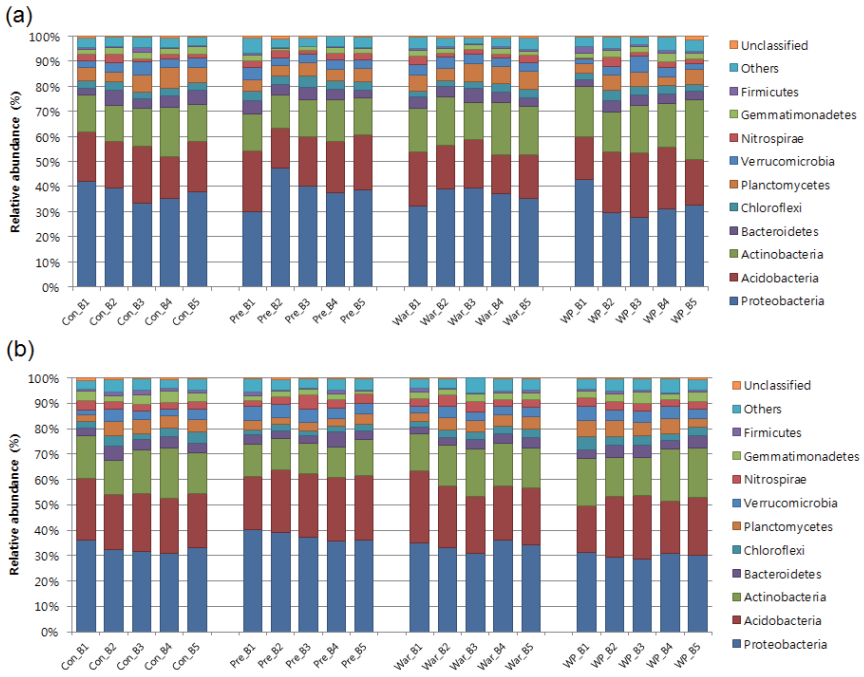


Fig. 75. Bacterial phylum distribution at (a) top (0～5cm depth) and (b) bottom (5～10cm depth).

Table 26. Sample information and bacterial diversity summary on first year climate manipulation site

Sample	Treatment	Block	Depth	454 reads	# of OTUs*	Shannon*	Inverse Simpson*	Chao*	ACE*
D1	NW NP	Block1	Upper (0~5cm)	5838	468	5.7	146.8	1034.5	1573.1
D2	NW NP	Block1	Lower (5~10cm)	4456	434	5.6	131.1	942.6	914
D7	NW NP	Block2	Upper (0~5cm)	3961	449	5.66	145.4	921.8	1408.5
D8	NW NP	Block2	Lower (5~10cm)	4880	478	5.78	202	1112	1655.8
D13	NW NP	Block3	Upper (0~5cm)	8212	501	5.79	151.4	1101.3	1705.6
D14	NW NP	Block3	Lower (5~10cm)	6601	499	5.76	149.7	1144.5	2138.4
D19	NW NP	Block4	Upper (0~5cm)	7629	525	5.88	199.1	1386.1	2176.4
D20	NW NP	Block4	Lower (5~10cm)	6371	458	5.75	212	1002.7	1358.6
D25	NW NP	Block5	Upper (0~5cm)	5014	487	5.84	227.4	1033.9	1459.2
D26	NW NP	Block5	Lower (5~10cm)	3181	411	5.58	170.5	893.7	1179.6
D31	NW P	Block1	Upper (0~5cm)	2792	431	5.7	233.7	927.4	1265.5
D32	NW P	Block1	Lower (5~10cm)	3042	371	5.3	72	749.9	1035.3
D37	NW P	Block2	Upper (0~5cm)	2954	433	5.58	131.7	968.1	1502.7
D38	NW P	Block2	Lower (5~10cm)	2963	353	5.3	104.1	751.2	920.5
D43	NW P	Block3	Upper (0~5cm)	2374	395	5.57	178.5	765.6	741.7
D44	NW P	Block3	Lower (5~10cm)	3397	407	5.51	127.4	787.1	1109.4
D49	NW P	Block4	Upper (0~5cm)	5773	486	5.79	186.4	1073.9	1694.1
D50	NW P	Block4	Lower (5~10cm)	5587	446	5.57	106.1	966.9	1017.5
D55	NW P	Block5	Upper (0~5cm)	3765	415	5.48	117.9	945	1256.6
D56	NW P	Block5	Lower (5~10cm)	5059	409	5.43	98.5	908.3	1412.4
D61	W NP	Block1	Upper (0~5cm)	5953	425	5.61	156.4	838.2	855.1
D62	W NP	Block1	Lower (5~10cm)	8440	381	5.34	84.3	683.2	949.2
D67	W NP	Block2	Upper (0~5cm)	8336	450	5.66	162.6	867.2	1351.7
D68	W NP	Block2	Lower (5~10cm)	8490	420	5.5	108	817.6	1345.7
D73	W NP	Block3	Upper (0~5cm)	4390	383	5.39	92.1	676	709.7
D74	W NP	Block3	Lower (5~10cm)	3711	358	5.44	159.8	663.1	819.3
D79	W NP	Block4	Upper (0~5cm)	3845	569	5.94	189	2517.8	4075.7
D80	W NP	Block4	Lower (5~10cm)	4201	539	5.85	185.1	1853.2	3796.1
D85	W NP	Block5	Upper (0~5cm)	6173	565	5.98	245.3	1972.4	3436.6
D86	W NP	Block5	Lower (5~10cm)	6401	557	5.93	228.9	1945.2	4183.3
D91	W P	Block1	Upper (0~5cm)	1637	290	5.17	127	528.5	658.1
D92	W P	Block1	Lower (5~10cm)	1766	300	5.27	143.6	499.1	583.7
D97	W P	Block2	Upper (0~5cm)	4895	405	5.62	196.1	777.9	754.8
D98	W P	Block2	Lower (5~10cm)	6069	439	5.67	162	861.8	901.2
D103	W P	Block3	Upper (0~5cm)	3089	375	5.51	172.6	642.1	887.7
D104	W P	Block3	Lower (5~10cm)	5779	466	5.81	244.5	892	896.8
D109	W P	Block4	Upper (0~5cm)	8997	427	5.6	147.5	899.7	1216.3
D110	W P	Block4	Lower (5~10cm)	8202	454	5.71	198.4	949.4	1018.1
D115	W P	Block5	Upper (0~5cm)	1396	308	5.31	163.3	528.7	641.2
D116	W P	Block5	Lower (5~10cm)	3011	376	5.58	225.9	721.1	664.7

그러나 이들 군집을 세균 종 레벨 분류단위인 OTU 수준에서는 처리구 간 세균 군집 구성에 통계적으로 유의한 차이를 보였다(PERMANOVA, P=0.0004)(Fig. 76 and Table 27a). 이후 어떤 처리구 간에 유의한 차이가 나타나는지 알아보기 위해 사후검정(pairwise t-test)을 실시한 결과 1% 유의수준(α =0.01)에서 대조구와 강수량(precipitation) 증가 처리구 간에 유의한 차이를 보였다(P=0.0028)(Table 27b). 이는 기후변화 모사 실험이 1년간 진행된 시점에서 토양 세균군집이 온도증가(warming)보다 강수량(precipitation) 증가에 더 빠르고 민감하게 반응하였다는 것을 나타낸다.

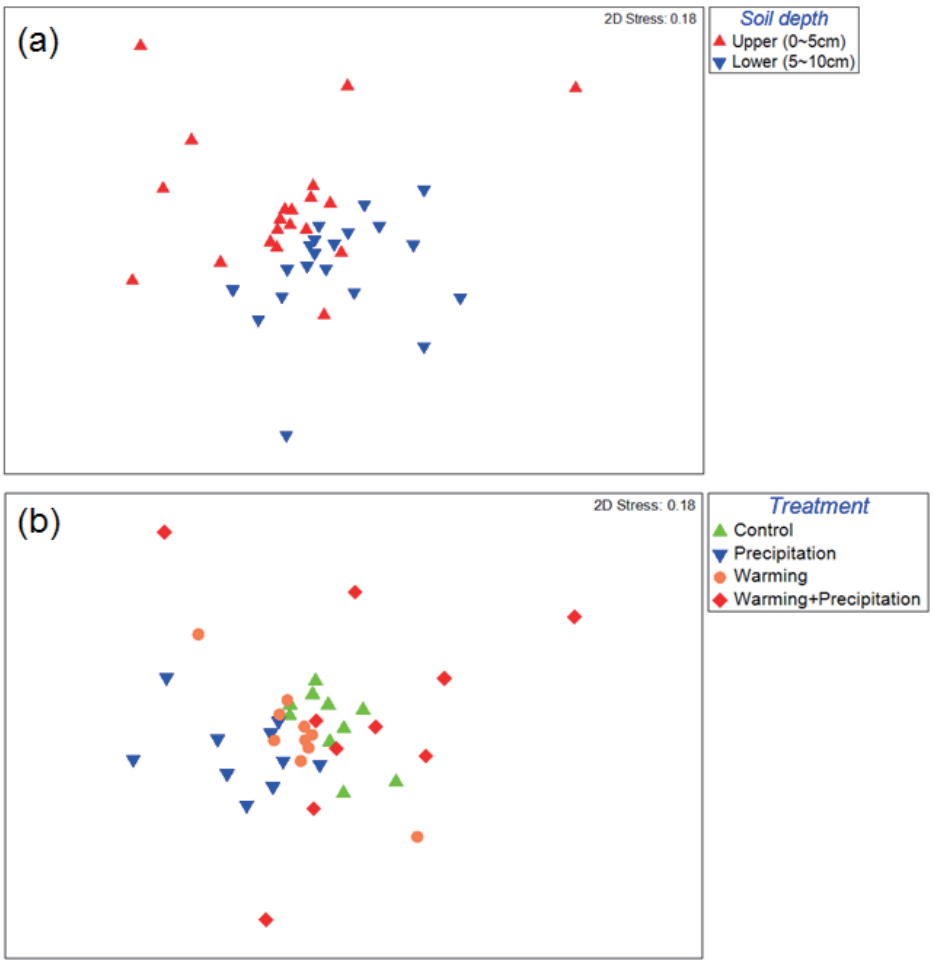


Fig. 76. Comparison of bacterial community structure between different (a) soil depth and (b) treatments.

Table 27. PERMANOVA result to compare bacterial community similarity between different soil depth, blocks and treatments (a) PERMANOVA table, (b) *post hoc* pairwise t-test result

(a)

Source	df	SS	MS	Pseudo-F	P (perm)	P (Monte Carlo)
Block	4	10481	2620.3	1.1286	0.0015	0.1837
Treatment	3	9756.5	3252.2	1.3087	**0.0001**	**0.0391**
Depth	1	3486.3	3486.3	1.5525	**0.0004**	**0.038**
Block x Treatment	12	29820	2485	1.0704	0.005	0.245
Block x Depth	4	8982.5	2245.6	0.96726	0.8118	0.5863
Treatment x Depth	3	6984.4	2328.1	1.0028	0.445	0.4783
Residual	12	27860	2321.7			
Total	39	97371				

(b)

Groups	t	P (perm)	Unique perms	P (Monte Carlo)
Control vs. Precipitation	1.1969	**0.0028**	7175	0.1394
Control vs. Warming	1.0853	0.0484	7093	0.3107
Control vs. Warming+Precipitation	1.1043	0.0066	7106	0.2674
Precipitation vs. Warming	1.1402	0.0162	7150	0.2152
Precipitation vs. Warming+Precipitation	1.1634	0.0123	7183	0.1805
Warming vs. Warming+Precipitation	1.166	0.0284	7189	0.1833

이후 대조구와 강수량 증가 처리구 간의 군집 구조차이가 어떠한 OTU의 차이에 의해 야기된 것인지 알아보기 위하여 Indicator species 분석을 진행하였다. 그 결과, 각 처리구에서 특징적으로 나타난 OTU들과 indicator value를 확인하였으며 강수량 증가(precipitation) 처리구에서 특징적으로 나타난 OTU들의 indicator value는 0.5이상이었다(Table 28). 이는 다른 처리구와 비교하였을 때, 각 집구의 강수량 증가 처리구 5개 중 과반수의 처리구에서 이 OTU가 특징적으로 발견되었음을 의미하는 것이다. 강수량 증가에 반응하여 상대수도가 증가한 indicator species는 Proteobacteria와 Acidobacteria에 속하는 unknown species들로서 이러한 특징적인 OTU들에 상응하는 종들의 생리적 특징을 연구한다면 강수량 증가에 의해 세균 군집의 기능적 변화를 간접적으로 유추할 수 있을 것이다.

Table 28. Top 5 OTU Indicator Values (Ind Val.) per treatment

Treatment	OTU	Ind Val.	Taxonomy : Phylum, Class, Order, Family, Genus, Species
Control	Otu000127	0.438	Proteobacteria, Betaproteobacteria, Burkholderiales, Sphaerotilus, unclassified, unclassified
	Otu000068	0.435	Proteobacteria, Betaproteobacteria, Burkholderiales, Oxalobacteraceae, Massilia, Massilia_namucuonensis
	Otu000198	0.426	Proteobacteria, Gammaproteobacteria, Steroidobacter, DQ984612, DQ984612, DQ984612
	Otu000818	0.417	Gemmatimonadetes, Gemmatimonadetes, Gemmatimonadales, Gemmatimonadaceae, EU421850, FJ444672
	Otu000039	0.388	Actinobacteria, Thermoleophilia, Solirubrobacterales, EU289467, EU289467, unclassified
Precipitation	Otu000031	0.530	Proteobacteria, Alphaproteobacteria, Rhizobiales, Hyphomicrobiaceae, Hyphomicrobium, unclassified
	Otu000050	0.504	Acidobacteria, Chloracidobacterium, Blastocatella, AY281358, AY281358, DQ297964
	Otu000072	0.492	Acidobacteria, Chloracidobacterium, EU335275, EU335275, FJ479597, unclassified
	Otu000046	0.467	Proteobacteria, Alphaproteobacteria, Rhodospirillales, Rhodospirillaceae, Defluviicoccus, unclassified
	Otu000025	0.419	Proteobacteria, Deltaproteobacteria, Myxococcales, Haliangiaceae, unclassified, unclassified
Warming	Otu000243	0.486	Acidobacteria, Chloracidobacterium, Blastocatella, AY281358, HM241101, HM062299
	Otu000114	0.448	Acidobacteria, Chloracidobacterium, Blastocatella, AY281358, AY281358, unclassified
	Otu000008	0.413	Actinobacteria, FJ478799, FJ478799, FJ478799, FJ478799, FJ478799
	Otu000291	0.40	Bacteroidetes, Cytophagia, Cytophagales, Cytophagaceae, Chryseolinea, unclassified
	Otu000092	0.363	Actinobacteria, Rubrobacteria, Gaiellales, Gaiellaceae, Gaiella, unclassified
Warming + Precipitation	Otu000106	0.437	Firmicutes, Bacilli, Bacillales, Bacillaceae, Aeribacillus, Aeribacillus_pallidus
	Otu000063	0.402	Actinobacteria, FJ478799, FJ478799, FJ478799, FJ478799, JF815508
	Otu000084	0.397	Proteobacteria, Gammaproteobacteria, Oceanospirillales, Halomonadaceae, Halomonas, unclassified
	Otu000267	0.360	Proteobacteria, Betaproteobacteria, AB308366, HQ014645, HQ014645, EF019835
	Otu000130	0.350	Acidobacteria, EU686603, EU686603, EU686603, Z95727, unclassified

또한, 기후 변화 모사 실험에 따른 토양 내 세균 생물량(biomass)의 변화를 관찰하고자 qPCR을 수행한 후 토양 깊이와 각 처리구 별 세균 생물량 변화를 분석한 결과 토양깊이에 따른 유의적인 차이는 없었으나 처리구 간에 유의한 차이가 있음을 확인할 수 있었다(Fig. 77) (토양 깊이, ANOVA, $P>0.05$; 처리구 간, ANOVA, $P<0.05$). 이후 어떤 처리구 간에 유의한 차이가 나는지 알아보기 위하여 사후검정(Tukey HSD)을 실시한 결과 5% 유의수준에서 대조구와 강수량(precipitation) 증가 처리구 간에 매우 유의한 차이를 보였다($P=0.00092$). 이는 토양 내 세균 생물량이 온도변화(warming) 보다 강수량 증가(precipitation)에 더 민감하게 반응하였다는 것을 의미한다.

종합해보면, 기후 변화 모사 실험 1년 후의 토양 내 세균 군집 구조 및 생물량이 온도상승보다 강수량 증가에 더 빠르고 민감하게 반응한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 기후 변화 모사 실험을 진행 한 지 1년 밖에 지나지 않았기 때문에 이러한 강수량 증가의 효과가 지속될지 여부와 그 영향이 직, 간접적인 것인지 여부는 향후 기후 변화 모사 실험을 장기간 진행하면서 세균 군집 구조 및 생물량 변화와 토양 특성 변화를 살펴보아야 할 것이다.

KOPRI
극지연구소

Table 29. 16S rRNA gene copy number per gram of soil

Sample	Treatment	Block	Depth	16S rRNA gene copy numbers(/g soil)
D1	NW NP	Block1	Upper (0~5cm)	1.13×10^9
D2	NW NP	Block1	Lower (5~10cm)	1.72×10^9
D7	NW NP	Block2	Upper (0~5cm)	3.49×10^9
D8	NW NP	Block2	Lower (5~10cm)	3.60×10^9
D13	NW NP	Block3	Upper (0~5cm)	6.76×10^9
D14	NW NP	Block3	Lower (5~10cm)	1.55×10^9
D19	NW NP	Block4	Upper (0~5cm)	2.27×10^9
D20	NW NP	Block4	Lower (5~10cm)	1.00×10^9
D25	NW NP	Block5	Upper (0~5cm)	7.42×10^9
D26	NW NP	Block5	Lower (5~10cm)	5.71×10^9
D31	NW P	Block1	Upper (0~5cm)	8.43×10^9
D32	NW P	Block1	Lower (5~10cm)	7.97×10^9
D37	NW P	Block2	Upper (0~5cm)	8.68×10^9
D38	NW P	Block2	Lower (5~10cm)	5.31×10^9
D43	NW P	Block3	Upper (0~5cm)	5.88×10^9
D44	NW P	Block3	Lower (5~10cm)	4.53×10^9
D49	NW P	Block4	Upper (0~5cm)	7.01×10^9
D50	NW P	Block4	Lower (5~10cm)	5.45×10^9
D55	NW P	Block5	Upper (0~5cm)	7.67×10^9
D56	NW P	Block5	Lower (5~10cm)	4.06×10^9
D61	W NP	Block1	Upper (0~5cm)	4.49×10^9
D62	W NP	Block1	Lower (5~10cm)	3.16×10^9
D67	W NP	Block2	Upper (0~5cm)	4.08×10^9
D68	W NP	Block2	Lower (5~10cm)	3.64×10^9
D73	W NP	Block3	Upper (0~5cm)	3.07×10^9
D74	W NP	Block3	Lower (5~10cm)	4.50×10^9
D79	W NP	Block4	Upper (0~5cm)	4.17×10^9
D80	W NP	Block4	Lower (5~10cm)	4.37×10^9
D85	W NP	Block5	Upper (0~5cm)	1.98×10^9
D86	W NP	Block5	Lower (5~10cm)	2.63×10^9
D91	W P	Block1	Upper (0~5cm)	3.79×10^9
D92	W P	Block1	Lower (5~10cm)	3.20×10^9
D97	W P	Block2	Upper (0~5cm)	1.69×10^9
D98	W P	Block2	Lower (5~10cm)	1.44×10^9
D103	W P	Block3	Upper (0~5cm)	3.80×10^9
D104	W P	Block3	Lower (5~10cm)	3.65×10^9
D109	W P	Block4	Upper (0~5cm)	2.82×10^9
D110	W P	Block4	Lower (5~10cm)	3.81×10^9
D115	W P	Block5	Upper (0~5cm)	1.95×10^9
D116	W P	Block5	Lower (5~10cm)	2.78×10^9

농업기술연구소

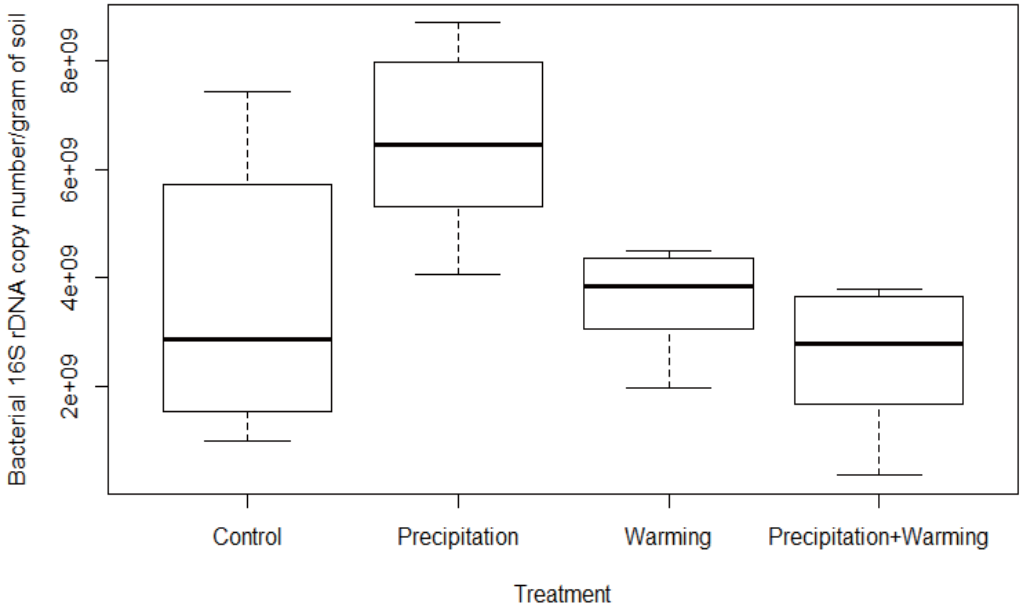


Fig. 77. Comparison of bacterial diversity between treatments using 16S rRNA gene copy number quantification.

KOPRI
극지연구소

마. 기후 변화 모사 처리 3년 차(T_3, 2015년) 토양 및 미생물 특성

(1) 기후변화 모사 3년 후 (2015년) 토양 특성

기후변화 모사 3년 후 토양 시료를 채취하여 분석한 결과, 측정한 모든 항목(토양 수분함량, pH, 전기전도도, 질산태 질소, 암모늄태 질소, 무기태 질소, 토양유기탄소, 총 질소, 탄질비)에서 처리구간 유의한 차이가 나타나지 않았다(Table 30, 31, 33). 그러나, 토양 수분함량, pH, 전기전도도의 층위별 비교 결과 organic layers 사이에는 차이가 없었으나, organic layers와 mineral layer 사이에 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 수분 함량과 전기전도도는 organic layers에서 높았고, pH는 mineral layer에서 높게 나타났다 (Table 30). 무기태 질소 분석 결과 암모늄태 질소가 질산태 질소보다 약 2배에서 70배 (평균 13배) 정도 높게 나타났다(Table 32). 암모늄태 질소의 경우 organic layer 1, organic layer 2, mineral layer 순으로 유의하게 양이 감소하였다(Table 33).

반면 질산태 질소는 organic layer 1에서 가장 높았고, organic layer 2와 mineral layer 사이 값은 통계적으로 유의한 차이가 없었다. Organic layer 1과 2에서 토양유기탄소와 총질소 함량은 30%이상과 약 3%로서 mineral layer에 비해 유의하게 높게 나타났다(Table 34). 그러나 C/N ratio는 10-11 내외의 값을 나타내었는데, 층위별로 비교하면 organic layer 1이 organic layer 2보다 유의하게 높았고, mineral layer는 organic layers와 차이가 없었다.

KOPRI 극지연구소

Table 30. Soil moisture content, pH, and electrical conductivity under different treatments in each layer

Treat-ment	Layer	N Rows	MC (%)		pH		EC (μS cm^{-1})	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
NWNP	Organic 1 (<5 cm)	5	204.8	27.3	7.4	0.1	335.3	137.3
	Organic 2 (>5 cm)	3	217.0	10.0	7.5	0.1	228.1	67.5
	Mineral	4	43.8	7.7	7.9	0.0	73.1	9.7
NWP	Organic 1 (<5 cm)	5	191.9	36.7	7.5	0.4	495.0	313.1
	Organic 2 (>5 cm)	3	187.9	35.9	7.4	0.2	343.2	267.2
	Mineral	4	47.3	7.8	7.9	0.2	64.6	14.0
WNP	Organic 1 (<5 cm)	5	176.0	53.2	7.5	0.3	454.6	343.1
	Organic 2 (>5 cm)	3	184.8	55.7	7.3	0.3	284.7	145.7
	Mineral	4	50.0	25.8	7.9	0.2	92.5	39.7
WP	Organic 1 (<5 cm)	5	210.1	66.6	7.4	0.2	352.9	235.9
	Organic 2 (>5 cm)	5	199.1	43.9	7.1	0.5	396.7	301.2
	Mineral	4	35.3	14.5	7.9	0.1	75.3	22.2

* 토양 수분, pH, 전기전도도는 모든 층위에서 각 처리구별 유의한 차이가 없음

KOPRI 극지연구소

Table 31. A result of two way ANOVA examining effects of warming and precipitation on inorganic nitrogen contents of the destructive sampling plots in 2015

			NH_4^+-N			NO_3^--N			Inorganic nitrogen		
	Source	DF	SS	F Ratio	Prob > F	SS	F Ratio	Prob > F	SS	F Ratio	Prob > F
Organic	B	4	44.73	2.92	0.07	1.65	1.46	0.28	36.46	2.20	0.13
Layer 1	W	1	0.96	0.25	0.63	0.68	2.41	0.15	0.02	0.01	0.94
(0-5 cm)	P	1	1.66	0.43	0.52	0.60	2.11	0.17	4.25	1.03	0.33
	W*P	1	1.26	0.33	0.58	0.05	0.16	0.69	0.82	0.20	0.66
Organic	B	4	2.64	1.16	0.41	0.68	1.01	0.47	2.17	0.61	0.67
Layer 2	W	1	0.09	0.16	0.70	0.06	0.34	0.58	0.30	0.33	0.58
(> 5 cm)	P	1	0.05	0.08	0.79	0.42	2.54	0.16	0.75	0.84	0.39
	W*P	1	0.04	0.08	0.79	0.01	0.07	0.79	0.10	0.11	0.75
Mineral	B	4	0.67	1.31	0.34	0.39	3.43	0.07	1.70	2.15	0.17
Layer	W	1	0.00	0.01	0.92	0.05	1.63	0.24	0.06	0.32	0.59
	P	1	0.00	0.00	0.97	0.01	0.25	0.63	0.01	0.03	0.87
	W*P	1	0.15	1.17	0.31	0.00	0.08	0.79	0.11	0.58	0.47

DF: degree of freedom; SS: Sum of square

KOPRI 극지연구소

Table 32. Inorganic nitrogen contents in destructive sampling plots after 3 years of climate manipulation

Depth	Parameter	Treatment			
		NWNP	NWP	WNP	WP
Organic layer1	N	5	5	5	5
(0-5 cm)	NH_4^+-N	6.41	6.48	6.34	7.42 ^{ns}
	(μg N/g soil)	(3.41)	(1.61)	(2.07)	(2.05)
	NO_3^--N	0.92	1.36	0.64	0.89 ^{ns}
	(μg N/g soil)	(0.70)	(0.58)	(0.31)	(0.59)
	Inorganic N	7.32	7.84	6.99	8.31 ^{ns}
	(μg N/g soil)	(3.42)	(1.33)	(2.32)	(1.64)
Organic layer2	N	3	3	3	5
(> 5 cm)	NH_4^+-N	4.22	4.21	4.68	4.19 ^{ns}
	(μg N/g soil)	(0.58)	(0.16)	(0.79)	(1.01)
	NO_3^--N	0.84	0.54	0.58	0.28 ^{ns}
	(μg N/g soil)	(0.58)	(0.46)	(0.40)	(0.27)
	Inorganic N	5.06	4.75	5.26	4.47 ^{ns}
	(μg N/g soil)	(0.92)	(0.48)	(0.82)	(1.00)
Mineral layer	N	4	4	4	4
	NH_4^+-N	1.08	1.37	1.35	1.10 ^{ns}
	(μg N/g soil)	(0.53)	(0.16)	(0.28)	(0.43)
	NO_3^--N	0.08	0.19	0.27	0.32 ^{ns}
	(μg N/g soil)	(0.07)	(0.10)	(0.21)	(0.38)
	Inorganic N	1.16	1.56	1.62	1.42 ^{ns}
	(μg N/g soil)	(0.57)	(0.24)	(0.36)	(0.76)

Data: mean (SD); SOC: soil organic carbon; TN: total nitrogen

KOPRI 극지연구소

Table 33. A result of two way ANOVA examining effects of warming and precipitation on soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents of the destructive sampling plots in 2015

		Organkc layer1 (0~5 cm)				Organic layer2 (> 5 cm)				Mineral layer			
	Source	DF	SS	F	prob	DF	SS	F	prob	DF	SS	F	prob
SOC	B	4	287.60	1.51	0.26	4	190.57	0.70	0.62	4	26.45	0.94	0.49
	W	1	15.81	0.33	0.58	1	59.22	0.86	0.39	1	0.05	0.01	0.94
	P	1	14.38	0.30	0.59	1	9.41	0.14	0.72	1	0.80	0.11	0.74
	W*P	1	101.61	2.13	0.17	1	55.91	0.82	0.40	1	3.79	0.54	0.48
TN	B	4	2.27	1.11	0.40	4	2.16	0.71	0.62	4	0.217	0.803	0.56
	W	1	0.10	0.20	0.66	1	0.67	0.88	0.38	1	0.000	0.000	0.99
	P	1	0.18	0.35	0.56	1	0.15	0.19	0.68	1	0.006	0.091	0.77
	W*P	1	0.63	1.22	0.29	1	0.51	0.66	0.45	1	0.062	0.918	0.37
C/N ratio	B	4	3.39	0.49	0.75	4	5.28	2.08	0.20	4	0.53	0.20	0.93
	W	1	0.31	0.18	0.68	1	0.13	0.20	0.67	1	0.23	0.34	0.57
	P	1	0.73	0.42	0.53	1	0.06	0.09	0.77	1	0.06	0.09	0.78
	W*P	1	0.26	0.15	0.71	1	0.12	0.19	0.68	1	0.81	1.23	0.30

DF: degree of freedom; SS: sum of square: F: F ratio; prob: probability >F; SOC: soil organic carbon; TN: total nitrogen; B: block; W: warming; P: precipitation

Table 34. Soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents, and C/N ratio in destructive sampling plots after 3 years of climate manipulation

Depth	Parameter	Treatment			
		NWNP	NWP	WNP	WP
Organic layer1	N	5	5	5	5
(0-5 cm)	SOC (%)	32.15	29.33	29.42	35.62 ^{ns}
		(4.29)	(8.56)	(8.00)	(7.71)
	TN (%)	2.91	2.75	2.70	3.25 ^{ns}
		(0.49)	(0.63)	(0.93)	(0.78)
	C/N ratio	11.19	10.58	11.21	11.06 ^{ns}
		(1.79)	(0.80)	(1.33)	(0.65)
Organic layer2	N	3	3	3	5
(> 5 cm)	SOC (%)	36.41	33.92	29.46	34.12 ^{ns}
		(2.57)	(6.15)	(10.95)	(8.26)
	TN (%)	3.56	3.37	3.03	3.39 ^{ns}
		(0.40)	(0.35)	(1.10)	(0.97)
	C/N ratio	10.34	10.01	9.68	10.20 ^{ns}
		(1.65)	(0.91)	(0.37)	(0.66)
Mineral layer	N	4	4	4	4
	SOC (%)	4.95	5.69	6.91	4.89 ^{ns}
		(1.02)	(1.66)	(3.49)	(3.39)
	TN (%)	0.47	0.57	0.67	0.45 ^{ns}
		(0.07)	(0.18)	(0.36)	(0.29)
	C/N ratio	10.60	10.04	10.47	10.82 ^{ns}
		(0.88)	(0.65)	(0.64)	(0.57)

Data: mean (SD); SOC: soil organic carbon; TN: total nitrogen

KOPRI 극지연구소

(2) 기후 변화 모사 처리 3년 차(T_3, 2015년) 토양 세균 군집 구조 및 생물량 변화 분석

기후 변화 모사 처리 3년 차(T_3)인 2015년, 토양 미생물 군집 구조 변화를 살펴보기 위해 5개 집구(plots)내의 샘플링용 집구의 4개의 처리구에서 토양 특성에 따라 유기물층(Organic layer, O)과 무기물 층(Mineral Layer, M)으로 나누어 토양을 채취하였으며 유기물-무기물이 혼재된 층(Organic-Mineral Layer, OM)이 있는 경우는 추가적으로 토양을 채취하여 총 50개의 토양 시료를 확보하였다. 확보한 토양 시료 중 10g을 덜어내어 PowerMax Soil DNA isolation kit(MOBIO, USA) 을 이용하여 gDNA를 추출하였으며 이후 Illumina MiSeq을 이용하여 DNA염기서열을 분석한 결과 총 7,113,297개, 샘플 당 평균 177,832개의 16S rRNA 유전자 염기서열이 확보되었다(Table 35).

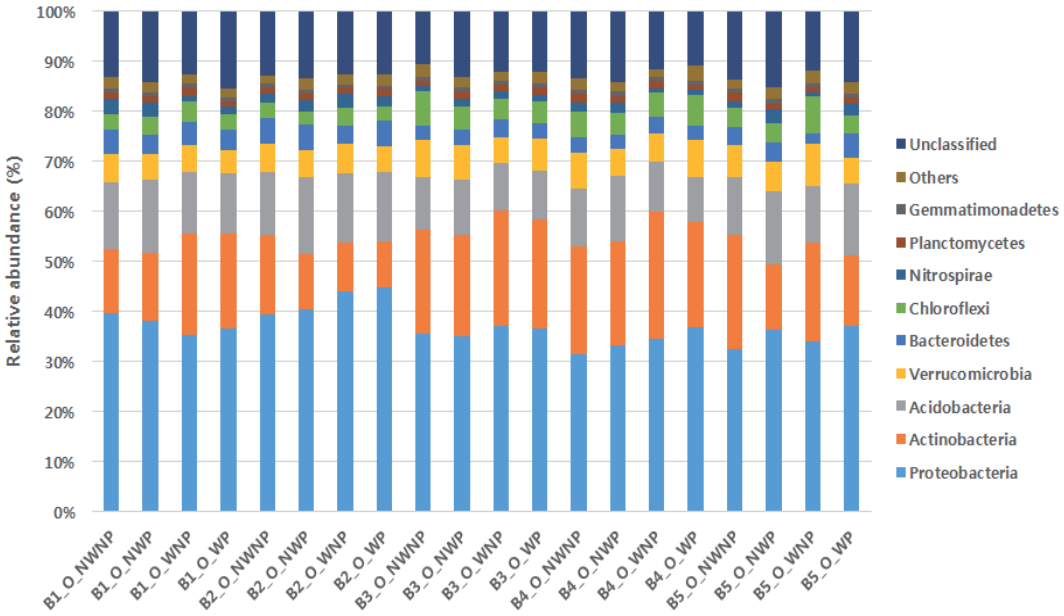
EzTaxon DB를 이용하여 계통분석한 결과 총 40개의 세균문으로 분류되었으며 Proteobacteria (36.9±3.4%), Actinobacteria (17.8±4.7%), Acidobacteria (12.2±1.8%)가 전체의 60% 이상을 차지하면서 우점하는 양상을 보였고 그 외에도 Verrucomicrobia, Bacteroidetes, Chloroflexi, Nitrospirae, Planctomycetes, Gemmatimonadetes도 검출되었으나 상대적으로 낮은 점유도를 보였다(Fig. 78). 각 세균 문들의 상대적인 비율은 집구간, 처리구 간 차이 없이 모든 샘플에서 일정하게 유지되는 양상을 보였으며 이는 3년 동안의 기후변화 모사 실험에서 수행된 강수량, 온도 변화는 토양 세균의 문 수준의 변화를 야기할 만큼 크지 않았음을 의미한다.

KOPRI 극지연구소

Table 35. Sample information and bacterial diversity summary

Sample	Treatment	Block	Depth	Trimmed reads	# of OTUs	Shannon	Inverse Simpson	Chao	ACE
B1 O2 NWNP	NW NP	Block1	Lower	203,731	559	5.7	105.4	1377.0	2199.3
B1 M NWP	NW P	Block1	Lower	179,111	660	6.0	204.7	1632.8	2956.2
B1 M WNP	W NP	Block1	Lower	207,582	709	6.1	289.0	2158.8	3790.4
B1 M WP	W P	Block1	Lower	188,983	627	6.0	243.1	1595.8	2712.7
B1 O NWNP	NW NP	Block1	Upper	158,539	652	6.0	201.3	1624.9	2768.1
B1 O NWP	NW P	Block1	Upper	146,637	657	6.0	217.6	1413.0	2172.6
B1 O WNP	W NP	Block1	Upper	177,409	684	6.1	244.7	1815.8	3308.4
B1 O WP	W P	Block1	Upper	91,481	642	6.0	284.4	1552.7	2250.5
B2 M NWNP	NW NP	Block2	Lower	188,037	690	6.1	237.2	1648.1	2473.3
B2 M NWP	NW P	Block2	Lower	169,863	683	6.1	298.7	1658.7	2788.0
B2 M WNP	W NP	Block2	Lower	194,960	663	6.0	219.5	1708.2	2864.4
B2 O2 WP	W P	Block2	Lower	189,044	588	5.9	256.6	1027.2	1563.1
B2 O NWNP	NW NP	Block2	Upper	190,484	632	6.0	266.0	1595.7	2428.7
B2 O NWP	NW P	Block2	Upper	177,113	649	6.0	196.3	1781.5	3061.6
B2 O WNP	W NP	Block2	Upper	141,516	665	6.0	204.9	1523.8	2274.1
B2 O WP	W P	Block2	Upper	148,189	682	6.1	207.7	1716.4	2913.0
B3 M NWNP	NW NP	Block3	Lower	231,765	721	6.2	301.3	1879.8	4060.8
B3 M NWP	NW P	Block3	Lower	238,149	717	6.1	248.4	1980.2	3711.6
B3 O2 WNP	W NP	Block3	Lower	219,141	649	6.0	190.7	1781.6	3342.7
B3 M WP	W P	Block3	Lower	237,580	673	6.1	260.2	1603.1	2689.6
B3 O NWNP	NW NP	Block3	Upper	52,784	620	5.9	243.8	1512.5	2769.1
B3 O NWP	NW P	Block3	Upper	186,771	618	6.0	265.3	1650.6	2550.6
B3 O WNP	W NP	Block3	Upper	174,344	652	6.0	254.5	1687.5	2933.4
B3 O WP	W P	Block3	Upper	169,263	617	5.9	230.6	1534.4	2995.6
B4 M NWNP	NW NP	Block4	Lower	217,475	698	6.1	321.0	1820.9	3506.1
B4 M NWP	NW P	Block4	Lower	205,241	699	6.1	323.8	1817.4	3343.2
B4 M WNP	W NP	Block4	Lower	174,266	673	6.1	273.7	1744.4	3123.1
B4 M WP	W P	Block4	Lower	223,137	704	6.1	228.1	1591.4	2542.1
B4 O NWNP	NW NP	Block4	Upper	157,231	681	6.1	279.4	1840.2	3464.4
B4 O NWP	NW P	Block4	Upper	164,085	634	6.0	271.7	1437.7	2563.7
B4 O WNP	W NP	Block4	Upper	193,119	599	5.9	201.7	1221.0	1982.2
B4 O WP	W P	Block4	Upper	115,690	644	6.0	243.6	1754.2	3237.2
B5 M NWNP	NW NP	Block5	Lower	221,225	689	6.1	286.6	1655.6	2713.2
B5 O2 NWP	NW P	Block5	Lower	125,090	534	5.7	144.0	948.9	1018.7
B5 M WNP	W NP	Block5	Lower	172,387	615	5.8	153.8	1589.7	2660.8
B5 M WP	W P	Block5	Lower	178,912	686	6.1	291.2	1748.0	3080.4
B5 O NWNP	NW NP	Block5	Upper	187,788	652	6.0	246.2	1546.1	2770.0
B5 O NWP	NW P	Block5	Upper	212,962	683	6.1	269.4	1725.4	2865.2
B5 O WNP	W NP	Block5	Upper	162,705	609	5.9	202.3	1749.5	3286.2
B5 O WP	W P	Block5	Upper	139,508	691	6.1	264.3	1669.9	2662.1

(a)



(b)

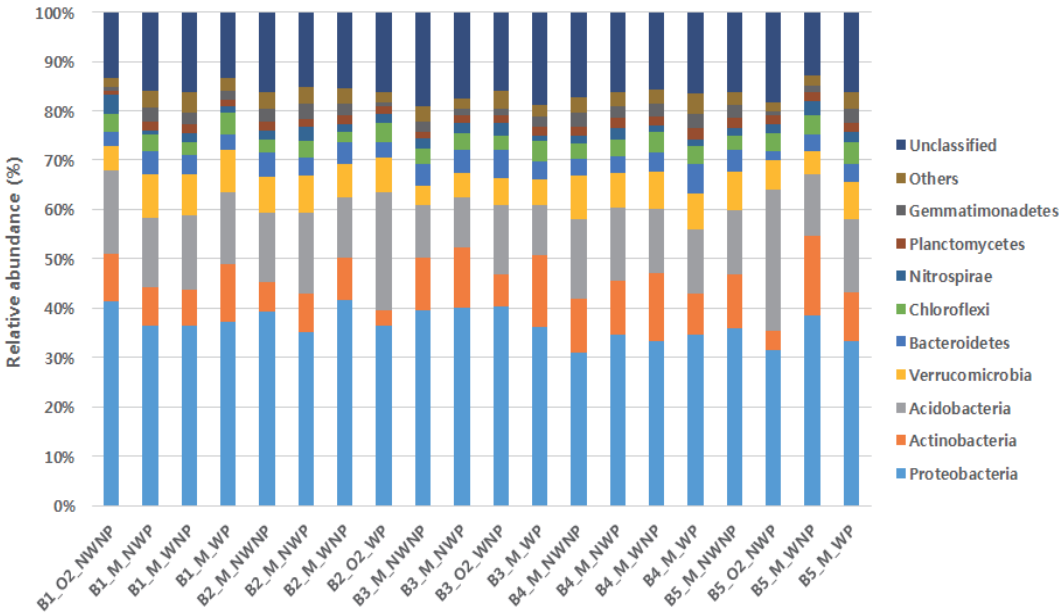
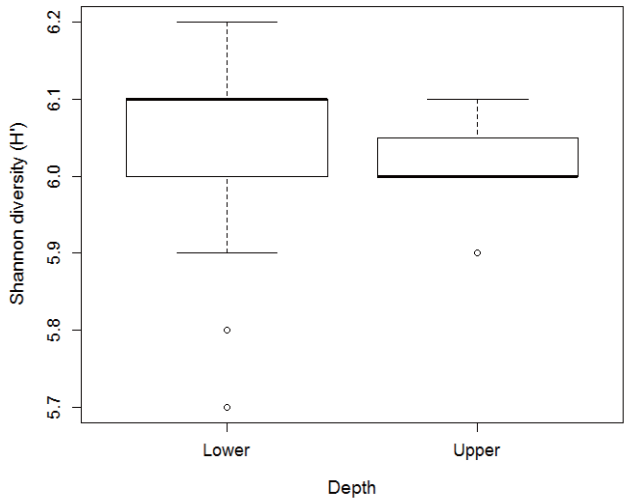


Fig. 78. Bacterial phylum distribution at (a) top and (b) bottom layers

토양 내 세균 다양성 분석결과 토양 깊이와 처리구 간 유의한 차이가 나타나지 않았다(토양깊이, Wilcoxon rank-sum test, P>0.05; 처리구 간, ANOVA, P>0.05)(Fig. 79).

(a)



(b)

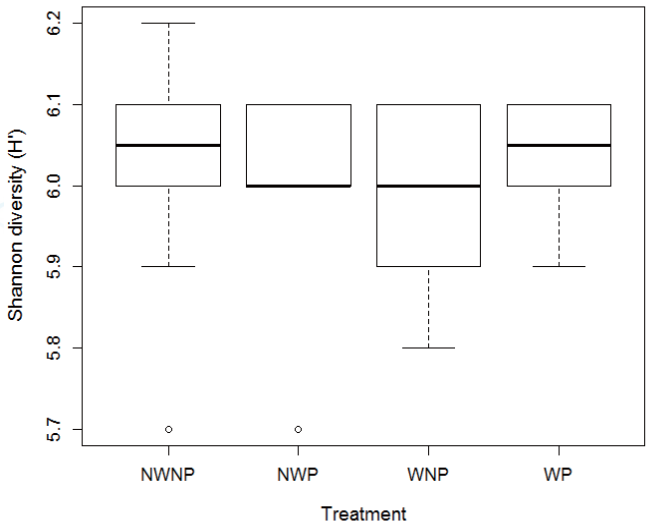
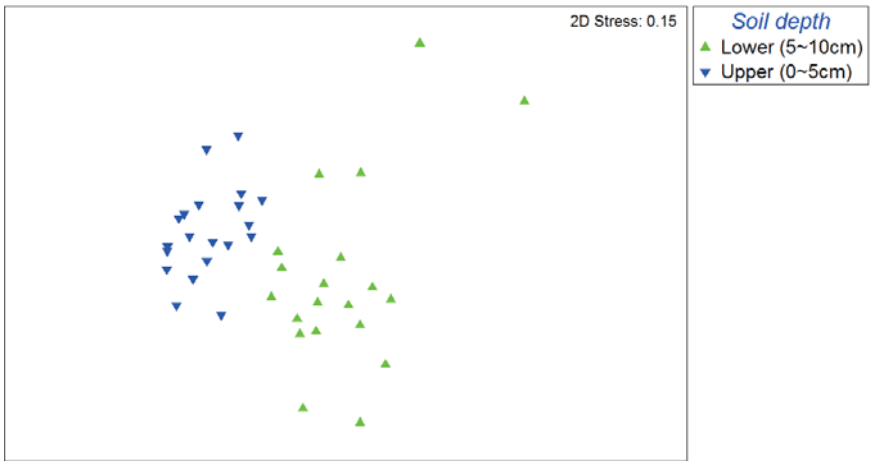


Fig. 79. Comparison of bacterial diversity between different (a) soil depth and (b) treatments

세균 종 레벨 분류단위인 OTU 수준에서 토양 깊이, 처리구 간 군집 구성 차이가 있는지 확인하기 위하여 다변량 분석(NMDS)을 수행한 결과 세균 군집은 토양 깊이, 즉 상층부와 하층부에 따라 서로 다른 군집 구성을 가지는 것으로 나타났으며(Fig. 78) 그 차이가 매우 유의함을 확인할 수 있었으나(PERMANOVA, P=0.0001), 처리구 간의 군집 차이는 유의한 차이를 나타내지 않았다(PERMANOVA, P=0.511) (Fig. 78, Table 36a). 이는 토양 내 세균 군집 구성이 기후 변화 모사 실험에서 수행된 강수량, 온도 변화보다 토양 깊이에 의해 더 큰 영향을 받았다는 것을 의미하며 이러한 결과는 기후 변화 모

사 실험 1년 후(T1) 세균 군집 분석에서 토양 내 세균 군집이 강수량과 온도 증가에 의해 변화하였으며 특히 대조군과 강수량 증가(Precipitation) 처리구 간의 군집 구조 차이가 매우 유의하였던 것과는 다른 결과이다.

(a)



(b)

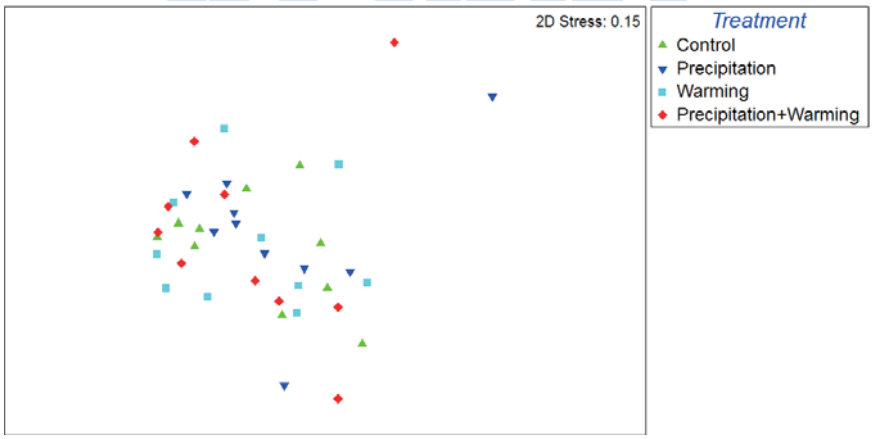


Fig. 80. Comparison of soil bacterial community structure between different (a) soil depth, (b) treatment samples.

Table 36. PERMANOVA result to compare bacterial community similarity between different soil depth, block and treatment samples (a) PERMANOVA table, (b) post hoc pairwise t-test result

(a)

Source	df	SS	MS	Pseudo-F	P (perm)	P (Monte Carlo)
Block	4	8358	2089.5	1.1776	**0.0131**	0.1299
Treatment	3	5272.4	1757.5	0.9905	0.511	0.5098
Depth	1	6077	6077	3.4249	**0.0001**	**0.0001**
Block x Treatment	12	22474	1872.9	1.0555	0.1226	0.3047
Block x Depth	4	7446.5	1861.6	1.0492	0.2271	0.3525
Treatment x Depth	3	4988.7	1662.9	0.9372	0.8017	0.6422
Residual	12	21292	1774.3			
Total	39	75909				

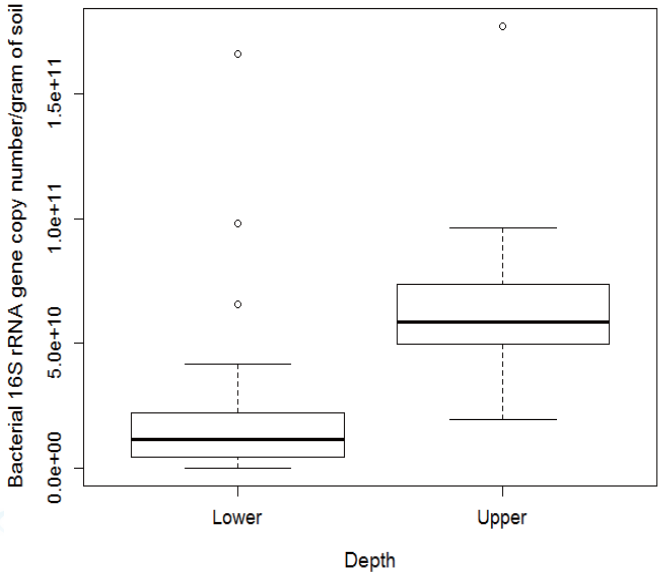
(b)

Groups	t	P (perm)	Unique perms	P (Monte Carlo)
Upper Layer vs. Lower Layer	1.8507	**0.0001**	9710	0.0001
Control vs. Precipitation	0.9655	0.7098	9724	0.5446
Control vs. Warming	0.9632	0.687	9762	0.5401
Control vs. Warming+Precipitation	1.0429	0.206	9749	0.3814
Precipitation vs. Warming	0.9784	0.6029	9763	0.51
Precipitation vs. Warming+Precipitation	1.0244	0.3026	9774	0.4172
Warming vs. Warming+Precipitation	0.9980	0.4433	9753	0.4686

KOPRI 극지연구소

또한 기후 변화 모사 실험에 따른 토양 내 세균 생물량(biomass)의 변화를 관찰하고자 qPCR을 수행한 후 토양 깊이와 각 처리구 별 세균 16S rRNA gene copy number를 비교한 결과 토양 깊이에 따라 통계적으로 유의한 차이가 관찰되었으나, 처리구 간에 유의한 세균 생물량 변화는 관찰되지 않았다(Fig. 81)(토양 깊이, Wilcoxon rank sum test, P=0.00004; 처리구 간, Kruskal-Wallis rank sum test, P=0.7844). 이는 토양 내 세균 생물량이 강수량, 온도 변화보다 토양 깊이에 의한 영향에 더 크다는 것을 의미한다.

(a)



(b)

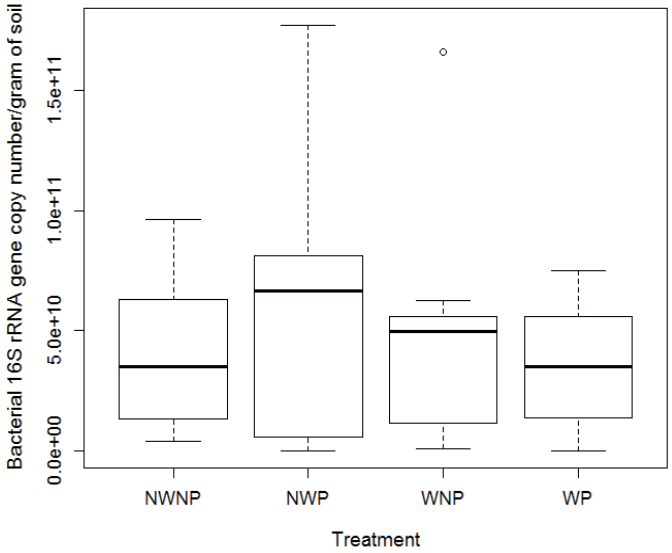


Fig. 81. Comparison of bacterial biomass between different (a) soil depth, (b) treatments using 16S rRNA gene copy number quantification.

기후 변화 모사 실험 3년 차 토양 내 세균 군집 구성과 세균 생물량 변화에 대해 분석한 결과 토양 깊이에 따른 세균 군집 구조의 차이는는 기후변화 모사 실험 이전부터 지속적으로 관찰되었다. 반면 기후변화모사 1년차에 강수량 증가에 의해 세균 군집 구조 및 세균 생물량이 변화했던 패턴이 3년차에는 더 이상 나타나지 않았다. 이는 기후변화 모사를 수행한 초기에 변화를 보였으나 시간이 흐르고 변화가 축적됨에 따라 생태계가 다시 제자리로 돌아오려는 생태학적 복원력(resilience)이 작용했을 가능성이 크다. 이러한 미생물 군집구조와 생물량 변화패턴과 토양 미생물에 의한 생태계 기능성(토양호흡, 유기물 분해, 질산화 등) 변화, 토양 유기물 특성 변화, 표층 식생 변화와 궤를 같이 하는 것인지는 추후 장기적인 모니터링을 통해 지켜보아야 할 것이다.

KOPRI
극지연구소

3. 그린란드 자켄버그 지역 기후변화 모사에 따른 미생물 특성변화 분석

그린란드 자켄버그 지역에서 서로 다른 두 종의 식물(*C. tetragona*, *S. arctica*)이 각각 우점한 지역을 대상으로 기후변화 모사 실험(온도상승, shading effect)이 8-9년간 진행한 바 있다. 기후변화모사에 따른 토양 세균 군집구조 변화를 살펴보기 위해 토양 DNA 추출, barcoded PCR, DNA 염기서열 분석(MiSeq 2x300bp)을 차례대로 수행하였고, qPCR을 활용하여 세균 특이적인 16S rRNA gene copy number를 비교함으로써 처리구간 세균 생물량 비교분석을 수행하였다. 토양 DNA는 2mm체로 거른 후 샘플 당 0.5g의 토양을 사용하여 FastDNA™ SPIN Kit for Soil DNA Extraction (MP Biomedicals)방법으로 추출하였다. 추출된 DNA를 대상으로 MiSeq amplicon sequencing을 수행하기 위해 두 단계에 걸친 PCR과정을 수행하였다. 1차 PCR과정(amplicon PCR)은 세균 특이적인 16S rRNA V3-V4 region (341F/805R)(Forward, 5'-TCGTCGGCAGCGTC-AGATGTGTATAAGAGACAG-CCTACGGGNGGCWGCAG-3'; Reverse, 5'-GTCTCGTGGGCTCGG-AGATGTGTATAAGAGACAG-GACTACHVGGGTATCTAATCC-3') (ILMN pre-adapter - sequencing primer - specific locus primer)을 타겟으로 하여 PCR을 수행하였다. 2차 PCR과정(Index PCR)은 ILMN NexteraXT Index조합을 이용하여 PCR을 수행하고 Bioanalyzer 1000 chip (Agilent)으로 농도 및 quality 체크를 수행하였다.

증폭된 PCR product는 MiSeq 2x300bp를 이용하여 DNA 염기서열을 분석하였고 DNA 염기서열에 대한 생물정보학적 분석은 quality trimming (Sickle), error-correction (Bayeshammer), paired-end reads assembly (PANDASeq) (param. 10bp overlap), MiSeq SOP (mothur) 순으로 진행하였다. Taxonomic assignment는 EzTaxon-DB를 기반으로 하였으며, 세균 종 수준의 분류 단위인 operational taxonomic unit (OTU)는 97% 16S rRNA gene 유사도를 적용하여 sequence clustering을 수행하였다.

총 90개의 토양 시료로부터 총 407,479개, 샘플 당 평균 4,527개의 16S rRNA 유전자 염기서열이 확보되었다(Table 37). Phylum 조성 분석결과 다른 북극 건조 툰드라 지역 토양 세균 분포와 유사하게 Proteobacteria, Actinobacteria, Acidobacteria, Verrucomicrobia, Chloroflexi, Planctomycetes가 우점하는 양상을 보였으며, 특징적인 차이로는 *S. arctica* 우점지역에서 *C. tetragona* 우점지역에 비해 상대적으로 Bacteroidetes의 상대수도가 두 배 가량 높게 나타났다(Fig. 82). Bacteroidetes가 대표적인 copiotrophs으로 알려져 있음을 감안할 때, *C. tetragona* 근권에 비해 *S. arctica* 우점 토양의 근권에 Bacteroidetes 그룹이 쉽게 분해 가능한 유기물들이 상대적으로 많이 분포할 것으로 짐작할 수 있다.

qPCR을 이용하여 서로 다른 식물 종 우점지역에서 처리군 간 세균 군집의 생물량 변화를 비교한 결과 두 지역 모두 처리구 간 통계적으로 유의한 변화는 관찰되지 않았다(ANOVA, $P>0.05$)(Fig. 83). 세균 다양성 분석결과 서로 다른 식물 종이 우점한 두 지역 모두 처리구 간 통계적으로 유의한 세균 다양성 차이는 나타나지 않았다(ANOVA, all $P>0.05$)(Fig. 84).

Table 37. Sample information and MiSeq amplicon sequencing result

Sample information					Sequencing & diversity analyses summary							
Sample	Depth	Vegetation	Treatment	Block	Trimmed reads	OTUs[a]	Shannon index[a]	Simpson index[a]	Inverse Simpson (1/D)[a]	Chao[a]	ACE[a]	Phylogenetic diversity[a]
Ca.b1.con.d0	D0	*C. tetragona*	Control	B1	4600	2579	7.45	0.0013	770.8	27564.4	66029.7	0.192
Ca.b1.con.d1	D1	*C. tetragona*	Control	B1	4580	2543	7.38	0.0018	545.2	28266.4	65220.0	0.197
Ca.b1.con.d2	D2	*C. tetragona*	Control	B1	4596	2431	7.21	0.0026	388.2	29659.1	80131.5	0.187
Ca.b1.sha.d0	D0	*C. tetragona*	Shading	B1	4586	2569	7.46	0.0012	850.9	23902.0	64513.8	0.199
Ca.b1.sha.d1	D1	*C. tetragona*	Shading	B1	4560	2601	7.43	0.0015	662.2	31778.2	76754.9	0.207
Ca.b1.sha.d2	D2	*C. tetragona*	Shading	B1	4629	2580	7.43	0.0015	683.8	29387.7	64560.2	0.208
Ca.b1.war.d0	D0	*C. tetragona*	Warming	B1	4494	2548	7.37	0.0018	546.0	27338.4	75174.0	0.195
Ca.b1.war.d1	D1	*C. tetragona*	Warming	B1	4517	2444	7.23	0.0028	351.1	26966.3	78102.0	0.186
Ca.b1.war.d2	D2	*C. tetragona*	Warming	B1	4514	2534	7.32	0.0026	387.4	38972.0	91597.3	0.196
Ca.b2.con.d0	D0	*C. tetragona*	Control	B2	4565	2735	7.57	0.0010	1010.2	31440.4	72801.8	0.200
Ca.b2.con.d1	D1	*C. tetragona*	Control	B2	4515	2588	7.44	0.0013	773.5	28998.5	73967.9	0.202
Ca.b2.con.d2	D2	*C. tetragona*	Control	B2	4557	2543	7.34	0.0021	465.7	32456.2	90475.0	0.196
Ca.b2.sha.d0	D0	*C. tetragona*	Shading	B2	4571	2560	7.43	0.0013	787.9	25075.1	66092.7	0.187
Ca.b2.sha.d1	D1	*C. tetragona*	Shading	B2	4590	2522	7.33	0.0019	525.0	33410.1	86127.4	0.199
Ca.b2.sha.d2	D2	*C. tetragona*	Shading	B2	4565	2485	7.22	0.0041	242.1	33376.3	97208.3	0.199
Ca.b2.war.d0	D0	*C. tetragona*	Warming	B2	4604	2598	7.44	0.0013	748.1	27370.2	73496.9	0.187
Ca.b2.war.d1	D1	*C. tetragona*	Warming	B2	4596	2524	7.38	0.0016	644.4	29350.2	81928.4	0.197
Ca.b2.war.d2	D2	*C. tetragona*	Warming	B2	4636	2550	7.37	0.0022	462.4	28522.2	70835.6	0.204
Ca.b3.con.d0	D0	*C. tetragona*	Control	B3	4607	2439	7.31	0.0017	605.1	24579.2	62013.3	0.195
Ca.b3.con.d1	D1	*C. tetragona*	Control	B3	4549	2533	7.37	0.0017	578.7	33679.8	77016.4	0.192
Ca.b3.con.d2	D2	*C. tetragona*	Control	B3	4487	2502	7.28	0.0023	438.3	40552.5	89662.4	0.190
Ca.b3.sha.d0	D0	*C. tetragona*	Shading	B3	4601	2541	7.43	0.0011	870.7	23869.8	62478.5	0.182
Ca.b3.sha.d1	D1	*C. tetragona*	Shading	B3	4535	2551	7.33	0.0024	414.1	32414.6	74328.1	0.202
Ca.b3.sha.d2	D2	*C. tetragona*	Shading	B3	4500	2435	7.24	0.0025	395.6	39452.5	91810.9	0.190
Ca.b3.war.d0	D0	*C. tetragona*	Warming	B3	4564	2572	7.42	0.0014	698.1	24565.8	64245.2	0.190
Ca.b3.war.d1	D1	*C. tetragona*	Warming	B3	4664	2429	7.25	0.0023	435.1	25214.1	68836.3	0.190
Ca.b3.war.d2	D2	*C. tetragona*	Warming	B3	4650	2338	7.18	0.0023	444.2	26547.2	71428.3	0.179
Ca.b4.con.d0	D0	*C. tetragona*	Control	B4	4511	2613	7.47	0.0011	873.7	28342.3	58907.4	0.189
Ca.b4.con.d1	D1	*C. tetragona*	Control	B4	4541	2564	7.37	0.0021	481.6	25514.0	62540.4	0.199
Ca.b4.con.d2	D2	*C. tetragona*	Control	B4	4589	2522	7.29	0.0025	395.8	35190.5	102715.9	0.207
Ca.b4.sha.d0	D0	*C. tetragona*	Shading	B4	4517	2691	7.55	0.0009	1111.1	28493.9	70367.1	0.194
Ca.b4.sha.d1	D1	*C. tetragona*	Shading	B4	4537	2601	7.42	0.0016	620.6	30861.0	74588.0	0.208
Ca.b4.sha.d2	D2	*C. tetragona*	Shading	B4	4609	2495	7.29	0.0025	400.4	31784.1	83994.5	0.194
Ca.b4.war.d0	D0	*C. tetragona*	Warming	B4	4597	2612	7.47	0.0012	868.7	27890.7	67054.5	0.185
Ca.b4.war.d1	D1	*C. tetragona*	Warming	B4	4581	2612	7.43	0.0015	646.3	29890.0	89892.6	0.203
Ca.b4.war.d2	D2	*C. tetragona*	Warming	B4	4594	2628	7.41	0.0019	524.6	37689.2	107519.9	0.204
Ca.b5.con.d0	D0	*C. tetragona*	Control	B5	4482	2484	7.35	0.0014	691.1	23545.7	64459.2	0.180
Ca.b5.con.d1	D1	*C. tetragona*	Control	B5	4548	2590	7.38	0.0019	513.6	35477.4	97584.1	0.206
Ca.b5.con.d2	D2	*C. tetragona*	Control	B5	4548	2630	7.37	0.0027	365.5	34635.4	99876.6	0.207
Ca.b5.sha.d0	D0	*C. tetragona*	Shading	B5	4522	2407	7.26	0.0017	574.5	24367.7	65085.6	0.174
Ca.b5.sha.d1	D1	*C. tetragona*	Shading	B5	4563	2558	7.31	0.0031	322.9	32323.1	90521.3	0.197
Ca.b5.sha.d2	D2	*C. tetragona*	Shading	B5	4541	2556	7.27	0.0040	251.7	36082.1	79825.2	0.200
Ca.b5.war.d0	D0	*C. tetragona*	Warming	B5	4524	2609	7.48	0.0012	859.0	25543.8	58374.6	0.190
Ca.b5.war.d1	D1	*C. tetragona*	Warming	B5	4562	2535	7.37	0.0017	582.0	32163.7	98153.1	0.196
Ca.b5.war.d2	D2	*C. tetragona*	Warming	B5	4577	2501	7.30	0.0026	381.3	27707.9	79783.7	0.190

Sample information					Sequencing & diversity analyses summary							
Sample	Depth	Vegetation	Treatment	Block	Trimmed reads	OTUs[a]	Shannon index[a]	Simpson index[a]	Inverse Simpson (1/D)[a]	Chao[a]	ACE[a]	Phylogenetic diversity[a]
Sa.b1.con.d0	D0	*S. arctica*	Control	B1	4561	2631	7.46	0.0015	673.1	27083.2	73445.2	0.187
Sa.b1.con.d1	D1	*S. arctica*	Control	B1	4515	2630	7.40	0.0023	431.8	37044.4	95707.9	0.199
Sa.b1.con.d2	D2	*S. arctica*	Control	B1	4541	2585	7.38	0.0019	524.6	29506.5	80972.3	0.198
Sa.b1.sha.d0	D0	*S. arctica*	Shading	B1	4569	2970	7.71	0.0009	1115.3	45921.0	153887.1	0.218
Sa.b1.sha.d1	D1	*S. arctica*	Shading	B1	4622	2697	7.46	0.0019	532.1	31807.7	91391.3	0.197
Sa.b1.sha.d2	D2	*S. arctica*	Shading	B1	4624	2552	7.29	0.0029	346.7	33116.9	90028.1	0.186
Sa.b1.war.d0	D0	*S. arctica*	Warming	B1	4556	2577	7.42	0.0015	655.5	27501.3	67852.1	0.187
Sa.b1.war.d1	D1	*S. arctica*	Warming	B1	4552	2579	7.41	0.0018	566.5	26364.1	81400.2	0.189
Sa.b1.war.d2	D2	*S. arctica*	Warming	B1	4600	2525	7.19	0.0062	160.9	27836.2	77507.6	0.180
Sa.b2.con.d0	D0	*S. arctica*	Control	B2	4442	2602	7.50	0.0010	981.7	21453.8	59226.8	0.186
Sa.b2.con.d1	D1	*S. arctica*	Control	B2	4585	2595	7.38	0.0021	485.0	31243.5	77723.4	0.196
Sa.b2.con.d2	D2	*S. arctica*	Control	B2	4498	2613	7.36	0.0028	361.2	32689.3	107162.9	0.197
Sa.b2.sha.d0	D0	*S. arctica*	Shading	B2	3685	2461	7.22	0.0025	395.8	21851.1	61940.1	0.176
Sa.b2.sha.d1	D1	*S. arctica*	Shading	B2	4568	2609	7.39	0.0023	441.1	34930.9	81344.8	0.199
Sa.b2.sha.d2	D2	*S. arctica*	Shading	B2	4621	2609	7.38	0.0025	405.8	30989.2	89618.7	0.201
Sa.b2.war.d0	D0	*S. arctica*	Warming	B2	4483	2757	7.58	0.0011	875.4	27489.2	78591.3	0.196
Sa.b2.war.d1	D1	*S. arctica*	Warming	B2	4567	2735	7.54	0.0014	729.7	29852.0	84378.3	0.202
Sa.b2.war.d2	D2	*S. arctica*	Warming	B2	4471	2571	7.36	0.0021	465.6	25289.4	70890.3	0.198
Sa.b3.con.d0	D0	*S. arctica*	Control	B3	4306	2639	7.49	0.0012	824.0	25533.0	69656.9	0.191
Sa.b3.con.d1	D1	*S. arctica*	Control	B3	4542	2721	7.51	0.0014	720.0	26944.9	93638.7	0.199
Sa.b3.con.d2	D2	*S. arctica*	Control	B3	4554	2610	7.42	0.0018	562.8	32592.2	76461.3	0.191
Sa.b3.sha.d0	D0	*S. arctica*	Shading	B3	4564	2651	7.41	0.0023	431.4	27696.3	91519.3	0.188
Sa.b3.sha.d1	D1	*S. arctica*	Shading	B3	4562	2657	7.45	0.0018	555.7	31733.7	74963.5	0.201
Sa.b3.sha.d2	D2	*S. arctica*	Shading	B3	4529	2579	7.35	0.0024	412.1	30015.5	81432.5	0.199
Sa.b3.war.d0	D0	*S. arctica*	Warming	B3	4238	2584	7.44	0.0013	791.3	23942.5	63594.9	0.194
Sa.b3.war.d1	D1	*S. arctica*	Warming	B3	4597	2567	7.35	0.0023	431.5	24919.7	72246.3	0.197
Sa.b3.war.d2	D2	*S. arctica*	Warming	B3	4552	2628	7.39	0.0021	485.6	35724.5	103563.1	0.195
Sa.b4.con.d0	D0	*S. arctica*	Control	B4	4096	2541	7.39	0.0014	707.4	26313.7	61197.2	0.191
Sa.b4.con.d1	D1	*S. arctica*	Control	B4	4528	2699	7.50	0.0014	715.7	35815.8	103877.6	0.199
Sa.b4.con.d2	D2	*S. arctica*	Control	B4	4530	2619	7.40	0.0020	493.8	33964.8	82500.0	0.196
Sa.b4.sha.d0	D0	*S. arctica*	Shading	B4	4488	2675	7.52	0.0012	853.8	28657.8	82403.0	0.196
Sa.b4.sha.d1	D1	*S. arctica*	Shading	B4	4584	2655	7.47	0.0014	728.1	30278.2	82914.6	0.200
Sa.b4.sha.d2	D2	*S. arctica*	Shading	B4	4553	2672	7.47	0.0015	685.4	33373.2	88071.6	0.201
Sa.b4.war.d0	D0	*S. arctica*	Warming	B4	4162	2744	7.58	0.0009	1066.9	32517.8	91777.9	0.200
Sa.b4.war.d1	D1	*S. arctica*	Warming	B4	4541	2635	7.46	0.0015	685.8	30483.4	75230.2	0.198
Sa.b4.war.d2	D2	*S. arctica*	Warming	B4	4521	2817	7.58	0.0013	767.0	38364.7	126705.1	0.213
Sa.b5.con.d0	D0	*S. arctica*	Control	B5	4226	2609	7.48	0.0012	837.2	24744.0	73328.0	0.190
Sa.b5.con.d1	D1	*S. arctica*	Control	B5	4555	2671	7.45	0.0017	592.5	32801.3	99040.1	0.201
Sa.b5.con.d2	D2	*S. arctica*	Control	B5	4556	2606	7.33	0.0031	325.6	36276.9	95380.6	0.197
Sa.b5.sha.d0	D0	*S. arctica*	Shading	B5	4393	2533	7.36	0.0018	559.6	25965.6	68157.3	0.185
Sa.b5.sha.d1	D1	*S. arctica*	Shading	B5	4558	2693	7.52	0.0012	858.8	33380.5	95008.7	0.210
Sa.b5.sha.d2	D2	*S. arctica*	Shading	B5	4557	2788	7.54	0.0016	632.4	40140.0	109243.2	0.199
Sa.b5.war.d0	D0	*S. arctica*	Warming	B5	4531	2594	7.40	0.0020	511.1	33235.1	92399.5	0.195
Sa.b5.war.d1	D1	*S. arctica*	Warming	B5	4650	2487	7.31	0.0025	392.7	32484.5	72269.9	0.193
Sa.b5.war.d2	D2	*S. arctica*	Warming	B5	4571	2716	7.48	0.0019	521.3	31785.8	86224.2	0.210

a. Diversity indices were estimated using randomly generated subset (n=3,685) per sample

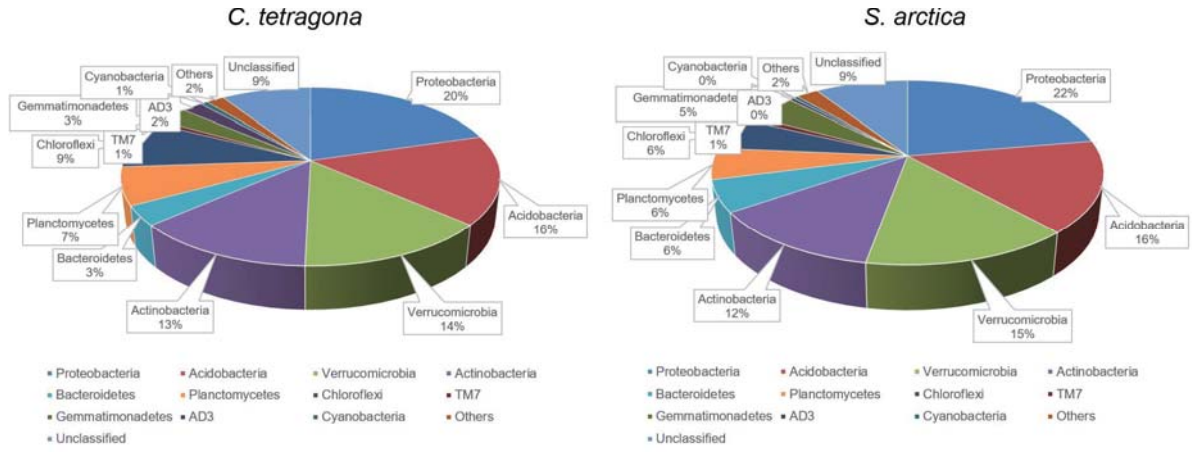


Fig. 82. Bacterial phylum distribution in two different plant species-dominated regions.

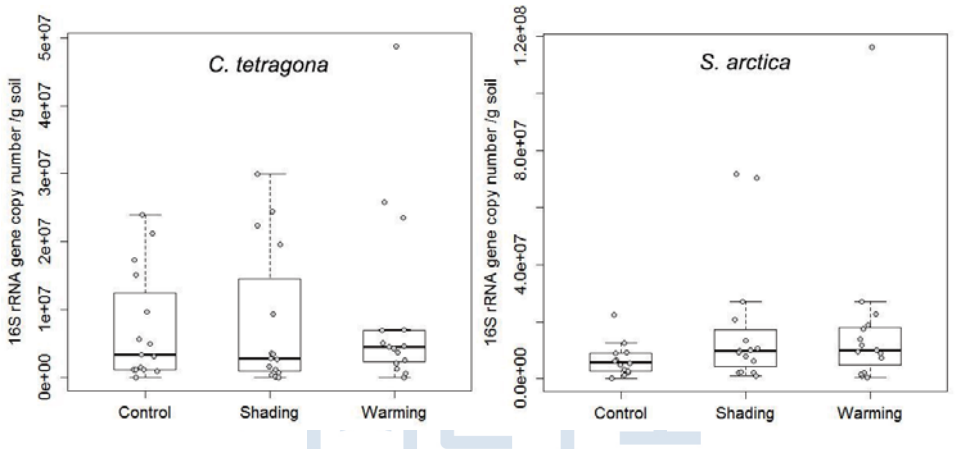


Fig. 83. Comparison of bacterial biomass between treatments using 16S rRNA gene copy number quantification.

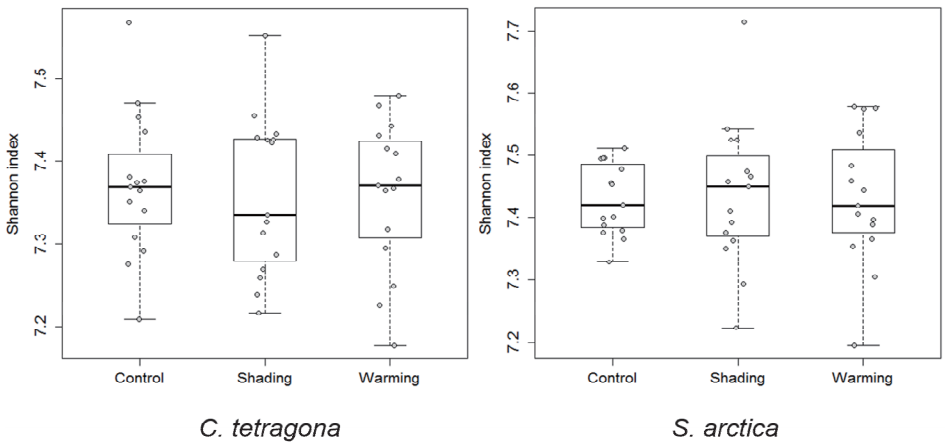


Fig. 84. Comparison of bacterial diversity between different treatments.

Phylum 레벨에서의 세균 군집구조 비교결과 식물 종과 토양 깊이에 따른 phylum 조성 차이가 나타난 반면(PERMANOVA, all P<0.001), 두 식물 종 모두에서 처리구 간 군집구조 차이는 통계적으로 유의하게 검출되지 않았다(PERMANOVA, all P>0.01) (Fig. 85). 이는 서로 다른 우점 식물 종의 존재와 토양 깊이의 차이가 세균 phylum 조성이라는 상위 레벨의 계통학적 차이를 유발할 정도의 영향을 미치는 반면, 온도상승과 shading 효과에 따른 처리구 간 차이가 세균 phylum 조성에 미치는 영향은 상대적으로 미미함을 나타낸다.

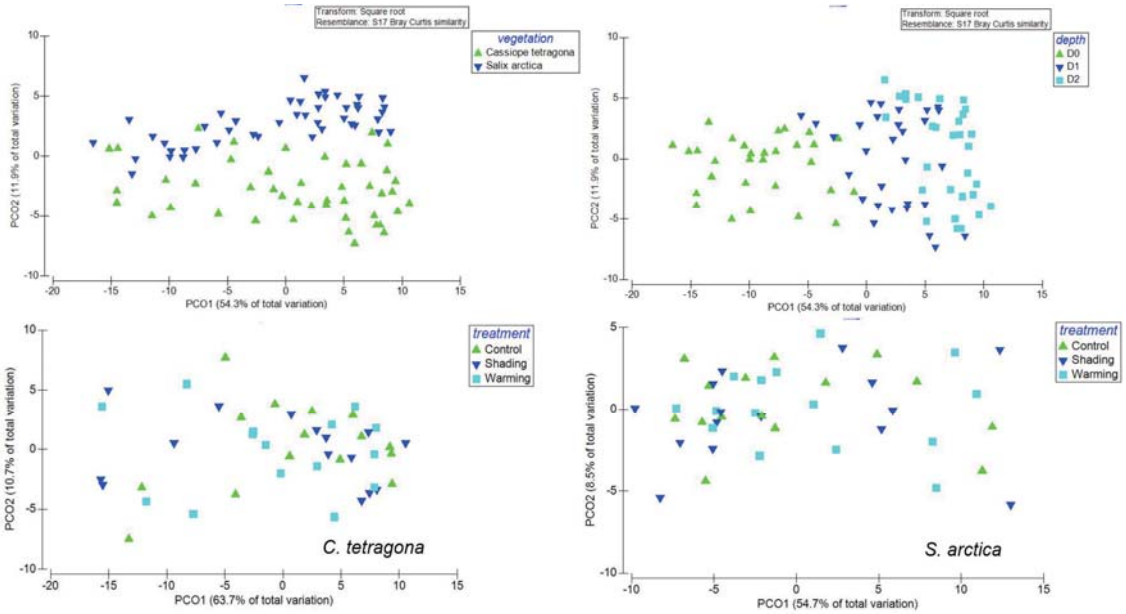


Fig. 85. Comparison of bacterial community structure at phylum level between different plant species, soil depth and treatment samples.

상위 분류군인 phylum 수준뿐만 아니라 가장 하위레벨인 세균 종, 즉 OTU 수준에서의 군집조성이 어떤 차이를 보이는지 살펴보았다. Phylum 조성 결과와 마찬가지로 식물 종과 토양 깊이에 따른 군집조성 차이는 OTU 수준에서는 더 확연이 나뉘는 특성을 보였다(PERMANOVA, P<0.001). 반면, OTU 수준에서의 군집조성 차이를 비교했음에도 처리구 간 통계적으로 유의한 군집조성 차이는 나타나지 않았다(PERMANOVA, P>0.01) (Fig. 86).

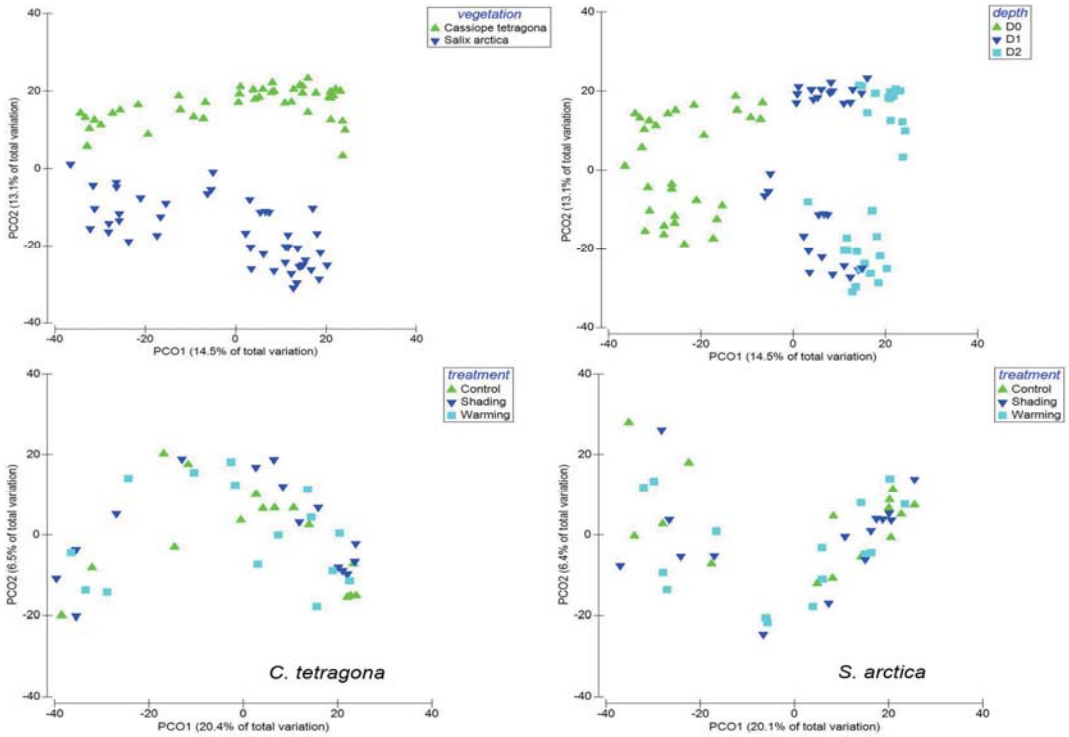


Fig. 86. Comparison of bacterial community structure at OTU level between different plant species, soil depth and treatment samples.

처리구 간 종 다양성, 군집구조의 차이가 없다는 사실은 크게 두 가지로 해석될 수 있다. 첫째, 현 실험조건에서 사용한 warming과 shading의 강도와 8-9년간의 축적된 기후변화 모사기간이 세균 종 조성의 변화를 일으킬 만큼 충분한 자극이나 교란으로 작용하지 않았을 수 있다. 둘째, 연구지역 토양 세균 종들은 기후변화 모사실험에서 주어진 교란(disturbance)에 큰 저항성(resistance)을 지니거나 기후변화 모사를 수행한 초기에 변화를 보였으나 시간이 흐름에 따라 다시 제자리로 돌아오는 생태학적 복원력(resilience)이 작용한 결과일 수 있다. 또한, 본 연구에서는 처리구 간 세균 군집구조의 차이만 비교하였을 뿐 토양 내 세균 군집의 생태학적 기능변화는 조사하지 않았으므로, 기후변화 모사에 의해 토양 미생물에 의한 생태계 기능성(토양호흡, 유기물 분해, 질산화 등) 변화가 수반되었는지 차후 조사해보아야 할 것이다.

4. 환북극 4개 지역 비교

가. 환북극 4개 지역의 유기탄소 저장량

관측망을 구축한 환북극 4개 지역에서 토양 유기탄소 저장량을 계산하였다(Table 38~41). 각 지역 간 특성의 차이로 인해 연구 목적 및 접근 방법이 달라, 유기탄소 저장량을 동일한 기준으로 비교하기 어려웠다. 그러나, 비슷한 깊이까지의 유기탄소 저장량, 가밀도, 토양 유기탄소 함량 등의 비교를 통하여 사이트 간 차이를 살펴보았다. 알래스카 카운실 지역은 1 m 깊이까지 확보된 토양 코어 시료가 많아, 토양 깊은 곳까지 저장되어있는 SOC stock을 계산할 수 있었다. 유기물 양이 많은 시료의 토양 가밀도는 0.1-0.5 g/cm^{3}로서 매우 낮았으나, 유기탄소 함량이 높아 약 1 m 깊이까지 500-650 Mg/ha의 유기탄소를 저장하고 있는 것으로 나타났다. 반면 미네랄이 많은 지점에서는 가밀도가 높아져도 유기탄소 함량이 낮아 약 200-300 Mg/ha의 유기탄소를 저장하고 있는 것으로 계산되었다.

캐나다 캠브리지 베이 지역에서는 유기물층이 5 cm 내외로 매우 얇게 분포하고, 토양 깊은 곳은 대부분 모래, 미사로 이로어져 토양 유기탄소 함량이 낮아, 약 1 m 깊이까지 계산을 하더라도 200 Mg/ha 내외로 추정되었다. 그린란드 자켄버그 지역은 표층 15 cm깊이까지 토양 시료가 채취되어, SOC stock이 매우 낮게 계산되었다. 자켄버그 채취 시료간 비교한 결과 모래 함량이 높은 *Cassiope* 사이트가 유기탄소 함량이 높아 미사와 점토 함량이 높은 *Salix* 사이트 보다 SOC stock이 두 배 정도 높게 나타났다. 그러나, 자켄버그 표층 SOC stock은 비슷한 깊이만을 고려하더라도 알래스카나 캠브리지 베이에 비해 낮게 추정되었다.

스발바르 중앙로벤빙하 후퇴지역은 자갈의 비율이 매우 높아 유기탄소 저장량을 계산할 때도 자갈 함량을 고려한 가비중 값을 이용해야 보다 정확한 값을 얻을 수 있다. 빙하후퇴지역은 30 cm 깊이까지 고려하더라도 4-6 Mg/ha로 매우 유기탄소 저장량이 낮았다. 반면 빙하에 영향 받지 않은 해안가에 가까운, 식생이 풍부한 지역의 경우 20-60 Mg/ha로 빙하후퇴지역의 5-10배 이상의 SOC를 저장하고 있었다. 이 양은 그린란드 자켄버그 *Salix* 지역의 유기탄소 저장량과 유사한 것으로 추정된다.

Table 38. Soil organic carbon (SOC) stocks from Alaskan soil samples acquired in 2012

AK 2012	Depth(cm)	Thickness (cm)	BD (g/cm3)	C (mg/g)	C stock in each depth (Mg/ha)	SOC stock (Mg/ha)
CORE 2-2	8-30 cm	22	0.22	469.5	222.75	651.12
	30-35 cm	5	0.48	93.3	22.27	
	35-40 cm	5	0.67	54.9	18.40	
	40-45 cm	5	0.71	104.4	36.90	
	45-50 cm	5	0.55	169.5	46.34	
	50-55cm	5	0.40	295.4	58.99	
	55-60 cm	5	0.24	467.5	55.93	
	60-65 cm	5	0.11	466.8	26.14	
	65-70 cm	5	0.11	468.3	24.77	
	70-75 cm	5	0.15	472.4	35.30	
	75-80 cm	5	0.16	496.1	40.55	
	80-85 cm	5	0.15	509.1	39.40	
	85-90 cm	5	0.09	503.4	23.38	
CORE 2-3	5-23 cm	18	0.19	461.6	158.43	493.31
	23-28 cm	5	0.31	327.2	51.00	
	28-33 cm	5	0.30	124.5	18.43	
	33-38 cm	5	0.30	224.9	33.19	
	38-43 cm	5	0.28	451.4	62.38	
	43-46 cm	3	0.25	472.7	35.87	
	46-51 cm	5	0.27	449.2	60.99	
	51-56 cm	5	0.13	331.0	21.82	
	56-61 cm	5	0.11	296.2	16.16	
	61-66 cm	5	Ice			
	66-69 cm	3				
	69-74 cm	5				
	74-79 cm	5				
	79-84 cm	5	0.08	448.5	17.55	
	84-89 cm	5	0.09	376.2	17.48	
CORE 3-2	5-25 cm	20	0.13	440.6	110.55	537.42
	25-30 cm	5	0.18	412.4	37.53	
	30-35 cm	5	0.71	152.1	54.27	
	35-40 cm	5	0.76	73.9	28.10	
	40-45 cm	5	0.43	197.1	42.19	
	45-66 cm	21	0.55	80.6	92.77	
	66-72.5 cm	6.5	0.72	103.1	48.18	
	72.5-77.5 cm	5	0.23	227.7	26.68	
	77.5-82.5 cm	5	0.28	291.2	40.38	
	82.5-87.5 cm	5	0.26	127.4	16.57	
	87.5-92.5 cm	5	0.65	51.2	16.67	
	92.5-99.5 cm	5	0.71	65.9	23.53	
CORE 3-3	4-21 cm	17	0.13	431.0	92.81	622.55
	21-26 cm	5	0.74	92.4	33.97	
	26-31 cm	5	0.29	221.9	32.69	
	31-36 cm	5	0.36	132.6	23.96	
	36-40 cm	4	0.29	315.4	36.71	
	40-43 cm	3	0.29	427.0	37.31	
	43-50 cm	7	0.47	264.6	87.57	
	50-55 cm	5	0.45	171.8	38.58	
	55-60 cm	5	0.21	416.6	43.88	
	60-65 cm	5	0.46	101.1	23.38	
	65-70 cm	5	0.38	141.0	26.91	
	70-75 cm	5	0.31	171.0	26.45	
	75-80 cm	5	0.39	106.8	21.06	
	80-85 cm	5	0.43	117.8	25.32	
	85-90 cm	5	0.51	109.9	28.08	
	90-95 cm	5	0.47	123.1	28.75	
	95-98 cm	3	0.50	100.9	15.12	

KOPRI 극지연구소

Table 38. Soil organic carbon (SOC) stocks from Alaskan soil samples acquired in 2012 (continued)

AK 2012	Depth(cm)	Thickness (cm)	BD (g/cm3)	C (mg/g)	C stock in each depth (Mg/ha)	SOC stock (Mg/ha)
CORE 5-2	13-20 cm	7	1.14	20.7	16.55	227.50
	20-25 cm	5	1.00	54.9	27.52	
	25-28 cm	3	1.16	32.2	11.20	
	28-33 cm	5	1.19	39.4	23.53	
	33-39 cm	6	1.30	29.0	22.54	
	39-44 cm	5	1.29	28.0	18.13	
	44-49 cm	5	1.14	31.2	17.84	
	49-54 cm	5	0.97	41.5	20.06	
	54-59 cm	5	0.90	31.4	14.15	
	59-64 cm	5	1.06	22.3	11.82	
	64-69 cm	5	1.04	22.2	11.50	
	69-74 cm	5	0.97	23.9	11.65	
	74-79 cm	5	0.96	24.1	11.57	
	79-84 cm	5	0.72	26.3	9.44	
CORE 5-3	3-20 cm	17	0.81	44.2	60.53	328.06
	20-25 cm	5	1.11	21.3	11.82	
	25-30 cm	5	0.84	18.5	7.74	
	30-35 cm	5	0.67	19.7	6.64	
	35-40 cm	5	0.43	21.4	4.62	
	40-45 cm	5	0.35	25.7	4.49	
	45-50 cm	5	0.72	21.9	7.93	
	50-55 cm	5	0.68	25.6	8.73	
	55-60 cm	5	0.66	28.0	9.29	
	60-65 cm	5	0.70	34.0	11.97	
	65-70 cm	5	0.64	44.8	14.29	
	70-73 cm	3	1.44	41.8	18.07	
	73-78 cm	5	0.79	169.9	66.93	
	78-83 cm	5	0.61	47.7	14.53	
	83-88 cm	5	0.49	122.3	30.00	
	88-93 cm	5	0.62	44.6	13.78	
	93-98 cm	5	0.67	109.5	36.70	

KOPRI 극지연구소

Table 39. Soil organic carbon (SOC) stocks from soil samples of Cambridge Bay, Canada acquired in 2012

CB 2012	Depth (cm)	Thickness (cm)	BD (g/cm^3)	C (mg/g)	C stock in each depth (Mg/ha)	SOC stock (Mg/ha)
Point 1	0-5 cm	5	0.35	297.66	52.09	232.23
	5-15 cm	10	1.14	53.27	60.73	
	15-25 cm	10	1.41	18.42	25.97	
	25-31 cm	6	1.39	18.57	15.49	
	31-50 cm	19	1.51	11.10	31.85	
	50-60cm	10	1.55	7.59	11.76	
	60-78 cm	18	1.49	12.80	34.34	
Point 2	0-2 cm	2	1.42	17.28	4.91	184.50
	2-20 cm	18	1.48	14.29	38.08	
	20-40 cm	20	1.53	9.44	28.89	
	40-60 cm	20	1.50	11.62	34.85	
	60-80 cm	20	1.56	6.31	19.68	
	80-100 cm	20	1.42	20.45	58.09	

KOPRI
극지연구소

Table 40. Soil organic carbon (SOC) stocks from soil samples of Zackenberg, Greenland acquired in 2011 and 2012

Plant	TRT	Depth	Thickness (cm)	BD (g/cm3)	C (mg/g)	C stock in each depth (Mg/ha)	SOC stock (Mg/ha)
Cassiope	C1C	0-5 cm	5	1.23	47.8	29.34	68.88
		5-10 cm	5	1.50	29.7	22.24	
		10-15 cm	5	1.57	22.1	17.30	
	C2C	0-5 cm	5	0.88	44.9	19.79	74.28
		5-10 cm	5	1.21	46.2	27.95	
		10-15 cm	5	1.47	36.1	26.54	
	C3C	0-5 cm	5	0.96	26.1	12.52	53.37
		5-10 cm	5	1.57	26.7	20.90	
		10-15 cm	5	1.44	27.7	19.94	
	C4C	0-5 cm	5	1.04	40.2	20.82	52.88
		5-10 cm	5	1.30	29.6	19.19	
		10-15 cm	5	1.26	20.4	12.87	
	C5C	0-5 cm	5	1.20	53.7	32.24	82.80
		5-10 cm	5	1.38	33.3	23.05	
		10-15 cm	5	1.36	40.4	27.51	
Salix	S1C	0-5 cm	5	0.91	30.4	13.86	34.32
		5-10 cm	5	1.07	19.2	10.31	
		10-15 cm	5	1.26	16.2	10.15	
	S2C	0-5 cm	5	1.19	18.1	10.73	34.32
		5-10 cm	5	1.22	19.7	11.96	
		10-15 cm	5	1.25	18.6	11.63	
	S3C	0-5 cm	5	1.18	14.6	8.61	27.27
		5-10 cm	5	1.29	13.9	8.98	
		10-15 cm	5	1.32	14.7	9.68	
	S4C	0-5 cm	5	1.18	20.1	11.82	34.26
		5-10 cm	5	1.19	18.0	10.70	
		10-15 cm	5	1.17	20.1	11.74	
	S5C	0-5 cm	5	1.11	23.2	12.90	37.80
		5-10 cm	5	1.22	18.6	11.36	
		10-15 cm	5	1.17	23.2	13.54	

KOPRI 극지연구소

Table 41. Soil organic carbon (SOC) stocks from soil samples of the glacier foreland and outside of moraine in Svalbard

Site	Point	Depth	Mgr-avel/Msoil	SOC (mg/g)	Estimated_BD_FE	C stock in each depth (Mg/ha)	SOC stock (Mg/ha)	BD_hybrid	C stock in each depth (Mg/ha)	SOC stock (Mg/ha)
Midtre Lovén Foreland	6	0-5 cm	1.71	1.86	1.53	1.43	7.55	0.78	0.72	3.98
		5-10 cm	1.74	1.57	1.54	1.21		0.77	0.61	
		10-20 cm	1.21	1.54	1.56	2.40		0.92	1.41	
		20-30 cm	1.78	1.61	1.56	2.51		0.77	1.24	
	298	0-5 cm	1.16	4.41	1.54	3.40	10.91	0.93	2.05	6.13
		5-10 cm	0.97	2.06	1.60	1.65		1.01	1.05	
		10-20 cm	1.60	1.79	1.61	2.88		0.82	1.47	
		20-30 cm	1.51	1.84	1.62	2.99		0.85	1.57	
Outside of Moraine	304	0-5 cm	0.05	21.44	1.27	13.62	57.25	1.24	13.28	45.83
		5-10 cm	0.09	22.15	1.28	14.18		1.23	13.57	
		10-20 cm	0.84	15.97	1.29	20.60		0.92	14.69	
		20-30 cm	1.88	5.79	1.53	8.86		0.74	4.29	
	305	0-5 cm	0.09	23.30	1.20	13.98	35.19	1.15	13.46	23.40
		5-10 cm	1.41	9.14	1.50	6.85		0.84	3.84	
		10-20 cm	2.29	6.09	1.54	9.39		0.67	4.07	
		20-30 cm	2.56	3.25	1.53	4.97		0.62	2.03	
	306	0-5 cm	0.26	61.22	0.89	27.24	91.39	0.82	25.11	64.30
		5-10 cm	0.63	26.90	0.93	12.51		0.76	10.29	
		10-20 cm	1.29	21.84	1.03	22.50		0.69	15.08	
		20-30 cm	2.34	22.76	1.28	29.13		0.61	13.82	
	307	0-5 cm	1.31	32.15	1.17	18.81	87.41	0.75	11.99	54.20
		5-10 cm	1.32	22.88	1.33	15.22		0.81	9.22	
		10-20 cm	1.10	23.74	1.30	30.86		0.85	20.20	
		20-30 cm	1.93	21.25	1.06	22.52		0.60	12.80	
	308	0-5 cm	0.95	77.50	0.93	36.04	96.72	0.70	27.14	64.02
		5-10 cm	0.82	19.47	1.41	13.73		0.99	9.62	
		10-20 cm	0.53	15.07	1.44	21.70		1.12	16.94	
		20-30 cm	2.60	16.83	1.50	25.25		0.61	10.32	
	310	0-5 cm	0.00	7.10	1.50	5.32	37.82	1.50	5.32	34.50
		5-10 cm	0.00	8.10	1.43	5.79		1.43	5.79	
		10-20 cm	0.05	12.68	1.49	18.90		1.45	18.35	
		20-30 cm	0.97	5.10	1.53	7.81		0.99	5.04	
	311	0-5 cm	0.41	33.87	1.14	19.31	105.85	0.97	16.48	60.83
		5-10 cm	1.75	26.67	1.47	19.60		0.75	10.05	
		10-20 cm	1.87	23.23	1.32	30.66		0.69	16.03	
		20-30 cm	1.93	26.29	1.38	36.28		0.69	18.27	

KOPRI 극지연구소

나. 환북극 4개 지역의 토양 및 유기탄소 특성

환북극 4개 지역의 토양 및 유기탄소 특성을 비교하여보았다(Table 42). 토양 특성 비교를 위해 채취한 시료들의 일부를 선택하였고(알래스카 2014년 채취하여 층위별로 구분한 코어 시료, 캠브리지 베이 2015년 채취한 control 지역의 유기물과 미네랄층, 자켄버그 2011, 2012년에 채취한 *Cassiope*와 *Salix* 지역의 0-5, 5-10 cm 깊이 토양, 스발바르 2014년 채취한 빙하에 영향을 받지 않아 식생이 잘 자라고 있는 3개 지점), 유기탄소 특성은 py-GC/MS로 분석하였다. 전반적으로 알래스카의 토양 pH가 3.5-5.3의 범위로 가장 낮은 값을 나타내었고, 다음으로는 자켄버그 *Cassiope* 지역, *Salix* 지역, 스발바르 지역, 캐나다 캠브리지 지역 순으로 증가하였다. 토양 유기탄소 함량은 층위, 깊이별로 큰 차이를 나타내었다. C/N ratio의 경우 알래스카 지역에서 20이상으로 가장 높게 나타났고, 스발바르와 캠브리지 베이에서 10-12 범위로 가장 낮은 값을 나타내었다.

환북극 4개 거점 토양의 유기물의 화학적 특성을 비교하기 위하여, 35개 시료(알래스카 9개, 캠브리지베이 6개, 스발바르 8개, 자켄버그 12개)를 선정하여 py-GC/MS 분석을 하였다(Table 43). AK-4는 어떠한 물질도 검출되지 않아서 결과 분석에서 제외하였다. 총 34개 시료의 분석 결과에서 157개의 물질이 검출되었으며, 주성분분석을 이용하여 각 시료의 유기물 화학적 특성을 비교하였다. 주성분 1축(12.36%)과 2축(8.51%)은 전체 축의 변수의 20.87%를 설명하고 있다. 알래스카 토양은 시료들 사이의 유기물 화학적 특성 차이가 상당이 많이 났지만 나머지 지역들은 시료들 간의 큰 차이를 볼 수 없었다(Fig. 87). 알래스카 Oe층 시료(AK_2, 5, 8)와 캠브리지베이 유기물층 시료(CB_1, 3, 5)는 주성분 2축을 기준으로 위쪽에 위치하고 있으며, 알래스카 A층 시료(AK_3, 6, 9)과 캠브리지베이 미네랄층 시료(CB_2, 4, 6)은 주성분 2축을 기준으로 아래쪽에 위치하고 있다. 하지만 알래스카 Oi층 시료(AK_1, 7)는 어떠한 경향을 볼 수 없었다. 작은 차이기는 하지만 자켄버그의 서로 다른 지역 (*Cassiope*와 *Salix)*의 유기물 특성의 경향의 차이가 나타났다. 스발바르 시료 역시 ML312(7개)가 한 곳에 모여 있으며, ML304(1개), ML311(1개)는 조금씩 차이가 나는 것을 볼 수 있었다.

Table 42. Soil physical and chemical properties in four Circum-Arctic research sites

Site	Year	Specification	Depth	pH	EC(μS/cm)	SOC(%)	TN (%)	C/N	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	NO_3^-N(μg/g)	NH_4^+N(μg/g)	InorgN(μg/g)
CB	2015	NWNP B2	Organic	7.5	284.3	35.6	2.9	12.4				0.9	10.4	11.4
			Mineral	7.8	62.1	6.3	0.6	11.2	77.6	19.5	2.9	0.2	1.6	1.8
		NWNP B3	Organic	7.3	531.6	32.3	3.0	10.7				0.2	4.9	5.2
			Mineral	7.8	68.4	4.6	0.5	9.8	71.5	23.0	5.5	0.0	1.4	1.4
		NWNP B4	Organic	7.3	372.6	24.9	2.6	9.6				0.5	3.3	3.8
			Mineral	7.9	78.3	3.9	0.4	9.8	75.5	19.9	4.6	0.1	0.4	0.5
AK	2014	Core 1-1	Oi	3.5	1860	37.0	0.6	64.5				0.5	8.1	8.6
			Oe	4.7	206.6	41.5	1.6	25.2				0.4	6.9	7.3
			A	5.3	148.3	2.6	0.1	21.6	54.0	39.4	6.6	0.2	23.2	23.4
		Core 1-2	Oi	4.0	389.3	44.1	1.1	40.3				1.2	5.8	7.0
			Oe	4.9	103.9	10.1	0.3	29.4				0.4	2.0	2.4
			A	5.0	79.4	1.8	0.1	16.7	48.7	43.4	8.0	0.4	30.5	30.9
		Core 1-3	Oi	4.1	523.6	43.7	1.0	41.8				1.1	45.0	46.1
			Oe	4.9	134.5	32.0	1.2	25.9				0.3	4.5	4.9
			A	5.2	95.3	2.4	0.1	24.4	51.2	42.0	6.8	0.2	30.3	30.4
ZK	2011	Cassiope C1	0-5 cm	4.9	61.2	4.8	0.3	15.6	67.9	21.5	10.6			
			5-10 cm	5.1	27.8	3.0	0.2	16.3	70.1	16.7	13.2			
		Cassiope C2	0-5 cm	4.9	60.5	4.5	0.3	15.0	47.6	40.0	12.4			
			5-10 cm	5.0	45.5	4.6	0.3	15.2	57.6	30.9	11.5			
		Cassiope C3	0-5 cm	5.1	60.1	2.6	0.1	18.1	72.8	17.4	9.7			
			5-10 cm	4.8	28.2	2.7	0.2	16.5	68.1	21.5	10.4			
	2012	Salix S1	0-5 cm	5.4	127.3	3.0	0.2	14.6	33.9	35.4	30.8			
			5-10 cm	5.6	55.7	1.9	0.1	15.4	33.7	37.4	28.9			
		Salix S2	0-5 cm	5.7	73.8	1.8	0.1	16.0	11.0	50.3	38.7			
			5-10 cm	5.9	39.9	2.0	0.1	16.0	9.8	51.1	39.1			
		Salix S3	0-5 cm	5.6	84.7	1.5	0.1	16.3	32.5	34.9	32.7			
			5-10 cm	6.0	45.6	1.4	0.1	17.7	28.7	37.8	33.5			
SV	2014	Sax opp	0-5 cm	6.5	99.3	7.0	0.6	12.2	39.3	52.8	7.8			
		_312	5-10 cm	7.3	41.4	4.0	0.4	10.7	41.2	53.1	5.7			
			0-5 cm	6.7	77.9	6.3	0.5	12.7						
			5-10 cm	6.9	53.9	4.6	0.4	11.7						
			0-5 cm	6.6	64.0	4.1	0.4	11.6						
			5-10 cm	6.5	41.0	4.5	0.4	11.2						
		Sax_304	0-5 cm	6.2	73.1	2.4	0.2	11.6	42.7	52.9	4.5			
		Sag niv_311	0-5 cm	8.2	77.3	2.8	0.2	12.4	20.4	72.5	7.1			

Table 43. Sample information and label for pyrolysis GC/MS analysis

Site	Sampling year	Sample name	Sample label
CB	2015	D B2 NWNP Organic1	CB_1
		D B2 NWNP Mineral	CB_2
		D B3 NWNP Organic	CB_3
		D B3 NWNP Mineral	CB_4
		D B4 NWNP Organic	CB_5
		D B4 NWNP Mineral	CB_6
AK	2014	Core 1-1 Oi	AK_1
		Core 1-1 Oe	AK_2
		Core 1-1 A1	AK_3
		Core 1-2 Oi	AK_4
		Core 1-2 Oe1	AK_5
		Core 1-2 A1	AK_6
		Core 1-3 Oi	AK_7
		Core 1-3 Oe	AK_8
		Core 1-3 2A1	AK_9
ZK	2011	Cassiope 1C D1	ZK_1
		Cassiope 1C D2	ZK_2
		Cassiope 2C D1	ZK_3
		Cassiope 2C D2	ZK_4
		Cassiope 3C D1	ZK_5
		Cassiope 3C D2	ZK_6
	2012	Salix 1C D1	ZK_7
		Salix 1C D2	ZK_8
		Salix 2C D1	ZK_9
		Salix 2C D2	ZK_10
		Salix 3C D1	ZK_11
		Salix 3C D2	ZK_12
SV	2014	ML312 C1 D1	SV_1
		ML312 C1 D2	SV_2
		ML312 C2 D1	SV_3
		ML312 C2 D2	SV_4
		ML312 C3 D1	SV_5
		ML312 C3 D2	SV_6
		ML304 C1 D1	SV_7
		ML311 C1 D1	SV_8

KOPRI 극지연구소

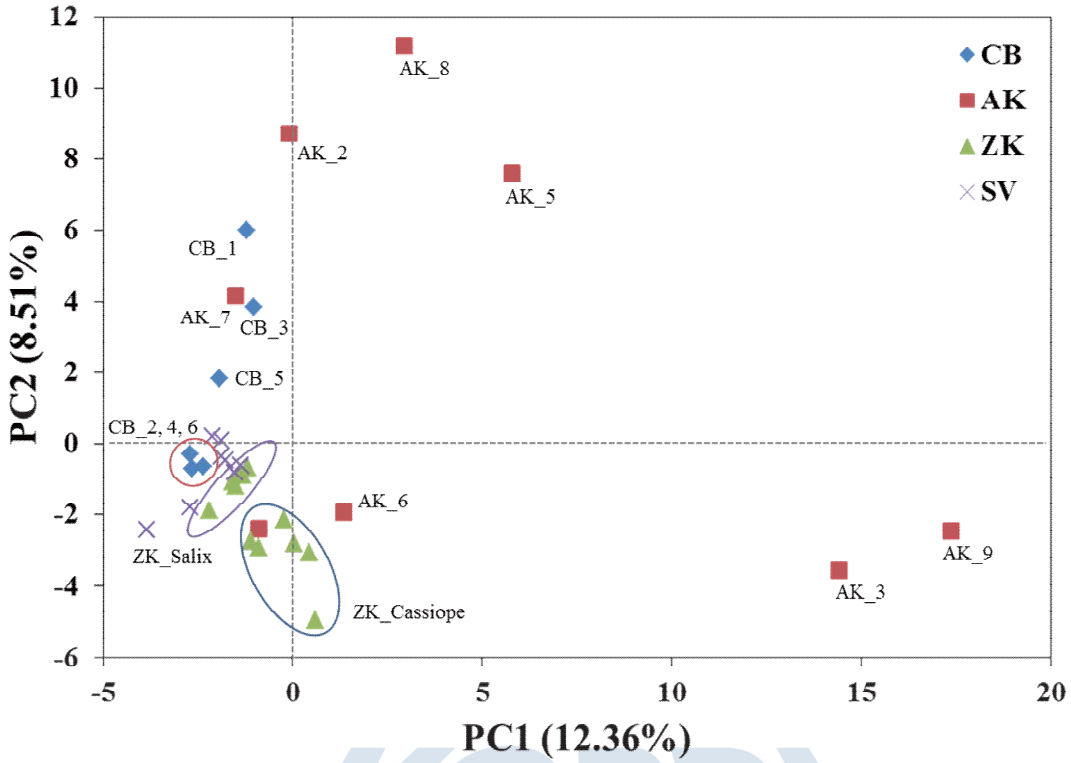


Fig. 87. A score plot from sparse PCA with pyrolysis products of soil organic matter from four Circum-Arctic research sites.

KOPRI
극지연구소

ㅇ 연구개발성과

- 논문게재 성과

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci 여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2011-0021067	201306	Isolation of facultatively anaerobic soil bacteria from Ny-lesund, Svalbard	Kim, Hye Min; Chae, Namyi; Jung, Ji Young; Lee, Yoo Kyung;	SCI	POLAR BIOLOGY	36(6)	국외	SCI 등재	2.006	아니오	50
2011-0021067	201408	Bacterial community structure and soil properties of a subarctic tundra soil in Council, Alaska	Kim, Hye Min; Jung, Ji Young; Yergeau, Etienne; Hwang, Chung Yeon; Hinzman, Larry; Nam, Sungjin; Hong, Soon Gyu; Kim, Ok-Sun; Chun, Jongsik; Lee, Yoo Kyung;	SCI	FEMS MICROBIOLOGY ECOLOGY	89(2)	국외	SCI 등재	3.875	예	100
2011-0021067	201510	Domibacillus tundrae sp nov., isolated from active layer soil of tussock tundra in Alaska, and emended description of the genus Domibacillus	Gyeong, Hye Ryeon; Baek, Kiwoon; Hwang, Chung Yeon; Park, Key Hun; Kim, Hye Min; Lee, Hong Kum; Lee, Yoo Kyung;	SCI	INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMATIC AND EVOLUTIONARY MICROBIOLOGY	65()	국외	SCI 등재	2.511	아니오	50

KOPRI 극지연구소

2011-0021067	201512	Warming and increased precipitation enhance phenol oxidase activity in soil while warming induces drought stress in vegetation of an Arctic ecosystem	Seo, Juyoung; Jang, Inyoung; Jung, Ji Young; Lee, Yoo Kyung; Kang, Hojeong;	SCI	GEODERMA	N	국외	SCI 등재	2.772	아니오	100
2011-0021067	201405	Soil organic carbon characteristic relating to geomorphology near Vestre Lovenbreen moraine in Svalbard	Jung, Ji Young; Lee, Kyoo; Lim, Hyoun Soo; Kim, Hyun-Cheol; Lee, Eun Ju; Lee, Yoo Kyung	직접 입력	Journal of Ecology and Environment	37(2)	국내	SCI 미등재		아니오	100
2011-0021067	201409	Microbial community structure of the active layer soil from resolute, Canadian High Arctic	Ok Sun Kim;Hye Min Kim;Hong Kum Lee;Yoo Kyung Lee	직접 입력	Journal of Climate Change Research	5(3)	국내	SCI 미등재		아니오	70
2011-0021067	201510	Soil development and bacterial community shifts along the chronosequence of the Midtre Lovenbreen glacier foreland in Svalbard	Hye Young Kwon, Ji Young Jung, Ok-Sun Kim, Dominique Laffly , Hyoun Soo Lim, Yoo Kyung Lee	직접 입력	Journal of Ecology and Environment	38(4)	국내	SCI 미등재		아니오	35

KOPRI 극지연구소

5. 온도 상승에 따른 동토층 토양유기물 분해효소기작 연구 (연세대학교 위탁과제)

가. 북극토양 온도상승에 따른 효소활성도

(1) 연구 배경

○ 북극권의 영구동토층은 낮은 온도로 인한 낮은 유기물 분해율로 인해 1400~1800 Pg 에 달하는 유기탄소가 저장되어 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 최근의 기온상승과 같은 기후 변화에 따라 온실기체의 발생원으로 작용할 가능성이 있어 이와 관련한 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 이에 따른 유기질소의 무기화와 기후변화에 따른 질소 침적은 미생물의 활성을 더욱 증가시켜 유기물 분해에 악순환으로 작용할 수 있다.

○ 동토층 생태계에서의 지구환경변화 효과는 주로 기온상승에 따른 동토층의 해빙 및 이에 수반되는 생태계의 생지화학적 구조 및 기능 변화에 있을 것이라고 예측되고 있다. 특히 동토층의 경우 향후 50~100년 사이에 현재 면적의 최대 25% 까지 해빙될 것이라고 예측되어, 장기적으로는 극지의 식생 구조의 변화가 뒤따를 수 있으며, 단기적으로 동토층 해빙이 유기물 분해에 관여하는 미생물 활성도 및 구조에 영향을 미쳐 기후변화에 되먹임 효과를 가져올 것으로 예상되고 있다.

○ 지구환경변화가 동토층 생태계의 토양유기물 분해와 같은 생지화학적 순환에 미치는 영향에 관한 연구는 향후 대기 중으로의 생물학적 되먹임에 있어서 매우 중요한 정보이다.

(2) 연구 내용 및 방법

(가) 연구대상지 및 새료채취 시기

○ 대상지는 캐나다 캠브리지베의 지역으로 2012년부터 기후변화모사실험이 수행되고 있다. 여기에서 open top chamber를 통한 온도 상승(W), 인위적인 강수 증가(P), 온도상승과 강수 증가(WP), 대조지(Ctrl)를 설정하여 조작실험 전후의 변화를 조사하였다.

○ 기후변화 모사실험 이전인 2012년 7월, 1년차인 2013년 8월, 3년차인 2015년 8월 기체 및 토양시료 채취를 실시하였으며 2013년 8월에는 또한 Dryas 및 Pedicularis 식물체의 어린잎을 채취하였다. 2012년 및 2013년에는 토양을 0~5cm (D1), 5~10cm (D2) 깊이로 나누어 채취하였으며, 2015년에는 organic 층과 mineral 층을 나누어 채취하였다. organic 층이 깊게 형성된 경우 5cm 깊이를 기

준으로 나누어 채취하였다.

(나) 체외효소활성도 측정

○ 각 실험구에서 채취한 토양을 acetate buffer와 혼합하여 원심분리한 뒤 상등액의 균질한 효소용액을 얻는다.

○ 가수분해효소: 형광성의 4-methylumbelliferyl 표지된 효소 각각의 기질 용액을 효소용액과 혼합하여 상온에서 1시간 배양한 뒤, 형광분석을 통해 분해된 기질의 양을 측정한다.

○ 페놀산화효소: 3,4-Dihydroxy-L-phenylalanine 용액을 효소용액과 혼합하여 상온에서 15분 배양한 뒤 흡광도 축정을 통해 분해된 기질의 양을 측정한다.

(다) 용존유기탄소(DOC) 분석

○ 각 실험구에서 채취한 토양을 물로 용출하여 상등액을 0.45㎛ 필터한 뒤, TOC-V meter를 통해 탄소의 농도를 측정하고 토양 g당 탄소 함량으로 환산한다. 위의 효소활성도와의 상관관계를 분석한다.

○ SUVA (specific UV absorbance): 용출한 DOC 용액에서 humic 물질의 비중과 상대적 분자량을 조사하기 위해 254 및 365 nm 파장에서 흡광도를 측정한다.

(라) 식물체 탄소동위원소 분석

○ 광합성기간동안 기후변화의 영향을 알기 위해 채취한 식물체의 어린잎을 60도에서 72시간 건조한 뒤 ball mill 장비를 이용하여 분쇄한다. 분쇄한 식물체의 탄소동위원소를 EA-IRMS 장비를 이용하여 분석하였다.

(마) 온실기체 발생량 분석

○ Static chamber method를 이용하여 각 실험구에 3개의 챔버를 설치하고 일정시간 간격으로 headspace의 공기를 채취하였다. 채취한 기체시료의 CO_2 및 CH_4 농도를 gas chromatograph 장비를 이용하여 분석하고 단위 면적, 시간당 기체 발생량으로 환산하였다.

(바) 메탄플럭스 관련 미생물량 분석

○ 채취한 토양에서 미생물 DNA를 추출한 뒤 qPCR을 통해 메탄생성균(mcrA) 및 메탄산화세균(pmoA)의 유전자량을 측정하였다.

(2) 연구 결과

(가) 체외효소활성도

○ 가수분해효소 활성도의 경우 조작실험의 여부보다 토양 깊이에 따른 차이를 보였다(Fig. 86, 87, 88). OTC 설치 이전인 2012년과 1년차인 2013년에는 D1에서 D2보다 높은 활성도를 보였으며, 기후변화 3년차인 2015년에도 유기물층에서 미

네랄층보다 높은 활성도를 보였다. 통계적으로 유의한 차이는 아니나 3년차인 2015년에는 온도를 상승시킨 W, WP 처리구에서 활성도가 약간 높은 경향을 보인 바 보다 장기적인 관측이 필요할 것으로 보인다.

○ 분해하기 어려운 복잡한 구조의 탄소를 분해하는 페놀산화효소의 경우 기후변화 1년차인 2013년 온도 상승에 의해 증가하여 난분해성 유기물 분해가 활성화될 것으로 보였으나, 3년차인 2015년에는 이러한 경향이 관측되지 않아 현재까지의 결과로는 단기적인 반응인 것으로 사료된다(Fig. 89).

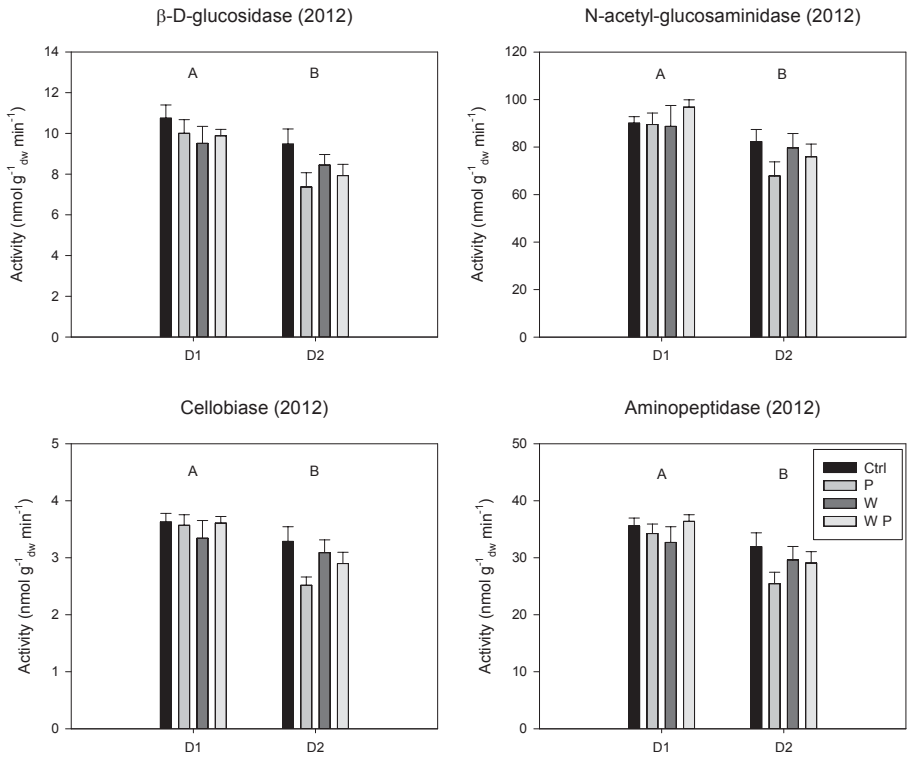


Fig. 86. Activity of hydrolases before manipulation (2012).

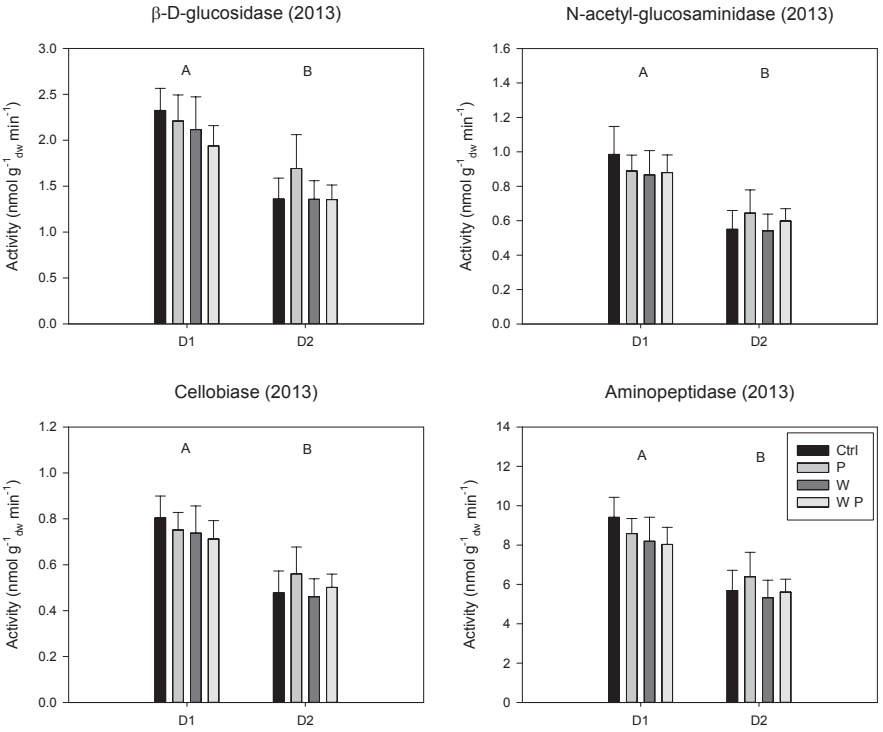


Fig. 87. Activity of hydrolases after 1 year of manipulation (2013).

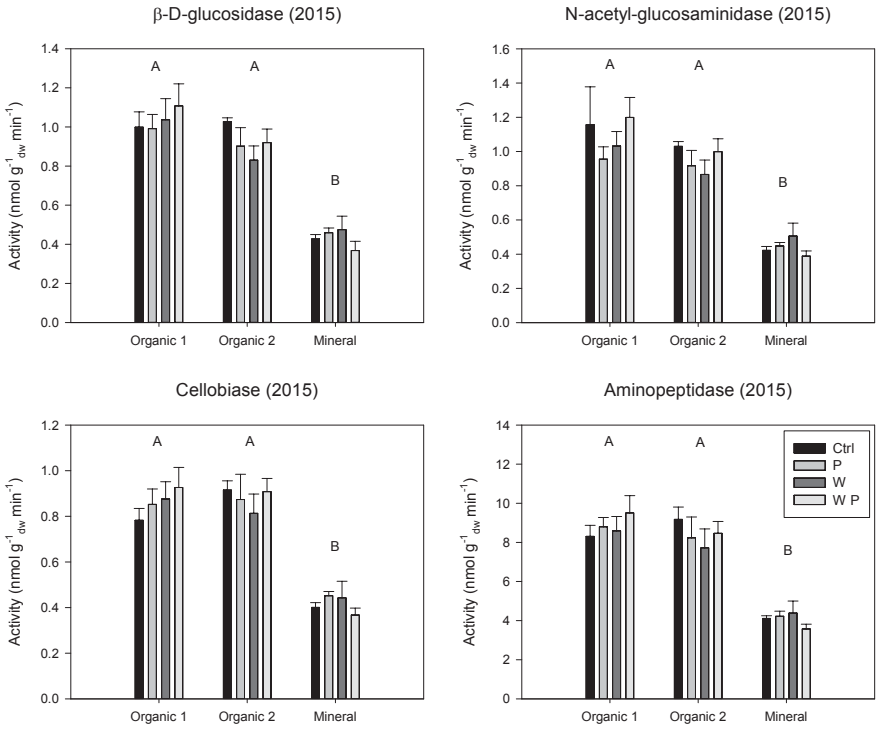


Fig. 88. Activity of hydrolases after 3 years of manipulation (2015).

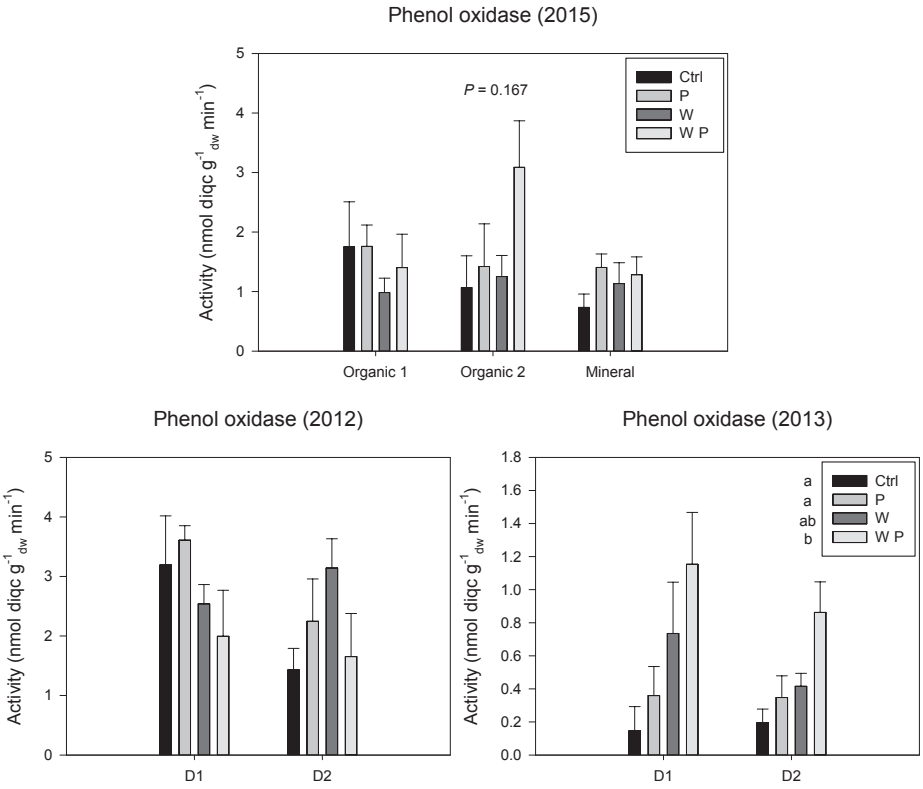


Fig. 89. Activity of phenol oxidase before and after manipulation.

극지연구소

(나) 용존유기탄소(DOC)

○ 토양 내 용존유기탄소의 함량 역시 모든 관측 시기에 깊이에 따른 차이를 보였다(Fig. 90). 2012, 2013년에 D1에서 D2보다 높은 함량을 보였으며 2015년에는 유기물 층에서 미네랄 층보다 높은 함량을 보였다. 용존유기탄소는 미생물이 이용하기 좋은 작은 단위의 유기탄소로서 유기물이 풍부한 표토층에서 그 함량이 풍부한 것으로 보인다. 기후변화 조작 처리구에 따른 유의한 차이는 없었으나, 실험의 영향을 가장 많이 받은 3년차에는 WP 처리구에서 다소 증가하는 경향을 보였다. 이는 큰 단위의 유기물이 분해된 산물로 볼 수 있어, 향후 장기적인 온도 상승에 따라 용존유기탄소 함량이 증가할 경우 유기물 분해율 증가로 해석될 수 있으며, 토양호흡에 의한 온실기체 발생 증가로 이어질 수 있다.

○ 용존유기탄소의 질적 분석인 SUVA 값 역시 대체적으로 처리구에 따른 차이를 보이지 않았으나, 미네랄 층의 humic 물질 함량의 경우 온도 상승에 따른 감소 경향을 보였다.

○ 또한 각 토양의 용존유기탄소 함량이 가수분해효소의 활성도와 유의한 상관관계를 보였다(Fig. 91).. 이는 유기물이 풍부한 층에서 효소활성도가 높은 현상 및 같은 유기물층 내에서 효소활성도가 높은 지점의 용존유기탄소 함량이 높은 현상으로 해석될 수 있다.

KOPRI 극지연구소

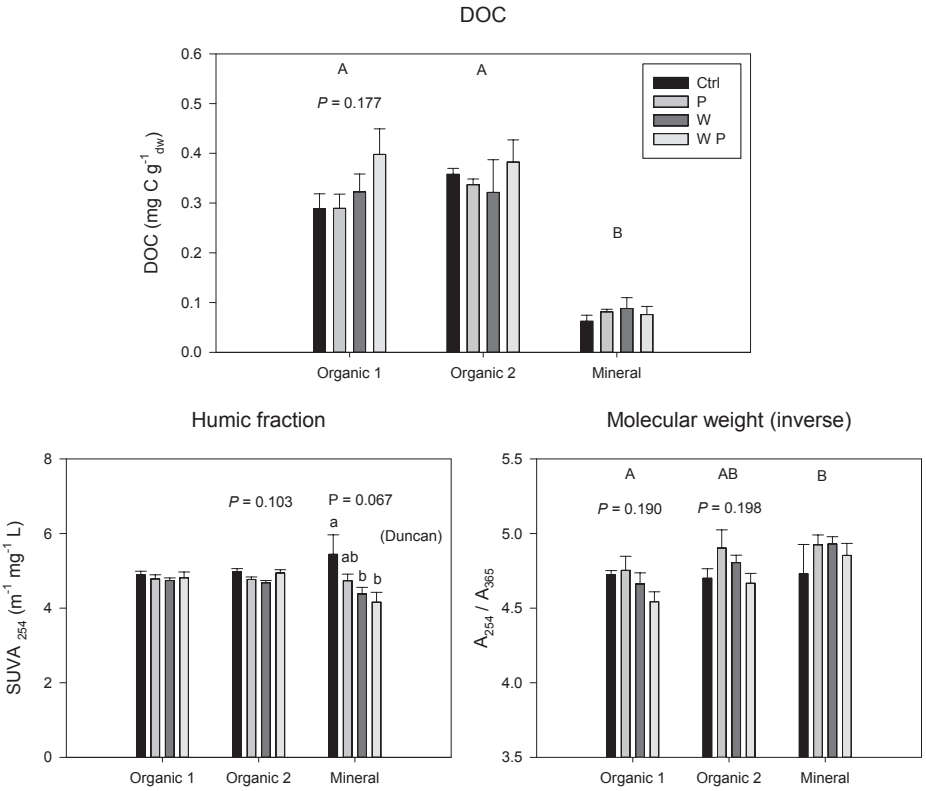


Fig. 90. Dissolved organic carbon (DOC) content and quality after 3 years of manipulation (2015).

극지연구소

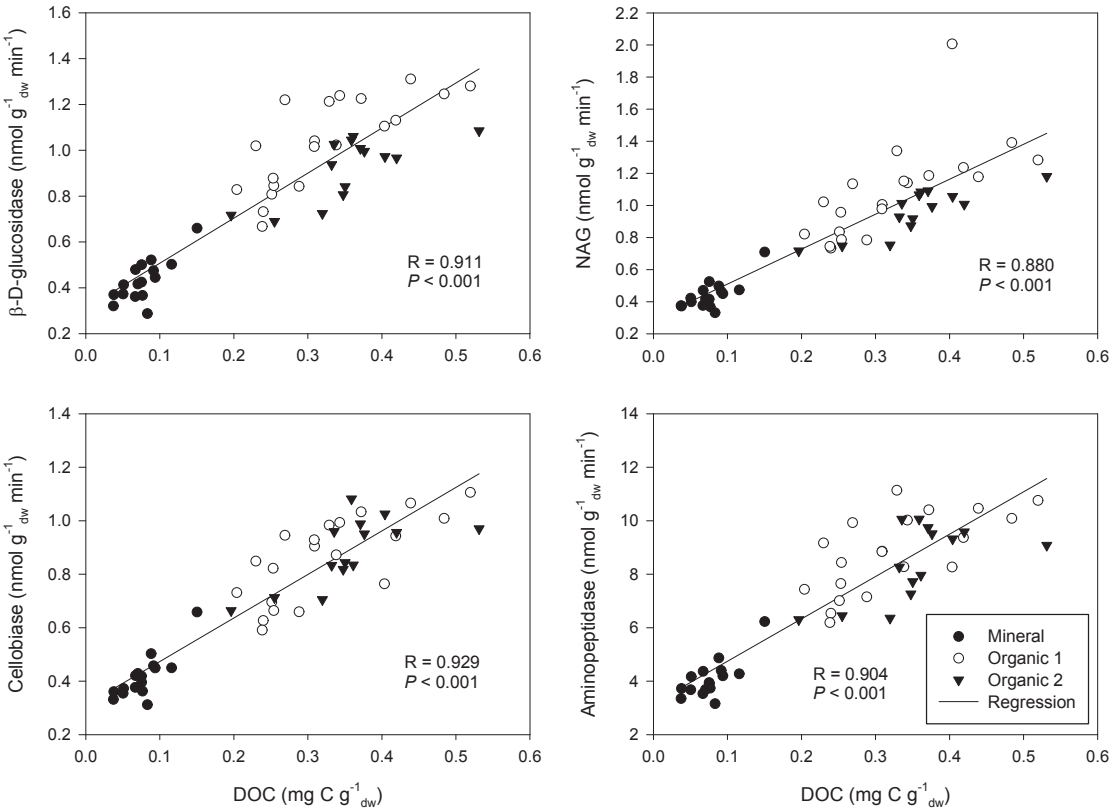


Fig. 91. Correlation between DOC and hydrolase activity after 3 years of manipulation (2015).

극지연구소

(다) 식물체 탄소동위원소

○ 기후변화 조작실험기간 동안 형성된 어린잎의 탄소동위원소 비를 분석한 결과 온도 상승 처리구에서 $\delta^{13}C$ 값이 높은 것으로 나타났다(Fig. 92). 이는 일반적으로 온도가 높고 수분이 부족한 환경에서 나타나는 경향으로서, 본 실험의 온도 상승 처리구 내의 식물 및 미생물이 온도와 증발산 증가의 영향을 받는다는 근거로 생각된다.

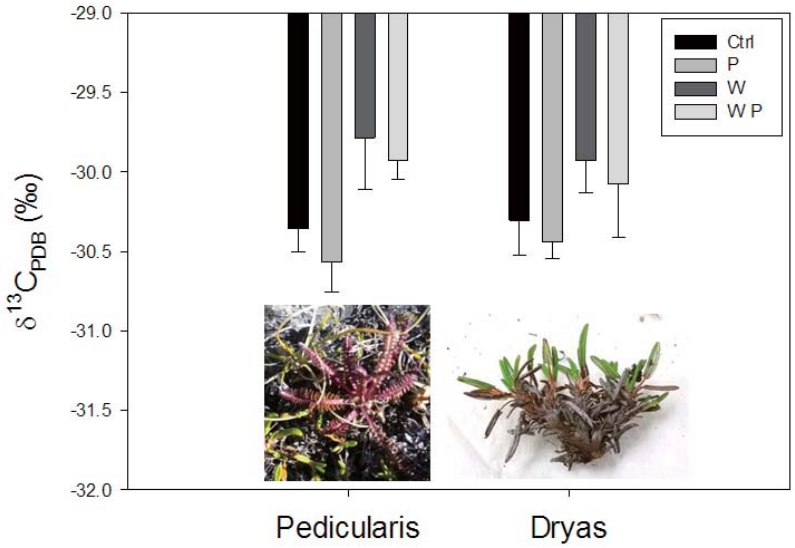


Fig. 92. Carbon stable isotope ratio of plant leaves after manipulation (2013).

(라) 온실기체 발생량

○ 각 처리구의 온실기체 발생량은 처리구에 따른 뚜렷한 경향을 나타내지 않고 조작실험 이전부터 공간적인 차이를 많이 나타냈다. 이산화탄소 플럭스의 경우 조작실험 이후 모든 처리구에서 흡수되는 경향을 보였는데(Fig. 93) 이는 연중 측정 시기에 다소 차이가 있어 나타나는 현상으로 생각된다. 이산화탄소 플럭스의 경우 식물생장상태에 따라 큰 차이를 가지게 되므로 이후 연 1회가 아닌 보다 강화된 관측이 필요하다.

○ 메탄의 경우 전체적으로 소멸되는 것으로 나타났으며, 이는 건조한 육상생태계의 일반적인 결과로 보인다(Fig. 94). 처리구 별 유의한 차이는 없었으나 조작실험 1년차인 2013년 온도 상승에 의해 단기적으로 메탄 발생이 약간 증가한 경향을 보이나, 역시 연 1회 관측의 한계로 인해 보다 면밀한 관측이 필요하다.

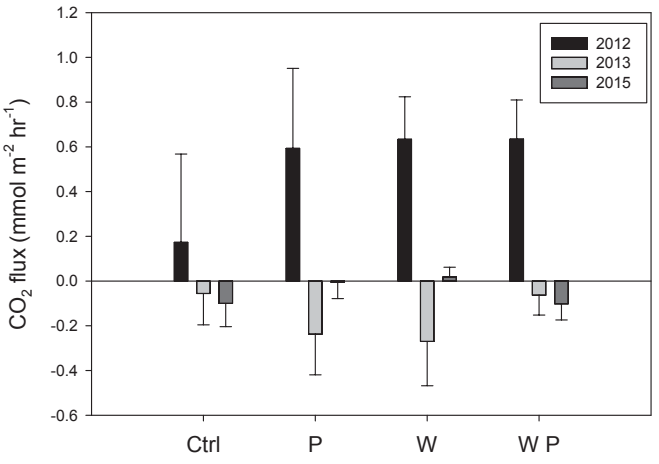


Fig. 93. CO_2 fluxes before and after manipulation.

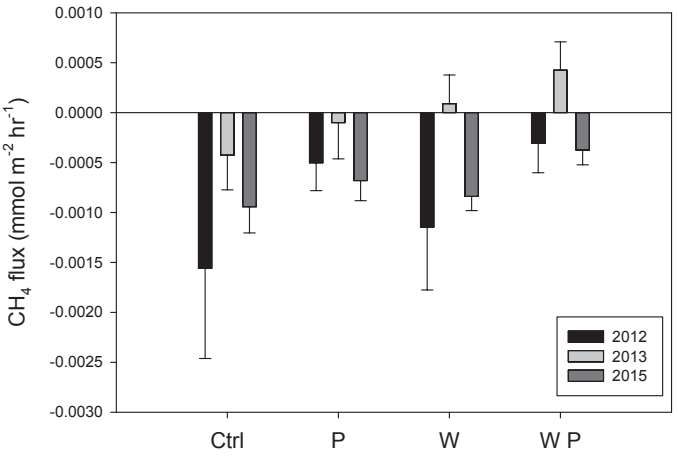


Fig. 94. CH_4 fluxes before and after manipulation.

KOPRI
극지연구소

(마) 메탄플럭스 관련 미생물량

○ 토양 내 메탄생성균 및 메탄산화세균의 풍부도는 처리구에 따른 유의한 차이를 나타내지 않았다(Fig. 95). 메탄생성균의 풍부도가 강수를 상승시킨 처리구에서 다소 높은 경향은 조작실험 이전인 2012년에도 나타나 공간적인 분포의 영향이 더 큰 것으로 보인다. 메탄산화세균의 경우 산소가 풍부한 표토층에서 더 높은 풍부도를 보였다(Fig. 96). 현재까지 메탄 관련 미생물의 풍부도와 메탄 플럭스 간의 뚜렷한 상관관계는 나타나지 않았으며 이는 식생, 기질 등의 공간적 차이에 의한 것으로 생각된다.

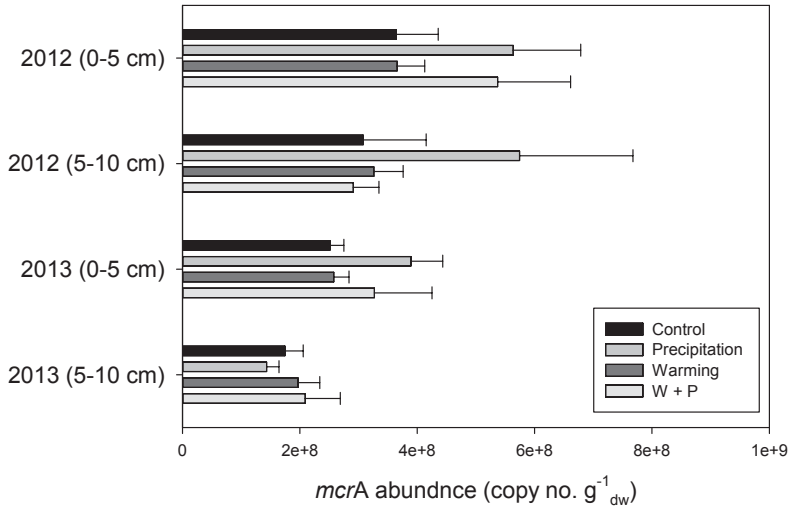


Fig. 95. Abundance of methanogen (mcrA gene) before and after manipulation.

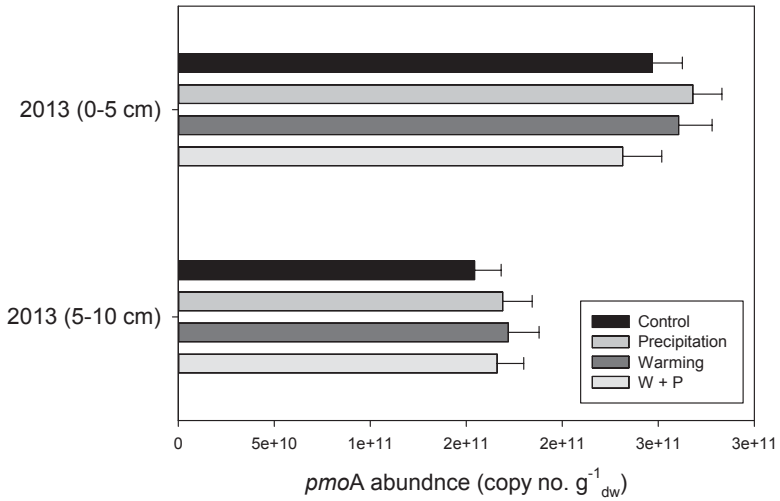


Fig. 96. Abundance of methanotroph (pmoA gene) after 1 year of manipulation.

KOPRI
극지연구소

나. 챔버 study

(1) 연구 배경

○ 거대한 면적의 동토를 포함하고 있는 북극의 생태계는 이산화탄소의 흡원이면서 메탄의 발원으로서 전 지구적인 역학에서 중요한 역할을 담당한다. 그러므로 툰드라 동토에서 온실기체 모니터링을 통한 탄소 순환의 메커니즘을 구명하는 것이 필수적이며, 이는 극지방에서의 환경 변화에 따른 육상 생태계의 반응을 이해하고 기후변화 감시에 있어서 매우 중요한 역할을 할 것이다.

○ 지표와 대기 간의 탄소 순환에 가장 크게 기여하고 있는 토양에서 대기로 방출되고 있는 이산화탄소 플럭스 관측은 접근성과 열악한 기상 조건으로 인해 대부분 단기간의 현장 관측 또는 샘플링을 통한 실내 조절 실험으로 현장에서의 연속적인 자료 확보가 매우 어려운 실정이다.

○ 현장에서 생지화학 순환을 직접 관측할 수 있는 미기상학적 방법을 이용하여, 토양에서 대기로 방출되는 이산화탄소 및 메탄의 정량화가 선행되어야하며, 이러한 결과는 생태계 순 탄소 교환량과 함께 탄소 순환을 이해하고 예측하는 모델 개발에 기여할 수 있다.

(2) 연구 내용 및 방법

(가) 연구대상지

○ 알래스카 카운슬에서 동안 20m × 30m 관측지 내에서 15개의 챔버를 설치하여 관측

(나) 온실기체 발생을 조절하는 환경 인자들의 관측

○ 각 식생별 토양온도와 광합성 유효복사량을 측정하여 토양 이산화탄소 방출량과의 관계 및 호흡량 산출을 위하여 활용

(다) 자동 챔버 시스템을 이용한 식생별 온실기체 발생량 분석

○ 각 식생별 관목와 이끼류(shrub & moss), 이끼류 (moss), tusscok 형태의 초본(tussock grass) 그리고 지의류(lichen)에서 관측

(라) 체외 활성도 분석

○ 알래스카 카운실 지역의 대표적인 식생 유형 4종(moss, lichen, shrub, tussock)에 대한 2014년과 2015년 토양의 체외효소활성도를 분석

KOPRI 극지연구소

(마) 연구 결과

- 온실기체 발생을 조절하는 환경 인자들의 관측

○ 관측된 광합성 유효 복사량은 오후 1시에서 2시 사이에 최고값을 보였고, 맑은 날의 최고값은 주로 1200-1400 $\mu mol^{-1}m^{-2}s^{-1}$이었다. 야간은 PAR이 10 $\mu mol^{-1}m^{-2}s^{-1}$ 이하가 되는 시간대를 야간으로 정의하였고, 주로 23:00 - 05:00에 해당된다(Fig. 97).

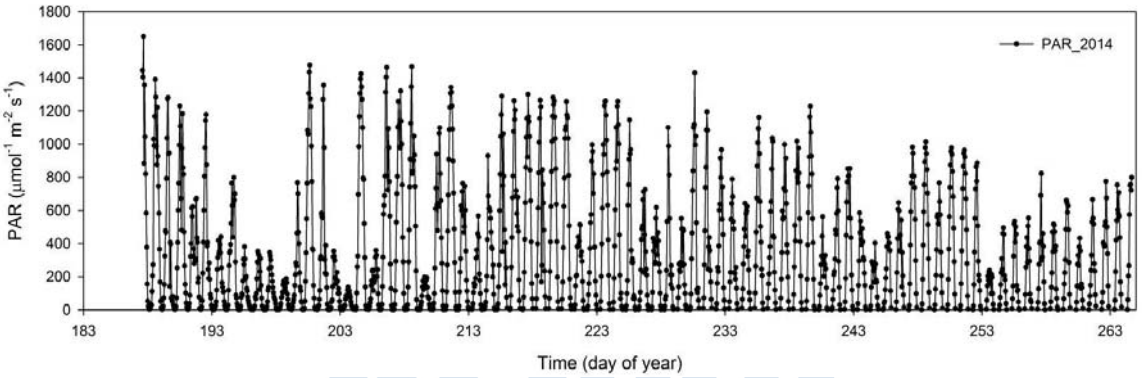


Fig. 97. Photosynthetically active radiation.

○ 식생별 깊이(0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 m)에 따른 각 식생별 온도 분포를 조사하였다. 식생 간의 비교에서는 초본(cotton grass)로 이루어져 있는 tussock에서 대체적으로 높은 온도가 관측되었으나, 0.02m 깊이의 경우는 관목과 이끼가 있는 토양에서 맑은 날 20 - 25°C까지 상승하면서 15°C 전후의 온도차를 보이며 매우 큰 폭의 일변화를 보였다. 야간 토양 온도는 관목과 이끼류에서 10°C 전후, tussock에서는 10-15°C, 지의류에서는 3-8°C를 보였고, 이 때 기온은 대체적으로 5-15°C의 범위를 보이며 모든 식생에서 거의 같은 온도 변화 패턴을 보였다(Fig. 98).

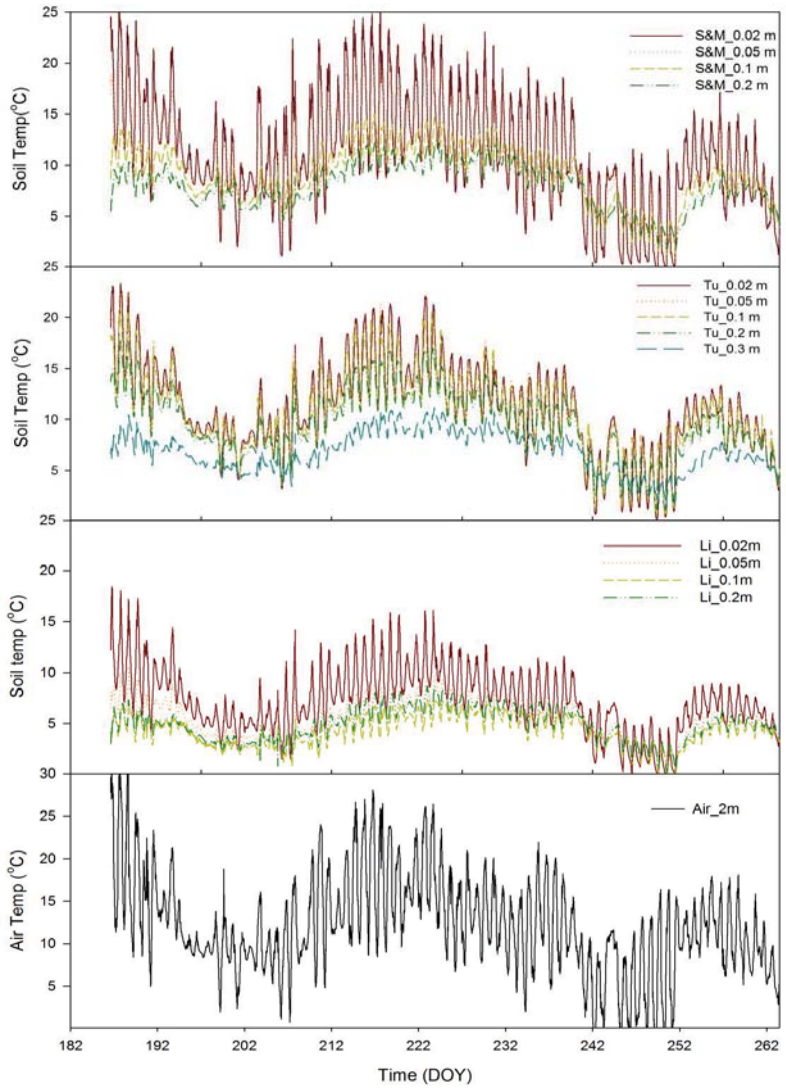


Fig. 98. Soil temperature profile at each vegetation type.

- 자동 챔버 시스템을 이용한 식생별 온실기체 발생량 분석

○ 야간 동안 관목과 이끼류(S & M)와 이끼류(Mo)의 이산화탄소 방출량은 평균적으로 0.1-0.3 mg $m^{-2}s^{-1}$으로 S & M이 약간 높은 값을 보였고, Tussock(Tu)에서는 0.1-0.2 mg $m^{-2}s^{-1}$, 지의류(Li)에서는 0 -0.15 mg $m^{-2}s^{-1}$ 였다(Fig. 99). 이산화탄소 방출량이 큰 관목과 이끼(shrub & moss) 그리고 초본 tussock의 미생물체외 활성이 이끼류와 지의류 보다 높았다(Fig. 100).

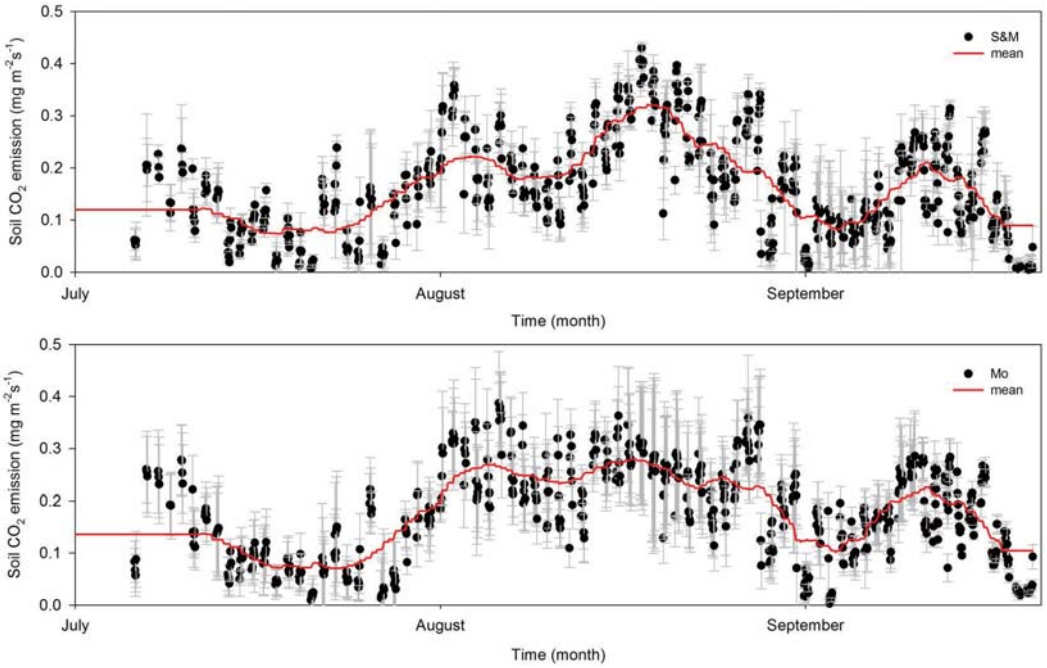


Fig. 99. Soil CO_2 flux at Shrub & Moss and Moss.

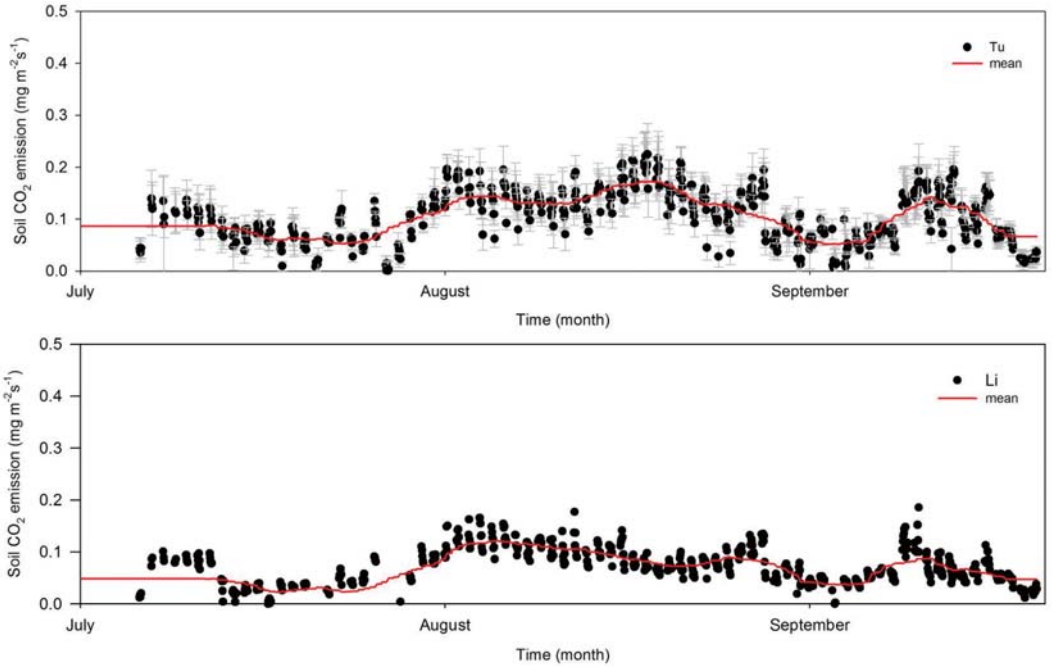


Fig. 100. Soil CO_2 flux at Tussock(Tu) and Lichen(Li).

- 체외 활성도 분석

○ 2014년과 2015년 토양의 체외효소활성도를 분석한 결과, 식생의 유형에 따라 그리고 식생에 따른 활성도에서 차이를 보였다((Fig. 101). 탄소와 관련된 Glucosidase 효소를 이용한 분석에서 2014년의 경우에는 관목과 초본에서 가장 높은 값을 보였으나, 2015년의 경우에는 2014년과 비교하여 매우 낮은 값의 활성도를 보였다. 토양 샘플이 7월에 이루어졌으므로, 이러한 결과는 2015년 적은 강수량의 영향으로 추정된다.

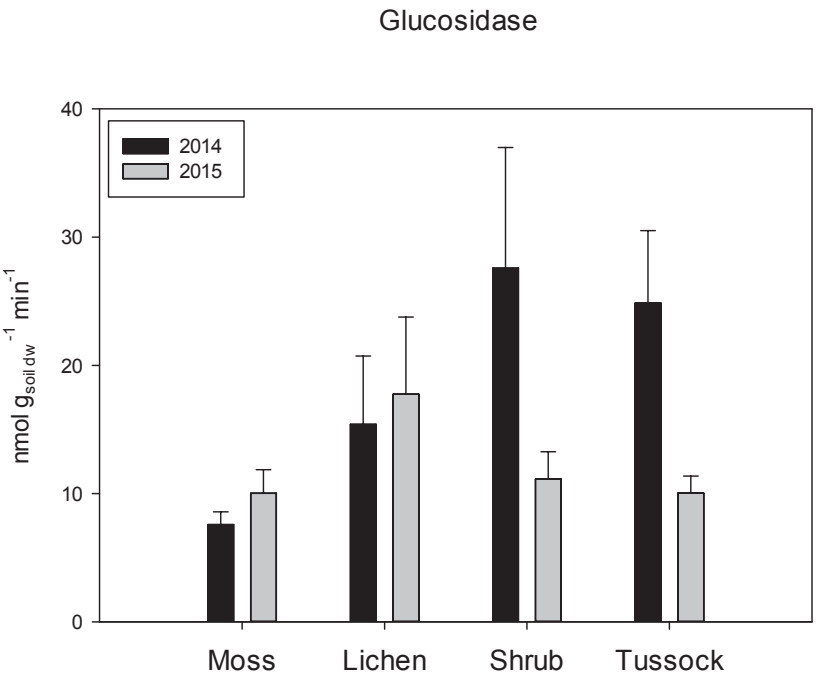


Fig. 101. Extra-cellular enzyme activities at each vegetation type in 2014 and 2015.

6. 캐나다 캠브리지 베이 기후변화 실험 모사구에서의 지방산 분석 (숭실대학교 위탁과제)

가. PLFA 라이브러리 구축을 통한 극지 미생물 분포 확인

(1) 토양 시료로부터 효율적 지방 회수 방법 적용

- 토양시료의 채취와 수급은 캠브리지 베이에 직접 방문하여 채취하려함.
- 토양 시료 내 지방산 표지 인자 분석을 위한 추출 조건 최적화/지방산 및 탄소 저장 물질 분석 기술 수립을 통한 지역·환경 간 표지 인자 비교 분석(Fig. 102).

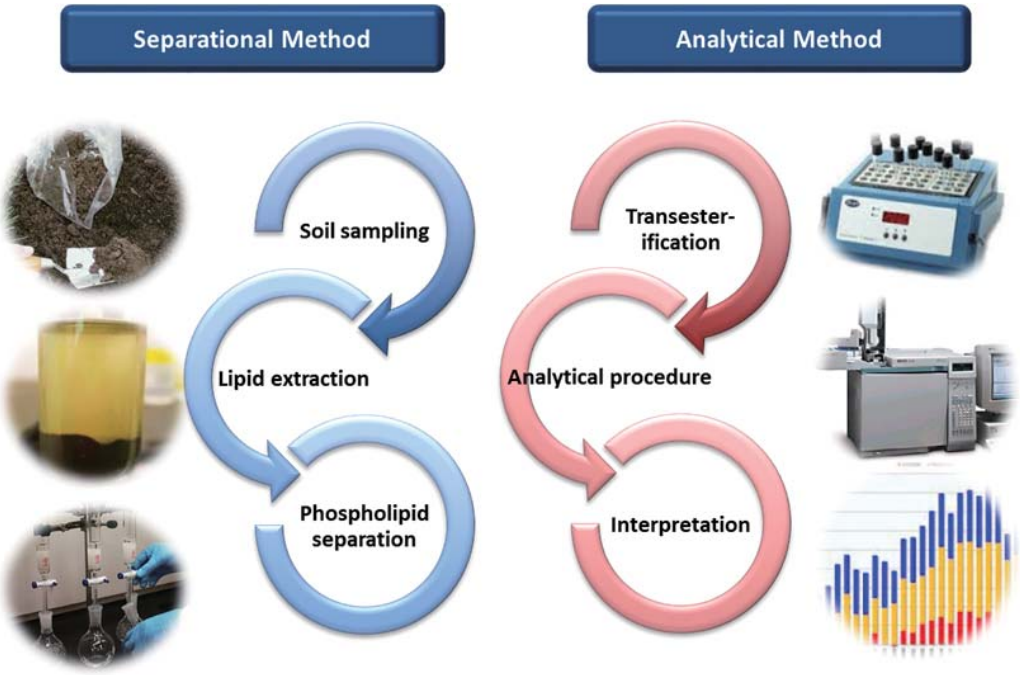


Fig. 102. Overall work-flow of soil microbiome profiling method via micribial membrane phospholipid analysis.

- 캠브리지 베이 토양으로부터 지질을 추출하는 방법을 최적화하고 지방산을 분석하여 표지인자 탐색
- 토양으로부터 지방산 추출법
  - ① 30 g 의 토양 시료를 채취하여 멸균된 튜브에 담고 여기에 메탄올 20 ml, 클로로폼 10 ml, phosphate buffer 10 ml을 차례로 넣은 후 밀봉한다.
  - ② 2분간 vortexing을 한 후 15분 동안 sonication을 하여 토양 내 lipid를

solvent로 용출시킨다.

③ 원심분리(3000 rpm, 10분)를 행하여 유리 피펫으로 상층 액을 빨아들인 후 아래층(chloroform층)을 새 용기에 옮겨 담는다.

④ 앞의 지질추출 과정을 2-4회 반복한다.

- 지질 추출법 확립 후 추출된 지질을 silicic aicd 컬럼크로마토그래피를 이용하여 3가지 class(Neutral lipid, glycolipid and phospholipid)로 분리(Fig. 103, 104)
- 분리된 지질 중 미생물 군집분포를 분석하는 데에는 미생물 막의 구성성분인 phospholipid를 이용함

KOPRI
극지연구소

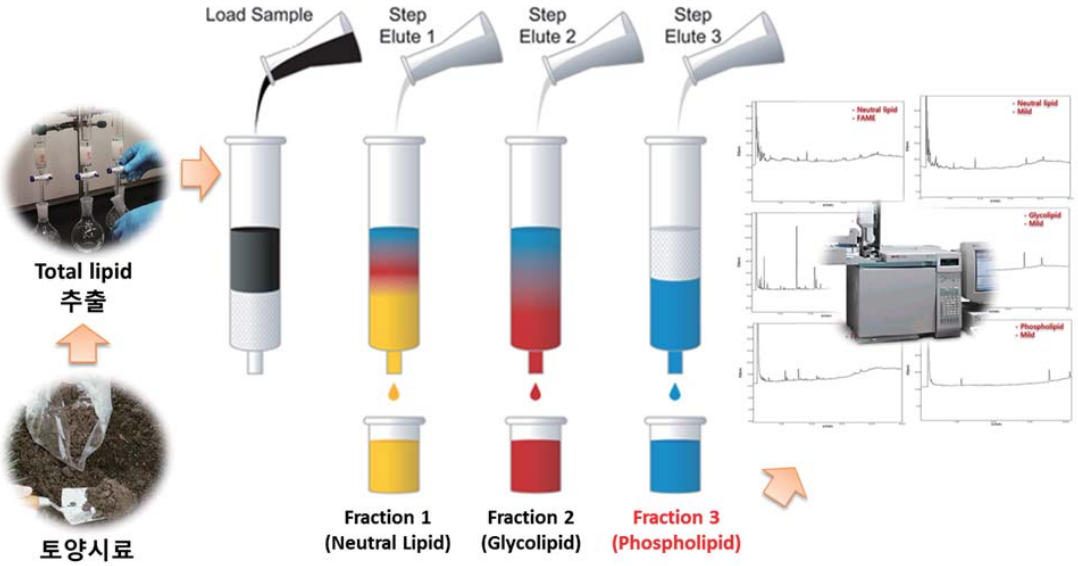


Fig. 103. The separation process of phospholipids from soil samples using cartridge-based column chromatography.

Fig. 104. The picture of cartridge-based column chromatography.

- 분리된 3종의 지질 (Neutral lipid, glycolipid and phospholipid)을 strong 또는 mild derivatization 수행
- GC-FID기반의 지방산 측정을 위하여 저온(37 ℃), 알칼리 조건인 mild reaction을 적용함
- 분석 method 최적화 결과

◆ Minimize sample size : 30 → 10 g
◆ Lipid extraction volume : 50 → 25 ml
◆ Column chromatography diameter : 2 → 1.1 cm
◆ 동시 분석가능한 최대 갯수 : 6 columns
◆ Save process time and solvent amount

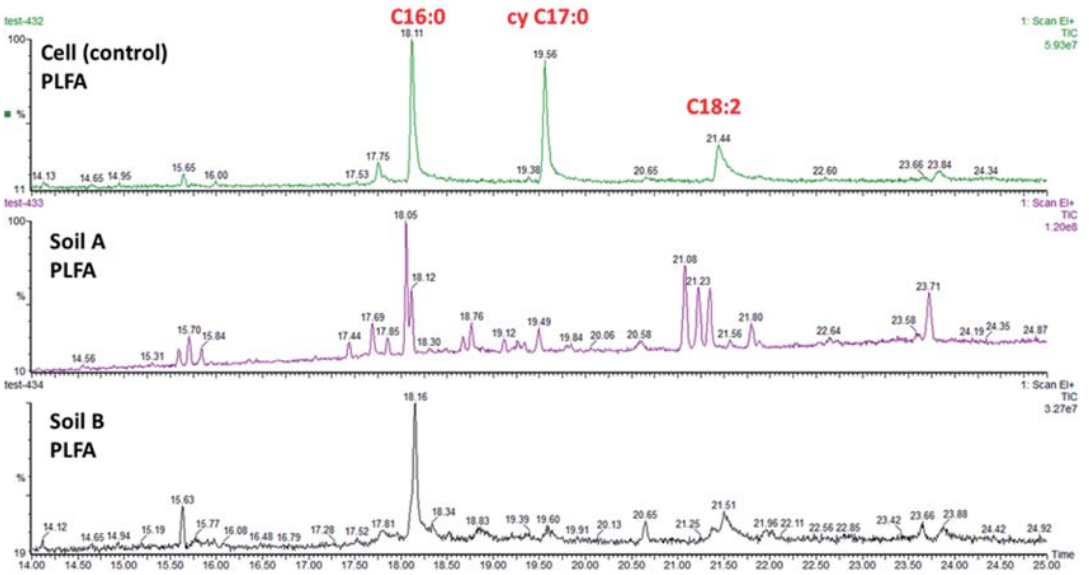
- Internal standard(IS)를 사용한 정량분석 method

◆ C21:0(internal standard) spiking 후 TIC에서 일치하는 RT 적분값으로 정량
◆ C8과 C21의 같은 농도에 대한 관계식을 구하고, C21을 1로 했을 때 해당되는 상수값을 구함
◆ 회수율 변환상수, FMAE-FA 변환상수를 반영함

(2) PLFA 지방산 라이브러리 구축

- 토양 내 PLFA의 정성 및 정량 분석을 위하여 FAME standard(BAME mix, Supelco 47080)의 측정 및 standard calibration하여 지방산 분석법 적용(Fig. 105)
- Internal standard (C21:0, Methyl heneicosanoate)를 이용하여 GC-MS의 적분 결과로부터 PLFA를 정량하는 방법을 구축
- Total bacterial PLFA는 비슷하지만 토양 A와 B의 미생물 군집 비교 결과 토양 B에서 Gram(-)균이 상대적으로 높은 비율을 차지(Fig. 106)

KOPRI 극지연구소



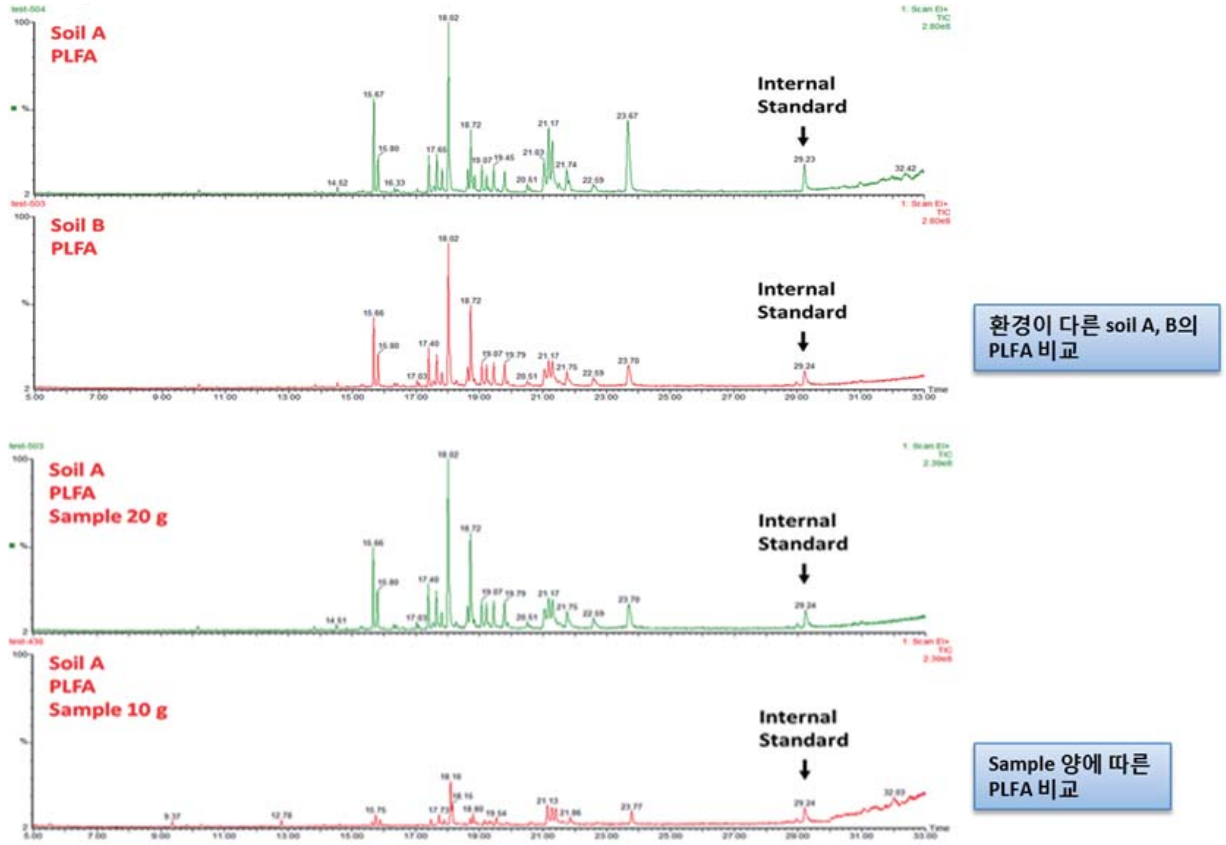
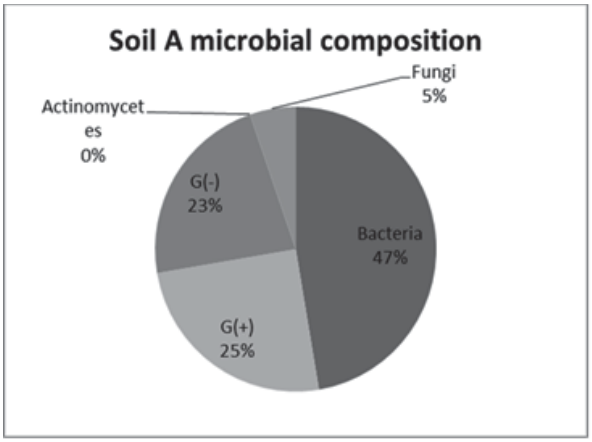
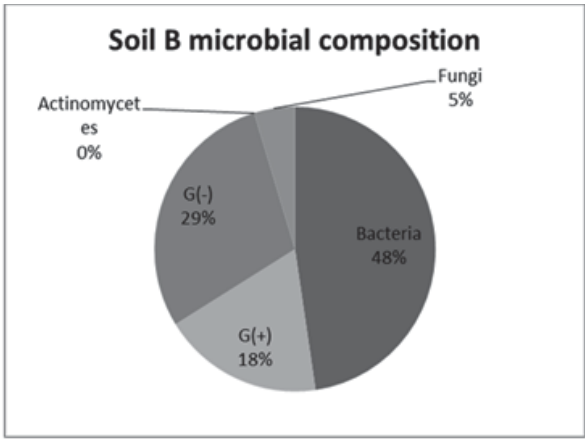
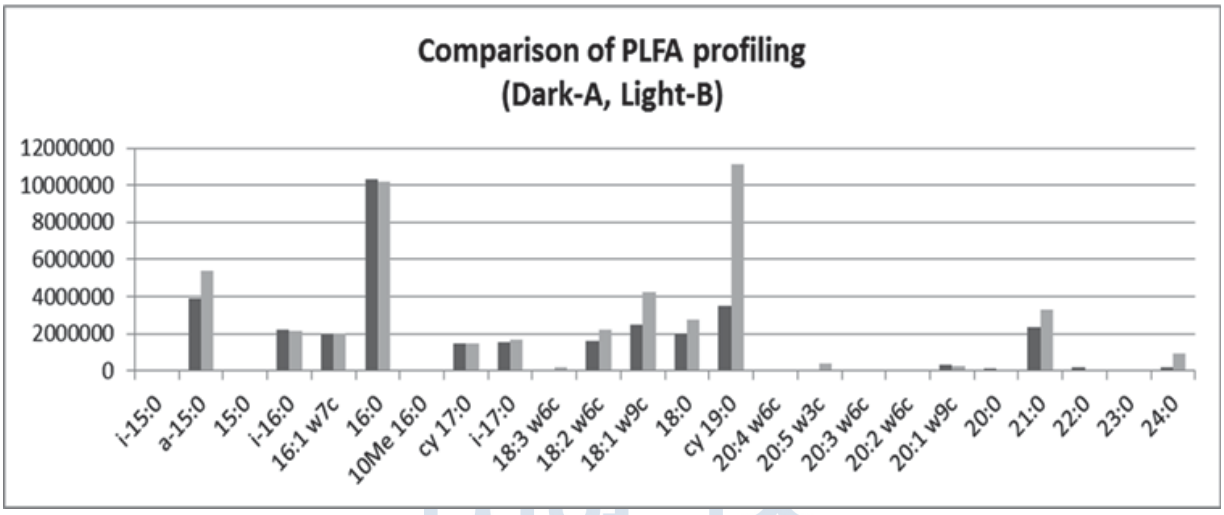


Fig. 105. Qualitative and quantitative analysis of PLFA using GC-MS. A: soil sample from near Ilgam pond B: soil sample from near engineering building.

국지연구소







국시연구소

Fig. 106. Microbiome comparison and total PLFA profiles between soil A and B.

Microbial group	Specific PLFA markers	PLFA group
Bacteria	15:0, i15:0, a15:0, i16:0, i17:0, a17:0, i18:0, cy17:0, cy19:0, 16:1w7, 17:1w9, 18:1w7	Multiple groups
Gram(+)	i14:0, i15:0, a15:0, i16:0, i17:0, a17:0, i18:0	Branched
Gram(-)	cy17:0, cy19:0, 16:1w7, 17:1w9, 18:1w7	Cyclopropyl, mono
Fungi	18:2w6,9c, 18:3w6, 18:3w3	Polyunsaturated
Actinomyetes	10Me16:0, 10Me17:0, 10Me18:0, i17:1w7c	10-Methyl branched
Eukaryote	16:0, 16:1w9c, 16:1w5c, 18:1w9c, 18:1w7c, 18:1w7t, 20:1, 21:0	
Methanobacter	16:1w8c, 18:1w8	
Anaerobe	14:1w7cDMA, i15:0DMA, 16:1w7cDMA, 18:0DMA, 18:2DMA, 19:0cy9,10DMA	
Protozoa	20:2w6, 20:3w6, 20:4w6	Polyunsaturated
Plants	18:1w9c, 18:1w11c, 18:3w3, 20:5w3, 20:0, 21:0, 22:0, 23:0, 24:0, 25:0, 26:0	Long saturated, straight

Fig. 107. PLFA markers according to microbial groups.

KOPRI 극지연구소

- 이전 연구와 문헌을 참고하여 현재까지 알려진 PLFA marker를 microbial group별로 분류하여 library 구축(Fig. 107)
- 총 25종의 PLFA 마커 분석을 통해 미생물 군집에 대한 group분포 파악

Group	Concentration (mg/kg soil)			
Microbial PLFA components	B1 WP organic2	B1 WP mineral	B1 NWP organic2	B1 NWP mineral
Total (mg/kg soil)	5.26	4.26	5.19	3.26
Bacteria	2.65	1.95	2.72	1.59
G+	0.34	0.35	0.34	0.24
G-	0.61	0.45	0.71	0.41
Fungi	0.00	0.00	0.00	0.00
Eukaryote	2.31	2.09	2.08	1.47
Protozoa	0.00	0.00	0.00	0.00
Actinomycete	0.30	0.23	0.38	0.20
Fungi/Bacteria	0.00	0.00	0.00	0.00
Microbial stress indicator				
Sat/Monosat	0.74	0.87	0.87	0.94
Iso/Anteiso	1.60	1.72	1.70	1.76

Group	Concentration (mg/kg soil)			
Microbial PLFA components	B2 NWP organic2	B2 NWP mineral	B2 NWNP organic2	B2 NWNP mineral
Total (mg/kg soil)	3.92	3.52	3.77	5.86
Bacteria	2.13	1.98	2.05	3.02
G+	0.24	0.22	0.25	0.45
G-	0.51	0.45	0.50	0.69
Fungi	0.00	0.00	0.00	0.00
Eukaryote	1.52	1.33	1.44	2.48
Protozoa	0.00	0.00	0.00	0.00
Actinomycete	0.27	0.21	0.28	0.36
Fungi/Bacteria	0.00	0.00	0.00	0.00
Microbial stress indicator				
Sat/Monosat	0.80	0.77	0.86	0.81
Iso/Anteiso	1.73	1.38	1.55	1.65

극지연구소

Fig. 108. Microbiome profile and stress degree of Alaska soil sample by PFLA analysis.

- 토양에 대한 PLFA의 정량 결과를 바탕으로 미생물 군집에 대한 예측방법을 확립함
- 또한 토양미생물에 대한 스트레스영향도 지방산 분석을 통해 유추 가능. 토양 샘플에 온도 혹은 기질 농도가 달라질 때 토양미생물의 스트레스에 따라 변화하는 지방산(Sat/Monosat, Iso/Anteiso)을 추적 분석함(Fig. 108)

지방산 지표들	지표의 수치	해석
Total PLFA	높을수록	살아 있는 생물량이 높음.
Fungi/Bacteria	> 1	토양유기물 함량이 높음.
Monounsaturated/Saturated	> 1	호기성과 높은 기질 농도 조건을 가짐.
Trans/Cis-monoenoic	> 1	Toxic한 물질에 노출되었음.
cy19:0/18:1ω7c cy17:0/16:1ω7c	> 1	불량한 환경적 특성, stress와 toxicity가 증가함, 양분 결핍, 낮은 pH, 중금속 오염, 제초제, 경운, 고온 등의 환경지표.
Anteiso/Iso	> 1	저온 스트레스에 노출되었음.
Gram (+)/Gram (-)	> 1	탄소영양원이 증가하고 있음, 온도가 낮아짐.

Fig. 109. The chemical and biological conditions of soil samples according to microbiome profiles.

- 캠브리지 베이로부터 얻은 토양 샘플 2종을 분석하여 PLFA 분석을 수행하며, 모든 분석 후에는 PCA(Principle component analysis)법을 통해 데이터 해석(Fig. 109)

나. 극지미생물 지질대사체 lipid A의 화학적 구조 규명

(1) 극지 토양유래 미생물의 안전성 평가기술 개발

- 극지 토양내에 존재하는 미확인 미생물들에 대하여 안정성 평가가 필요함
- 특히 지질대사체인 Gram(-)균에 존재하는 내독소(Endotoxin; LPS)는 동식물에 독성을 띄는 주요 인자로서 그 구조를 규명하여 극지 토양내에서 새로 발견되는 미생물들에 대한 독성평가 방법으로 적용하고자 함(Fig. 110)

KOPRI 극지연구소

Sequence ID: lcl|Query_44971 Length: 840 Number of Matches: 1

Range 1: 2 to 820 Graphics ▼ Next Match ▲ Previous Match

Score	Expect	Identities	Gaps	Strand
1343 bits(727)	0.0	790/821(96%)	2/821(0%)	Plus/Plus

```
Query  20   ATGCTAGTCGAGCGGCAGCACGGGTACTTGTACCTGGTGGCGAGCGGCGGACGGGTGAGT  79
            ||||  ||||||||||  ||  |  |||  ||||  ||||   |  | ||||||||||||||||||
Sbjct  2    ATGCAAGTCGAGCGGTAG-AGAGGTGCTTGCACCT-CTTGAGAGCGGCGGACGGGTGAGT  59

Query  80   AATGCCTAGGAATCTGCCTGGTAGTGGGGGATAACGCTCGGAAACGGACGCTAATACCGC  139
            ||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
Sbjct  60   AATGCCTAGGAATCTGCCTGGTAGTGGGGGATAACGCTCGGAAACGGACGCTAATACCGC  119

Query  140  ATACGTCCTACGGGAGAAAGCAGGGGACCTTCGGGCCTTGCGCTATCAGATGAGCCTAGG  199
            ||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
Sbjct  120  ATACGTCCTACGGGAGAAAGCAGGGGACCTTCGGGCCTTGCGCTATCAGATGAGCCTAGG  179

Query  200  TCGGATTAGCTAGTTGGTGAGGTAATGGCTCACCAAGGCGACGATCCGTAACTGGTCTGA  259
            ||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
Sbjct  180  TCGGATTAGCTAGTTGGTGAGGTAATGGCTCACCAAGGCGACGATCCGTAACTGGTCTGA  239

Query  260  GAGGATGATCAGTCACACTGGAACTGAGACACGGTCCAGACTCCTACGGGAGGCAGCAGT  319
            ||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||||
Sbjct  240  GAGGATGATCAGTCACACTGGAACTGAGACACGGTCCAGACTCCTACGGGAGGCAGCAGT  299
```

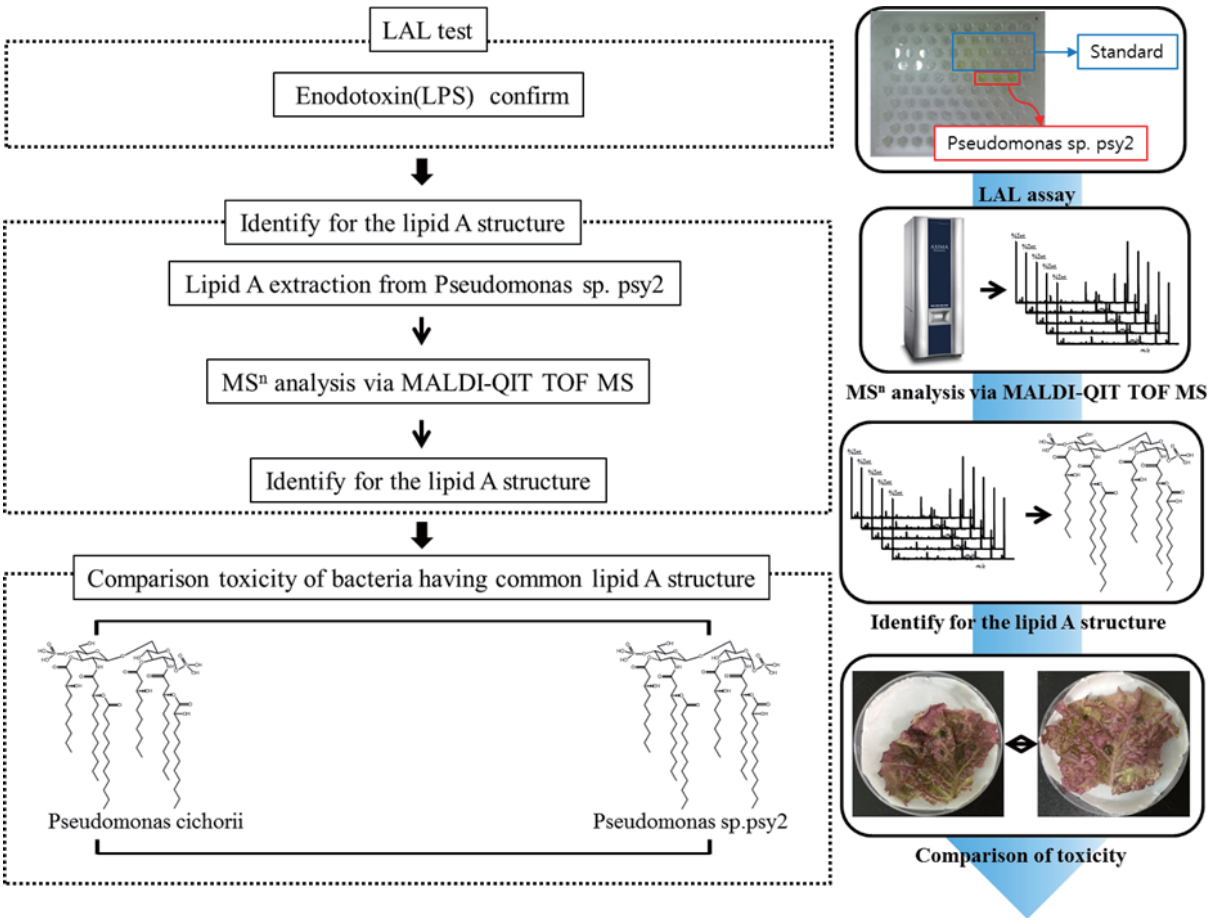
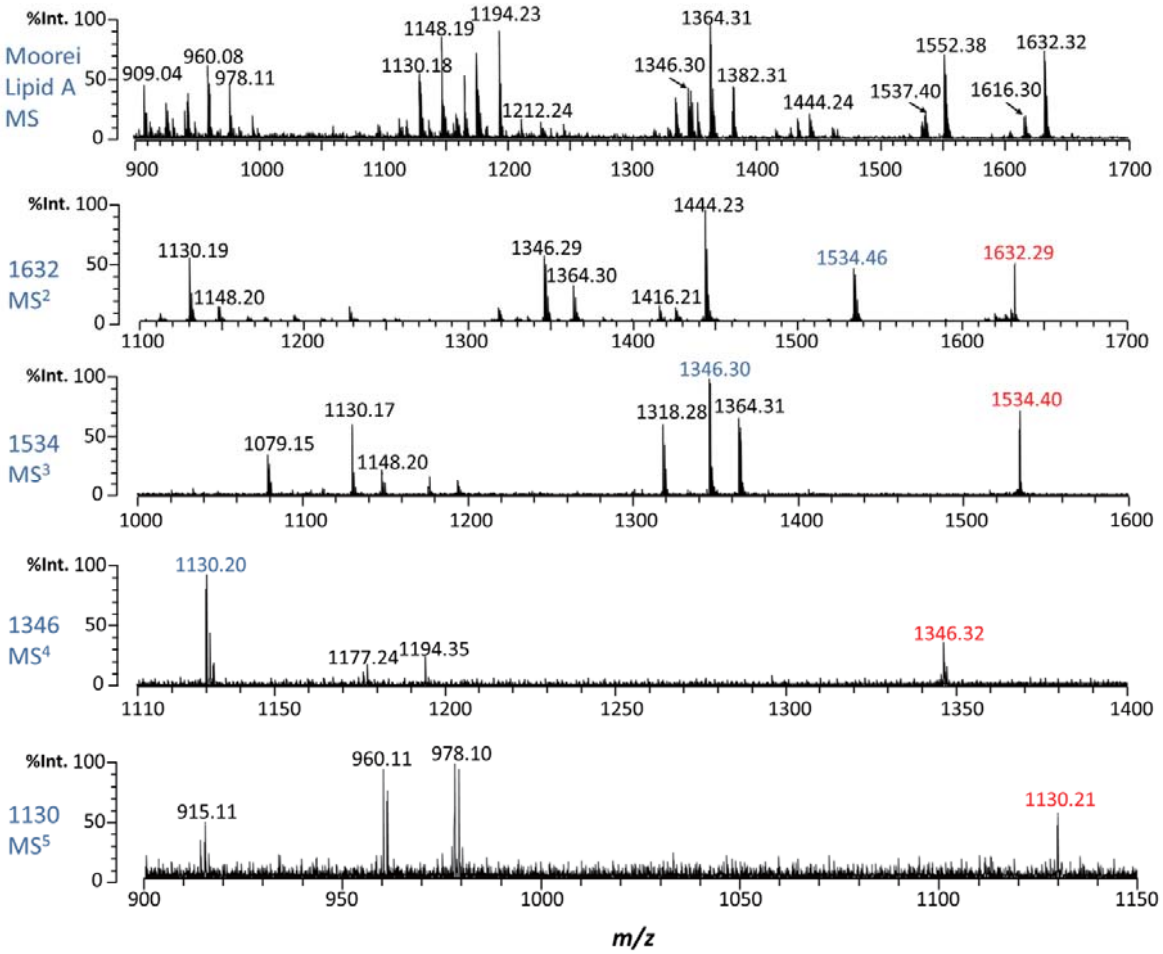


Fig. 110. Overall work-flow of the biological safety evaluation of polar microbe.

- 극지토양샘플 상층액을 배양하여 배양된 콜로니들을 16s RNA sequencing한 결과 pseudomonas속과 96% 일치하는 새로운 종의 미생물을 발견
- LPS(Lipopolysaccharide) 확인을 위해 LAL(Limulus amebocyte lysate) assay를 수행한 결과 bacteria 내에 LPS가 존재함을 확인
- LPS로부터 가수분해를 통해 Lipid A를 추출하고 MALDI-QIT TOF MS 기반의 질량분석을 수행함
- MALDI-QIT TOF MS는 이온화 한 물질을 다중으로 반복하여 구 구조를 조각낼 수 있는 질량분석기로써 전하대비 질량 수치만으로도 본 구조 예측을 가능하게 함



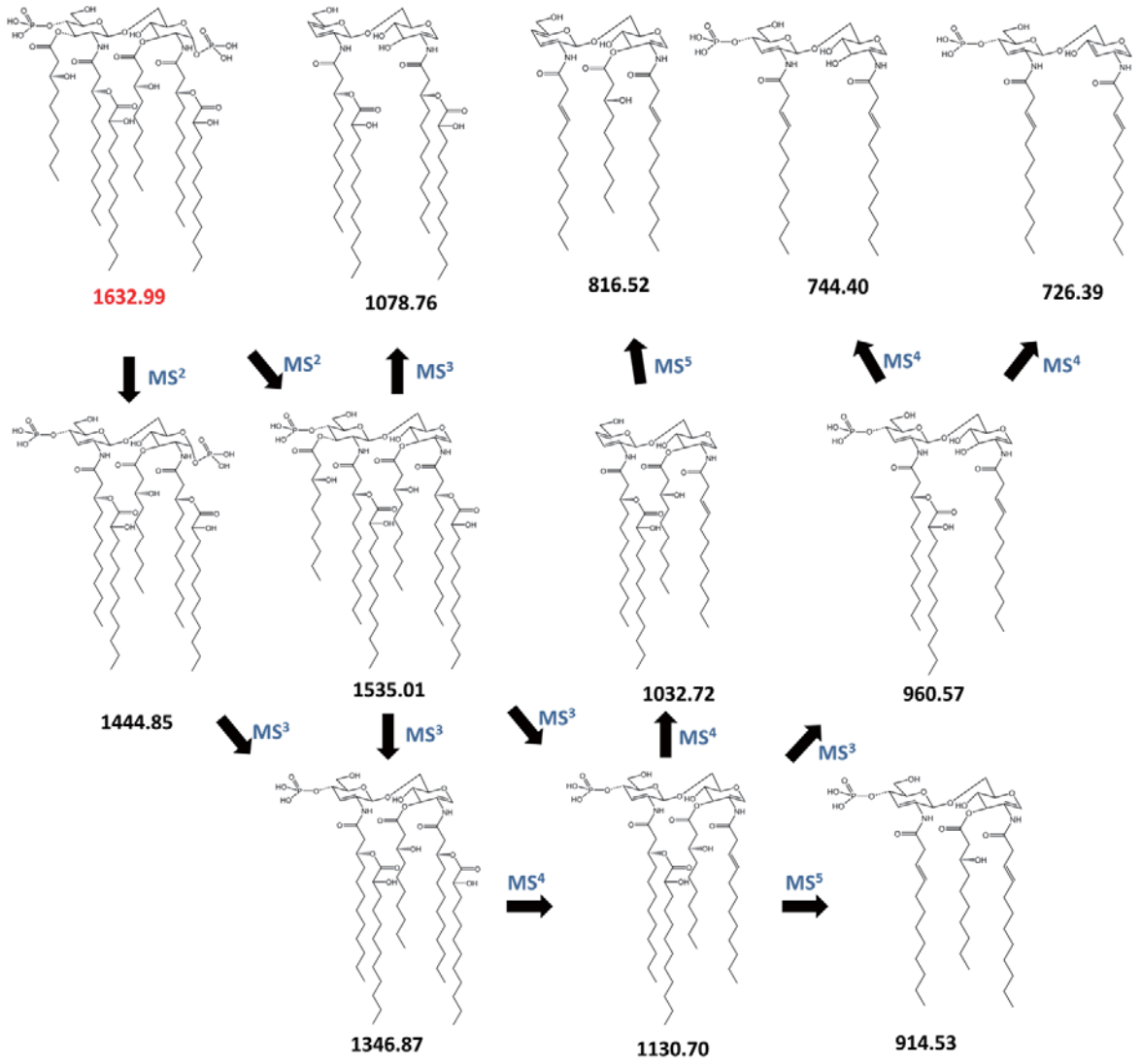
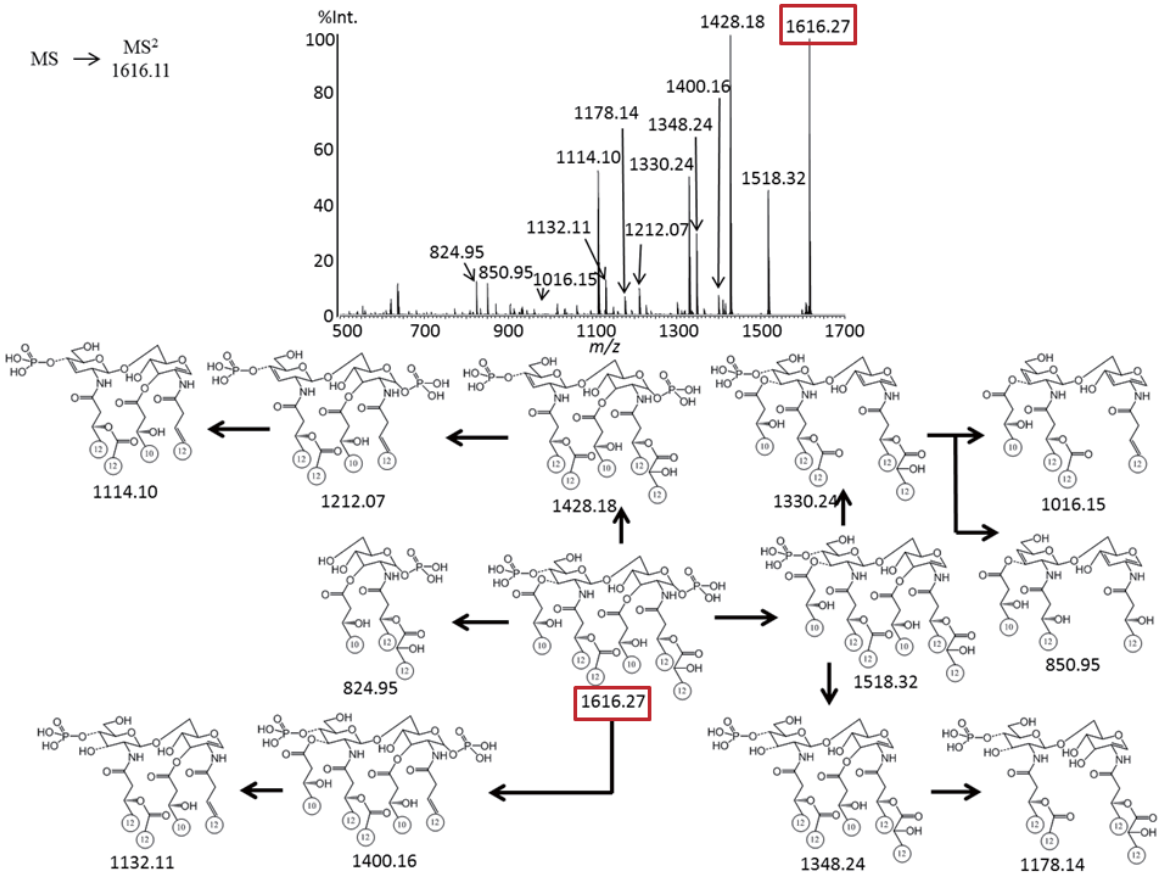
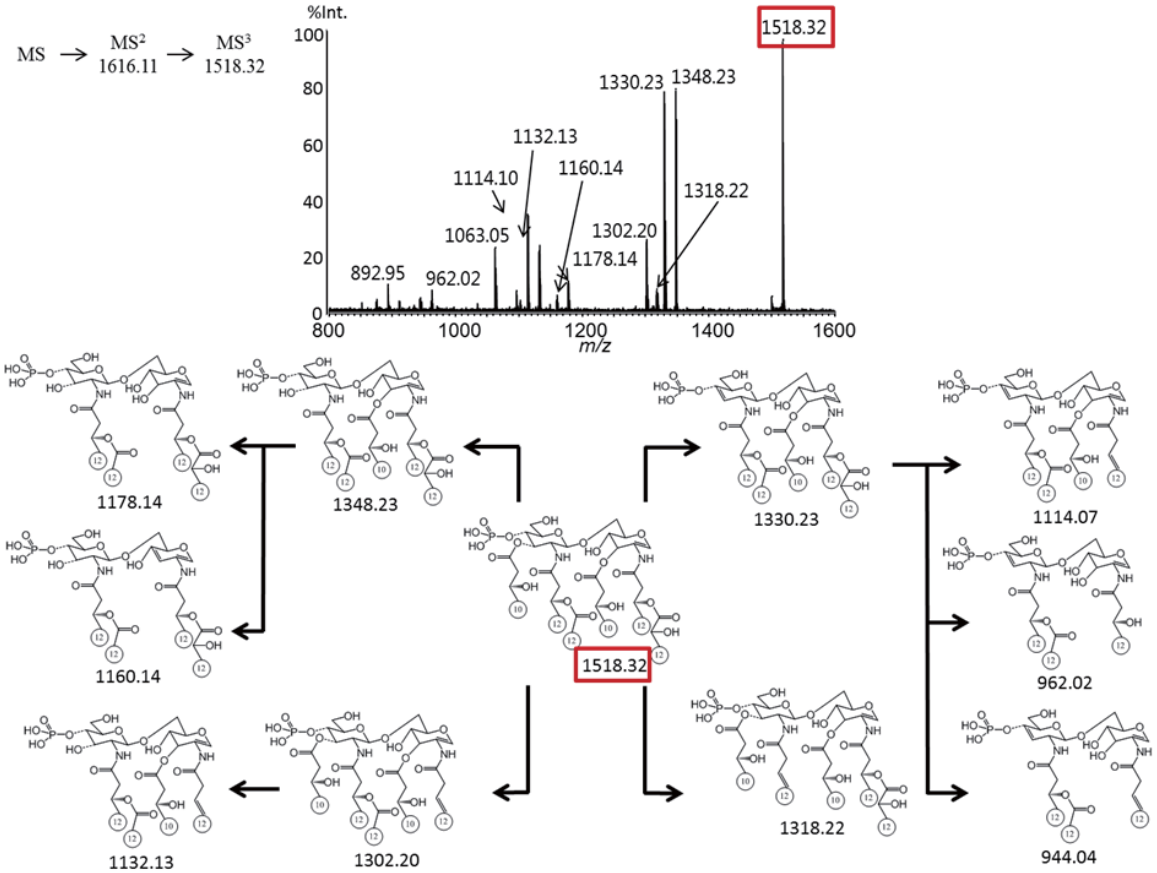


Fig. 111. MS and MS^n profile of lipid A molecule from polar soil microbe (Pseudomonas Moorei).

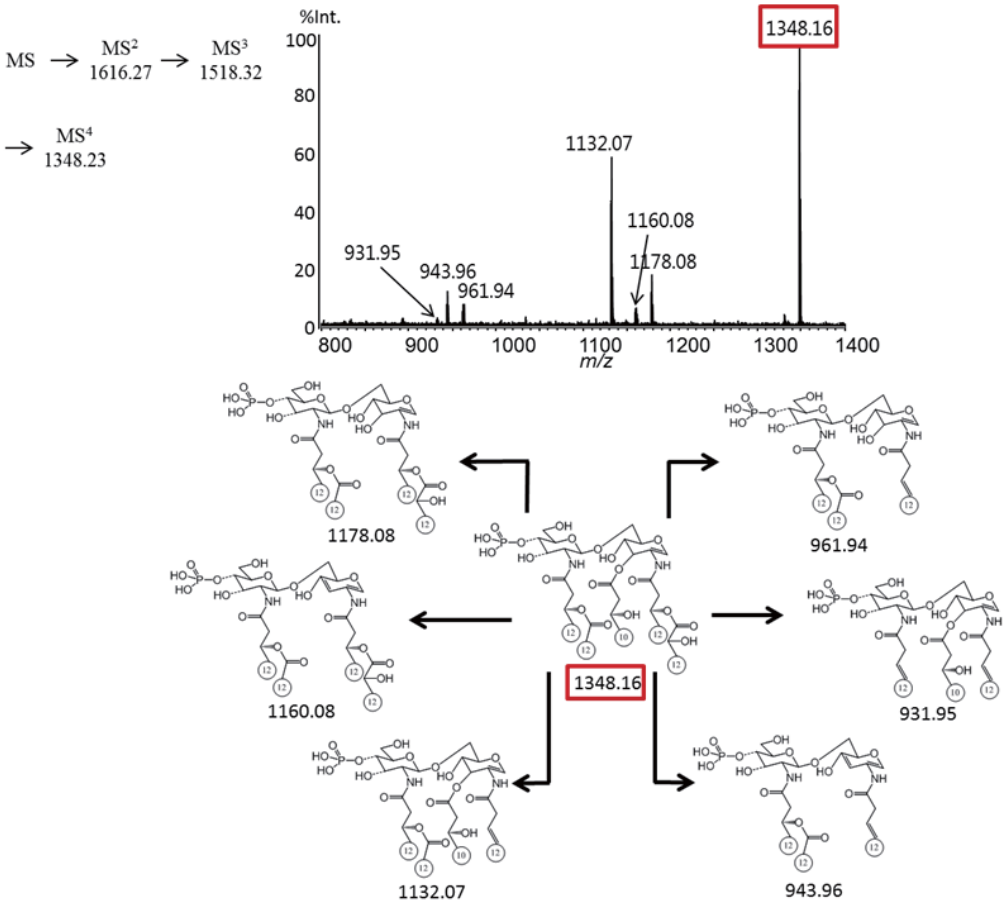
- 극지 토양 유래 미생물중 종까지 확인된 미생물을 선별(Pseudomonas Moorei)
- Lipid A 분리 정제 후, 다중 MS분석을 통하여 구조 분석 진행(Fig. 111)
- 각각의 Lipid A 조각구조에 대한 질량 파악 후, MS^n 스펙트럼에서 관찰되는 전하 대비 질량 값과 비교분석 수행


MS → MS²
1616.11
%Int.
100
80
60
40
20
0
500
700
900
1100
1300
1500
1700
m/z
1428.18
1616.27
1400.16
1178.14
1348.24
1114.10
1330.24
1518.32
1132.11
1212.07
824.95
850.95
1016.15
1114.10
1212.07
1428.18
1330.24
1016.15
824.95
1616.27
1518.32
850.95
1132.11
1400.16
1348.24
1178.14

극지연구소


MS → MS² 1616.11 → MS³ 1518.32
%Int.
100
80
60
40
20
0
800
1000
1200
1400
1600
m/z
1518.32
1330.23
1348.23
1132.13
1114.10
1160.14
1318.22
1063.05
1302.20
1178.14
892.95
962.02
1178.14
1348.23
1330.23
1114.07
1160.14
1518.32
962.02
1132.13
1302.20
1318.22
944.04

극지연구소


MS → MS² 1616.27 → MS³ 1518.32
→ MS⁴ 1348.23
%Int.
100
80
60
40
20
0
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
m/z
1348.16
1132.07
1160.08
1178.08
931.95
943.96
961.94
1178.08
961.94
1160.08
1348.16
931.95
1132.07
943.96

극지연구소

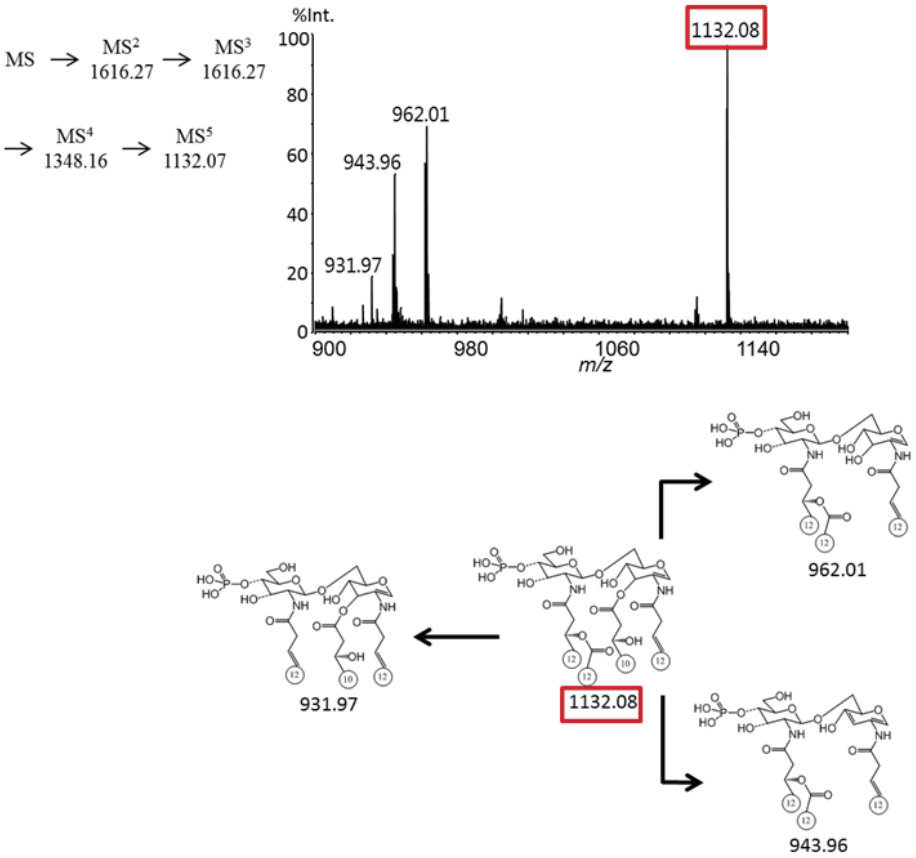


Fig. 112. MS^n profiling of MALDI-QIT TOF MS for lipid A from Pseudomonas sp. psy2.

특허연구소

- Pseudomonas속(sp. psy2로 명명)에 해당하는 미생물의 Lipid A 구조 분석 결과(Fig. 112), 기존에 구조가 밝혀져 있던 Pseudomonas cichorii의 Lipid A와 그 구조가 같은 것으로 확인됨
- Pseudomonas cichorii는 세균성 잎마름 병(bacterial leaf blight)을 유발하는 병원균으로써 이파리에 암초록색 병반이 생긴 후 확대되어 소엽 전체를 시들게 함

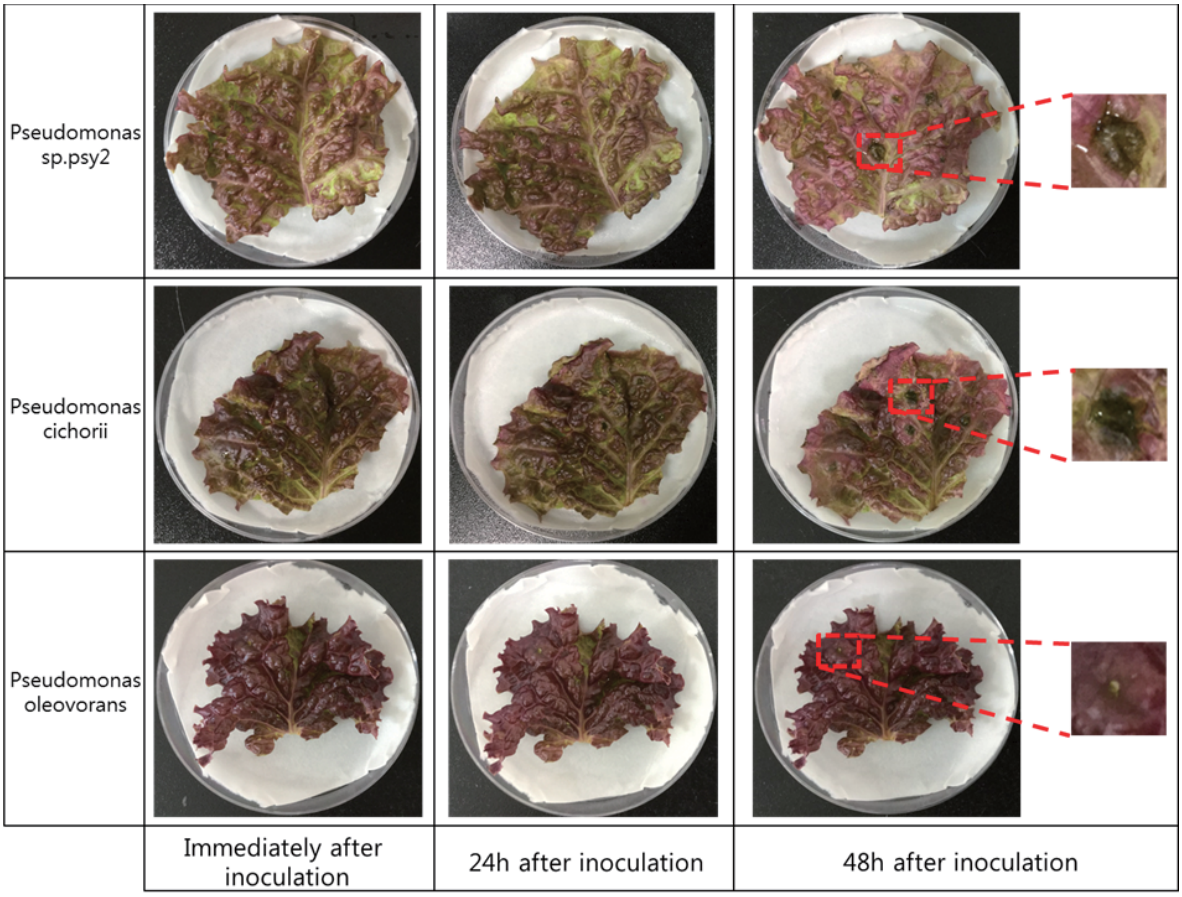


Fig. 113. Toxicity test of Pseudomonas sp. psy2 as a proof of concept.

극지연구소

- MALDI-QIT TOF MS 기반 Lipd A 구조분석 및 안전성 평가기술 검증을 위해 실제 식물 이파리로 POC(proof of concept) test를 수행함(Fig. 113)
- 본 연구에서 분석한 Pseudomonas sp. psy2와 Pseudomonas cichorii가 똑같이 식물에 병원균으로써 작용하는지 확인하기 위해 상추와 같이 48시간 배양
- 대조군인 Pseudomonas oleovorans와 다르게 두 샘플 모두 병변이 발생함으로써 동일 독성을 확인
- 극지토양으로부터 스크리닝한 미생물의 endotoxin 구조 분석 및 육상 미생물과의 비교를 통해 미생물의 안전성 예측 모델을 개발
- 향후, 더 많은 수의 극지토양 미생물의 안전성 평가를 통해 라이브러리 구축의 필요성이 있음을 제시함

제 3 절
급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현(세부과제 3)

1. 탄소순환이 결합된 지구시스템 모델 운용

본 연구에서는 미국국립기상청 NCAR에서 개발된 CESM(Community Earth System Model) version 1.2를 활용(Fig. 1)한 offline 역학식생모형을 이용하여 영구동토층의 식생 모의 성능을 검증하였다. 또한, 식생-탄소 순환 모의 능력을 검증하기 위해 본 연구소 서버에 시스템을 구축하였다.

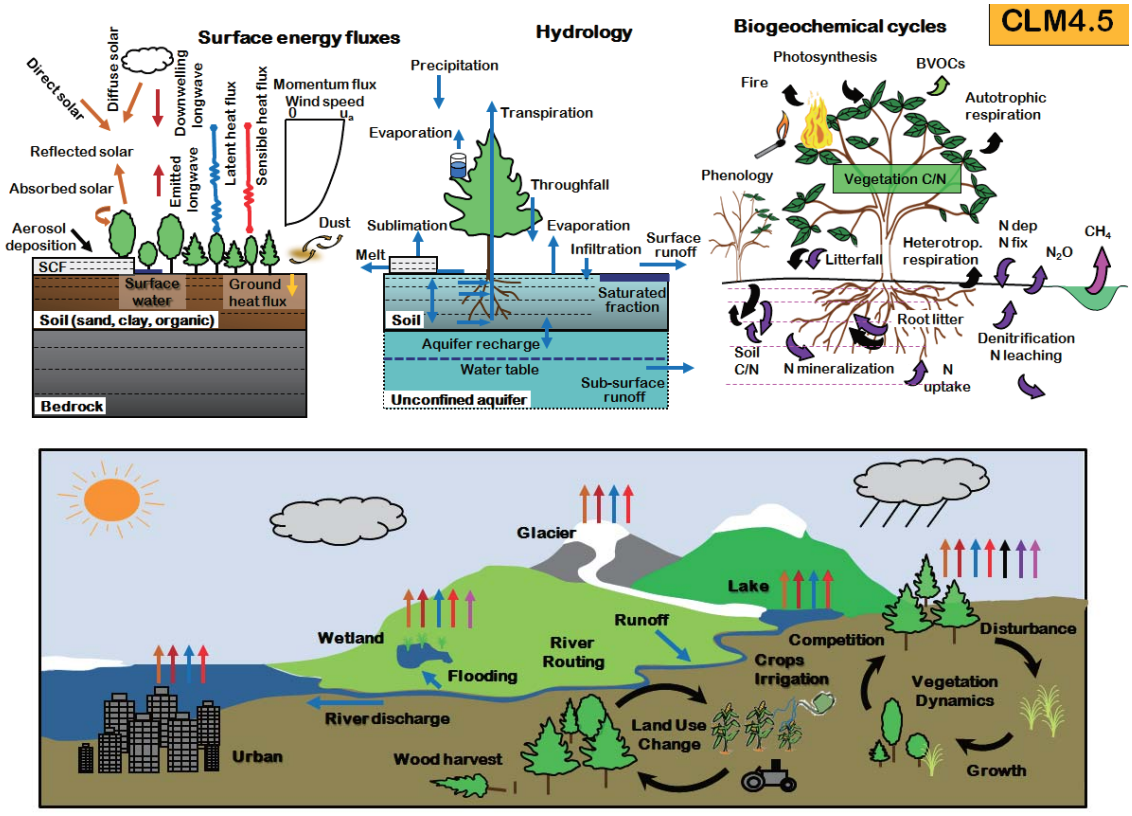


Fig. 1. Biogeophysical and biogeochemical processes in CLM 4.5 (Lawrence *et al.*, 2011).

가. 지면 모델

본 연구에서 구축한 지면 모델은 NCAR의 Community Land Model(CLM) 버전 4.5

이다. 이 모델은 이전 4.0 버전에서 북극 지역에서의 낮은 토양 탄소, 열대지역에서의 너무 많은 Gross Primary Production(GPP; 총 일차 생산량), 북극지역에서의 너무 작은 GPP, 북극 지역의 건조한 토양, 열대에서 과다한 엽면적지수 등의 바이어스를 개선하고자 해당 부분을 업그레이드 한 버전이다.

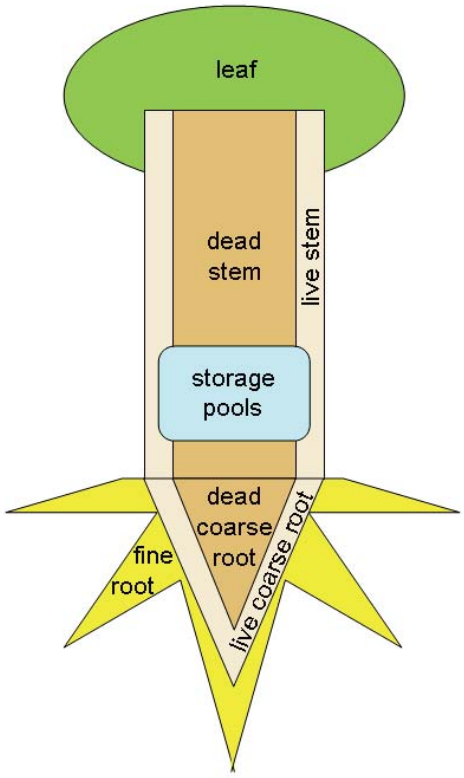
나. 모델 내 질소순환, 탄소순환, 메탄

지구시스템 모델인 CESM(Community Earth System Model)의 지면 모듈에 포함된 Biogeophysics package를 분석하였다. 이는 다음과 같이 구성된다.

- 동토층 탄소순환 이해에 중요한 Carbon-Nitrogen Cycle module 코드 분석
- 육상 탄소 플럭스 모듈, 해양 탄소 플럭스 모듈, 인간 활동에 따른 인위적 탄소 플럭스 모듈 코드 분석
- 대기 모듈 내 CO_2 Tracer gas 처리 코드 분석

지면 모델 CLM4.5의 탄소와 질소의 식생 내 탄소 pool은 Fig. 2와 같다. 탄소와 질소는 식생의 잎, 줄기, 굵은 뿌리와 잔뿌리에 존재한다. 각 pool은 1년 이상의 장주기 저장과 1년 미만의 단주기 저장으로 구분할 수 있다. 이밖에 성장에 쓰이는 호흡 저장, 유지에 필요한 호흡 저장, 전류 질소 pool이 있다. 따라서 총 탄소 pool은 20개, 질소 pool은 19개가 된다.

KOPRI 극지연구소



CLM vegetation state variables (pools):

C and N pools for each tissue (structural pools):

- Leaf
- Stem (live and dead)
- Coarse root (live and dead)
- Fine root

Each structural pool has two corresponding storage pools:

- Long-term storage (> 1 yr)
- Short-term storage (< 1 yr)

Additional pools:

- Growth respiration storage (C)
- Maintenance respiration reserve (C)
- Retranslocated nitrogen

Total number of pools…

Carbon: 6 + 12 + 2 = 20

Nitrogen: 6 + 12 + 1 = 19

Fig. 2. carbon and nitrogen pools(Oleson *et al.*, 2013).

극지연구소

본 연구에서는 지면모델 CLM 4.5를 동토층 기후 시뮬레이터에 성공적으로 탑재하고(Fig. 3), 이로부터 미래 영구동토층의 변화 및 이산화탄소, 메탄 방출을 전망한 연구를 수행하였다.

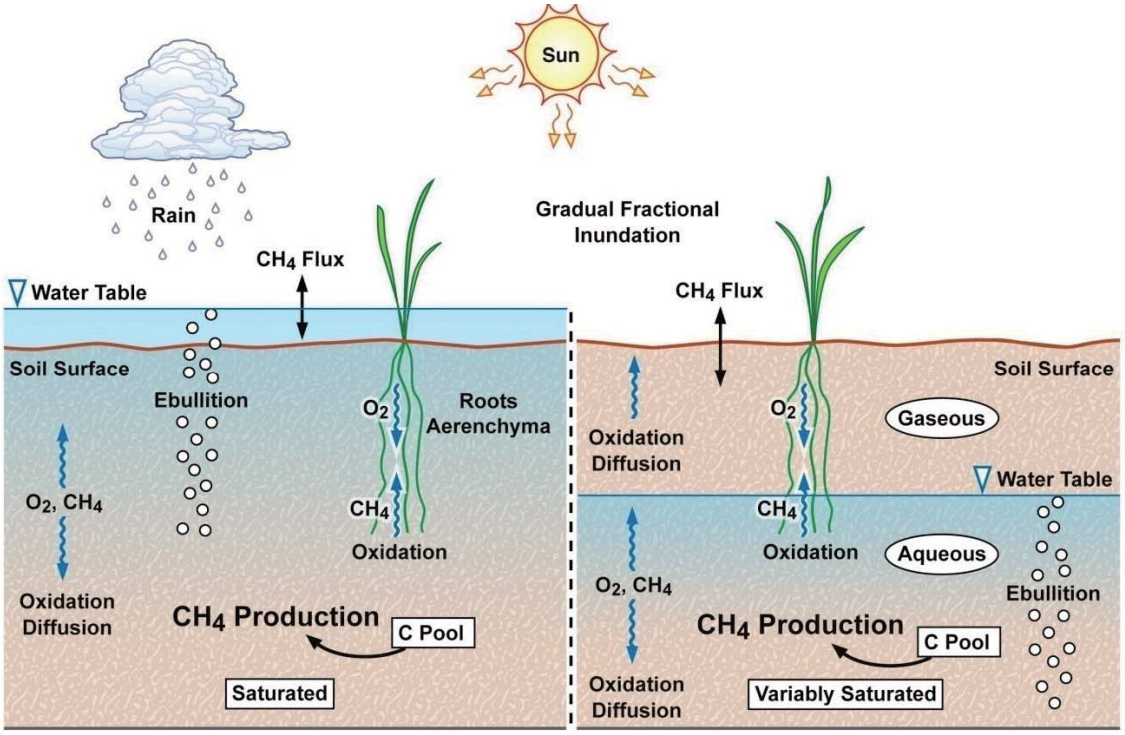


Fig. 3. Schematic representation of biological and physical processes integrated in CLM that affect the net CH4 surface flux (Riley *et al.* 2011a). (left) Fully inundated portion of a CLM gridcell and(right) variably saturated portion of a gridcell(Oleson *et al.*, 2013).

2. 지구시스템 모델을 활용한 미래 기후변화 전망

가. 미래 영구동토층 식생변화의 북극 해빙 및 온난화에 대한 영향

(1) 연구 배경

고위도와 북극지역은 최근에 상당한 기후 온난화가 전구 평균된 것보다 훨씬 급격히 진행되고 있다. 이에 수반되는 효과로써 환북극 육지에 식생의 큰 변화가 있다. 인류의 걱정과는 다르게, 인류가 이끄는 온실 기체의 증가와 관련된 기후 변화는 고위도 극한 환경에 있는 일부 식생에 더 좋은 환경을 제공한다. 온난화와 식생 성장기의 확대는 북극 툰드라의 식생 녹화를 증가시킨다. 척박한 환경에 처해 있던 툰드라의 식물에게는 동토층의 해동이 호조건이 될 수 있으며, 툰드라의 키 작은 잔디과의 식물들이 관목이나 나무로 전이되는 모습이 여러 곳에서 보고되고 있다.

본 연구에서는 식생 피드백을 모의할 수 있는 모델링 기법을 이용해 지구온난화 하에서 식생 피드백이 북극해의 해빙 변화와 관련하여 고위도 및 환북극 온난화를 더욱 확장시킬 수 있음을 제안하고자 한다.

(2) 연구 방법

(가) 식생-기후 접합 모델을 이용한 모의

미국국립기상청 NCAR에서 개발된 Climate System Model version 3(CCSM3)를 이용하였다. 수평격자는 2.8° X2.8° 이고 연직으로는 26개의 하이브리드 시그마 층을 가진다. 이 연구에서는 DGVM(Dynamic Global Vegetation Model, Levis *et al.*, 2004) 동적식생모델을 사용하였다. 이 모델은 주어진 기후 조건 하에서 식생의 면적과 구조를 모의할 수 있다. 따라서 종합적인 식생-기후 결합 모델링을 통해 생지물리적인 상호작용을 모의 할 수 있다. 실험 구성은 다음과 같다. 이산화탄소 농도 355 ppmv의 현재 기후(P), 현재 대비 두 배 이산화탄소 710 ppmv의 미래 기후(F), 미래 실험에 동적식생모델을 결합한 FV 이다(Fig. 4). F-FV는 식생 피드백만의 효과를, FV-P은 식생 피드백과 지구 온난화의 결과를 함께 나타낸다. 세 개의 실험 모두 200년간 모의하였으며, 마지막 50년 평균을 분석에 사용하였다.

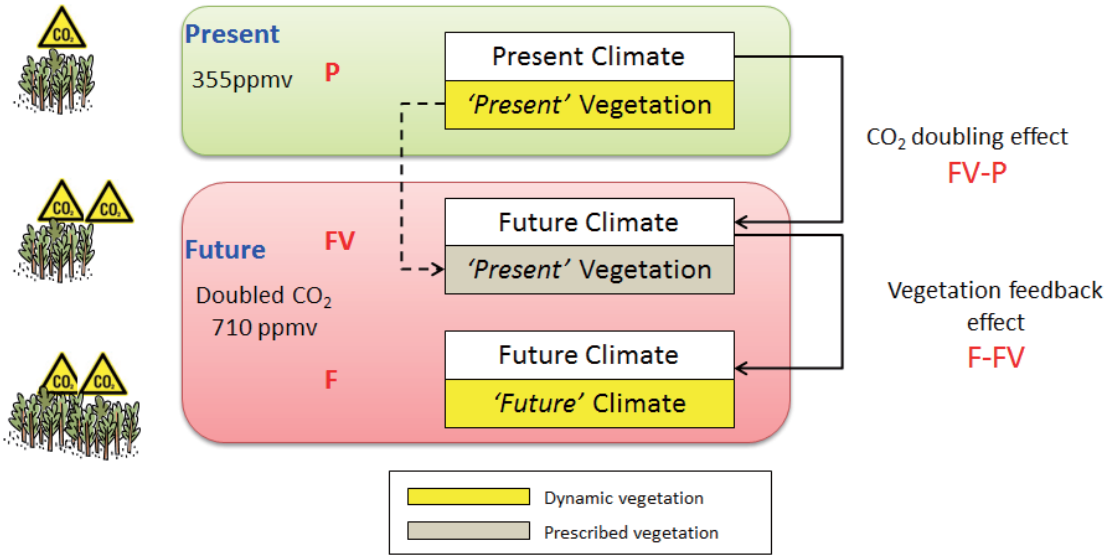


Fig. 4. Experiment design to examine the impact of pan-Arctic greening.

(3) 연구 결과

Fig. 5에 증가된 온실기체에 의한 반응으로써 식생 변화로부터 유도되는 변화를 비교하였다. 동토 영역 중 현재 기후 하에서 거의 나지인 지역의 식생이 증가하고 아한대 숲이 북쪽으로 확장되는 것이 현저하게 나타났다.

이러한 식생 활동의 증가는 모의되는 기온 증가에도 매우 큰 영향을 준다. 동적 식생 모델을 적용하여 미래 툰드라 식물 효과 증가를 반영하였을 때, 식물의 성장기인 3월부터 9월의 평균된 지표면 기온이 훨씬 크게 증가한 것을 알 수 있다(Fig. 6a와 c). 동절기인 10월부터 2월의 평균 지표면 기온에도 동적 식생 모델을 적용하여 미래 툰드

라 식물 효과 증가를 반영하였을 때, 그 기온 증가가 더 크게 나타났다. F-P와 FV-P 두 경우 모두 중위도에서 고위도까지 온난화 경향이 나타나지만, 식생 피드백을 고려했을 때 온난화 시그널이 훨씬 크게 나타난다. 식생 피드백이 없을 때는, 식생 성장기 동안에 대부분의 고위도 육상과 해상 지역에 2-3 K의 균질한 온난화가 있다. 하지만, 식생 피드백을 포함시키면 고위도 환북극 육상 지역에 3-5 K의 온난화가 있는 것을 확인할 수 있으며(Fig. 6), 이 지역이 Fig. 5의 식생이 많이 변화한 지역과 잘 일치함을 알 수 있다.

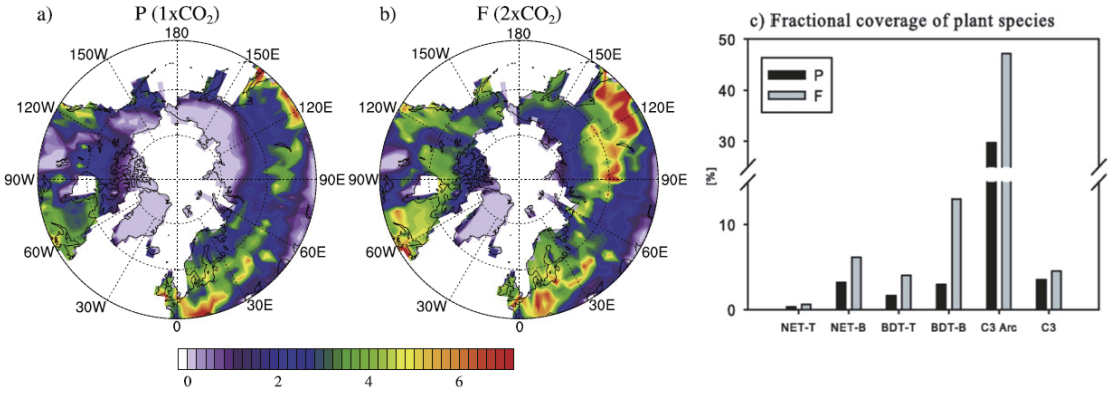


Fig. 5. Mean leaf area index(LAI) in the growing season(May to September) for (a) the present(P) and (b) future(F) simulation and (c) the fractional coverage of the plant species(NET: needleleaf evergreen tree, BDT: broadleaf deciduous tree, C3: grasses with a C3 pathway. T, B, and C in the suffix indicates temperate, boreal and the Arctic, respectively) over a high latitude north of 60° N . The LAI represents the leaf abundance, which is the fractional area of the plant's leaf surface relative to the surface area.

특이한 점은 식생 활동이 활발한 식생의 성장기 다음인 동절기에도 식생 피드백에 의한 지표 온난화의 증폭이 뚜렷한 것이다. 식생 피드백의 효과가 없이도 이산화탄소 두 배의 효과는 환북극 고위도에 4-6 K, 북극 지역은 6-8 K에 이른다(Fig. 6b). 하지만, 식생 피드백이 포함되면, 고위도와 북극 지역의 온난화는 더욱 강해진다(Fig. 6d). 이러한 변화는 전혀 예상하지 않았던 결과로써, 일 년 중 동절기에는 입사 태양 복사가 거의 0이기 때문에 식생 변화의 직접적인 피드백이 최소가 되어, 지면 식생 변화와 관련된 직접적인 알베도 피드백은 매우 약할 것으로 기대 되었기 때문이다.

식생 피드백 효과를 정량적으로 규명하기 위해서, 두 실험 간(F-FV) 에 지면기온의 차이를 계산하였다(Fig. 6e,f). 식생 성장기간 동안에 식생 피드백 효과는 환북극 고위도 지역에서 1-3K 까지 온난화가 증폭되지만, 북극해에는 그 효과가 상대적으로 온건하다. 이것은 식생 피드백 효과와 연관된 동서 평균된 지면 기온 변화에서 더 분명하게 나타

난다(Fig. 6g). 아한대 여름철에(6월에서 8월) 향상된 지면 온난화는 주로 65-75° N에 제한되고 9월에서 11월 기간 동안에 북위 80° N 이상의 북극에서는 2 K 이상의 가장 강한 온난화 효과가 있다. 북극해에 식생 활동이 없는 것은 명백하므로, 이 지역의 증폭된 온난화는 고위도의 식생 피드백으로부터 시간 지체된 원격 반응임을 생각할 수 있다.

북극해의 이 지체된 원격 반응의 원인에 대해 한 가지 가능한 설명은 북극의 해빙과 해양 과정과 연관된 피드백이 이러한 결과를 초래했다는 것이다. 식생 활동의 증가는 처음에는 성장기 동안에 환북극 지역에 온난화를 유도하고(Fig. 6e), 이것이 해양 상부의 해빙을 더 녹이고 온난화를 이끌 수 있다. 그리고 다음 가을과 겨울에 얼음이 덜 덮여있고 더 따뜻한 해수면이 북극의 지체된 온난화를 이끌 수 있다. Fig. 7에서 북극 해빙이 F에서 보다 FV에서 더 적은 사실이 이것을 뒷받침한다.

Fig. 7a,b에 환북극 고위도 지역의 현열과 잠열 플럭스가 크게 증가하였고, 이것은 이러한 변화가 직접적으로 식생 피드백과 관련이 있음을 말해준다. 현열 플럭스는 직접적으로 대기 하부를 온난화시키고 잠열속의 증가는 응결될 때 대류권 하부를 온난화시킬 수 있다. 식생으로부터의 향상된 발산은 잠열 플럭스의 증가에 기여한다. 식생 피드백 효과에 의해서 지면 증발은 증가하지만 지면 근처 대기 하부에서 상대습도는 감소한다(Fig. 7d). 이것은 상대적으로 큰 기온 증가가 포화 수증기압의 증가를 이끌기 때문인 것으로 분석된다.

KOPRI
극지연구소

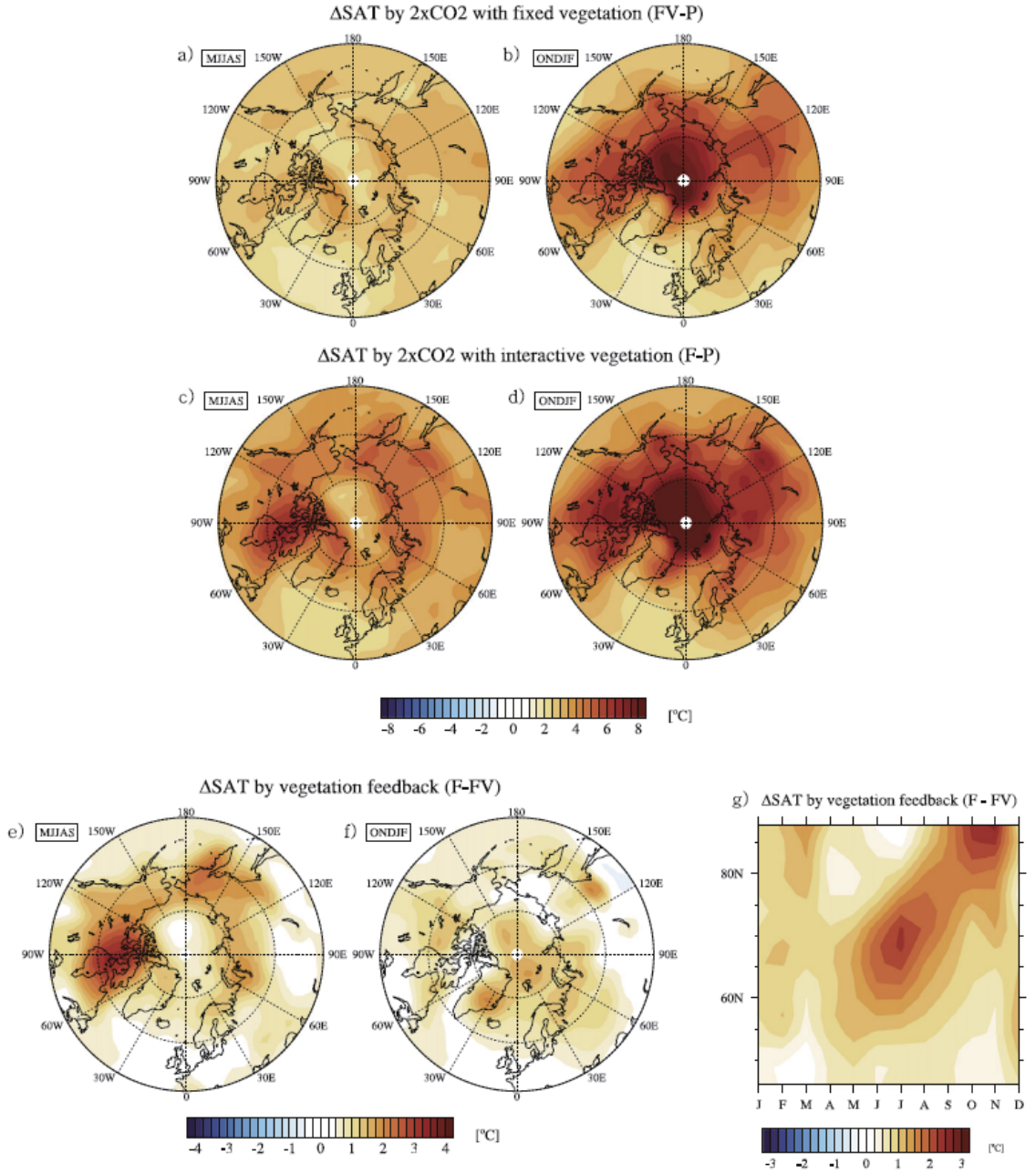


Fig. 6. Surface air temperature difference between the FV and P simulation (a), (b), the F and P simulation (c), (d) and the F and FV simulation (e), (f). The zonal mean of the surface air temperature difference between the F and FV simulation (g).

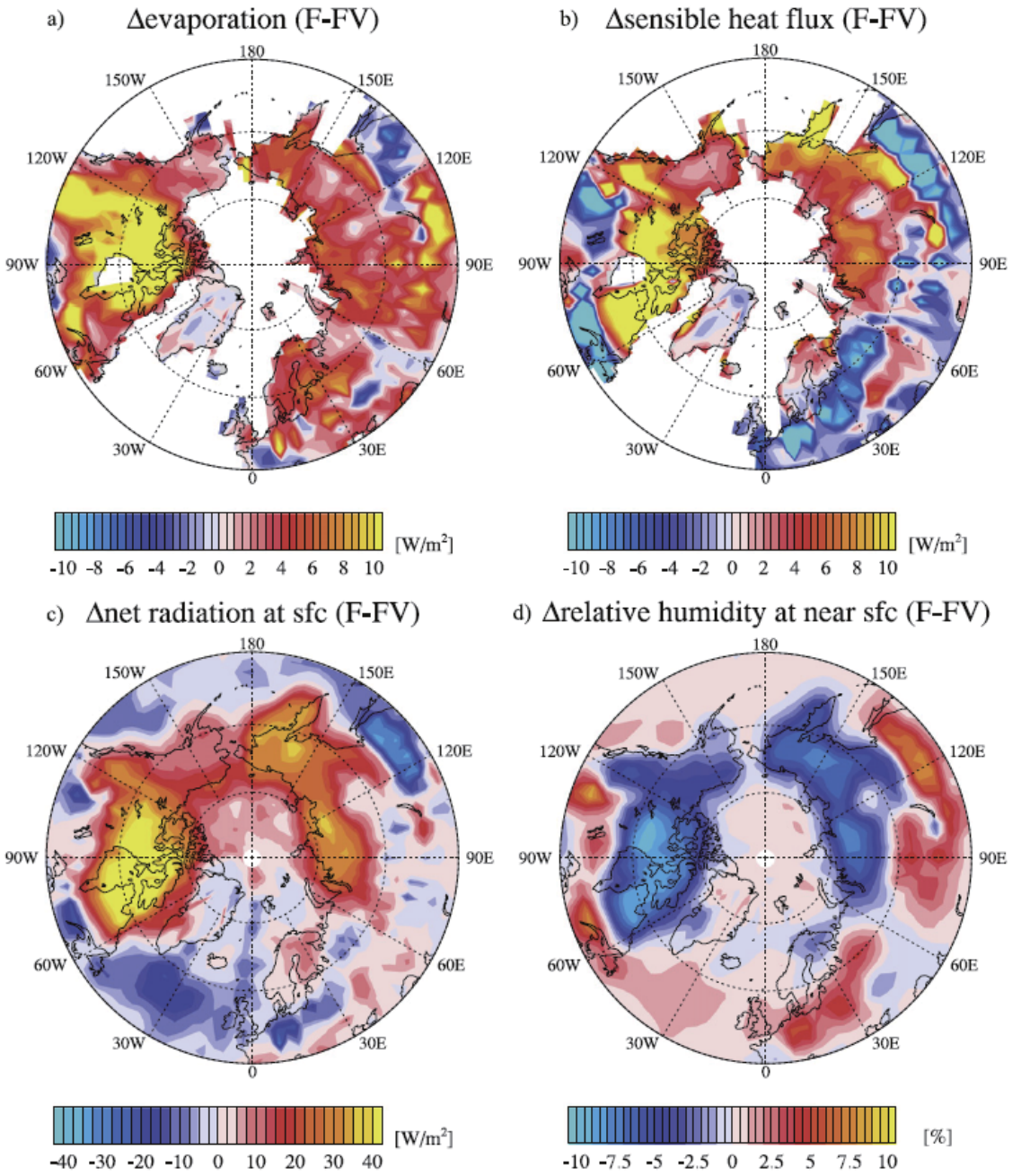


Fig. 7. Changes in (a) evaporation, (b) sensible heat flux, (c) net radiation (shortwave and longwave) at the surface and (d) relative humidity at the near surface by the vegetation feedback effect (F-FV). The evaporation and sensible heat flux is positive upward, but the net radiation is positive downward.

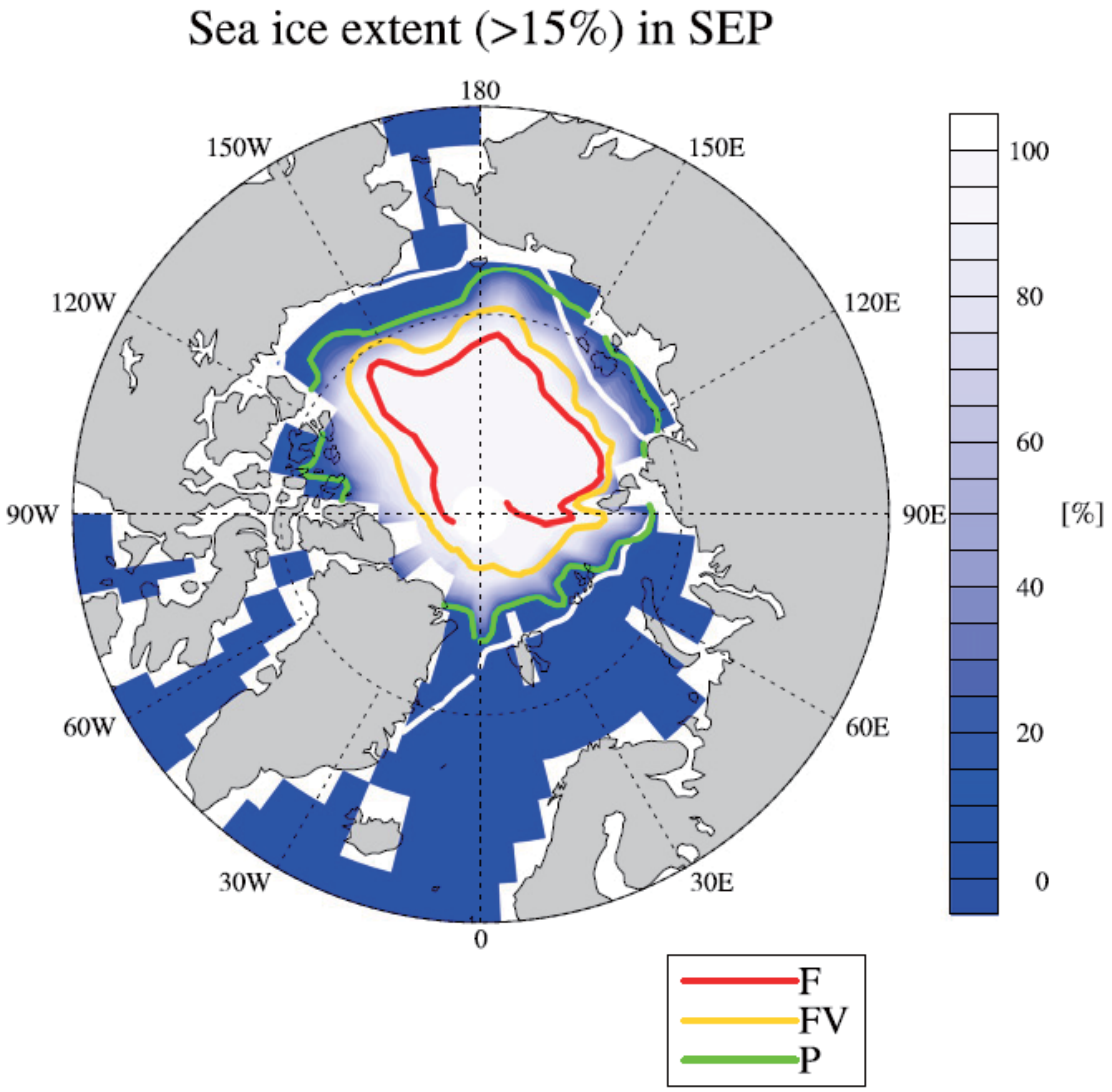


Fig. 8. Lines indicate sea ice extents where the ocean is covered with more than 15% sea ice (the red, yellow and green line indicates the sea ice extent in the F, FV and P simulations, respectively). The white line is an average sea ice extent for the period of 1981-2000, as estimated from HadISST data. The shading indicates the simulated average sea ice concentration for September in the Psimulation.

식생 피드백 효과와 연관된 대규모 대기 순환의 변화 또한 북극 주변에 고기압 아노말리를 유도하면서 지면의 온난화의 증폭에 기여한다. 여름철에 식생 피드백과 연관된 환북극 온난화는 고위도(40~80° N)의 남북 온도 경도를 감소시킨다. 이것은 40~70° N의 대류권 편서풍을 약화시킨다(Fig. 9a,b). 식생 피드백 효과에 의한 해면기압 변화의 공간 패턴(Fig. 9c)은 북극 지역에 고기압 아노말리와 중위도에 저기압 아노말리를 보인다. 비록 여름철이지만 이러한 패턴은 - Arctic Oscillation의 패턴을 보인다. 고기압

아노말리는 대기의 상승 운동을 억제시키고 구름의 형성을 방해할 수 있다. 이것은 지면으로 입사되는 태양복사를 증가시켜 온난화를 증폭시킬 수 있다.

다음 가을(9월~11월)에 고위도 육상에 식생 피드백에 의해 강화된 지면 온난화는 육상 60° N에 0.98 K까지 이른다. 하지만 흡수되는 태양복사의 증가는 0.07 Wm^{-2}에 그친다. 대신 북극해에 강한 온난화 효과(+1.55 K)가 있는데, 이것은 주로 잠열(+1.60 Wm^{-2})과 장파복사(+0.89 Wm^{-2})에 의한 것이고 부분적으로는 더 따뜻하고 덜 해빙으로 덮여 있는 해면에 의한 현열(+0.39Wm^{-2})에 의한 것이다.

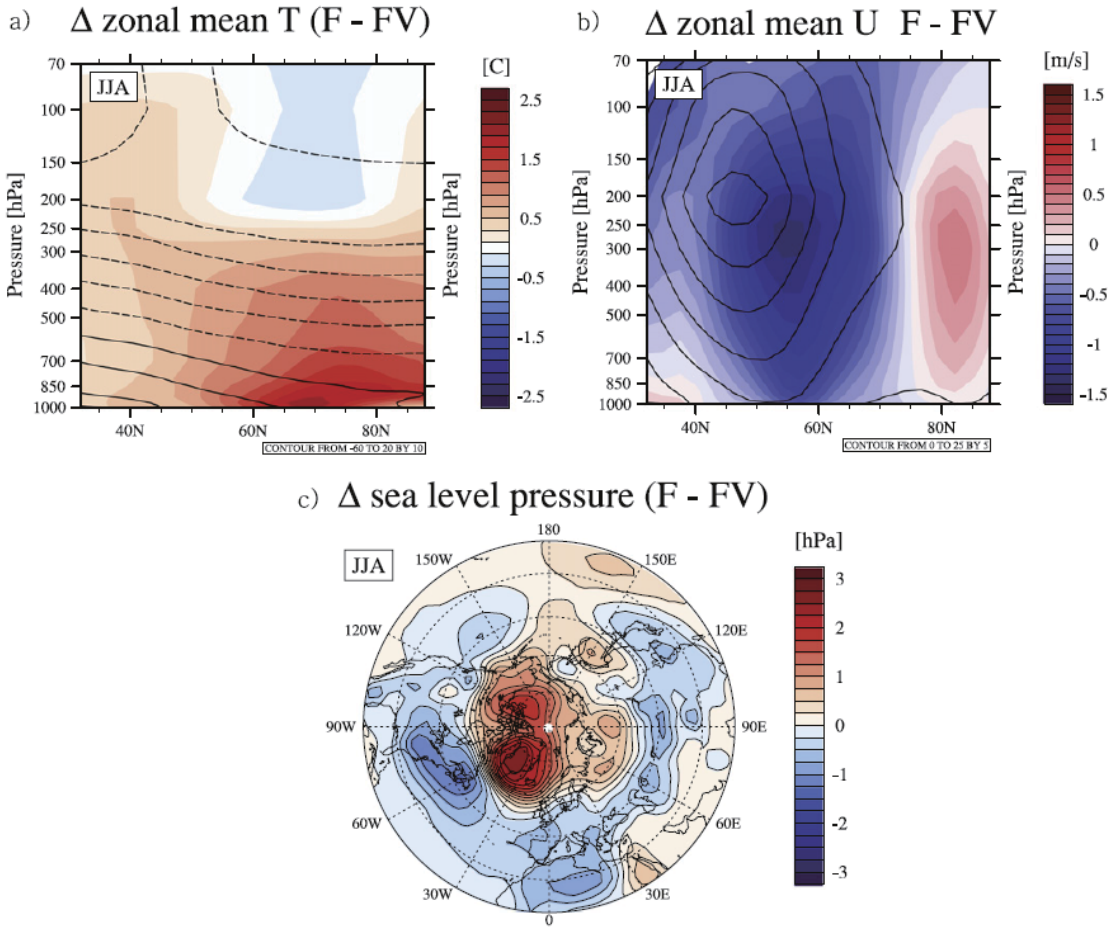


Fig. 9. (a) Zonal mean of air temperature, zonal wind and (c) sea-level pressure changes by the vegetation feedback effect(F-FV) in JJA. For the air temperature and zonal wind, the shading indicates the difference between the F and FV simulation, and the contour lines indicate the climatological mean value in a P simulation (the dashed and solid line indicates a negative and positive value, respectively).

Fig. 10은 식생 피드백에 의한 northward atmospheric energy transport(NET, 북으로의 에너지 전파의 변화)를 보여준다. 여기서 에너지는 대류권에서 Moist Static Energy(MSE, 습윤 정적 에너지)를 의미한다. MSE는 내부, 잠재, 잠열 에너지의 합으로 나타낸다. NET는 1000에서 200 hPa 연직으로 적분된 남북 간의 MSE 플럭스(MSE*남북 바람)로 정의된다.

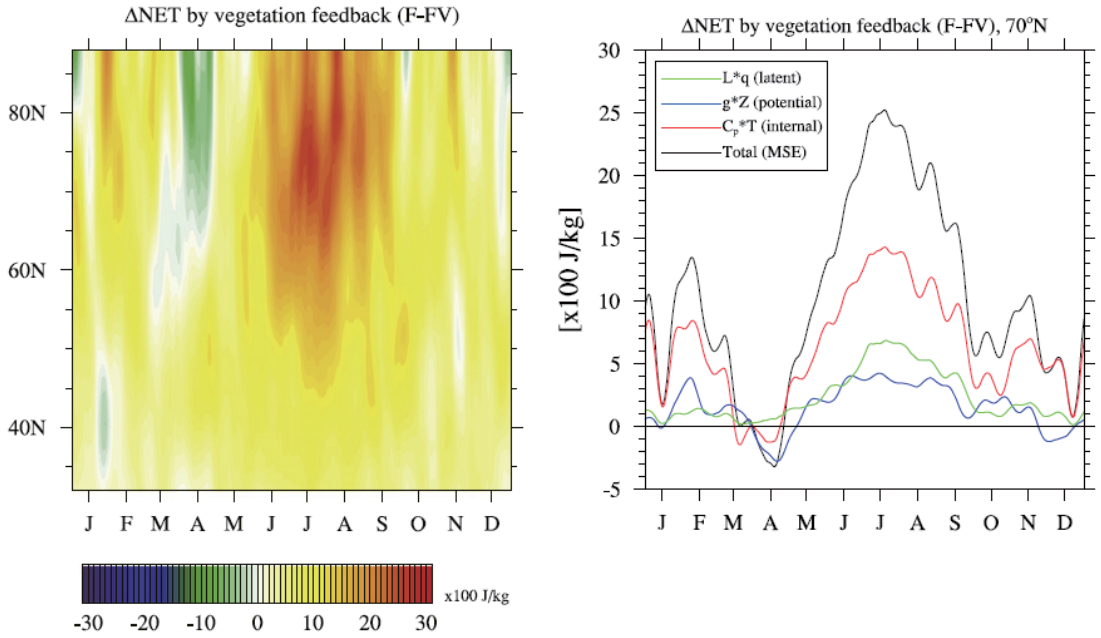


Fig. 10. Left: tropospheric(1000－200 hPa) NET change by the vegetation feedback effect(F-FV). Right: changes in the components of NET at 70° N. A ten-day running average is applied for the time dimension. Here, the atmospheric energy is estimated by the moist static energysummation of the atmospheric latent, potential and internal energy.

고위도에서 북극으로의 에너지 전파는 식생 성장기(6월~9월) 동안에 대부분 현열과 습윤 전파에 의해 매우 증가한다. 증가된 증발산과 태양복사를 통해 향상된 식생 활동에 의한 추가적인 열과 습도는 대기 순환과 에디 활동에 의해 북쪽으로 전파된다.

NET 증가는 전체 식생 성장기에 걸쳐 있는데, 여름에 피크를 보이고 가을에 점진적으로 감소한다. 하지만, 식생 피드백에 의한 북극해의 온난화는 여름에 최소이고 가을에 최대이다(Fig. 6g). 이러한 지체된 반응은 해양의 열용량이 크고 해빙의 잠열이 크기 때문이다. 대기를 통한 북쪽으로의 남는 열 전파는 주로 북극 해빙을 녹이는데(JJA에 해빙 함량의 -20.98%와 얼음 두께의 -11.02 cm) 사용되고 상부 북극해 얼음이 최소인 9월 중순까지 해양을 온난화한다(JJA에 +0.79 K). 결과적으로, 태양 복사는 얼음에 덜 덮여있는 해양으로 더 침투되고 남쪽에서 전파된 추가 에너지는 지속적으로 해양

상부를 온난화시킨다. 북극 기후 시스템이 해빙이 어는 시기로 들어가면, 얼음이 덜 덮여있는 해양을 통해서 상대적으로 더 차가운 대기로 많은 양의 잠열(+1.00Wm^{-2} in SON)과 현열(+0.39Wm^{-2} in SON) 플럭스가 방출되기 시작한다. 이리하여, 고위도에서의 식생 피드백과 하절기 동안의 에너지 전파는 북극해와 해빙의 원격 변화를 이끌고 내고 결론적으로 북극해 상의 얼음-알베도 피드백을 강화하여 온난화를 강화시킨다(+1.55 K in SON).

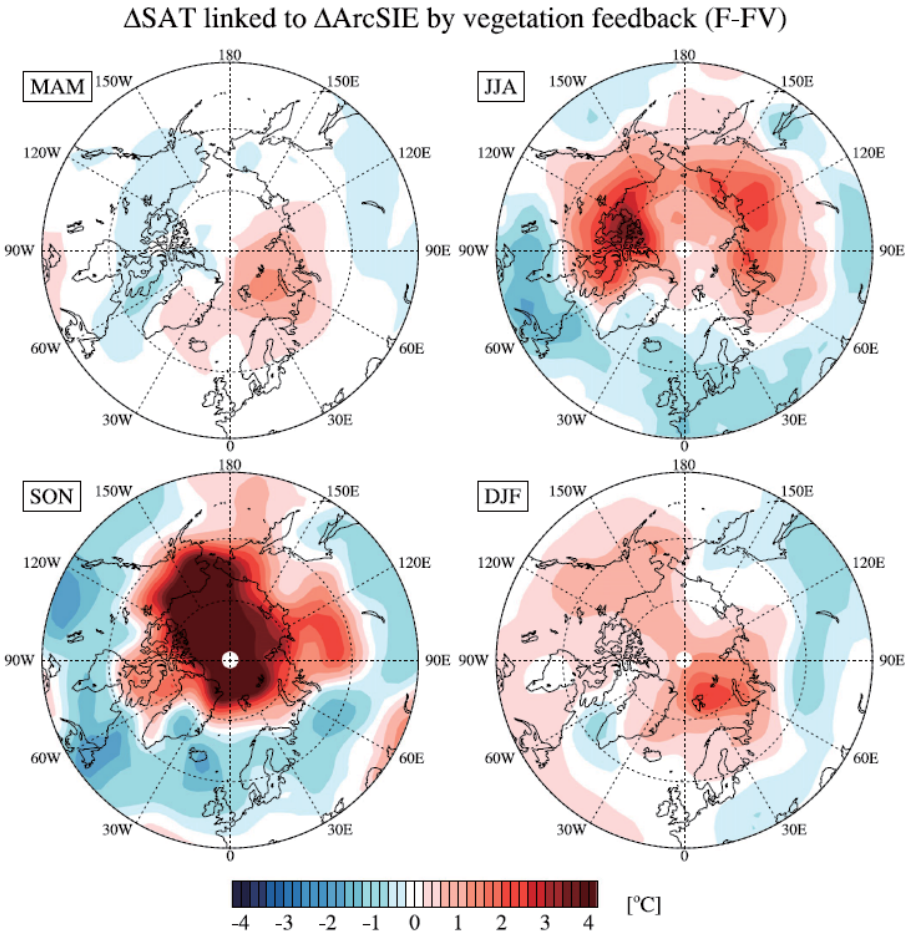


Fig. 11. Statistically projected surface air temperature change associated with the Arctic sea ice extent (SIE) change by the vegetation feedback effect based on a regression analysis. The SIE is the summation of the areal extent where the sea ice concentration is greater than 15% over the Arctic sea (north of 70 N), and the SAT is the surface air temperature. Details of the calculation are in the text.

해빙과 결합된 가을과 겨울의 강화된 북극 온난화는 다음 봄과 여름 고위도 육상의 증진된 식생의 성장과 함께 더욱 강화된다. 식생 피드백에 의한 북극 해빙의 변화와 연관된 지면 기온의 변화를 Fig. 11에 나타냈다. 북극해 해빙 함량과 지면 기온 사이의 통계적 일관성은 북극해 해빙 함량에 지면기온의 아노말리를 회귀하여 분석할 수 있다. Fig. 11은 식생 피드백에 의한 해빙 함량과 연관된 지면 기온의 변화를 나타낸다. 연중 환북극과 고위도 지역에 상당한 온난화가 있음을 알 수 있다. 겨울과 다음 봄에, 지면 기온의 큰 증가는 북극해의 북대서양과 대륙의 북쪽 끝에서 볼 수 있다. 이것은 식생 성장기의 확장을 이끌고 다음 봄에 식생의 활동을 증가시켜 양의 피드백 순환을 이끄는 것으로 분석된다.

(4) 요약

본 연구 (Jeong *et al.*, 2014)에서는 북반구 고위도 식생변화의 기후피드백 효과가 얼마나 큰지 정량적으로 입증하였다.

- 영구동토층 내 식생 피드백을 고려하지 않고 미래 기후를 시뮬레이션 하였을 때와 북반구 지표면 온도 증가와 식생 피드백을 고려한 경우 온도 증가를 비교하였을 때, 식생 피드백을 고려했을 때 온난화가 훨씬 큼을 확인하였다.
- 이러한 차이는 영구 동토층 내 식생의 온난화에 따른 급격한 증가가 고위도 육상 지역의 알베도 수치를 30% 이상 감소시켜 태양에너지 흡수율을 높이는데 기인하였다.
- 본 연구에서, 이러한 에너지 흡수율 증가는 주변 북극권 지역의 시공간적 에너지 분포를 바꾸어서 고위도 열 수송에 따라 식생 증가 시기뿐만 아니라 북반구 겨울철 지표 온도 증가와 가을철 북극 해빙 면적에도 큰 영향을 줄 수 있음을 보였다.

나. 환북극 동토 식생 증가의 열대 강수에 대한 영향

(1) 연구 배경

지구 온난화에 따라 북반구 수목 한계선은 북으로 전진할 것으로 기대되며, 사실상 고위도 수목의 극으로의 확장은 이미 목격되고 있다 (Lloyd 2005). 북극이 나머지 지역보다 크게 온난화될 것으로 전망되므로 (Holland and Bitz 2000), 북극 생물군계의 분포와 성질은 상당히 변화할 것이다. 사실상 동적식생모델을 이용한 모델 실험은 이산화탄소 이배증에 대한 반응으로 북극 동토층과 툰드라의 척박한 땅이 광범위한 초원으로 대체되고 북부 러시아와 캐나다의 한대 숲은 극 쪽으로 확장한다(Jeong *et al.* 2011)는 결과를 나타낸다. 고위도 식생의 이러한 변화는 지역 기후 뿐 아니라 먼 열대 기후에도 영향을 미친다. 북극 식생 변화는 육상에서 알베도를 감소시키고 대기 수증기를 증가시켜 고위도 온난화를 증폭시킨다(Swann *et al.* 2010, Falloon *et al.* 2012, Chae *et al.* 2015). 중위도 조림은 해들리 순환의 변화를 이끌어 연평균 열대 강수의 북으로의 이동

을 이끌고 남아시아 몬순을 강화시킨다(Swann *et al.* 2012, McCarthy *et al.* 2012). 유라시아 대륙의 삼림 면적의 확대는 ITCZ를 북으로 이동시키는데, 이것은 완신세 중기의 푸른 사하라를 설명할 가능성이 있다.

선행 연구 Chae *et al* (2015)에서, 북극 식생의 증가가 북극 온난화의 계절 주기에 주는 영향을 논하였다. 겨울철에 극지방에 일사량이 적게 도달하기 때문에, 감소된 육상 알베도는 흡수되는 태양 에너지를 증가시키는데 대한 영향이 적다. 북극 식생 녹화의 영향은 여름에 겨울보다 4배 온난화의 효과가 더 크다. 식생 변화에 의해 야기된 에너지 입사 아노말리는 큰 계절성을 보여, 원격 기후에 대한 영향 또한 큰 계절 변동을 보일 것으로 기대된다. 열대 강수대의 이동은 열대에 살고 있는 수십억 사람에게 영향을 미치고 또한 육지 생산성의 양식을 변화시킬 수 있으므로, 북극 녹화의 계절적 의존성이 열대 강수에 미치는 영향을 규명하는 것은 매우 중요하다.

(2) 연구 방법

본 연구에서는 유한-체적 역학 코어를 채택한 위도 방향 2˚X 경도 2.5˚ 수평해상도와 연직으로 26 혼합-시그마 층을 가지는 NCAR CAM3.1을 이용했다. CAM3.1은 흐름 없는 slab ocean model(SOM)과 접합되어 자체 해수면온도의 변동성을 생산한다. SOM에서 혼합층 깊이는 공간적으로 변동할 수 있다. 해양 열 수송과 모델 바이어스를 설명하기 위해, 플럭스 보정(Q-flux)이 SOM에 적용되었다. Q-flux는 SST와 해빙 상태를 기후 값으로 처방한 CAM3.1로 200년 모의 중 마지막 100년의 지표 플럭스로 강제한 SOM의 혼합층 기둥에 에너지 균형 식을 적용하여 얻어진다. CAM3의 지면 과정은 Community Land Model version 3(CLM3; Oleson *et al.* 2004)로 모의된다. 이 지면 모델은 지표와 지표에서 가까운 토양 층의 내부에서의 열적, 수문학적 과정과 지표와 대기 간의 열, 습도, 운동량속을 계산한다(Bonan *et al.* 2002; Oleson *et al.* 2004; Dickinson *et al.* 2006). 지표 격자에, 식생이 차지하는 부분은 plant functional type(PFTs)의 비율로 표현된다.

고위도 식생 변화의 열대 기후에 대한 영향을 규명하기 위해, 현재 식생으로 규준실험(CNT)과 이산화탄소 이배증 하에서 미래에 북극 식생의 상태를 가정한 실험(VEG)을 수행하였다. 실험 설정은 위도 방향 2˚X 경도 2.5˚ 수평해상도의 유한 체적 역학 코어를 사용한 것을 제외하면 Chae *et al.*(2015) 과 같다. 모의 세부 사항은 Chae *et al.*(2015)를 참고할 수 있다. Jeong *et al.*(2011)의 모의는 같은 대기모델을 사용하였지만 동적식생모델과(DGVM; Levis *et al.* 2004) 접합하였고 고위도 초원과 관목이 이산화탄소 이배증에 대한 반응으로 한대 숲으로 대체되었다고 가정하였다. 이리하여, 민감도 실험 VEG에서 북위 60˚이상에서 초원과 관목은 한대 숲으로 대체시키고 나머지 격자는 현재 기후 값으로 고정하였다. 식생 변화의 열대 강수에 대한 최대 영향을 연구하기 위해 모든 초원과 관목이 대체된 극한의 경우를 고려하였다. 이러한 경우에 Jeong *et al.*(2011)의 동적식생모델을 이용한 이산화탄소 이배증에 대한 반응보다 여름철 잎면적 지수의 변화가 25% 더 크다. 또한 덜 급진적인 상황으로 초목만 한대 숲으로 대체시킨

실험을 고려하였다. 그 결과, 정도는 달랐지만 정성적으로 매우 유사하게 나타났으므로 급진적인 실험의 결과만 나타내었다. 각 적분은 100년간 수행되었고 분석은 마지막 80년의 평균으로 하였다. VEG와 CNT 사이의 기후 평균의 차이는 δ로 표시할 것이다.

(3) 연구 결과

(가) 반구의 에너지 불균형과 열대 강수 이동

Fig. 12는 북극 식생 변화에 의한 시간 평균된 에너지 수지 차이를 보여준다. 북극권에 더 어두운 식생으로의 변화로 인해 더 많은 일사량이 북반구 고위도에 흡수된다. 시간 평균된 에너지 균형에서, 북위 60°N에서 남쪽으로의 에디 활동에 의해 남는 에너지는 저위도로 이동한다. 북반구 아열대에서 에디 플럭스에 의한 에너지의 46%는 대부분 해들리 순환에 의해 남반구로 수송된다. 북반구 아열대는 남반구 아열대보다 더 따뜻해지고 적도를 가로질러 에너지를 남쪽으로 수송하는 아노말리 해들리 순환이 야기된다. 이것은 열대에서 코리올리 파라미터가 작기 때문에 대류권 상층에서 큰 수평 기온 경도가 유지될 수 없기 때문이다. 아노말리 해들리 순환의 아래 부분은 적도를 가로질러 북쪽으로 수분을 수송하여 열대 강수대를 북쪽으로 이동시킨다.

해들리 순환 질량 수송에 있어서 상부와 하부에서 적도를 가로지르는 에너지와 수분의 더 큰 수송이 수반된다. 적도에서는 에디 플럭스를 무시할 수 있기 때문에, 아노말리 해들리 순환에 의한 에너지 수송은 적도를 가로지르는 대기 에너지의 수송의 대부분을 설명한다. 그리고 아노말리 해들리 순환에 의한 수분 수송은 열대 강수의 이동을 야기하는 주요 요소이다. 그렇기에, 북으로의 열대 강수 이동의 크기는 남쪽으로의 적도를 가로지르는 대기 에너지 수송의 크기에 비례한다. 남쪽으로의 적도를 가로지르는 에너지 수송의 아노말리는 Fig. 12에 나타낸 것처럼 일반적으로 대기 에너지 수송의 부호가 바뀌는 곳에서 에너지 플럭스의 북으로의 이동을 이끈다(Kang *et al.* 2008). 에너지 플럭스는 해들리 순환이 상승하는 부분에 매우 상응하므로 동서 평균된 ITCZ의 위치이다.

(나) 계절적 변화

북극 녹화의 반응으로, 북반구는 식생 종류가 바뀐 유라시아의 북쪽 지역에서 모델의 가장 하층의 시간평균 기온이 최고 4.87 K까지 더 따뜻해진다(Fig. 13a). 남반구에 비해 북반구의 상대적인 온난화는 연평균 값에서 북쪽 열대의 습윤화와 남반구 열대의 건조화를 이끈다. 이것은 Swann *et al.*(2012)과 일치하는 결과이다. 북극에 도달하는 일사량이 크게 계절 변동하므로, 북극 온난화는 강한 계절 함수(Chae *et al.* 2015) 이고 더 저위도로 도달하는 온난화 징후의 크기이다. 특히 북반구 중위도의 온난화는 6~8월 여름에 최대이다. 하지만, 열대 강수의 가장 큰 북쪽으로의 이동은 3~5월 봄철에 일어난다(Fig. 13d). Hwang and Frierson(2013) 에 의하면, 열대 강수의 반응은 열대 강수 비대칭 지수 precipitation asymmetry index(PAI)에 의해 정량화된다.

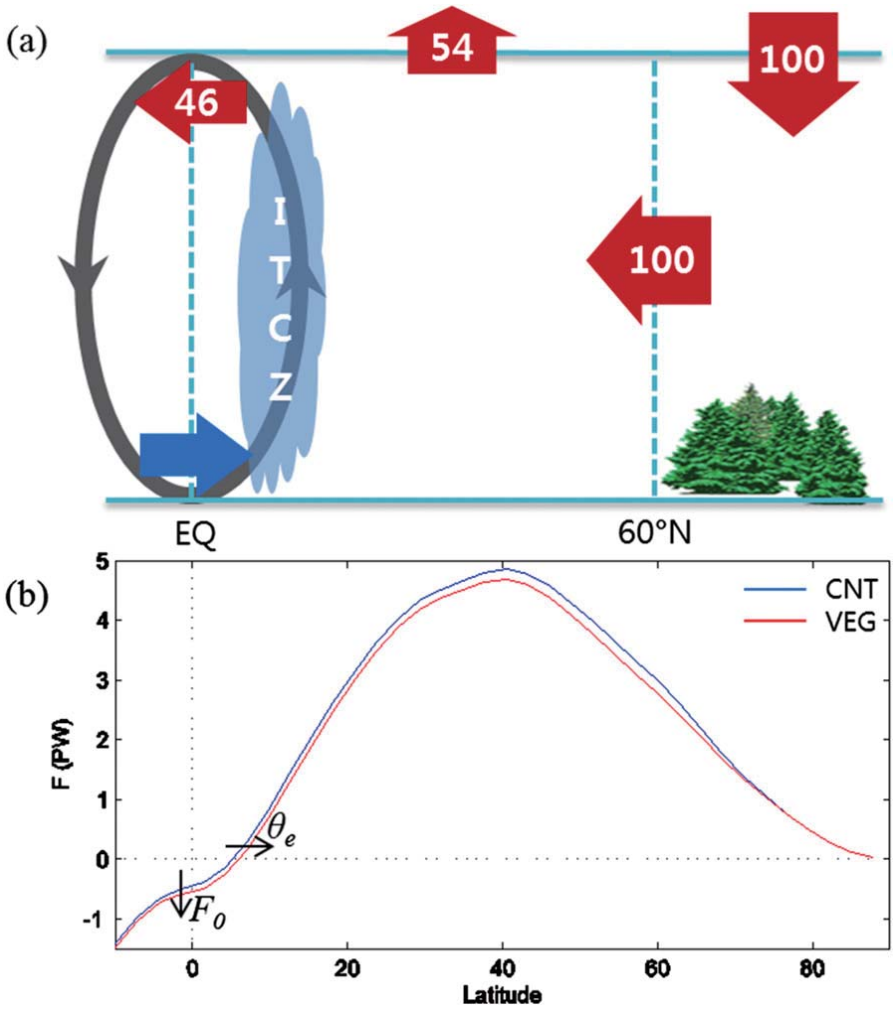


Fig. 12. (a) Schematic of the time-mean energy budget difference between VEG and CNT. With Arctic greening, there is 0.22 PW(shown as 100 units) more incoming TOA radiative flux(RTOA) poleward of 608N. Note that 46% of the surplus of R_{TOA} is transported southward across the equator. The resulting counterclockwise anomalous Hadley circulation transports moisture northward across the equator, leading to a northward shift of tropical precipitation. (b) The total atmospheric energy transport(F in PW) in CNT(blue) and VEG(red). As the southward cross-equatorial atmospheric energy transport increases(i.e., more negative F_0), the energy flux equator θ_e where F changes sign is shifted northward.

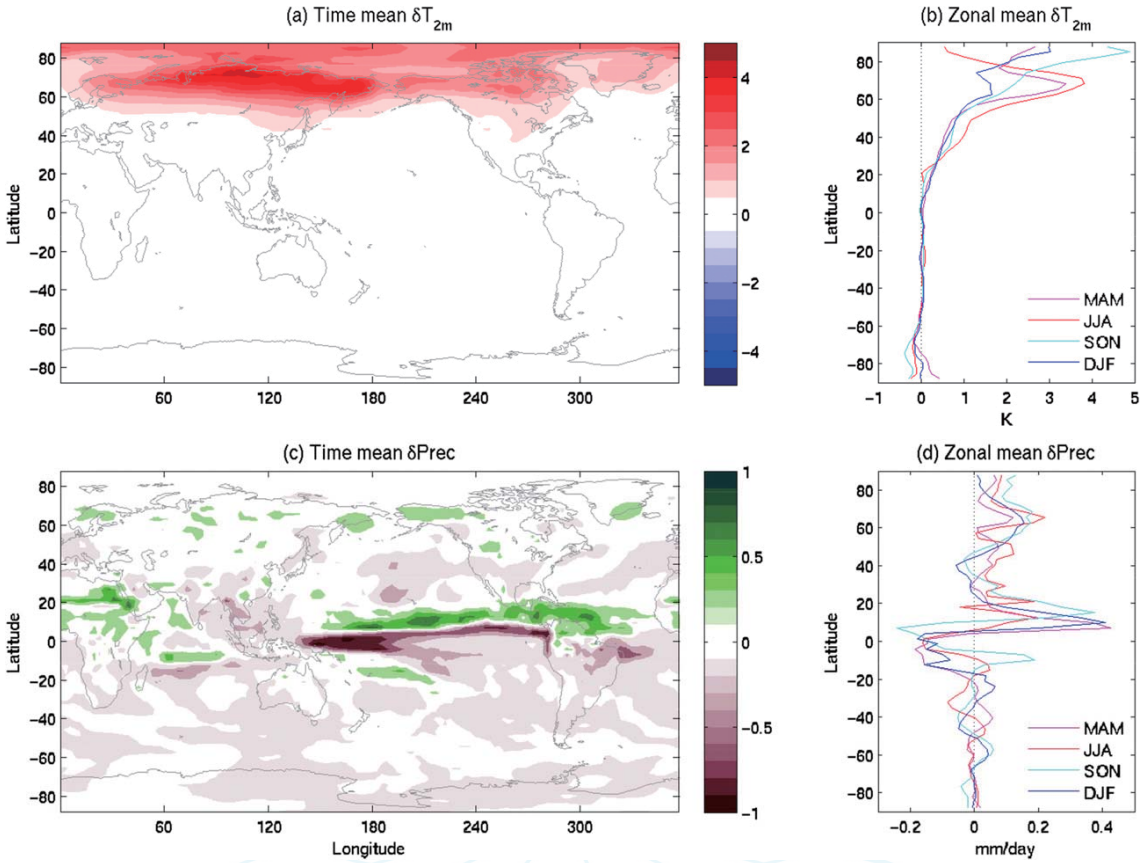


Fig. 13. The time-mean difference between VEG and CNT of the (a) lowest model level temperature (K) and (c) precipitation (mm/day). (b),(d) The zonal means of (a) and (c), respectively, in MAM (magenta), JJA (red), SON (cyan), and DJF (blue).

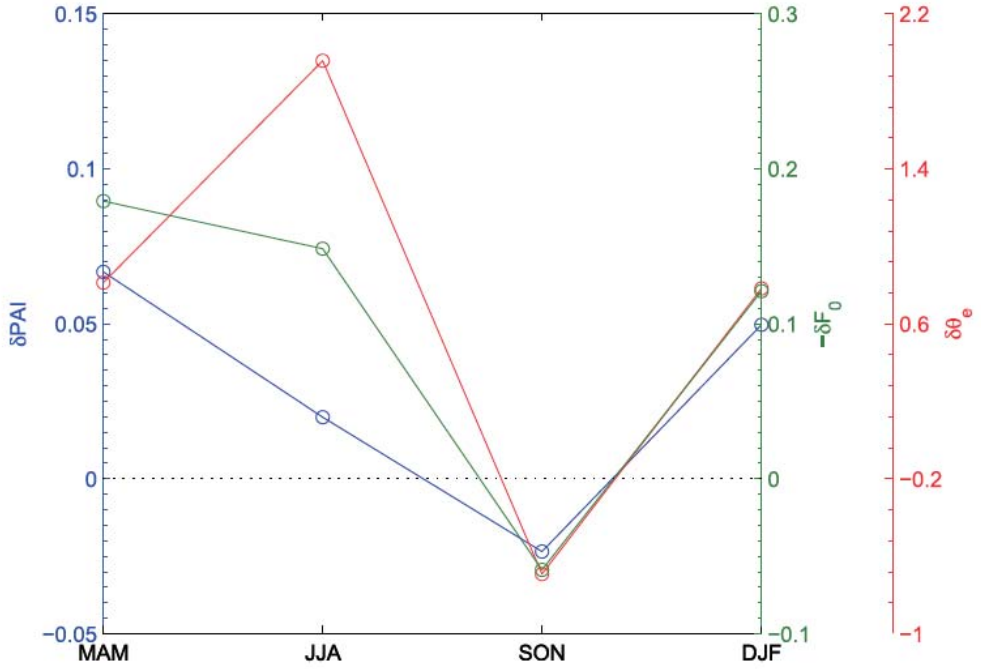


Fig. 14. The difference between VEG and CNT in precipitation asymmetry index δPAI (blue), negative of atmospheric energy transport between 15° S and 15° N($-\delta F_0$) in PW(green), and energy flux equator $\delta\theta_e$ in degrees (red).

KOPRI 극지연구소

여기서 P는 괄호에 있는 위도대를 따라 동서 평균된 강수이다. PAI의 양의 변화는 열대 강수의 북쪽으로의 이동에 해당한다. 계절에 따른 PAI의 반응은 Fig.14의 푸른색으로 보인다. Fig.13c로부터 열대 강수 연평균의 북쪽으로의 이동이 명백하다. 하지만, 그 크기와 열대 강수 반응의 방향은 계절에 따라 크게 변화한다. 북극 식생의 연중 변화에도 불구하고 가장 큰 북쪽으로의 이동은 봄철에 발생하고 흥미롭게도 9월~11월의 가을철에는 남쪽으로 약간 이동한다.

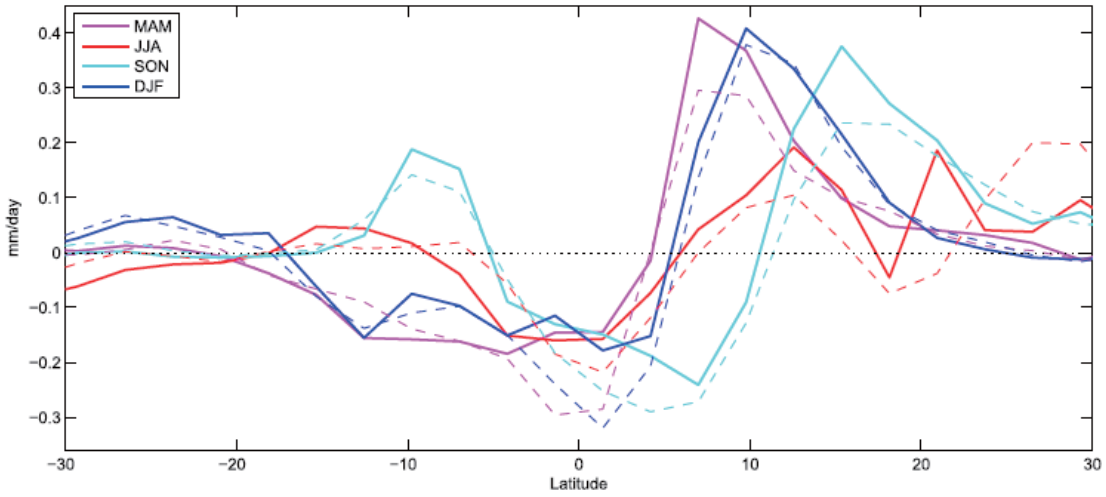
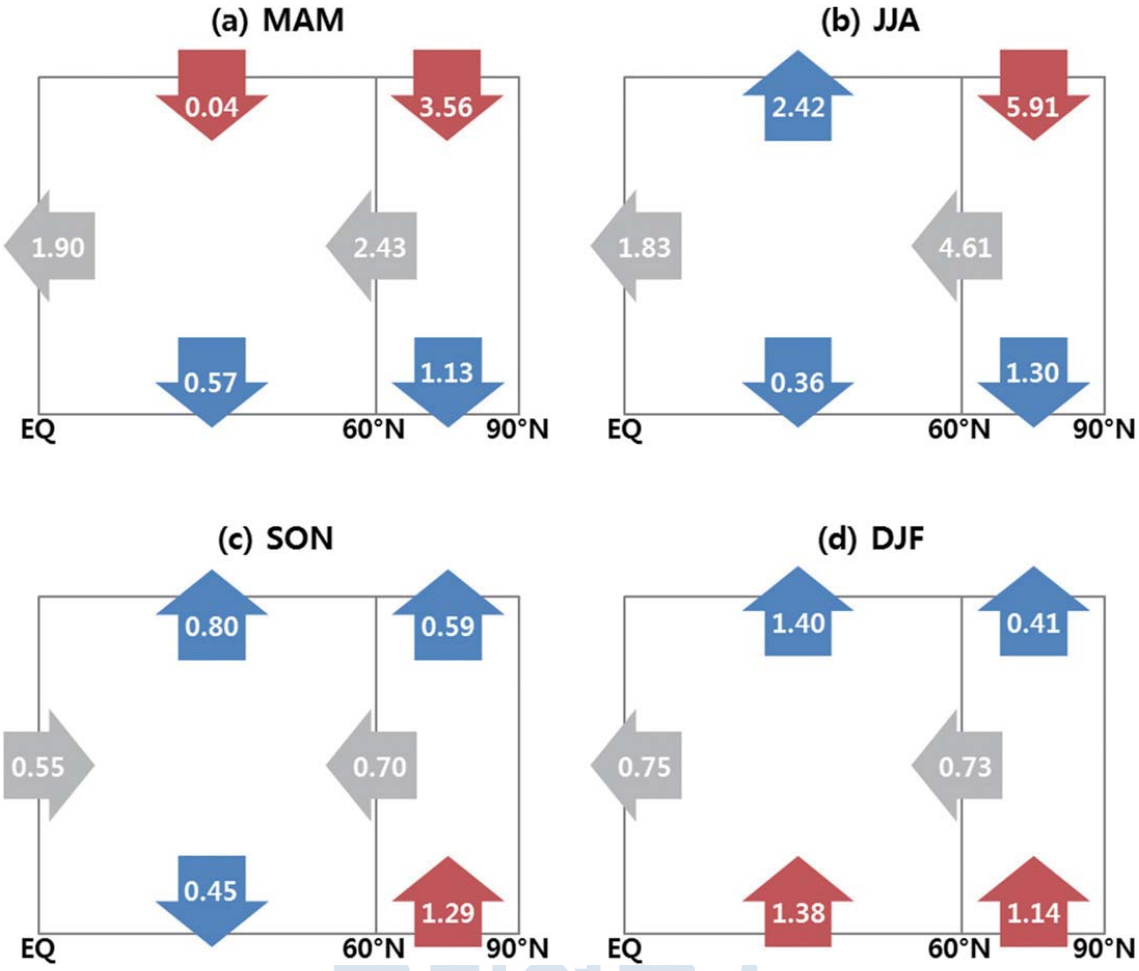


Fig. 15. The zonal-mean response of precipitation (solid) and $-[\overline{qCNT\nabla} \cdot \delta\bar{v}]$ (dashed) between 30° S and 30° N in MAM, JJA, SON, and DJF in magenta, red, cyan, and blue, respectively.

모든 계절에 있어서, 열대 강수의 반응은 Fig. 15에서 직선과 점선 사이의 총 유사성에 의하면 대체로 해들리 셀의 시간/동서 평균 아노말리 질량의 수송에 의한 습기 수렴의 변화에 의한다. 총 습기 안정의 변화가 거의 없을 때(Kang *et al.* 2009), 열대에서 δPAI는 아노말리 대기 에너지 수송의 크기에 비례할 것으로 기대된다. δF_0로 나타낸 15° S에서 15° N에 평균된 대기 에너지 수송 반응의 절대적인 크기는 Fig. 14에 각 계절별로 초록색으로 나타냈다. 붉은색으로 함께 나타낸 것은 에너지 플럭스 적도 $\delta\theta_e$의 반응이다. $|\delta F_0|$와 $\delta\theta_e$ 둘 다 열대 강수 반응의 계절성 δPAI 을 정확히 예측한다.



극지연구소

Fig. 16. Schematic of the response of the energy budget in (a) MAM, (b) JJA, (c) SON, and(d) DJF. Top and bottom arrows indicate the response of TOA radiative fluxes(δR_{TOA}) and net surface energy fluxes(H), each minus the global mean, respectively. Blue(red) corresponds to cooling(warming) the atmosphere column. Gray denotes the response of atmospheric energy transport dF at given latitude. Unit in 10^{14} W.

무엇이 F_0의 변화를 이끄는지 이해하기 위해서, TOA와 지면(H)에서 연직 플럭스의 변화와, 각각에서 전구 평균을 뺀, 각 계절별로 적도와 60° N 을 가로지르는 남북 방향의 대기 에너지 수송(F)를 비교하였다(Fig. 16). 우리는 Fig. 17에 TOA 복사속의 변화를 다섯 성분으로 분해하였다: 지면 알베도(S_{ALB})에 의한 단파복사속(SW), 구름 단파복사속(S_{CLD})과 구름 없는 단파복사속(S_{NCLD})효과, 청천 장파복사속(L_{CLR})과 구름 장파복사 강제(L_{CRF}). TOA 단파복사속은 approximate partial radiative perturbation (APRP) method(Taylor *et al.* 2007) 방법을 이용해 세 개의 항으로 나누었다. 지면 에너지 플럭스 (H)는 단파, 장파, 현열과 잠열 속으로 나뉜다(Fig. 18).

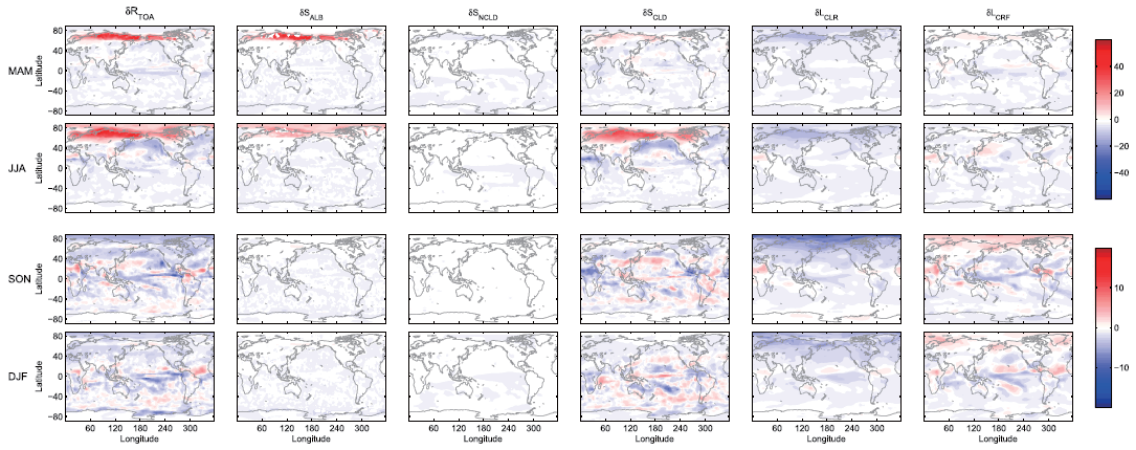


Fig. 17. The response of TOA radiative fluxes. From left to right, net flux, shortwave radiative flux decomposed into surface albedo, noncloud effects, cloud effects, longwave clear-sky radiative flux, and longwave cloud radiative forcing in(from top to bottom) MAM, JJA, SON, and DJF. Positive corresponds to downward(i.e., warming the atmosphere). Units are Wm^{-2}.

극 지역의 일사량은 여름과 겨울보다는 봄과 여름에 큰 계절 변동성을 보인다: 60° N에서 극 방향으로 순 TOA 단파속의 양이 143 W/m^2과 302 W/m^2 대 60 W/m^2 and 8W/m^2. 그러므로 북극 식생 변화의 지면 알베도(S_{ALB}) 감소에 대한 효과는 단지 봄과 여름에 우세하다(Fig. 17, 두 번째 열). Fig. 17과 Fig. 18에서 봄-여름과 가을-겨울 사이의 차이가 크다. 봄과 여름에, 북부 유라시아에서 S_{ALB}의 차이는 하층운의 감소로 인해 δS_{CLD}(Fig. 17,4번째 열)에 의해 증폭된다(Fig. 19). 따라서 60° N 북쪽의 대기는 구름 피드백에 의해 여름철에 더 큰 양만큼 TOA로부터 따뜻해진다. 지면에서(Fig. 18), 감소된 지면 알베도는 60° N 이상 극 쪽의 지면을 향한 단파복사속을 크게 증가시키는데, 이것 중 일부는 상향 장파와 난류 속에 의해 보완되고 일부는 해양에 저장된다. Fig. 16a와 Fig. 16b에 나타낸 것처럼, 60° N 극 쪽에서 대기로의 순 에너지의 잉여는 60° N 에서 남쪽으로의 대기 에너지수송과 균형을 이룬다. 적도와 60° N 사이에, 대기는 증가된 하층운에 의해 (Fig. 19) 북태평양 북부에서 δS_{CLD}에 의해 JJA에 TOA에서 냉각된다(Fig. 17). 약 0.19 PW 남는 것은 MAM과 JJA에 해들리 순환에 의해 적도를 가로질러 남쪽으로 수송되고, 이것은 적도 강수의 북쪽으로의 이동을 수반한다.

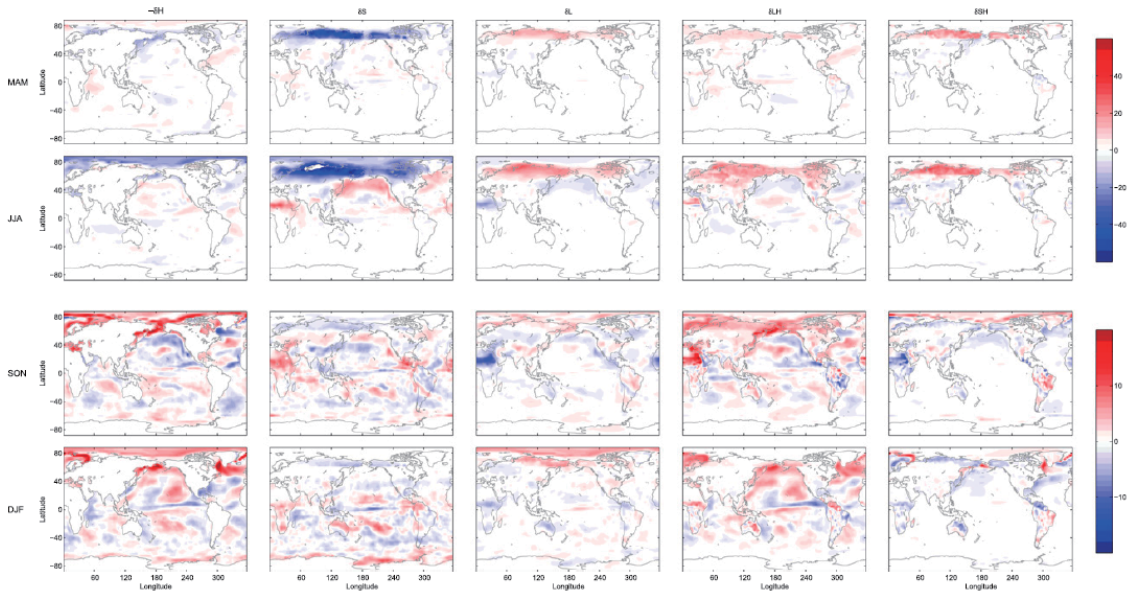


Fig. 18. The response of surface energy fluxes. From left to right, total flux, net shortwave flux, net longwave flux, latent heat flux, and sensible heat flux in (top to bottom) MAM, JJA, SON, and DJF. Positive corresponds to upward (i.e., warming the atmosphere). Units are Wm^{-2}.

SON과 DJF에 일사량은 극지역에 거의 도달하지 않기 때문에 극 녹화의 δS_{ALB}에 대한 영향은 무시할 수 있다(Fig. 17의 두 번째 열), 이것은 따뜻해진 대기의 δL_{CLR} 냉각 효과(Fig. 17의 다섯 번째 열)에 의한 상쇄보다 더 크다. 극지역 대기는 SON에 더 따뜻하기 때문에(Chae *et al.* 2015) 냉각 효과는 DJF 보다 SON에 더 크다. 이것은 MAM과 JJA와는 다르게 60° N의 극쪽에 TOA에서 큰 에너지 손실을 이끈다. 하지만, 난류속의 증가를 통해 지면에서 그 위 대기로의 상당한 에너지 전이가 있다(Fig. 18의 네 번째, 다섯 번째 열). 이러한 지면 플럭스는 MAM과 JJA 동안 해양에 저장되어 있는 에너지를 방출시키고 특히 해빙 손실이 있는 지역에 집중되어 있다.

결과적으로, 60° N 극쪽의 대기는 약 0.07 PW 정도 에너지를 더 받고 이것은 60° N를 가로질러 남쪽으로 수송된다. DJF에 적도와 60° N 사이에서, 이 에너지 속의 대부분은 남쪽으로 향하는 적도를 가로지르는 대기 에너지 수송과 균형을 이룬다. 반면 SON에 대기는 TOA와 지면에서 60° N에서 수송을 통해 받은 것보다 더 많은 에너지를 잃고(δL_{CLR}을 통해서), 이것은 0.06 PW의 적도를 가로지르는 대기 에너지의 북쪽으로의 수송을 가져온다. 그 결과로 아노말리 해들리 순환은 적도를 가로질러 수분을 남쪽으로 수송하고 열대 강수의 남쪽으로의 이동을 이끈다. 이리하여, 북극 식생의 연간 변화의 열대 강수에 대한 영향은 극야 동안 북극에 도달하는 적은 일사량과 계절에 따라 변화하는 기후 피드백과 에너지 저장으로 인해 계절에 따라 광범위하게 다르다. 예를 들어, SON에 북극 온난화에 대한 식생 종류의 변화의 효과는 더 따뜻한 대기가 더 많은 L_{CLR}

을 방출하고 지면 난류속을 감소시키는 중위도 냉각에 비하면 매우 작다. 따라서 북반구 대기는 SON에 에너지를 잃고, 대기의 에너지는 적도를 가로질러 북쪽으로 수송하고 열대 강수는 남쪽으로 이동시키는 반대의 시간 평균된 반응을 갖게 된다.

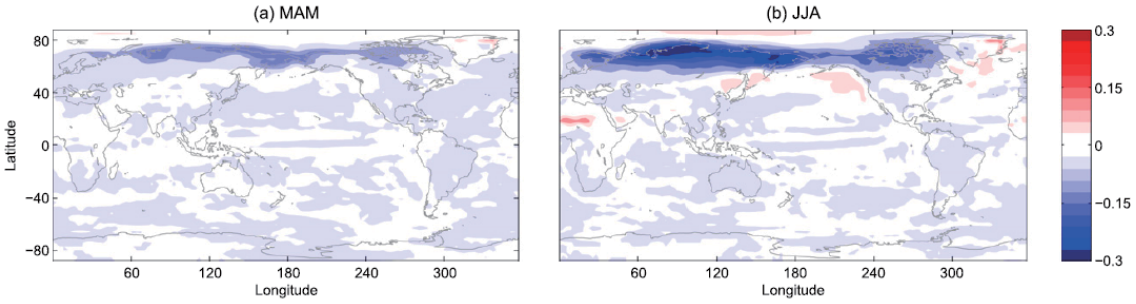


Fig. 19. The response of low cloud amount in (a) MAM and (b) JJA.

(4) 요약

본 연구(Kang *et al.*, 2015)에서는 혼합층을 모의하는 해양 모델과 결합된 NCAR CAM3.0-CLM3.0을 이용하여 환북극 녹화가 열대 강수에 미치는 영향을 조사하였다. 60° N 보다 북쪽의 초원 또는 관목의 모든 격자를 한대숲으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 시간 평균하여 분석하면, 태양 복사를 더 흡수하는 식생으로의 변화로 인해 아열대보다 북쪽의 위도대에서 태양복사의 흡수가 더 증가하고 이로 인해 지면 온도가 증가하였다. 북반구에 더 흡수된 에너지 아노말리로 인해 해들리 순환이 변화하고 남쪽으로 재분배되어 열대 강수대의 북쪽으로의 이동을 가져온다.

그런데, 북극 식생의 변화 강제력이 연중 주어졌기 때문에 열대 강수의 북쪽으로의 이동이 연중 있을 것으로 기대를 했으나, 결과는 그렇지 않았다. 가을인 SON에는 다른 계절과는 반대로, 열대 강수대는 남쪽으로 이동한다. 극야 동안에, SON과 DJF에는, 북극에 도달하는 일사량이 거의 없기 때문에 식생 녹화의 효과는 매우 작다. 예를 들어, SON과 DJF에, 60° N의 극쪽에 청천 단파복사는 3.24 W/m^{2}와 1.25 W/m^{2}만큼 증가하는 반면 MAM과 JJA에는 23.66 W/m^{2}과 19.71 W/m^2 만큼 증가한다. SON에 단파복사의 증가는 따뜻한 대기로부터 증가된 OLR에 의한 상쇄보다 더 크기에 북부 아열대 대기는 TOA에서 냉각된다. TOA에서 냉각 효과는 계절의 저장과 해빙 면적의 손실로부터 증가된 난류 지면 플럭스에 의해 압도되고 따라서 고위도에서 대기로의 약간의 에너지 입력이 있다. 이러한 아노말리 에너지는 남쪽으로 수송되지만 북극 이외 북반구 대기를 냉각시키는 증가된 OLR과 감소된 난류 지면 플럭스에 의해 보완되는 것 이상이다. 따라서 아노말리 해들리 순환은 에너지를 북쪽으로 재분배하게 되고 열대 강수의 남쪽으로의 이동을 야기한다.

북극 녹화에 대한 열대강수의 반응에 있어서 이러한 큰 계절 변동성은 주로 극 지역의 일사량이 큰 계절성을 가지기 때문이다. 이렇기에 연평균 ITCZ의 더 따뜻한 반구

로의 이동을 보인 약화된 대서양 열염분 순환과 북극 해빙 손실과 같은 고위도 기후 강제에 대한 열대 강수의 반응(즉, Zhang and Delworth 2005, Deser *et al.* 2015)은 상당한 계절 의존성을 가질 것으로 기대할 수 있다. 반대로, 극지방 이외에서 식생의 변화가 있는 경우에는, 열대 강수의 반응이 계절성이 거의 없을 것으로 기대할 수 있다. 실제로, Swann et al.(2014)는 유라시아의 확장된 숲 면적과 사하라의 초원이 계절에 상관없이 일관되게 열대 강수의 북으로의 이동을 초래함을 보였다. 미래 전망에서, 불확실성이 크기는 하지만 열대 강수는 남반구보다 북반구에서 온난화가 더 크기에 북쪽으로 이동할 것으로 기대된다(Friedman *et al.* 2013). 본 연구는 북극 녹화가 다른 계절에는 강화될 수 있지만, SON에는 열대강수의 북쪽으로의 이동을 약간 상쇄할 수 있음을 제안한다.

다. 미래 환북극 동토층 전망 (미래 기후 변화 시나리오)

(1) 연구 배경

전체 면적이 2천 3백만 제곱킬로미터로 북반구 육지 면적의 24%를 차지하고 있는 북극권 영구동토는 지구 온난화와 함께 더욱 주목받고 있다. 그 이유는 이곳에 많은 양의 썩은 식물이나 동물의 사체와 같은 유기물이 얼어있는데, 동토층이 녹아내리면서 이러한 유기물도 녹게 되고 이에 따라서 미생물의 분해가 증가하게 되기 때문이다. 이 분해 과정에서 땅 속의 이산화탄소나 메탄이 공기 중으로 방출될 수 있다. 메탄은 이산화탄소 21배의 온실효과를 가지는 기체로 적은 양이 배출되더라도 그로 인한 온실효과는 매우 클 수 있으며, 일단 대기 중으로 방출되면 평균 잔류시간이 8.1년 되는 안정된 기체이다. 그러나 방대한 영구 동토 영역에서 방출되는 이산화탄소나 메탄의 양을 관측을 통해 추정하기는 매우 어려운 일로, 본 연구에서는 지구시스템 모델을 이용한 수치모델링 기법으로 현재 및 미래에 동토 영역에서 방출되는 이산화탄소 및 메탄의 양을 추정하였다.

본 연구에서는 지구 시스템 모델을 이용하여 미래 온난화된 기후 하에서 환북극 동토의 해동이 어떻게 될지, 그로 인해 초래될 수 있는 이산화탄소와 메탄의 방출은 어떠할지 전망하였다.

(2) 연구 방법

본 연구에서는 동토층 및 전지구의 미래 변화를 모의하기 위하여 NCAR의 생지화학 모듈 결합 지면모델 CLM(Community Land Model) 4.5의 BGC(BioGeoChemistry)를 사용하였다. BGC는 본 연구 과제의 당초 목표였던 탄소 순환 뿐 아니라 메탄 순환까지 포함 되어 있는 모델로 이 모델을 이용하여 메탄의 방출까지 고려할 수 있었다. CLM 4.5는 CCSM 지구시스템 모델의 지면을 구성하는 모델로써, 생지물리, 수문, 생지화학 과정들이 포함되어 있다(Koven *et al.*, 2013; Oleson *et al.*, 2013).

이 실험은 CESM에서 지면 모형만 사용하는 오프라인 실험으로 진행하였고, 실험에

사용된 대기 경계조건은 NCAR의 Parallel Climate Model 기후 모형을 이용하였다. CLM4.5의 오프라인 모델링을 위해서는 대기로부터 지면 모델로 주어지는 강제력이 필요하다. 미래 온난화 시나리오로는 Special Report on Emissions Scenarios(SRES)의 A2 시나리오를 이용하였다. 따라서 현재 이산화탄소 농도는 관측 값대로, 미래의 이산화탄소 농도는 SRES A2 시나리오에 따라 변동하도록 설정하였다. 새로운 보정법을 적용하여 바이어스를 보정하고 다운스케일 하여 대기 강제력 값을 주었다 (Li *et al.*, 2010). 자료의 수평 해상도는 1° X1° 이며, 시간 해상도는 3시간 간격으로 강수, 바람장, 기온, 습도, 태양복사, 기압 변수가 지면 모델에 입력되었다. 모의 기간은 2005년부터 2099년으로 현재 기후부터 21세기 전망되는 미래 기후까지 모의하였다(Fig. 20).

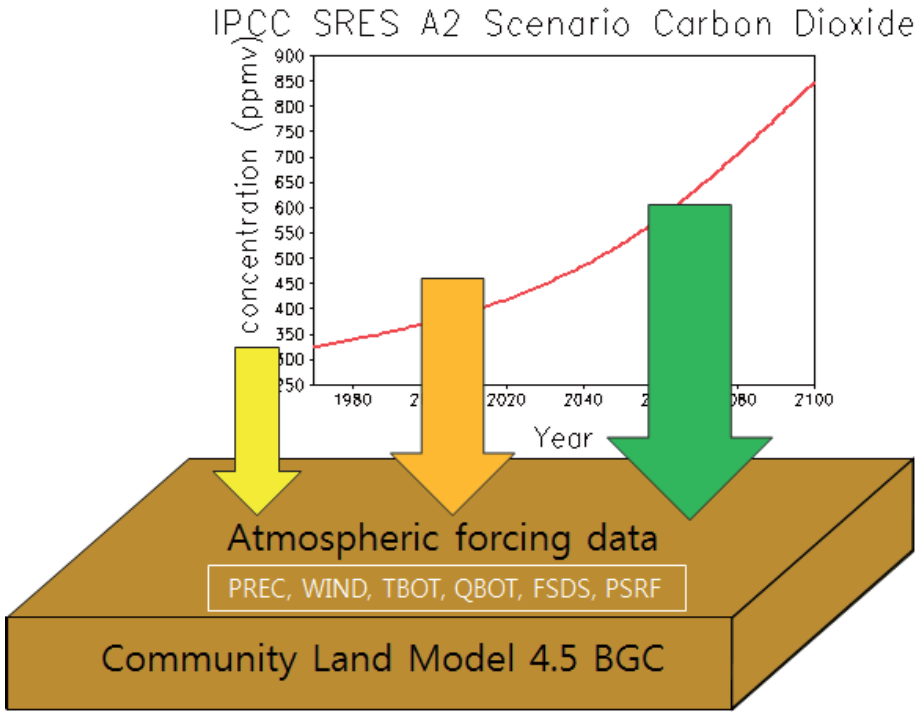


Fig. 20. Experiment design using CLM4.5 BGC and SRES A2 scenario.

(3) 연구 결과

(가) 동토활동층 깊이

동토영역의 활동층 깊이를 모의한 결과, 온난화에 따라 현재에 비해 미래에는 활동층의 깊이가 깊어지는 것으로 예상되었다. 현재 영구동토로 분류되는 유라시아 대륙의 위도 60도 이상 지역이 21세기 중반이 되면 활동층 깊이가 30 cm 이상이 되어 사실상 영구동토가 아닌 지역으로 바뀌게 된다. 특히 21세기 후반이 되면 북극해를 둘러싼 지역을 제외하면 카라-바렌츠 해와 접해있는 지역들도 영구동토가 아닌 지역으로 바뀌게

된다(Fig. 21).

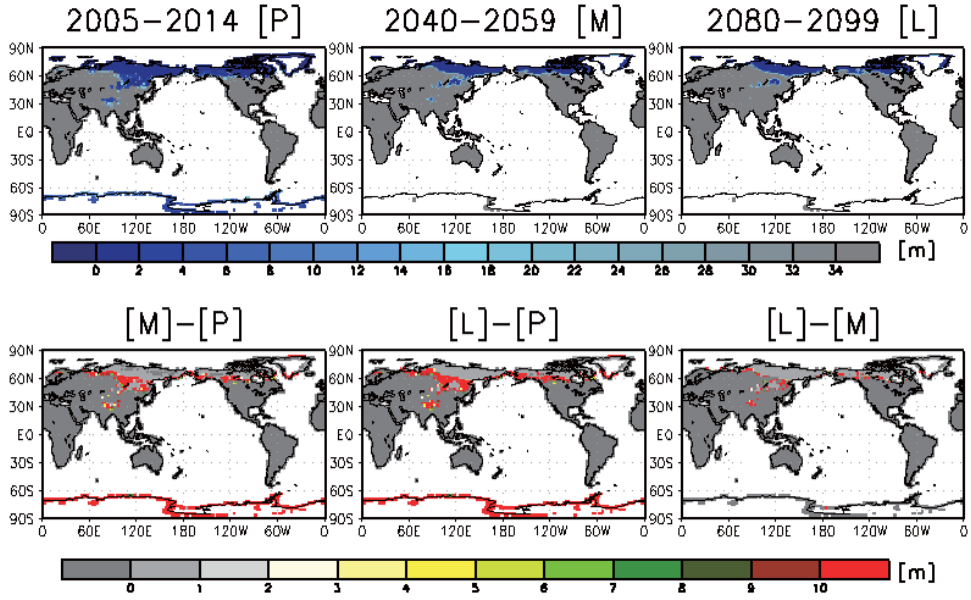


Fig. 21. Projection for the active layer thickness.

동토영역의 활동층 깊이의 증가는 동토층 아래 토양 속 수상의 변화를 의미한다. 녹은 토양에서는 얼음의 감소 및 수상의 증가를 기대할 수 있다. 북미 대륙과 유라시아 대륙의 대표적인 동토 지역인 알라스카와 시베리아 지역의 토양 속 얼음 및 수상의 시간에 따른 변화를 분석하였다(Fig. 22). 이때 알라스카는 60° N-70° N, 160° W-140° W, 시베리아는 60° N-75° N, 100° E-130° E 영역으로 정의하였다. 두 지역 모두 토양 온도의 증가와 함께 토양 얼음상의 감소, 토양 수상의 증가가 보이고 있다.

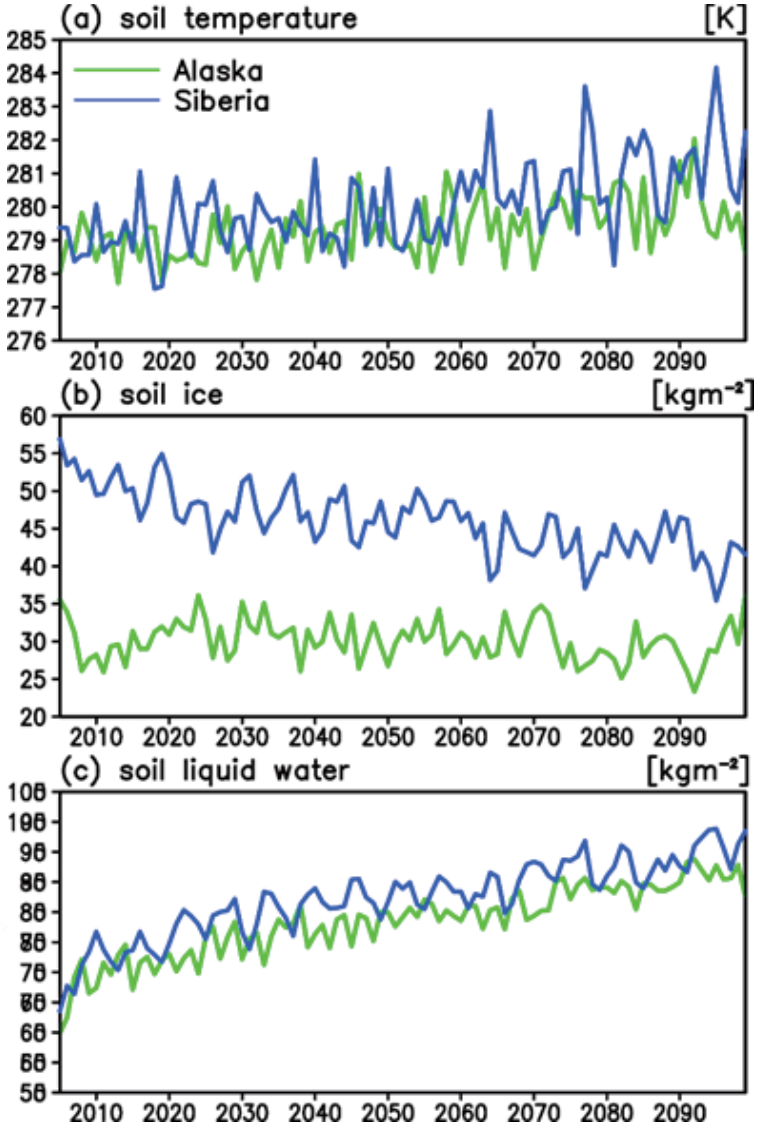


Fig. 22. Time series for soil temperature, ice, water in Alaska and Siberia under global warming.

2014년 11월 덴마크 코펜하겐에서 열린 제 40차 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 회의에서 승인된 “기후변화 2014 종합 보고서(Climate Change, 2014: Synthesis Report)” 에 의하면, 지구 평균 표면 온도가 상승함에 따라 지표면 근처 영구동토층이 감소할 것은 사실상 확실하며, 다중모델 평균을 바탕으로 볼 때, 영구동토층(지표면 근처 상층 3.5 m 까지)은 RCP2.6에서 37%, RCP8.5에서 81%까지 감소할 것으로 전망된다고 언급하였다.

그러나, 이 IPCC 5차 보고서에는 동토로부터 방출되는 탄소는 고려되지 않았다. 본 과제에서 수행된 미래 기후변화 시나리오에 의하면, 동토에서 방출되는 이산화탄소까지 고려된다면 21세기 말 대기 중 이산화탄소의 농도는 더욱 증가할 것으로 전망된다.

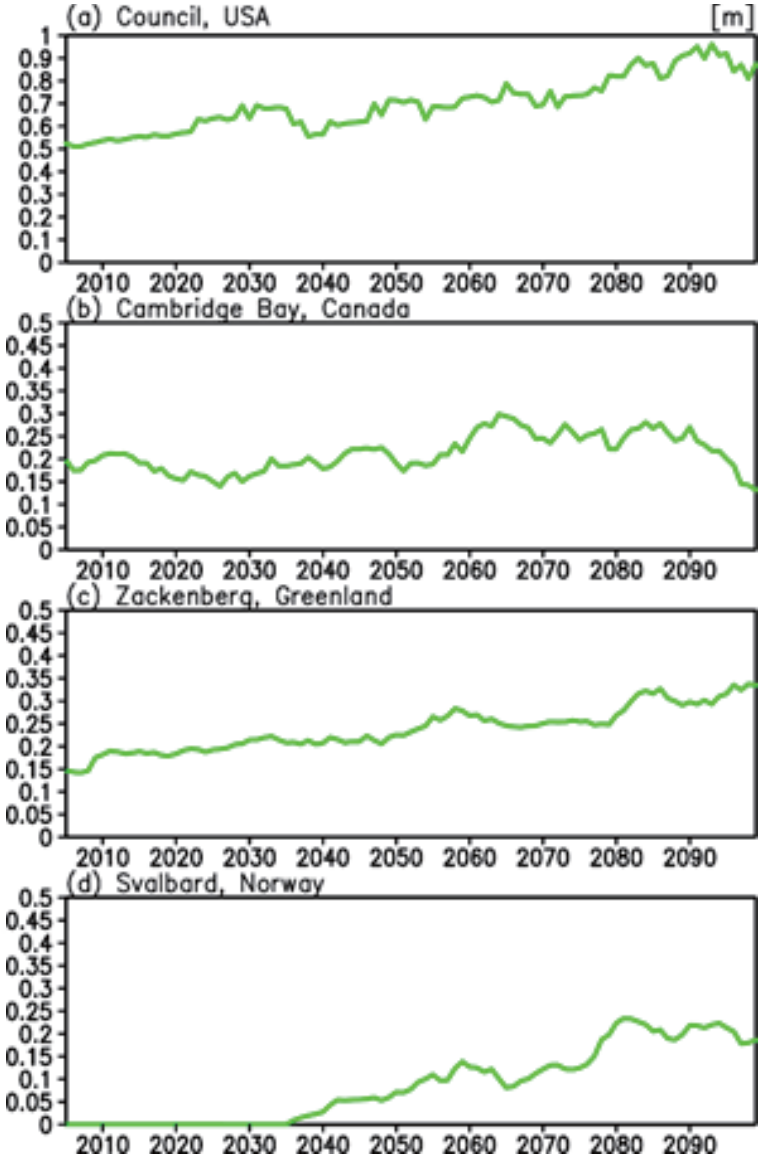


Fig. 23. Time series for the active layer thickness in the circum-arctic monitoring nodes.

환북극 동토 관측 사이트의 활동층 깊이의 시계열을 통해 각 관측 사이트가 동토를 벗어나는 시점을 분석하면, 카운실 지역은 2090년경에 1 m 이상 이 되어야 영구동토이고 그린란드의 자켄버그는 2100년에는 30 cm이상 되어야 영구 동토가 될 것으로 전망된다. 반면, 2030년대 중반까지 지표가 동토이던 스발바르는 그 이후에 동토의 깊이가 증가하고 2100년경에는 20cm 정도의 깊이가 될 것으로 전망된다(Fig. 23).

(나) 미래 동토의 이산화탄소 전망

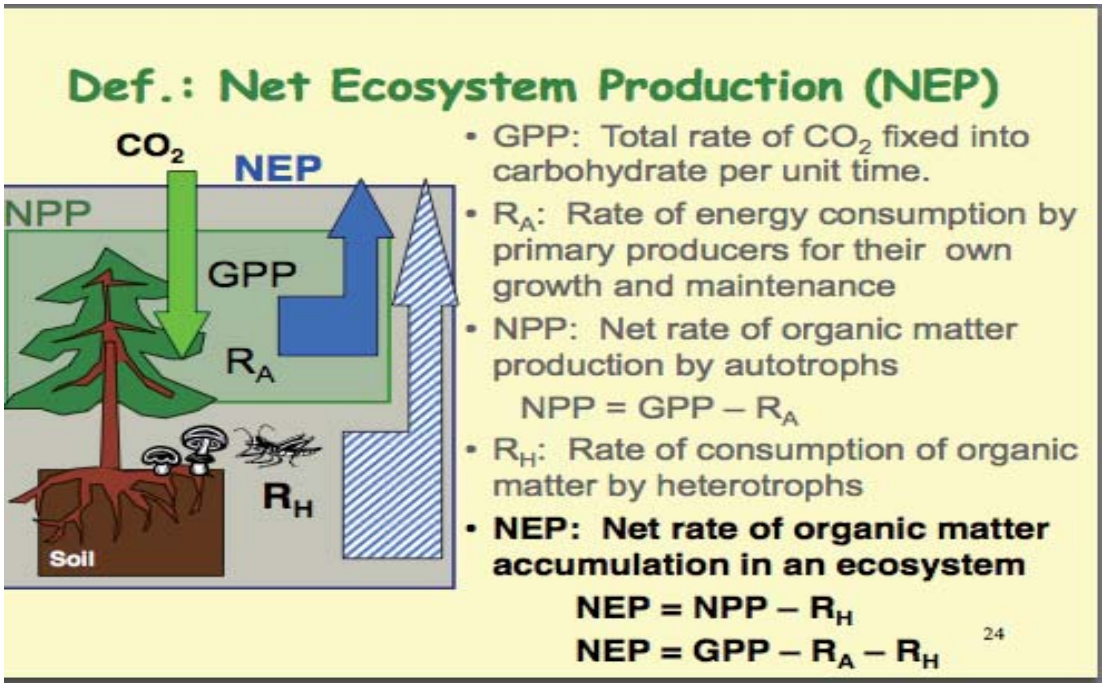


Fig. 24. The concept of net ecosystem production (https://www.studyblue.com/notes/note/n/chapter-19-ecosystems-and-primary-productivity-/deck/6646503).

KOPRI 극지연구소

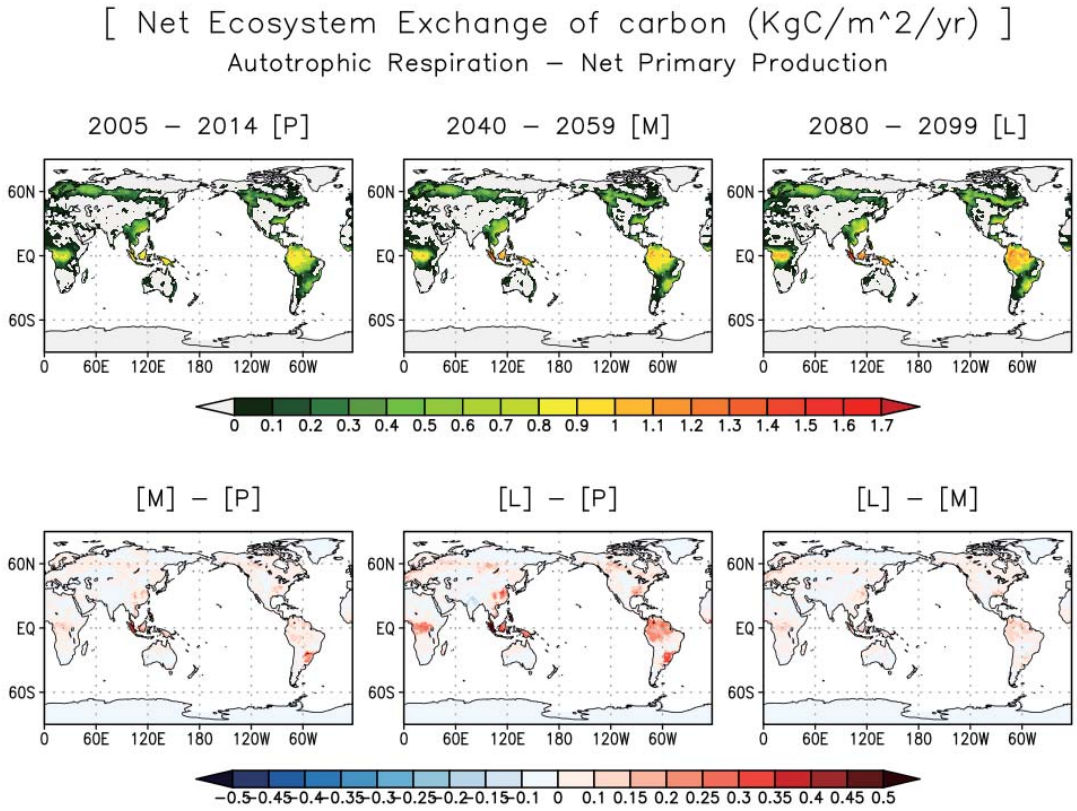


Fig. 25. Projection of net ecosystem exchange of carbon.

극지연구소

순 이산화탄소의 교환량(NEE, Net Ecosysem Exchange of carbon)은 식물의 자가영양호흡(AR, Autotriphic Respiration)과 순 일차 생산량(NPP, Net Primary Production)의 차에 의해 결정된다(Fig. 24). 생태계 호흡의 차이인 순 이산화탄소 교환량은 서부중앙 아프리카와 유라시아지역, 남아메리카 대부분과 북아메리카 일부 지역, 양쯔 강 이남 지역에서 자가영양호흡이 더 많아 양의 값으로 나타난다(Fig. 25). 미래 21세기 중반과 후반에는 이산화탄소의 교환량이 현재보다 증가하는 추세를 보이는데, 특히 양쯔 강 이남의 상록수림과 아열대 활엽수림과 침엽수림, 북아메리카 활엽낙엽림, 남아메리카의 열대활엽 몬순지역에서 강하게 나타난다.

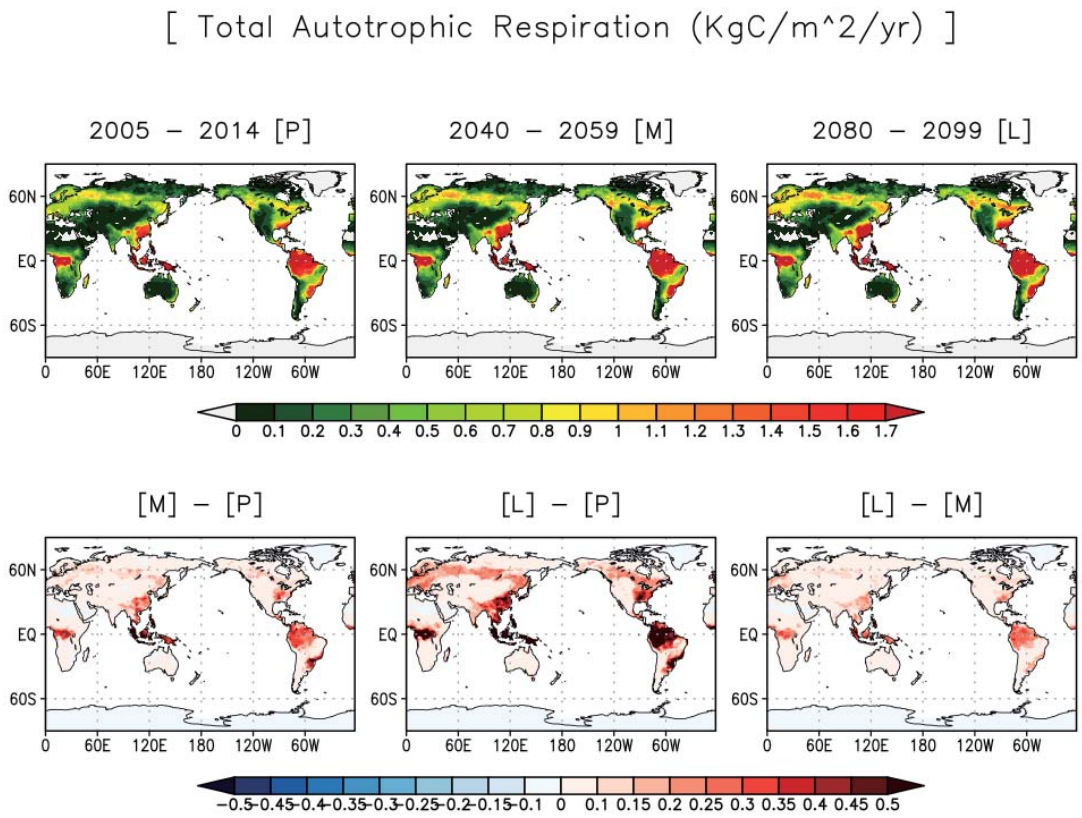


Fig. 26. Projection of total autotropic respiration.

극지연구소

자가영양호흡은 광합성을 하는 유기체(식물)에 의한 호흡을 의미한다. 자가영양호흡(AR)은 순 이산화탄소 교환량(NEE)이 증가하는 지역과 동일한 지역에서 21세기 후반으로 갈수록 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 26).

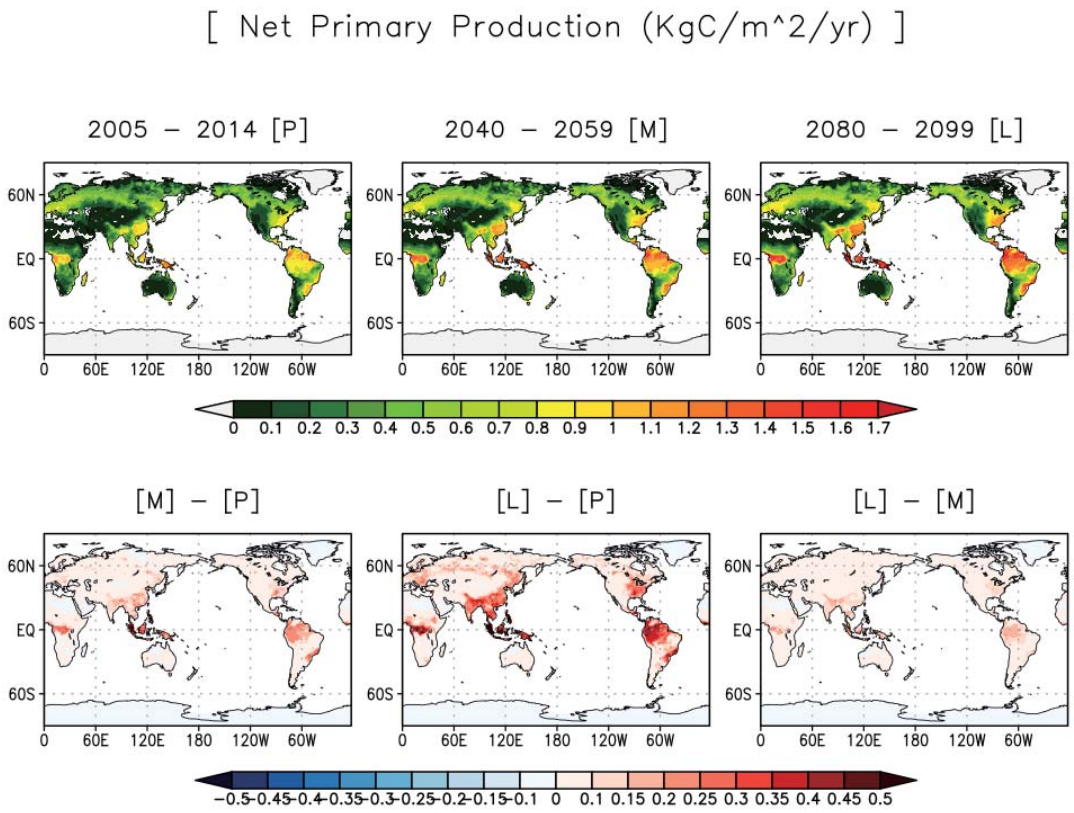


Fig. 27. Projection of net primary production.

극지연구소

순 일차 생산량(NPP)은 식물의 광합성에 의해 저장된 총 일차 생산량(GPP, Gross Primary Production)과 식물의 성장과 유지에 사용되는 호흡과의 차이를 의미한다. 21세기 중반과 후반으로 갈수록 순 일차 생산량(NPP)은 순 이산화탄소 교환량(NEE)이 증가한 지역과 동일한 지역에서 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 27). 21세기 후반으로 갈수록 자가 영양호흡(AR)과 순 일차 생산량(NPP)은 모두 증가하지만 자가 영양호흡량이 순 일차 생산량보다 상대적으로 더 많으므로 결론적으로 21세기 후반으로 갈수록 순 이산화탄소의 교환량(NEE)이 증가하게 된다(Fig. 25).

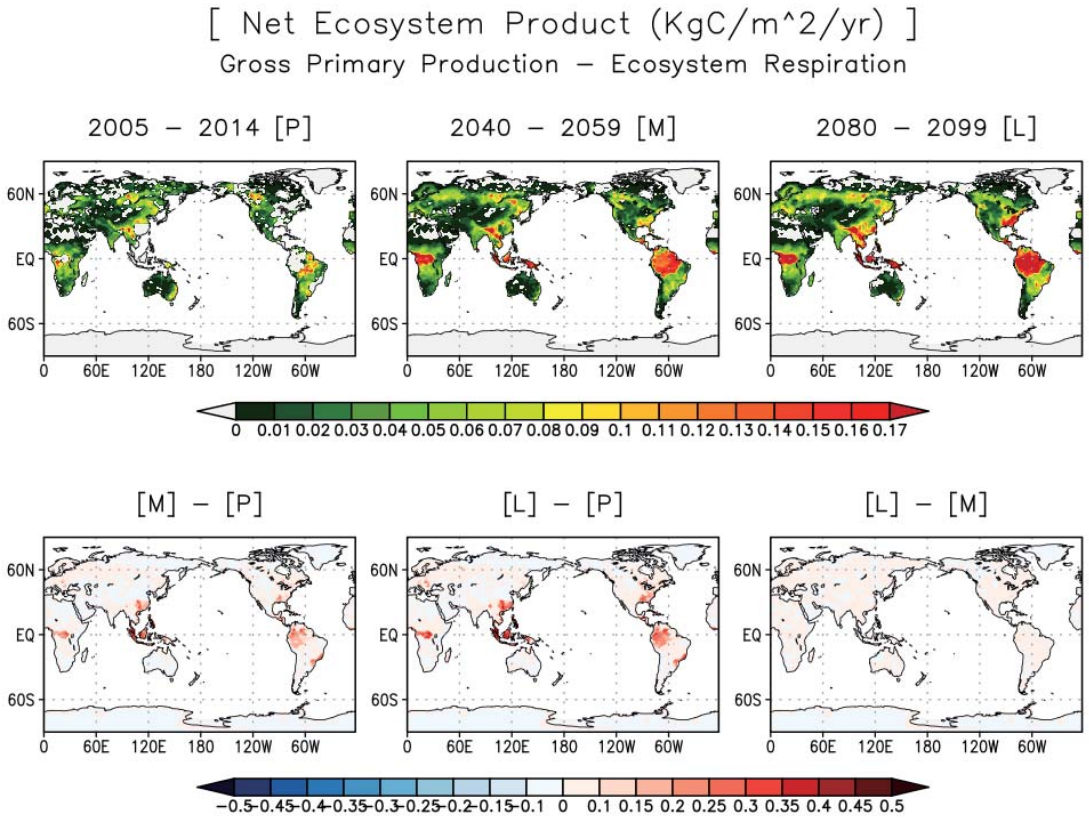


Fig. 28. Projection of net ecosystem production.

극지연구소

순 생태계 생산량(NEP, Net Ecosystem Production)은 총 일차 생산량(GPP)과 생태계 호흡량(TER, Total Ecosystem Respiration)의 차이로 나타낼 수 있다. 현재에서 21세기 중·후반으로 갈수록 순 생태계 생산량(NEP)은 서부와 중앙아프리카의 열대활엽우림지역, 양쯔강 이남의 상록수림과 아열대 활엽수림과 침엽수림, 남아메리카의 열대활엽우림 몬순지역과, 북아메리카 활엽낙엽림 지역에서 강하게 나타난다(Fig. 28). 결론적으로 21세기 중반과 후반으로 갈수록 생태계 호흡량(ER) 보다 일차 생산량(GPP)의 증가가 더 강하기 때문에 순 생태계 생산량은 미래로 갈수록 증가하는 것으로 전망된다.

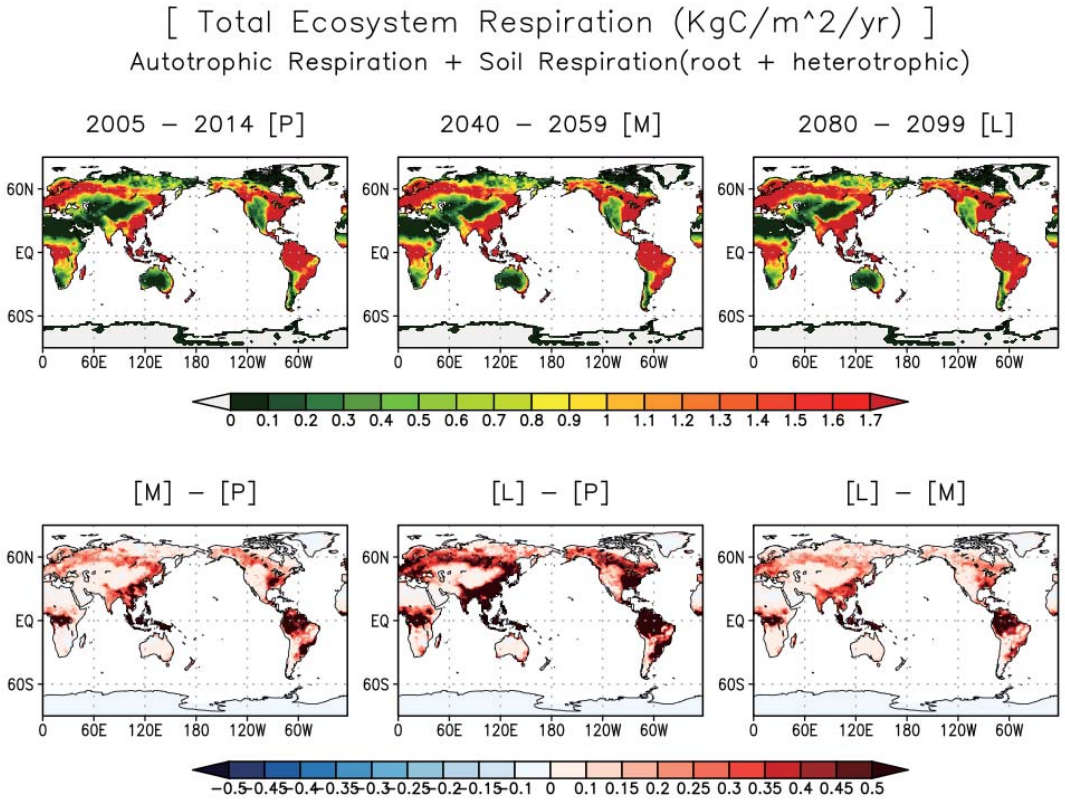


Fig. 29. Projection of total ecosystem respiration.

생태계 호흡량(TER)은 자가 영양호흡(AR)과 토양호흡(SR, Soil Respiration)으로 구성된다. 토양호흡은 식물의 뿌리호흡(RR, Root Respiration) 과 종속 영양호흡(HR, Heterotrophic Respiration)의 합으로 나타내어진다. 생태계호흡량(TER)은 21세기 중반과 후반으로 갈수록 강하게 나타난다(Fig. 29).

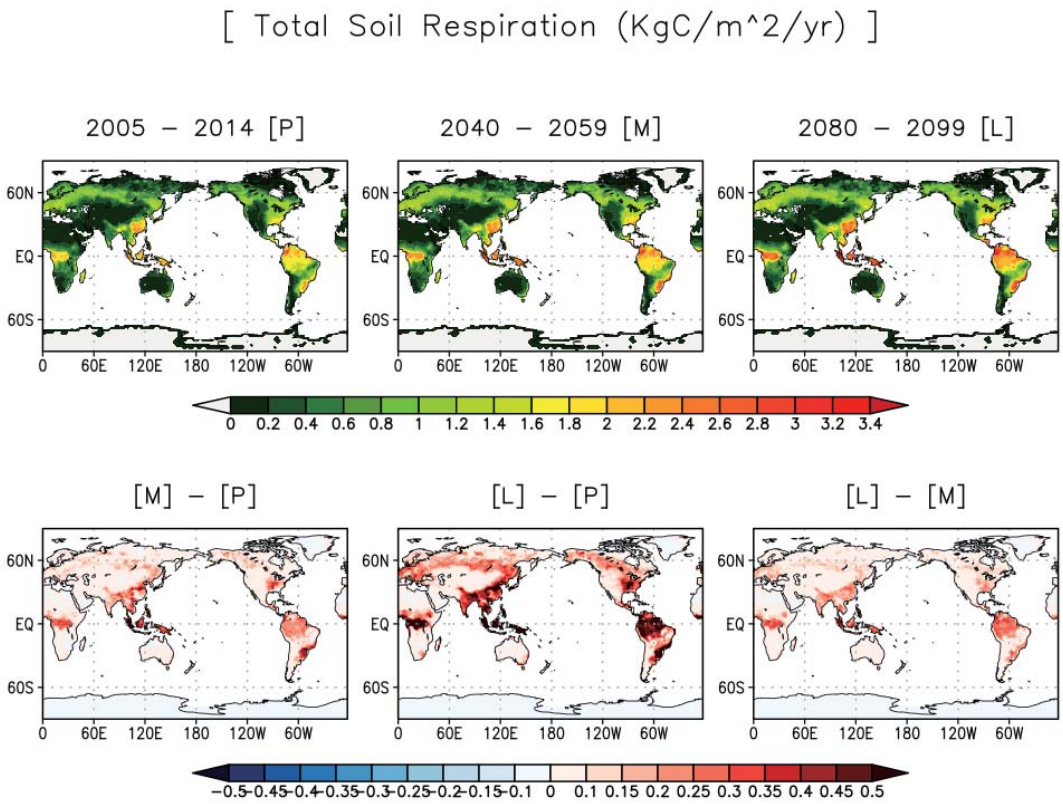


Fig. 30. Projection of total soil respiration.

극지연구소

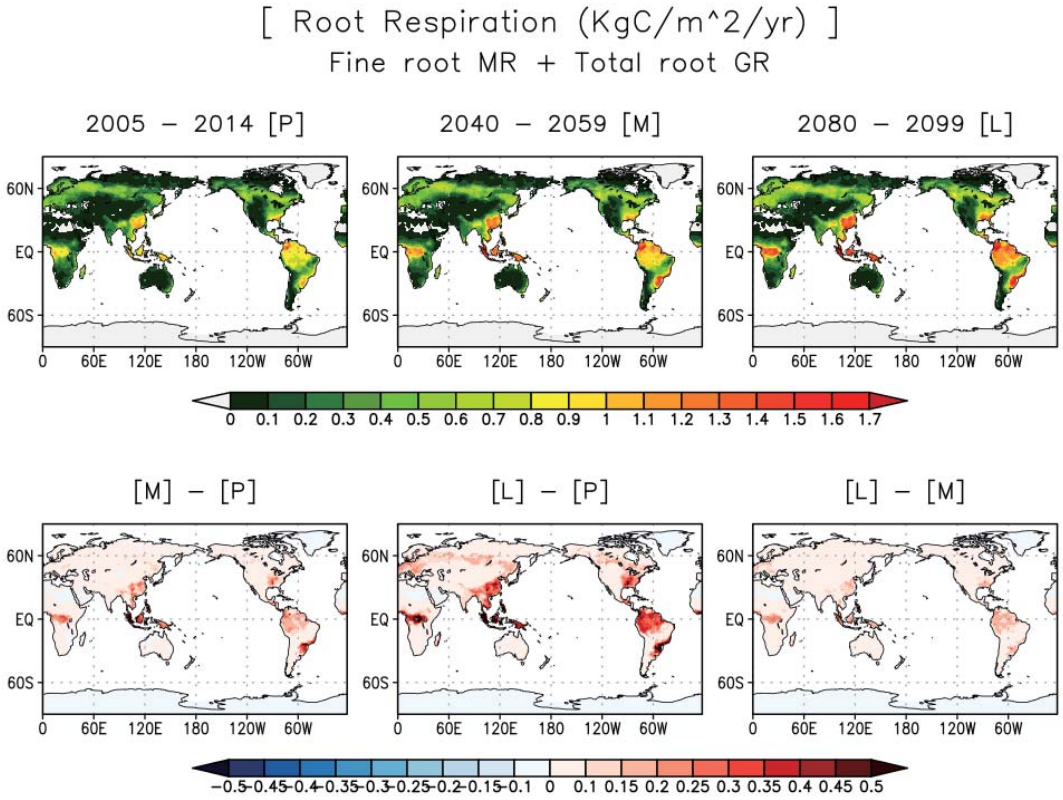


Fig. 31. Projection of root respiration.

극지연구소

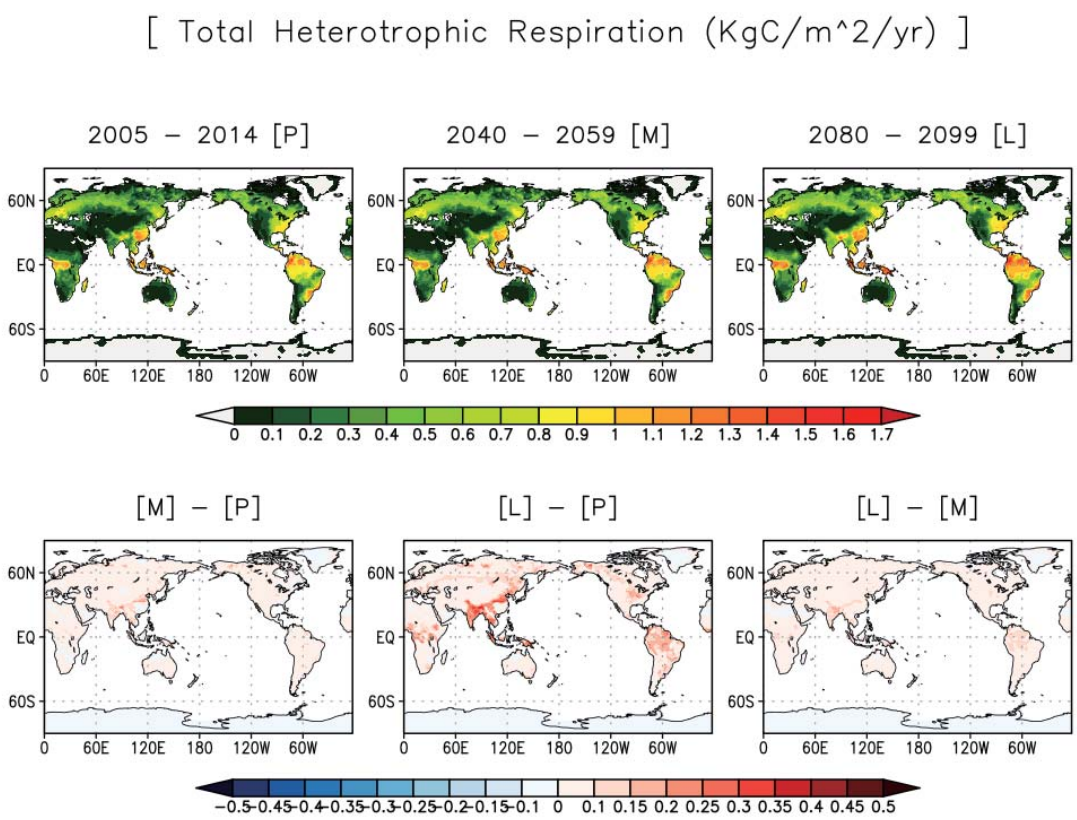


Fig. 32. Projection of total heterotropic respiration.

금지연구소

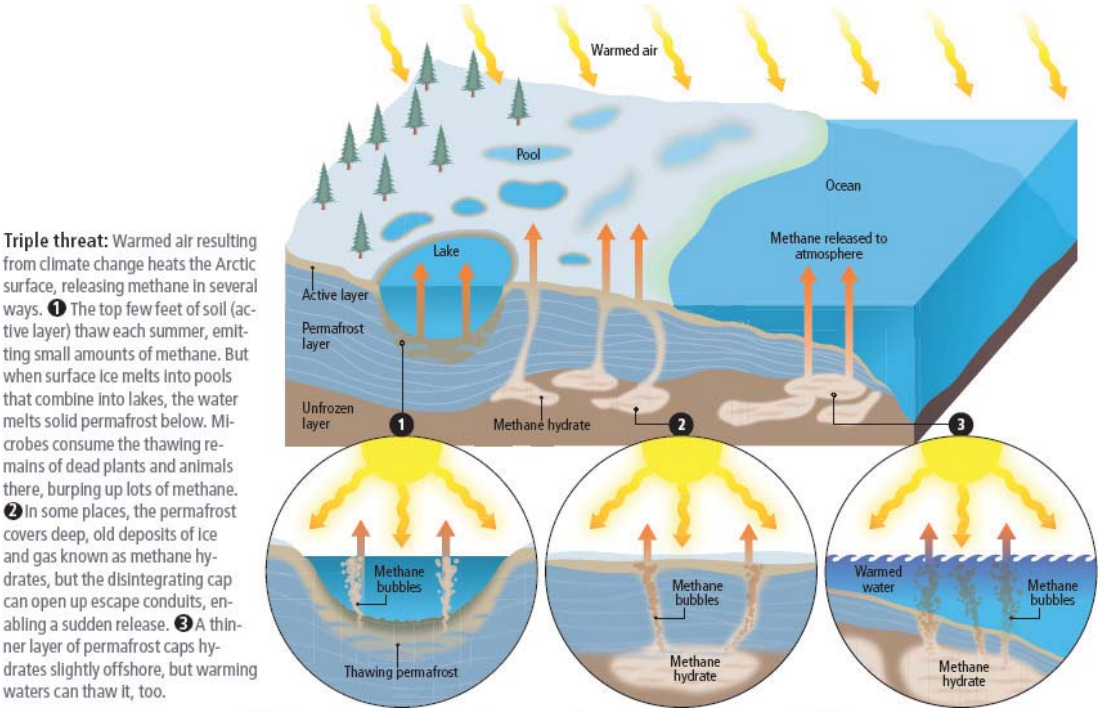
총 생태계 호흡량을 구성하는 자가 영양호흡과 토양 호흡 중 더 많은 양을 차지하는 토양 호흡을 살펴보면, 토양 호흡도 역시 21세기 후반으로 갈수록 증가한다(Fig. 30). Hicks Pries *et al.*(2013)에서도 온난화에 따라 토양호흡이 증가하는 것으로 분석된다. 이것은 얼어있던 동토층이 녹아내리게 되면, 이곳에 얼어있던 식물이나 동물의 사체가 분해되면서 미생물 호흡의 증가와 함께 토양으로부터의 이산화탄소 방출이 증가하기 때문인 것으로 분석된다.

토양호흡은 뿌리호흡과 토양미생물호흡으로 나눌 수 있다(Hanson, *et al.*, 1999). 토양미생물호흡은 종속영양호흡과 같은 말로, 21세기 후반으로 갈수록 뿌리호흡(Fig. 31)과 미생물들의 종속영양호흡(Fig. 32)이 모두 증가 하는 추세를 보인다. 결론적으로, 동토층이 녹게 되면 생태계 호흡량을 구성하는 두 요소가 모두 증가하기 때문에 생태계 호흡량이 증가하는 것으로 분석된다.

(다) 미래 동토의 메탄 전망

기후변화로부터 온난화된 대기 하에서 동토의 메탄 방출은 습지와 큰 연관성이 있다. 동토층이 녹아내리면 동토 활동층에 존재하던 메탄이 방출될 수 있다(Fig. 33). 21세기 말의 메탄 방출은 현재보다 더 고위도 지역에서까지 진행될 것으로 전망되며, 21세

기 중반보다 후반으로 갈수록 방출되는 지역이 늘어날 것으로 전망된다. IPCC 5차 보고서에 의하면, 기후변화에 따른 온난화가 극지역에서 더욱 심하게 진행될 것으로 전망되기 때문이다. Fig. 33과 같이 메탄의 방출은 습지와 관련이 깊다.



Triple threat: Warmed air resulting from climate change heats the Arctic surface, releasing methane in several ways. ❶ The top few feet of soil (active layer) thaw each summer, emitting small amounts of methane. But when surface ice melts into pools that combine into lakes, the water melts solid permafrost below. Microbes consume the thawing remains of dead plants and animals there, burping up lots of methane. ❷ In some places, the permafrost covers deep, old deposits of ice and gas known as methane hydrates, but the disintegrating cap can open up escape conduits, enabling a sudden release. ❸ A thinner layer of permafrost caps hydrates slightly offshore, but warming waters can thaw it, too.

극지연구소

Fig. 33. The mechanism of methane emission with permafrost thawing under global warming (Simpson, 2009).

따라서 강의 범람 지역에서의 메탄 농도와 그 외 지역에서의 메탄 농도를 구분지어 살펴보았다. 강으로부터 침식/범람된 영역이 유라시아 고위도의 하탕가강, 올레뇨크강, 레나강, 바이칼호, 북미의 경우에, 메켄지강, 그레이트슬레이브호 근처에 집중되어 있다. 이러한 지역은 미래 메탄 방출이 증가할 것으로 전망된 지역들과 잘 일치한다.

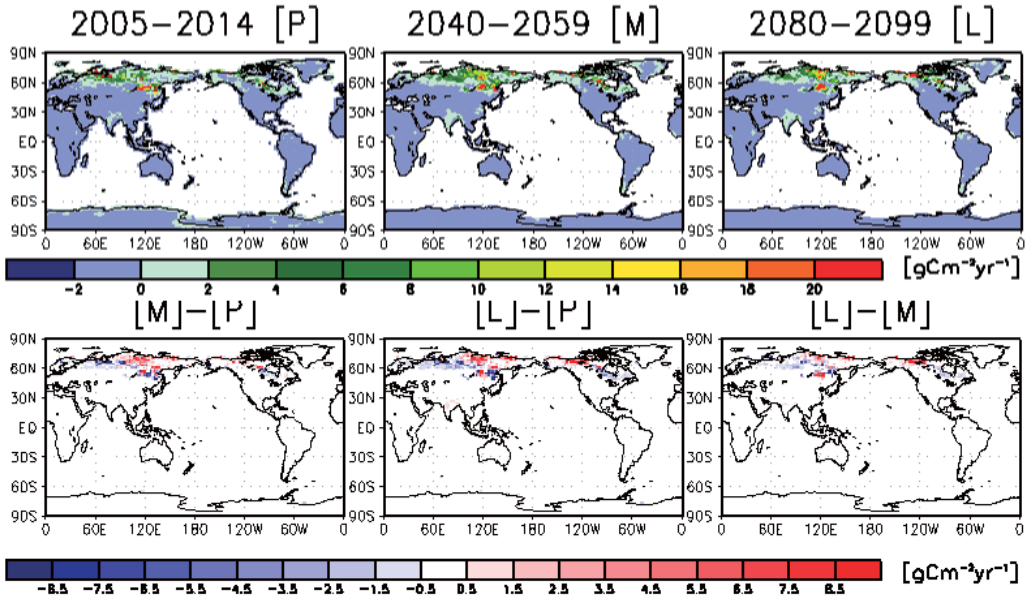


Fig. 34. Projection of methane emission.

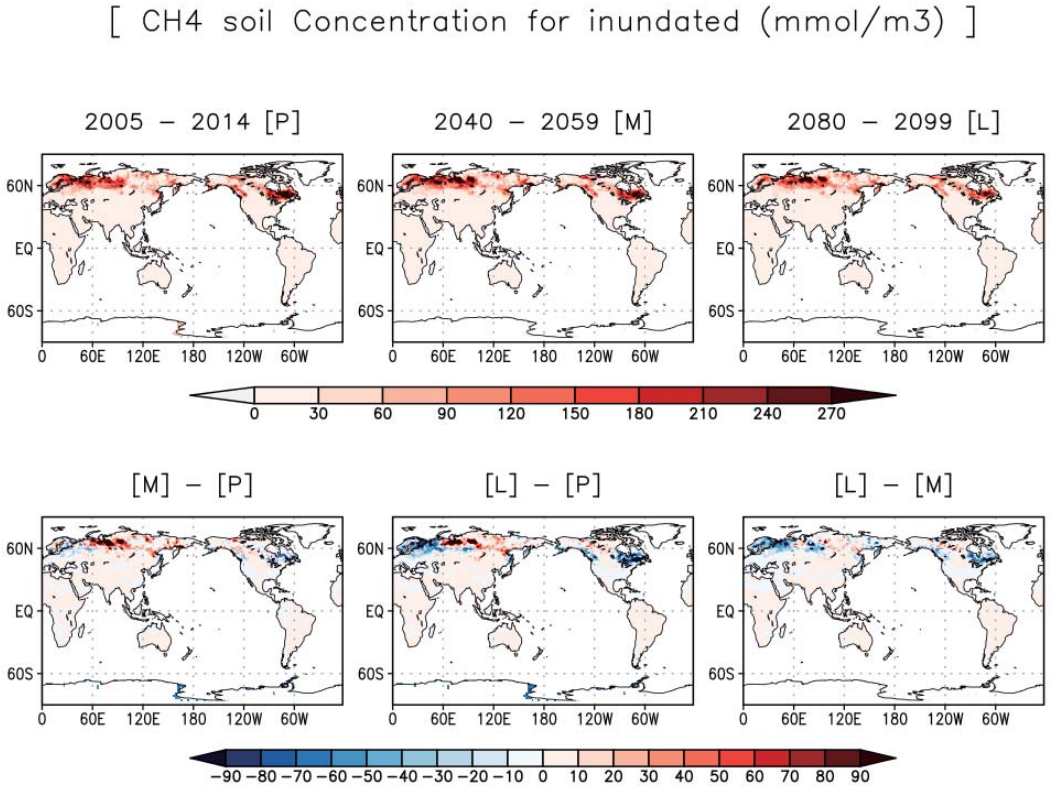


Fig. 35. Projection of methane emission for inundated regions.

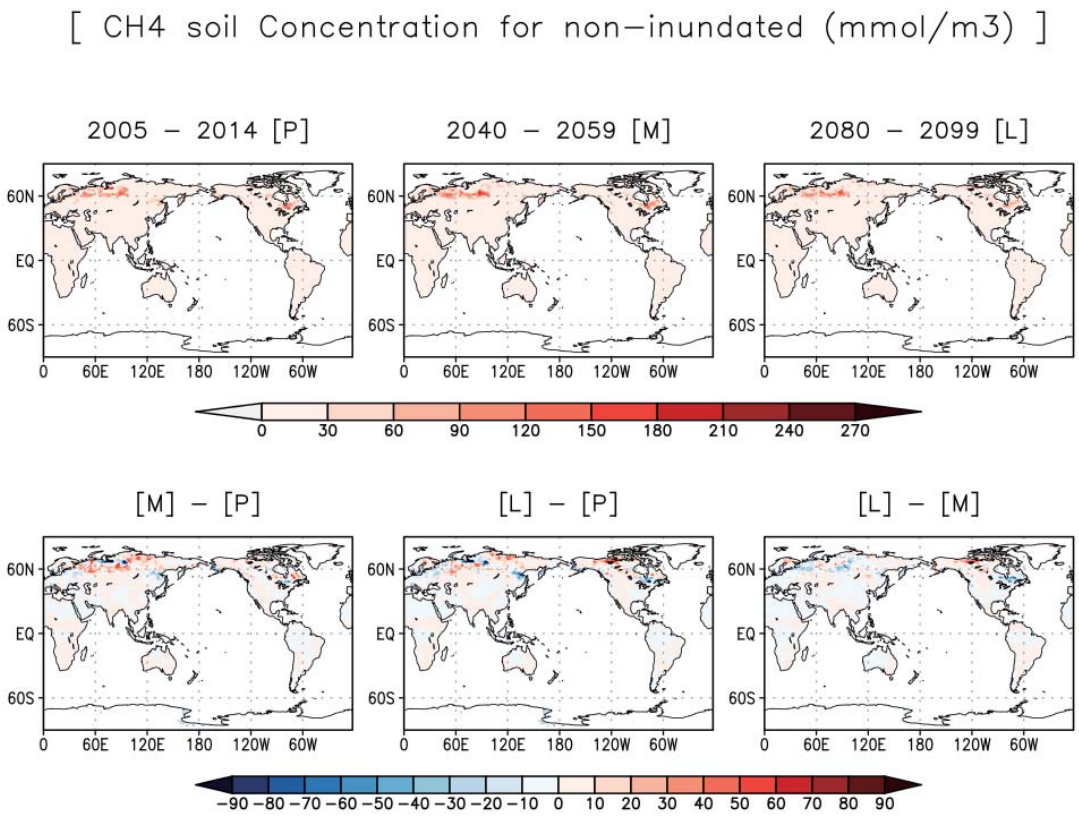


Fig. 36. Projection of methane emission for non-inundated regions.

현재 기후 하에서는 북위 60도 부근 지역에서 범람에 의한 토양의 메탄농도가 강하게 나타난다. Fig. 35에서 동토층에서 대기로의 메탄방출과 범람 지역에서의 메탄 방출이 거의 일치한다. 모델 내에서 각 격자의 강수와 증발량의 차이, 즉 남는 물은 옆 격자로 유출된다. 따라서 미래 기후하에서 동토 영역에 강수와 증발량의 차이가 커져 강의 범람 지역이 증가하는 것으로 추정된다. 강의 범람에 의해 생성된 습지에서 방출되는 메탄은 유라시아 지역에서는 북위 60° N 부근에 집중되어 있으며, 북아메리카 지역에는 허드슨만 이남 지역에 집중되어 있다.

Anthony *et al.*(2012)에 의하면, 메탄이 방출되는 원인으로는 동토층이 녹는 것과 빙하가 녹는 것으로 구분할 수 있다. 그러므로 Fig. 36의 북극해 주변에서 메탄방출이 강한 것은 범람의 원인보다 빙하가 녹아서 임을 예상할 수 있다.

(라) 요약

현재부터 21세기 말인 2099년 까지 미래 온실 기체 배출 A2 시나리오에 바탕을 둔 환북극 동토 환경 변화를 전망하는 기후변화 시나리오를 생산하였다. 온난화의 진행에 따라 동토층이 녹아내리면서 토양으로부터의 이산화탄소 및 메탄의 방출이 모두 증가하는 것으로 전망되었으며, 그 강도는 21세기 말로 갈수록 더 커지는 것으로 전망되었

다. 이산화탄소의 방출과 관련해서는 토양 속 미생물 활동의 증가와 함께 토양 호흡량의 증가가 큰 기여를 하는 것으로 분석되었다. 메탄의 방출은 습지와 관련성이 큰 강의 범람 및 북극해 주변에서는 해빙의 융빙과 큰 관련성이 있는 것으로 분석되었다.
본 과제에서 도출된 환북극 동토의 미래 기후변화 시나리오는 계속 과제 "북극권 동토 관측 거점을 활용한 환경변화 감시와 예측"의 참고 자료로 활용될 것이다.

3. 유라시아 눈 덮임과 환북극 동토층 기후

가. 기후변화에 따른 북미 동토층 지역의 기상/기후 변동성 변화 탐지 및 분석 연구

알라스카 동토지역의 식생 변동은 기온뿐만 아니라 강수에도 민감하게 반응하고 있다. 이와 관련하여 알라스카 동토지역은 온난화에 따라 녹화가 아니라 갈화가 나타나는 지역이 출몰하고 있으며, 이는 부족한 강수량 때문임이 밝혀졌다(Jeong *et al.*, 2012). 북태평양 상 스톰 활동성의 경년변동은 북미지역 동토층의 기후변화를 초래하는 기온, 강수량 변동을 조절하는데 매우 중요한 요소이다(Fig. 37). 이러한 관련성을 이해하기 위하여 분석연구를 수행하고 북태평양과 북미 대륙 고위도 기상/기후 변동성이 스톰에 의해 연관되어 있음을 밝혔다. 이러한 결과는 알라스카를 비롯한 북미지역 동토층 기후변화를 이해하는데 중요한 기초자료로 활용되었다.

나. 유라시아 가을철 적설 위성 자료 분석 및 겨울철 극진동 관련성 분석

유라시아 가을철 적설 분석을 위해 미국 National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA) 산하 NESDIS(The National Environmental Satellite Data and Information Service)에서 생산 및 배포된 IMS 북반구 눈 및 얼음 자료(Fig. 38)를 분석하였다. 해상도의 경우 24km와 4km 두 가지로 제공되는데, 본 연구에서는 상대적으로 자료가 더 긴(1997-현재) 24km 자료를 분석하였다. 적설량 추정은 높은 반사도로 인해 위성으로 추정이 매우 어려운 분야로서 정확한 자료 획득에 어려움이 있다. IMS 자료는 이러한 단점을 극복하기 위해 시도된 최신 알고리즘 기반 데이터로 가능한 모든 위성 자료 및 보조자료를 수집, 컴퓨터 알고리즘 및 분석 작업으로 생산되었다. 사용된 위성은 POES, MODIS, GOES, GMS, METEOSAT, AMSU, DMSP, SSM/I 자료가 있다.

KOPRI 극지연구소

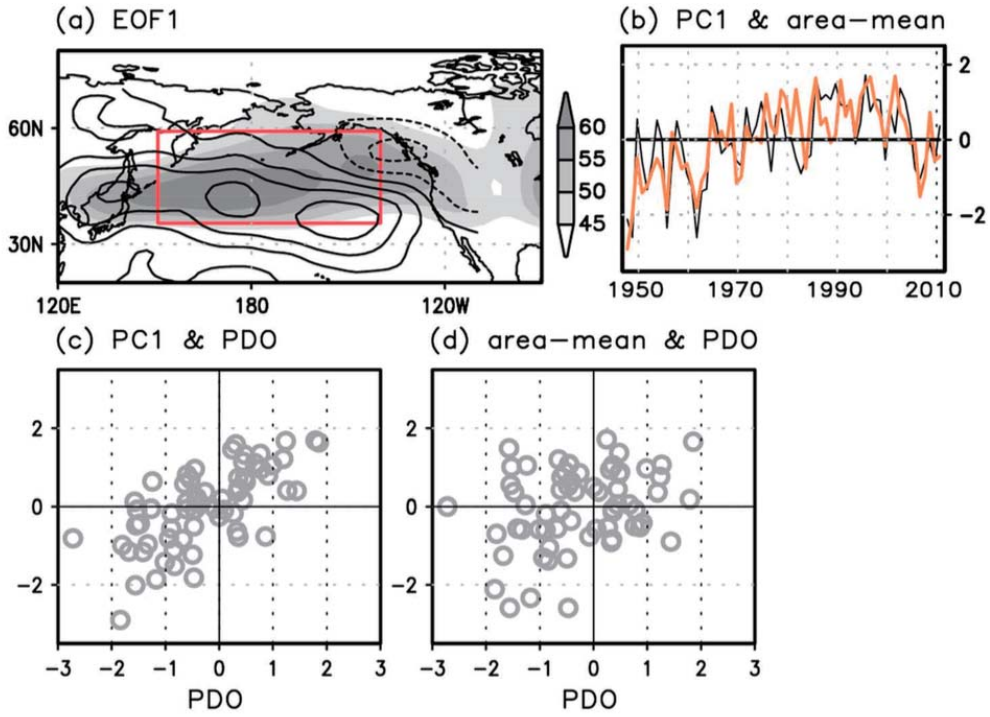


Fig. 37. (a) Leading eigenvector of RMS of the 2-8 day band-pass filtered Z500 for the 20° N-70° N, 100° E-110° E region (contour) and its climatology (shading). (b) Temporal coefficients of the leading eigenvector (first principal component (PC1), orange colored line) and area-mean Pacific storm track activity (black line) over the climatological storm track region (20° N-70° N, 150° E-140, denoted by the red box in a). (c) Scatterplot of PC1 against the corresponding Pacific Decadal Oscillation (PDO) index. (d) Same as Figure 1b but for the area-mean Pacific storm track activity.

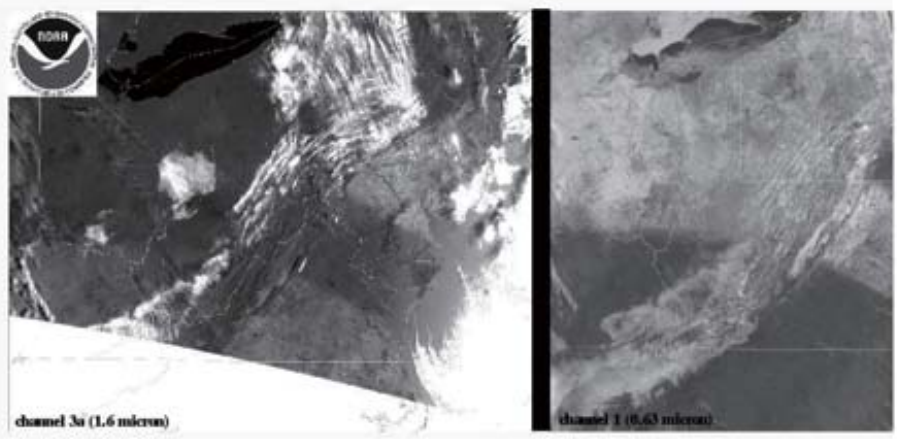


Figure 5. Images of snow and ice cover from the NOAA-15 Advanced Very High Resolution Radiometer for 12 March 1999. The shortwave infrared image on the left is from Channel 3A (1.6:m) and the visible image on the right is from Channel 1 (0.63:m). Snow and clouds cover the area over south-central New York, central Pennsylvania, and soutern Ohio. It is difficult to differentiate snow cover from clouds in the Channel 1 image (right); however, the clouds are much easier to identify as the bright white areas in the Channel 3A image (left).

Fig. 38. An example of data to use for analysis (NOAA-15 AVHRR satellite data).

KOPRI

본 과제에서는 IMS 자료 D/B로부터 북반구 일 Snow Cover를 추출하는 코드를 작성하여 획득된 Snow Cover를 분석에 활용하였다(Fig. 39).

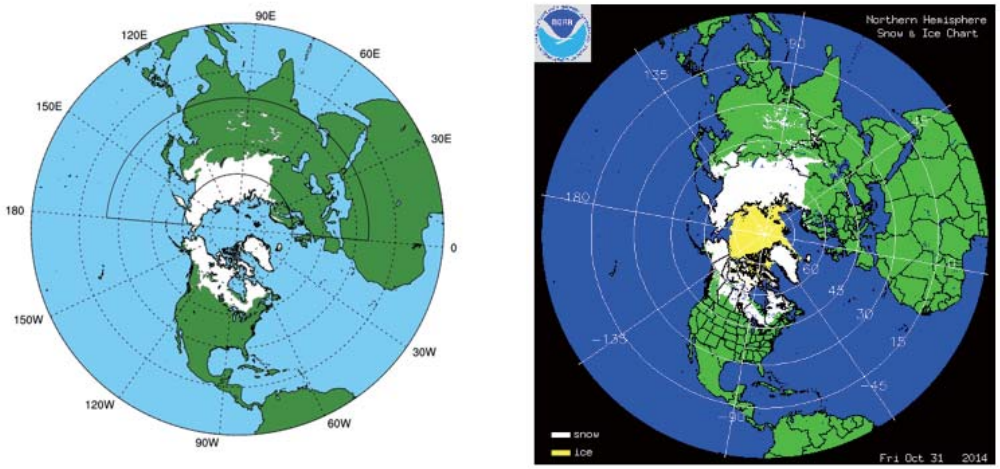


Fig. 39. (left) Snow cover for 31 October 2014 results from satellite composites (right) the public satellite image from IMS for the same day.

또한, 동토층 지표면 온도 분포에 결정적으로 중요한 역할을 하는 북극진동과 유라시아 적설분포의 관련성을 조사하였다. 그 결과, 가을철(10월) 유라시아 적설은 겨울철 북극진동과 매우 큰 관련성이 있음을 확인하였다(Fig. 40). 이러한 결과는 환북극 동토층 기후변화를 이해하는데 중요한 기초자료로 활용되었다.

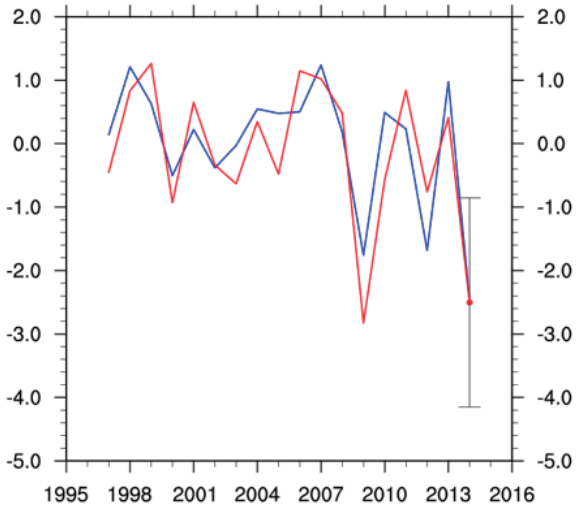


Fig. 40. Normalized Eurasian snow cover area in October (blue), Arctic Oscillation index during winter (red). The red dot is predicted AO index. The error bar is 95 % confidence level using the student t-test.

제 4 절
북극권 동토층 생태계 특성 규명(세부과제 4)

1. 북극권 동토의 토양 탄소/질소 역학 및 토양 특성 연구

○ 북극권 영구동토층의 토양에 대한 물리화학적 특성을 전반적으로 이해하고자 다각도의 연구를 실시함. 현재 본 과제에서 확보한 여러 곳의 환북극 영구동토 거점 중, 다른 세부과제와 겹치지 않도록 하면서도 지역적 특이성을 고려하여 알래스카 카운실을 거점으로 선정 후 이를 중점으로 토양 특성과 탄소역학에 대해 연구하였음.

○ 알래스카 카운실의 영구동토는 불연속 영구동토 지대이며 수분함량이 높은 전형적인 acidic moist tundra임(Yoshikawa and Hinzman, 2003). 따라서 유기물이 많이 축적되어 있어 토양탄소 동태에 관한 연구에 적합한 지역임. 또한 북위 64-65° 지역으로 북극권(Arctic Circle, 북위 66° 33 ‘)의 바로 아래에 위치하여 온난화에 의한 동토의 융해에 따른 토양 물질수송특성의 변화가 더욱 두드러지게 나타날 것으로 예상되고 있음. 이 지역은 현재 지형의 열적 변화(thermokarst lake)가 나타나고 있어 본 연구진의 판단을 뒷받침해주고 있음.

○ 뿐만 아니라, 알래스카 카운실은 베링해협에 인접한 해안 tundra로 분류되기 때문에 향후 영구동토의 융해로 인한 tundra 토양의 물질이 해안까지 수송될 수 있는 가능성을 배제할 수 없는 지역임. 따라서 알래스카 카운실은 토양 탄소/질소의 역학 및 동결-융해에 의한 물질수송특성에 대한 연구에 매우 적합한 거점임.

가. 토양 분류 및 층위분석

(1) 연구 내용 및 방법

○ 토양의 층위분석을 통해 토양을 구성하는 물질(고상 중 광물질과 유기물질)의 수직적 분포를 파악할 수 있고, 이는 토양의 생성 및 특성에 대한 기초적인 자료를 제시함. 층위분석은 보통 구덩이(pit)를 파서 현장에서 직접 실시하나, 유기물이 많이 축적되어 있고 수분이 많기 때문에 장비의 접근성이 용이하지 않아 특수 코어링 장비(Spiral coring auger)를 이용하여 토주(soil core)를 확보한 후 분석하였음.

○ 토주는 두 해에 걸쳐 확보하였는데, 처음에는 50 cm까지 채취하였고(Fig. 1), 그

다음에는 영구동토층을 많이 포함하도록 하고자 2 m 토주를 확보하였음(Fig. 2). 특히 2 m 토주의 경우 지하지형을 미리 비파괴적 검사인 전기비저항법을 실시하여 채취 지역의 특이성까지 고려하였음(이 토주의 층위분석은 농촌진흥청의 송관철 박사 지원).

Fig. 1. Collecting sites of 50 cm soil cores in Council, Alaska.

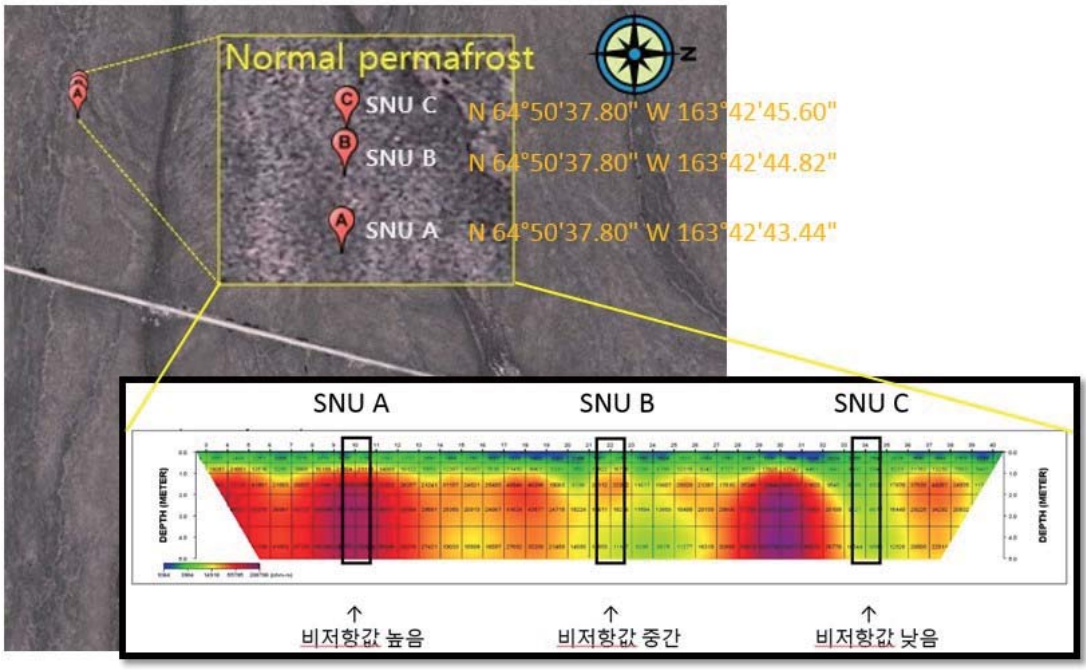


Fig. 2. Collecting sites of 2 m soil cores and non-resistance values.

(2) 연구 결과

○ 50 cm 토주에서 20-25 cm 깊이에서는 분해가 거의 안 된 fiber(fibric, Oi) 형태의 유기물이 주를 이루었고, 이후에는 분해가 많이 이뤄진 muck(sapric, Oa) 층위가 주를 이룸. 유기물층(Oi 및 Oa)의 중량수분함량은 589.8±155 (%, w/w)이고, 토양광물층(A)은 41.7±10 (%, w/w)이었음. 지온은 35 cm 이하에서 연중 영하로, 영구동토라 할 수 있음. 따라서 종합적으로 Histic Cryosols(reference: World reference base 2006)이라 판단됨. 50 cm 토주로는 영구동토층을 많이 확보하기 어려우므로 깊이를 확장하여 2 m 깊이까지 채취하여 영구동토층의 층위분석을 계획하였음.

○ 50 cm 토주의 연대를 측정하기 위해 탄소의 AMS분석을 실시함. 토양의 깊이가 깊어질수록 토양의 연대가 순차적으로 증가하여 35 cm 부근에 이르러 BP(Before Present) 3740년으로 나타났음(Fig. 3). 그러나 이 지점을 기점으로 45 cm 까지 오히려 BP가 감소하였고, 이후 다시 증가하는 양상을 보임. 중간 깊이의 연대 역전 양상은 반복적인 동결-융해에 의한 cryoturbation의 영향으로 보기에는 어려움이 있음. 이 지역 주변에 강이 발달해 있으므로 강의 범람에 의한 외부 토양 혹은 탄소의 유입에 의한 결과로 추정됨.

Table 1. 50 cm soil cores and soil layer analysis

cm	soil color			soil texture or organic matter status	soil horizon
	Hue	Value	Chroma		
0~5	10YR	2	1	fiber	
5~11	10YR	2	1	fiber	
11~15	10YR	2	2	fiber	Oi
15~20	10YR	2	2	fiber	
20~23	10YR	2	2	fiber	
23~25	10YR	3	2	muck	Oa
25~30	10YR	3	2	muck/silt loam	
30~40	10YR	3	2	Silt loam	A
40~50	10YR	3	2	Silt loam/muck	

cm	soil color			soil texture or organic matter status	soil profile
	Hue	Value	Chroma		
0~5	10YR	2	1	fiber	Oi
5~9	10YR	2	1	fiber	
9~10	10YR	2	2	fiber and muck	
10~15	10YR	2	2	fiber	
15~20	10YR	2	2	fiber	
20~23	10YR	2	2	fiber	
23~25	10YR	3	2	Silt loam	A
25~28	10YR	3	2	muck/silt loam	
28~38	10YR	2	2	muck/silt loam	
38~50	10YR	3	2	Silt loam	

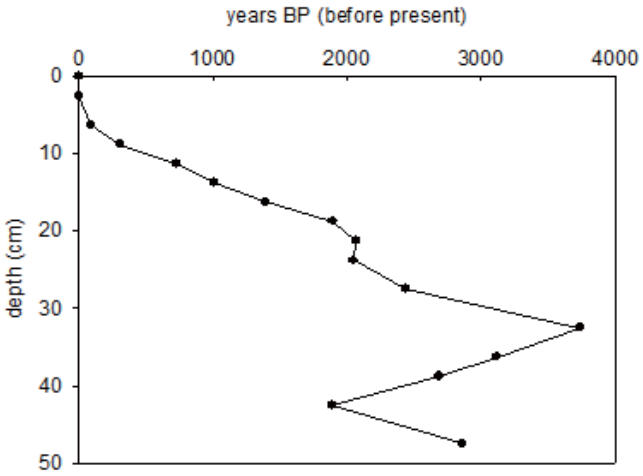


Fig. 3. Carbon dating analysis of 50 cm soil cores.

○ 전기비저항 값이 가장 낮았던 SNU-C site는 토주 전체가 유기물층으로 구성되어 있었고, 가장 높았던 SNU-A site는 2 m 내에 모재층(C)까지도 분포하는 전토층(regolith)을 보임 (Table 2). SNU-A가 SNU-B 보다는 광물입자가 더 굵고, 모래 및 자갈의 분포가 많았음. SNU-A의 C층 역시 2층으로 나눠지는데 이는 모래의 굵기 및 자갈 함량에 따른 것으로 C2층의 모래 입자가 더 굵었음. SNU-B의 토성은 미사질양토였음. 따라서 전기비저항 값이 수분상 뿐만 아니라, 토양 층위를 이루는 구성물질(유기물, 광물)의 분포를 보다 더 반영하는 것으로 판단됨.

○ SNU-A,B,C site는 직선거리로 10 m 간격의 근거리였으나, 전토층의 구성이 현격하게 달라지는 것을 확인할 수 있었음. 이는 알래스카 카운실 거점의 지하지형이 매우 불균질함을 직접적으로 나타내주는 것임. 특히 이러한 불균질성은 유기물층

이 주로 분포하는 50 cm 이상의 깊이에서보다 광물층이 나타나는 그 이하의 깊이에서 더 두드러지게 나타남.

○ 50 cm 토주와 2 m 토주를 비교해 볼 때, 50 cm 토주의 유기물층은 분해가 덜 된 Oi층이 20-25cm 깊이까지 발달한 반면, 2 m 토주에서는 주로 Oe층(Oi와 Oa의 중간 분해 정도)이 발달한 것으로 나타남 (Table 1, 2). 그러나 A층의 토성은 미사질 양토로 동일하였으며, 이는 보통의 영구동토층에서와 마찬가지로 미사가 우세하게 발달해 있음을 나타냄.

○ 따라서 전기비저항 탐사로 미리 조사 지역의 전토층을 가늠한 후 시료 채취 지점을 선정하는 것을 권장함. 그러나 무엇보다도 지역의 대표성을 갖추기 위해서는 보다 넓은 범위에서의 전기비저항 탐사가 이뤄져야 함을 시사하는 바임.

○ 2 m 토주는 A층 이하에 얼음이 상당히 많이 분포하였으며, SNU-C site의 경우, Oe4층 이후로 얼음이 분포하고 있어, 얼음을 비롯한 토양수를 채취하여 분석하였음 (Table 3). 그 결과, 전기전도도(EC) 및 용존유기탄소(DOC) 함량이 희석배수를 감안하고서도 높게 나타나, freeze concentration effect의 간접적인 증거로 예상됨. 따라서 토양미생물 체외효소활성, 양이온 등의 화학종 분포 등에 대한 추가적인 연구가 필요함. 휴믹화지수를 간접적으로 나타내는 SUVA254의 경우 SNU-A와 SNU-B에서는 깊이가 깊어질수록 감소하였으나, SNU-C는 반대의 양상을 보였고, 형광분석에 의한 HIX와 FI의 경우에는 지점 및 깊이에 대한 특이성이 나타나지 않았음.

KOPRI 극지연구소

Table 2. Soil layer and chemical analysis of 2 m soil cores

Site	depth(cm)	soil horizon	pH(1:5)	EC(dS m^{-1})	Total N (g kg^{-1})	Total C (g kg^{-1})	C/N ratio
SNU-A	0-8	Oi	4.32	0.044	18.92	464.63	24.55
	8-25	Oe1	4.76	0.023	19.61	484.19	24.69
	25-36	Oe2	5.36	0.012	2.50	65.64	26.23
	36-58	Oe3	5.57	0.014	11.19	256.45	22.92
	58-84	A	5.83	0.014	0.67	7.22	10.75
	84-142	C1	5.82	0.019	0.47	3.73	8.00
	142-160	C2	5.96	0.019	0.45	5.12	11.49
SNU-B	0-8	Oi	4.86	0.025	19.90	448.10	22.52
	8-13	Oe1	4.76	0.026	21.80	445.64	20.44
	13-51	Oe2	5.52	0.013	1.83	52.62	28.73
	51-83	A1	5.62	0.015	1.04	17.77	17.14
	83-136	A2	5.73	0.035	1.73	25.74	14.91
	136-163	2Oe1	5.48	0.092	4.62	99.97	21.62
	163-188	2Oe2	5.96	0.060	2.91	43.89	15.07
SNU-C	0-7	Oi	4.53	0.031	12.79	392.89	30.72
	7-19	Oe1	4.78	0.019	21.84	478.60	21.91
	19-42	Oe2	5.14	0.013	10.71	242.42	22.64
	42-58	Oe3	5.16	0.021	9.72	243.68	25.06
	58-85	Oe4	5.53	0.023	6.91	123.67	17.91
	85-148	Oe5	5.97	0.039	11.56	228.92	19.80

극지연구소

Table 3. Chemical characteristics of soil water in 2 m soil cores

	soil depth(cm)	pH	EC (dS m^{-1})	DOC (mg L^{-1})	$SUVA_{254}$ (m^{-1} mg^{-1} L)	HIX	FI
SNU-A	58-84	5.34	0.06	61.6	4.64	0.50	3.19
	84-142	5.11	0.10	167.40	1.65	0.62	3.16
	142-160	5.60	0.15	140.20	0.65	0.51	2.59
SNU-B	51-83	5.27	0.17	66.80	5.69	0.53	2.35
	83-136	5.33	0.18	202.40	2.57	0.75	2.98
	136-163	4.99	0.12	658.00	1.12	0.66	2.75
SNU-C	163-188	5.44	0.07	367.80	0.92	0.49	3.25
	58-85	5.59	0.16	62.00	3.84	0.69	2.55
	85-148	6.66	0.24	123.20	2.01	0.72	2.40

나. 질소유입에 따른 동토의 탄소역학 연구

(1) 연구 내용 및 방법

○ 화석연료 사용의 급증으로 질소강하물(Nitrogen deposition)이 전지구적으로 증가되고 지구온난화에 의한 유기물의 분해는 식물체 및 미생물이 이용 가능한 무기태질소의 증가를 야기함. 향후 미래기후에서는 내외부에서의 질소유입이 불가피할 것으로 판단됨. 따라서 현장에 직접 질소를 처리하여 자연적인 계절변화(동결-융해)를 겪게 하여 이에 따른 탄소/질소 역학의 변화를 이해하기로 함. 또한 반복적인 계절변화가 이들 역학에 미치는 영향을 알아보기 위해 2년에 걸친 실험설계를 함.

○ 따라서 현장에 50 cm 토주를 설치하고 질소를 처리한 후 1년(T1)과 2년(T2) 후에 회수하여 5 cm 간격으로 탄소/질소 동태를 분석하였음 (Fig. 4). 이 때, 외부 유입된 질소의 거동을 정확하게 파악하기 위해 중질소(15N)가 표지된 요소((15NH2)2CO, 5 atom %)를 330.8 g N m-2 year-1의 비율로 처리하였음. 이는 T1, T2 각 토주 당 1.5 g, 3 g의 질소가 처리된 것임. 총 3 지점을 임의로 선정하였고, 무처리구를 두어 질소처리구와 비교분석하였음.

Fig. 4. (a) 2-years old N-treated soil cores (T1, T2) setting, (b) T1 collected, T2 remained, (c) control and N-treated cores.

(2) 연구 결과

○ 중질소 처리 후 2년이 지난 토주의 깊이별 총질소, 무기태질소 함량 분석 및 각각의 중질소함량을 분석한 결과 질소 처리한 토양이 무처리구에 비해 유의적으로 산도 및 전기전도도가 증가하였음 (Table 4, 6). 질소 처리에 의해 질소 함량이 크게 증가하였고, 이로 인해 탄질비가 유의적으로 감소하였음.

○ 유기물층이 지배적인 상층부의 토양 총탄소는 질소 처리에 영향을 받지 않았으

나, 30 cm 이하의 깊이에서는 무처리구에 비해 현저하게 감소하였음 (Table 4). 반면 용존유기탄소는 토주 내 전토층에서 유의적으로 증가하였음 (Table 5). 또한 질소처리에 의해 방향성(aromaticity)을 나타내는 SUVA254와 휴믹화 정도를 나타내는 HIX 역시 무처리구에 비해 유의적으로 증가한 것으로 보아 질소 처리는 토양의 탄소 함량뿐만 아니라 토양 탄소의 질 역시도 단기간에 변화시킬 수 있음을 나타냄. 질소함량이 높을수록 형광지수(FI)가 무처리구에 비해 낮게 나왔는데, 이는 토양유기물의 분해에 의한 토양유기물 유래의 용존유기탄소가 증가했음을 나타냄 (Table 5).

○ 본 연구는 2년에 걸쳐 질소를 유입 받았기 때문에 반복측정에 의한 분산분석을 실시하여 토양 깊이와 질소 처리 그리고 질소 유입 연도가 토양 화학성에 미치는 영향을 알아보고자 하였음. SUVA254를 제외한 측정된 토양 화학성은 깊이에 따라 유의적인 차이를 보였으며, 오히려 총탄소와 총질소의 경우 질소 처리에 따른 유의적인 차이는 없었음 (Table 6). 그러나 무기태질소와 용존유기탄소는 질소 처리에 의해 유의적인 차이를 보여, 처리된 질소는 토양의 탄소와 질소의 양보다는 질에 큰 영향을 미치는 것으로 사료됨. 토양 산도와 전기전도도는 T1, T2 간에 차이가 없는 것으로 보아 질소 처리량 혹은 횟수보다는 질소 처리 자체에 큰 영향을 받은 것으로 보임.

Table 4. Chemical analysis of T2 soil cores in different depth

	Depth(cm)	pH (1:5)	EC (dS m^{-1})	C (%)	N (%)	C/N
^{15}N treated	5	7.48 ±0.13	0.45 ±0.05	43.2 ±1.5	2.7 ±0.1	15.9
	10	7.42 ±0.21	0.47 ±0.04	46.4 ±4.2	2.9 ±0.1	16.0
	15	7.43 ±0.18	0.39 ±0.03	39.5 ±7.4	2.4 ±0.4	16.2
	20	6.93 ±0.22	0.26 ±0.03	20.9 ±2.4	1.4 ±0.1	14.6
	25	6.20 ±0.49	0.16 ±0.02	13.7 ±1.5	0.9 ±0.1	15.3
	30	5.64 ±0.43	0.09 ±0.03	7.8 ±0.5	0.5 ±0.0	15.7
	35	5.40 ±0.30	0.06 ±0.01	8.9 ±1.5	0.5 ±0.1	18.4
	40	5.74 ±0.33	0.05 ±0.00	23.4 ±16.6	1.1 ±0.7	22.0
	45	5.03 ±0.00	0.05 ±0.00	6.6	0.3	18.8
control	5	4.67 ±0.14	0.05 ±0.01	44.0 ±0.7	1.7 ±0.2	25.3
	10	4.71 ±0.08	0.03 ±0.01	39.6 ±4.4	1.5 ±0.2	26.0
	15	4.44 ±0.04	0.03 ±0.01	41.3 ±5.0	1.9 ±0.3	21.3
	20	4.35 ±0.10	0.04 ±0.00	27.4 ±11.0	1.3 ±0.6	20.4
	25	4.40 ±0.08	0.03 ±0.00	14.7 ±5.3	0.8 ±0.3	18.4
	30	4.49 ±0.05	0.03 ±0.00	19.2 ±3.8	1.0 ±0.3	19.8
	35	4.47 ±0.15	0.03 ±0.00	19.7 ±5.2	1.0 ±0.3	18.9
	40	4.53 ±0.11	0.02 ±0.00	16.2 ±1.8	0.9 ±0.1	18.6
	45	4.65 ±0.00	0.04 ±0.00	38.1 ±0.0	1.9 ±0.0	20.3

Table 5. Organic carbon analysis of T2 soil cores in different depth)

	Depth (cm)	DOC (g kg^{-1})	$SUVA_{254}$ (m^{-1} mg^{-1} L)	HIX	FI
^{15}N treated	5	11.68 ±2.59	4.10 ±0.26	0.77 ±0.01	1.82 ±0.11
	10	7.71 ±1.07	3.97 ±0.75	0.73 ±0.05	1.83 ±0.07
	15	5.58 ±0.52	3.78 ±0.88	0.77 ±0.03	1.69 ±0.11
	20	2.69 ±0.37	4.21 ±0.42	0.81 ±0.03	2.00 ±0.19
	25	1.40 ±0.15	4.07 ±0.28	0.78 ±0.03	1.96 ±0.04
	30	0.96 ±0.32	3.31 ±1.20	0.72 ±0.05	1.92 ±0.10
	35	0.39 ±0.03	2.36 ±0.16	0.69 ±0.03	1.90 ±0.15
	40	0.58 ±0.13	2.88 ±1.14	0.68 ±0.05	2.68 ±0.35
	45	0.33	2.70	0.72	1.78
control	5	1.10 ±0.24	0.66 ±0.23	0.45 ±0.11	2.63 ±0.40
	10	0.66 ±0.34	0.93 ±0.40	0.52 ±0.11	2.86 ±0.13
	15	0.47 ±0.24	0.25 ±0.05	0.33 ±0.05	2.65 ±0.77
	20	0.41 ±0.08	0.58 ±0.40	0.41 ±0.09	2.83 ±0.40
	25	0.22 ±0.04	0.58 ±0.34	0.48 ±0.03	2.12 ±0.29
	30	0.22 ±0.05	0.80 ±0.11	0.49 ±0.08	3.01 ±0.60
	35	0.25 ±0.05	0.38 ±0.07	0.55 ±0.02	2.23 ±0.23
	40	0.16 ±0.06	0.34 ±0.09	0.63 ±0.11	2.52 ±0.22
	45	0.23	0.43	0.71	2.68

Table 6. Two years after N-treatment results (EC, TC, TN, IN, DOC, PC: Phenolic compound, POA: Phenol oxidase activity)

Source of variation	pH	EC	TC	TN	IN	DOC	$SUVA_{254}$[a]	PC	POA
Between subjects									
Soil depth (D)	***	***	***	***	***	***	ns	***	***
N input (N)	***	***	ns	ns	***	***	***	***	***
D × N	***	***	ns	*	***	***	ns	***	***
Within subjects									
Year (Y)	ns	ns	ns	*	***	*			
Y × N	***	*	ns	ns	***	**			
Y × D	ns	***	ns	ns	***	***	na	na	na
Y × N × D	ns	***	ns	ns	***	***			

[a] $SUVA_{254}$, specific ultraviolet absorbance at 254 nm
ns, *,**,***: non-significant or significant at α=0.05, 0.01, or 0.001, respectively
na: not applicable

○ T1과 T2 토주의 총 중질소회수율은 각각 86.0 %와 67.8 %로 처리된 질소의 상당량이 토주에 그대로 잔류하였음을 알 수 있었음 (Table 7). T1에 비해 T2의 중질소회수율은 21.2 % 가량 감소하였는데, 이는 질소가 많은 환경에 노출된 시기가 길수록 미생물의 acclimation이 증가했기 때문인 것으로 사료됨. T1과 T2 토주의 상층 25 cm의 중질소회수율은 각각 전체의 75.8 %, 82.7 % 임. 25 cm는 유기물층과 토양광물층의 경계로 유입된 질소의 광물층 이하로의 하방이동이 상당히 제한적이었음을 보여줌. 이 토주의 토성은 미사질양토로 수분의 이동에 토성 자체가 문제가 되진 않았을 것으로 보임. 그러나 영구동토의 특성상 입단형성에 의한 토양의 구조발달이 어렵고 수분함량이 전토층에 걸쳐 높아 수리구배가 생기기 어려

운 지역이기 때문에 이러한 결과를 초래한 것으로 추측됨. 또한 활동층이 형성되는 하계에도 30 cm 이하에서 아이스렌즈나 얼음쐐기가 발견되기 때문에 토양수가 일부 고상으로 존재하는 것도 수분 및 양분의 하방이동을 방해하는 요인으로 판단됨.

○ 무기태질소 중 질산태 질소는 거의 검출되지 않았기 때문에 암모니아태 질소와 총질소의 중질소함량으로 각각의 질소 회수를 산정하였는데, 처리된 대부분의 중질소는 암모니아태로 남아 있었음 (Table 7). 이는 요소가 암모니아태 질소로 분해된 후 부동화(immobilization) 및 질산화 혹은 탈질(denitrification) 작용이 매우 제한적인 환경이었음을 시사함. 이는 본 연구진에 의한 기존의 항온배양실험과 일치하는 결과로 유입된 질소가 영구동토층 토양의 질소 순환에 막대한 영향을 미치진 못하는 것으로 판단됨.

○ T2 토주 내 토양에서 암모니아태 질소와 용존유기탄소, phenolic compound, phenol oxidase는 질소처리에 의해 양의 상관관계가 강하게 형성되어 있음을 알 수 있었음 (Fig. 5). 용존유기탄소의 경우 무처리구에서도 암모니아태 질소와 양의 상관관계를 보이나 질소처리에 의해 그 양상이 더 뚜렷해졌고($r^2=0.84$, $p<0.001$) phenolic compound 함량과 phenol oxidase activity의 경우 원래 암모니아태 질소와 상관관계를 보이지 않았으나, 질소 처리로 인해 강한 양의 상관관계가 나타났음(phenolic compound: $r^2=0.75$, $p<0.001$; phenol oxidase activity: $r^2=0.89$, $p<0.001$). 질소 처리에 의한 phenolic compound의 증가는 난분해성 탄소의 함량 증가를 의미하므로 앞서 용존유기탄소의 흡광/형광 분석에서의 결과와 마찬가지로 질소 처리는 토양 탄소의 질을 현격하게 변화시킴을 알 수 있었음.

Table 7. N derived from ^{15}N-urea in T1 and T2 soil cores. (NDFF, N derived from ^{15}N-urea)

Soil depth (cm)	NDFF (mg N core^{-1}) in T1		NDFF (mg N core^{-1}) in T2		Recovery (%) as total N	
	as NH4-N	as total N	as NH4-N	as total N	T1	T2
5	137.4±16.9	235.8±8.5	557.1±66.0	520.5±60.7	15.5±0.7	17.3±2.0
10	188.5±62.4	200.2±37.7	470.5±40.8	499.9±71.5	14.7±3.0	16.7±2.4
15	187.4±9.8	206.9±7.0	292.9±34.0	273.5±24.3	14.4±0.1	9.1±0.8
20	199.3±44.3	199.1±16.4	116.9±27.0	154.6±27.9	13.7±1.5	5.2±0.9
25	132.9±34.9	132.5±19.1	250.2±51.0	232.2±28.0	9.7±1.4	7.7±0.9
30	147.7±13.4	160.1±22.3	87.9±10.9	194.7±29.1	14.6±2.2	6.5±1.0
35	61.7±49.6	61.0±23.9	30.7±11.4	101.5±30.8	3.3±1.9	3.4±1.0
40	13.0±10.7	22.5±11.5	14.3±3.4	57.0±32.3	1.5±1.3	1.9±1.1
45	1.8±0.8	1.6±0.7	8.6±0.0	55.6±22.2	0.2±0.0	1.9±1.1
the entire soil profile	1069.729.3	1219.7±13.6	1818.6101.2	2033.5±13.6	86.0±2.9	67.8±0.4

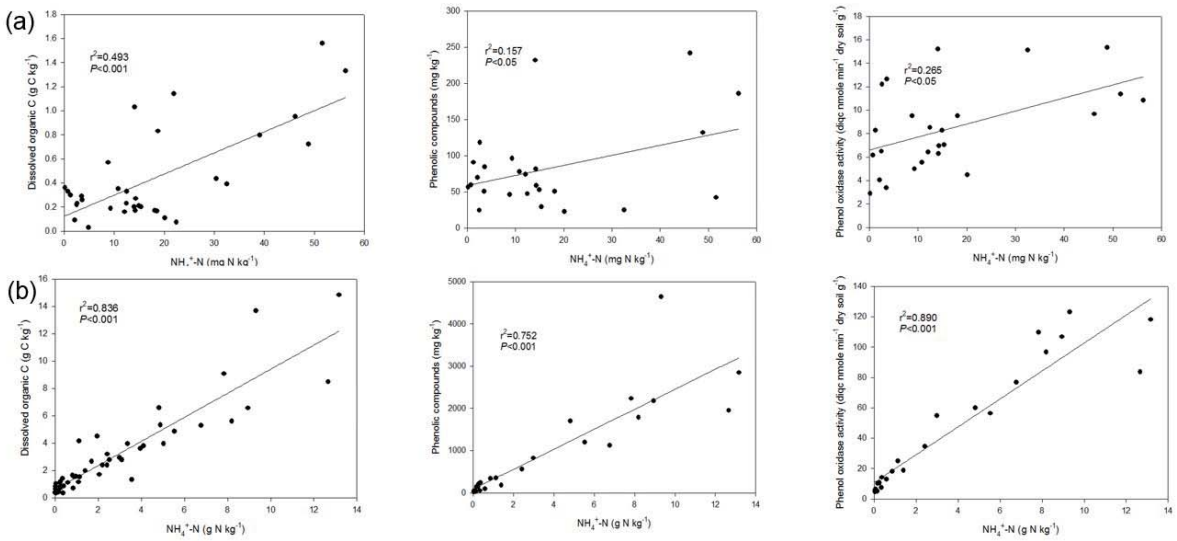


Fig. 5. Nitrogen, carbon, phenolic compound and phenol oxidase analysis of T2 soil cores. (a) control site, (b) ^{15}N-urea.

○ 처리된 중질소의 토양 입자 탄소 내 분포를 알아보기 위해 밀도-크기 분획을 실시하여 각각의 분획별로 중질소율을 분석함. 무처리구에서는 LF(light fraction)과 HF(heavy fraction) 간에 중질소율이 차이를 보이지 않았으나 질소처리구에서는 LF보다 HF의 중질소율이 높았으며 특히, 입자가 작을수록 더 높은 표지율을 보였음 (Fig. 6.) 이는 처리된 중질소가 암모니아태 질소의 형태였기 때문에 고운 입자에서 그 양이 많았기 때문으로 사료됨. LF와 굵은 입자의 HF에서 증가된 중질소율은 처리된 질소의 일부가 부동화되어 해당 분획에 위치하였기 때문임. 그러나

이 토양의 질소 반응에 대한 정확한 이해를 위해서는 후속연구가 필요할 것으로 판단됨.

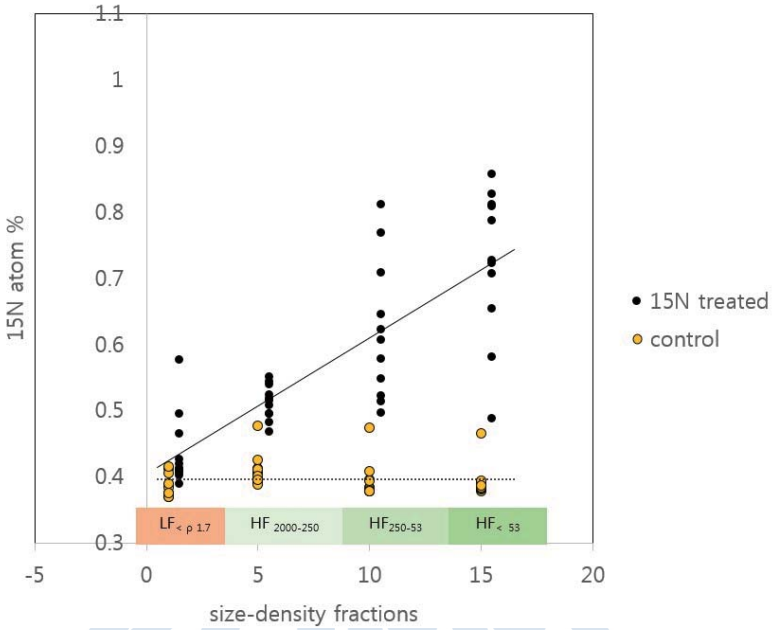


Fig. 6. Soil particle size and density effects of T2 soil cores. (LF: light fraction, HF: heavy fraction).

극지연구소

다. 영구동토층 토양의 수리특성 분석

(1) 연구 내용 및 방법

○ 알래스카 카운실 거점은 기후변화에 의한 지형의 열적 변화가 관찰되는 곳이므로 일반 영구동토 지역(Normal permafrost)과 융해지역(Thermokarst erosion)을 구분하여 토양의 수리특성 분석을 위한 시료를 채취함 (Fig. 7, 8). 융해지역은 인근에 작은 호수가 조성 되어 있고, 습지의 지형적 특성을 나타내어 광물이 주를 이루는 무기물층까지 시료채취가 불가하였음. 하여 일반 융해 지역은 모두 유기물층(식생을 걷어내고 동일한 깊이(15-20cm))에 국한하여 수리특성 분석을 위한 실내실험을 진행하였음. 반면 일반 영구동토 지역은 무기물층을 비교적 수월하게 채취할 수 있어 유기물층과 무기물층으로 나누어 수리특성수을 분석하였음. 전용적 밀도는 2인치 core method, 포화수리전도도는 정수위법, 수분보유곡선은 압력셀을 이용하였음.

○ 알래스카 카운실의 영구동토층 토양이 수분함량이 높으나 전지역이 모두 수분 포

화상태는 아님. 따라서 보다 정확한 수리특성을 파악하기 위해 불포화수리전도도 역시 필요함. 불포화수리전도도는 주어진 수분포텐셜에서 중력수의 이동에 관한 특성을 설명할 수 있음. 포화수리전도도와 수분보유곡선을 통해 간접적으로 불포화수리전도도를 예측할 수 있으나, 토양의 토성, 구조, 유기물 함량 등 여러 가지 조건에 제약이 있어 정확한 예측이 어려움. 따라서 현장에서 직접 장력 침투계(disc tension infiltrometer)를 이용하여 일반 영구동토 지역의 불포화수리전도도를 측정하였음 (Fig. 8.) 융해지역은 수분함량이 너무 높고 지형적인 안정성이 확보되지 않았기 때문에 직접적인 불포화수리전도도는 측정하지 않았음.

Sampling site	Name	Coordinate
Thermokarst erosion	Lake A	N 64°51'41.57" W 163°42'32.28"
	Lake B-1	N 64°51'36.06" W 163°41'28.56"
	Lake B-2	N 64°51'35.82" W 163°41'29.04"
	Lake B-3	N 64°51'35.64" W 163°41'29.58"
Normal permafrost	SNU A	N 64°50'37.80" W 163°42'43.44"
	SNU B	N 64°50'37.80" W 163°42'44.82"
	SNU C	N 64°50'37.80" W 163°42'45.60"

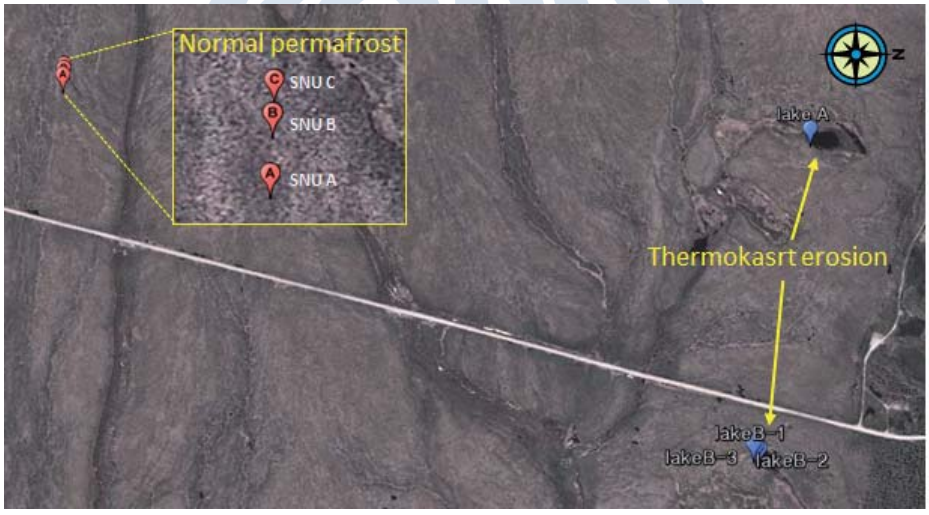


Fig. 7. Collecting sites for thermokarst erosion and normal permafrost.

Fig. 8. Disc tension infiltrometer using for soil analysis.

(2) 연구 결과

○ 유기물층에서는, 일반 영구동토 지역에서 융해 영구동토지역보다 더 낮은 전용적밀도와 보다 높은 포화수리전도도를 보였음 (Table 8, 9). 융해 영구동토지역의 유기물층은 상대적으로 더 분해가 많이 된 유기물인 muck로 이뤄진 Oa층인 반면 일반 영구동토 지역의 유기물층은 부식과 식물잔재가 섞여있는 peat로 이뤄진 Oe층이었음. 이러한 유기물 분해정도의 차이는 수리특성에도 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었음. 일반 영구동토의 무기물층의 전용적밀도는 일반적인 온대 지역의 양토 계열과 비슷한 수준을 보였으며 반복적인 동결-융해에 의한 compaction 등은 일어나지 않았던 것으로 판단됨.

○ 유기물층의 포화수리전도도는, 일반 영구동토의 site 1 지점은 '빠름(rapid)'으로 분류될 수 있고, site 2와 site 3 지점은 '보통 느림(moderate slow)'로 분류됨 (Table 9). 일반 영구동토의 무기물층은 전체적으로 유기물층보다 느린 포화수리전도도를 보였고 그 정도는 '느림(slow)'이었음. 일반 영구동토의 토성은 미사질양토이고 보통의 전용적밀도를 보이나, 구조의 발달이 거의 없는 토양이었기 때문에 느린 포화수리전도도를 나타낸 것으로 사료됨.

Table 8. Bulk density analysis at permafrost sites

Sampling site	Layer	Bulk density (Mg m^{-3})
Normal permafrost	Mineral layer†	1.25 (0.08)
	Organic layer	0.22 (0.02)
Thermokarst lakes	Organic layer	0.43 (0.05)

Table 9. Water potential in different soil layers (SE, n=5)

	Normal permafrost				Thermokarst erosion		
	mineral layer		organic layer		organic layer		
	mean	SE	mean	SE		mean	SE
	K_{sat} (cm s^{-1})		K_{sat} (cm s^{-1})			K_{sat} (cm s^{-1})	
Site 1	$4.9*10^{-6}$	$8.3*10^{-7}$	$3.0*10^{-4}$	$7.4*10^{-6}$	Lake 1	$1.5*10^{-5}$	$1.9*10^{-7}$
Site 2	$4.2*10^{-5}$	$3.7*10^{-7}$	$2.5*10^{-4}$	$3.9*10^{-6}$	Lake 2	$2.2*10^{-5}$	$2.4*10^{-7}$
Site 3	$1.9.*10^{-4}$	$1.0*10^{-5}$	$4.2*10^{-3}$	$5.6*10^{-5}$			

금지연구소

○ 일반 영구동토 지역과 융해 지역 토양에서, 용적수분함량과 water potential 간의 관계로부터 수분특성곡선을 산출하였음 (Fig. 9) 일반 영구동토 지역은 유기물층과 무기물층 모두 1 bar까지 급격하게 용적수분함량이 감소하다가 이후 5 bar까지 변화가 없었으며 8 bar 이후에 다소 감소하는 양상을 보임. 반면 융해 지역의 유기물층은 2 bar까지 용적수분함량이 급격히 감소하였고 이 후의 water potential 에서는 변화가 거의 없었음. 일반 영구동토 지역과 마찬가지로 12 bar 부근에서 다소 감소하는 양상이었음. 2 bar까지는 동일한 water potential에서 일반 영구동토 내 유기물층의 용적수분함량이 컸으며 이는 일반 영구동토 유기물층의 공극률(전용적밀도로 역산)이 더 컸기 때문으로 판단됨. 그러나 2 bar 이후에는 오히려 융해 영구동토 유기물층에서 용적수분함량이 더 높게 나타났는데, 이 역시 밀도차에 의한 수분보유능으로 설명할 수 있음. 유기물층보다 무기물층의 용적수분함량은 동일 water potential 대비 낮았으며 이는 1 bar 이전의 낮은 water potential 일 때와 10 bar 이상의 높은 water potential에서 두드러지게 나타남.

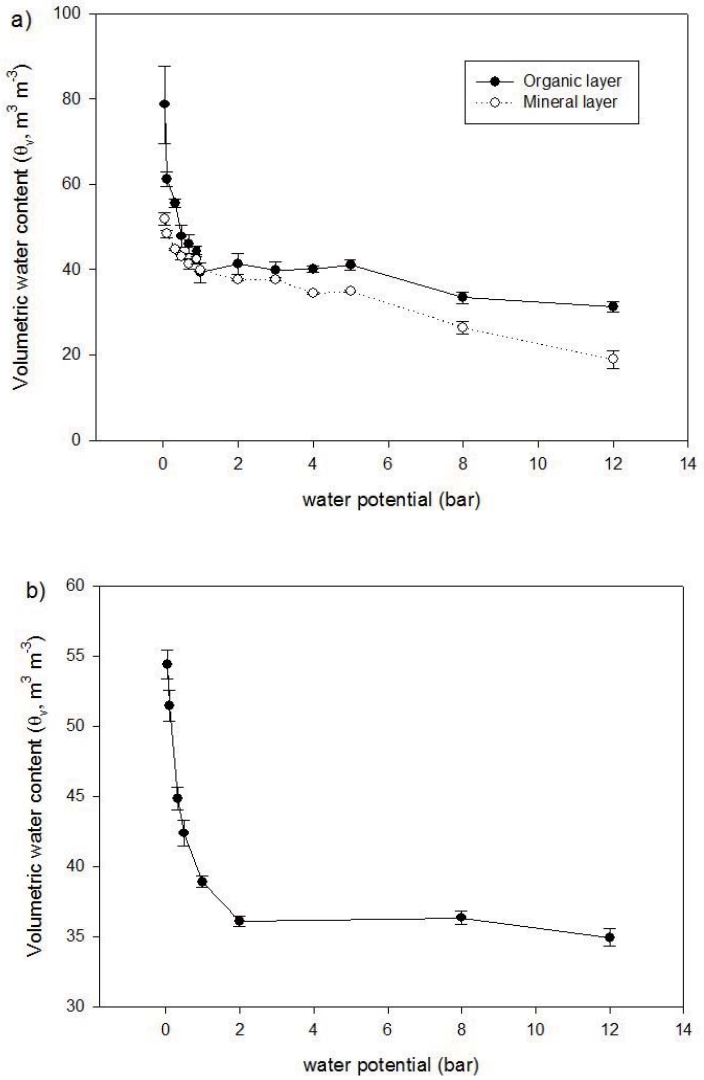


Fig. 9. Water potential curve. a) normal permafrost, b) dermokarst permafrost.

○ 불포화수리전도도를 측정하는 지점의 thawing depth는 SNU A, B, C 지점별로 각각 평균 29.1 cm, 36.9 cm, 35.2 cm 였음(n=5). 이는 활동층의 깊이를 말해주는 것으로 수분의 이동이 각 지점별 thawing depth만큼으로 국한될 것임을 나타냄.

○ 장력 침투계로 측정한 불포화수리전도도는 측정된 지점에 따라 현격한 차이가 있었음(Fig. 10). 특히 thawing depth가 낮고 토양 무기물층이 다른 지점에 비해 발달한 SNU A 지점의 수리전도도가 가장 낮았고, 토층이 모두 유기물로 이뤄진 SNU C 지점의 수리전도도가 가장 높았음. 모든 지점에서 matric potential이 증가

할수록 수리전도도는 급격하게 감소하여 8 cm의 matric potential 이후에서는 수리전도도가 0에 수렴하였음.

○ 장력 침투계는 기본적으로 Wooding과 Gardner 모형을 이용하여 불포화수리전도도를 추정함. 이 때, 추정되는 값은 대공극의 모세관 길이의 역수(α)와 포화수리전도도(Ksat)임. 본 실험의 SNU A, B, C1, C2 지점에서 추정된 α는 각각 0.08 cm-1, 0.12 cm-1, 0.25 cm-1, 0.34 cm-1이고 포화수리전도도는 2.2 cm h-1, 3.6 cm h-1, 12.6 cm h-1, 24.8 cm h-1임.

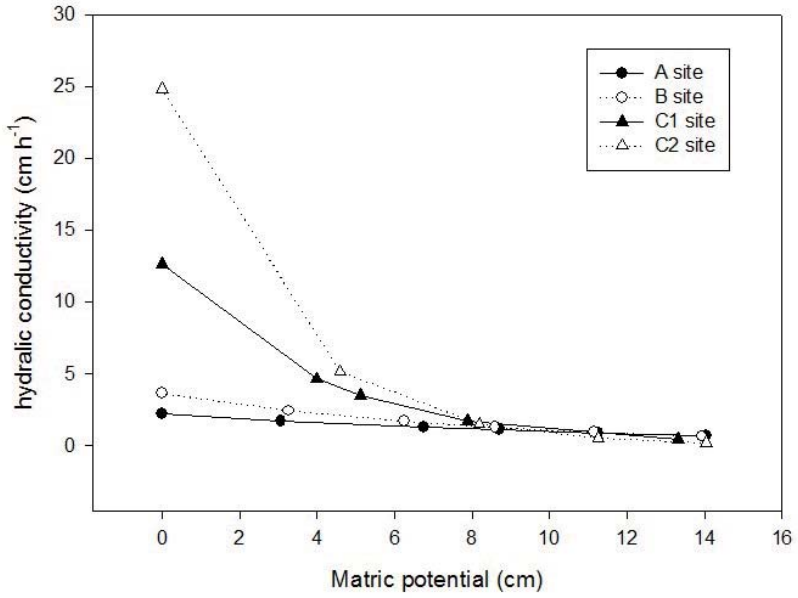


Fig. 10. Unsaturated hydraulic conductivity in Normal permafrost area through disc-tension infiltrometer method.

라. 영구동토층 토양의 물질수송특성 이해

(1) 연구 내용 및 방법

○ 지구온난화의 가속화는 영구동토층에 다량 축적된 유기물의 분해를 야기하고, 이는 온실기체와 더불어 다량의 용존 물질 발생을 야기할 것으로 예상됨. 따라서 유기물층이 두껍게 발달한 알래스카 카운실의 영구동토층 토양 내의 물질수송특성에 대한 이해가 중요함.

○ 따라서 물질수송특성을 파악하기 위해 50 cm 토주를 임의로 3지점에서 확보한 후 질산태 질소를 이용한 혼성치환실험을 실시하였음. 질소강하물의 증가가 예견되고 유기물의 분해로 발생하는 용존태 질소를 고려했을 때, 무기태 질소가 혼성치환실험 대상으로 적합하였고 알래스카 영구동토 토양에서는 거의 검출되지 않지만 토양 입자와의 반응성을 감안하여 암모니아태 질소 대신 질산태 질소를 선정하였음. 그러나 질산태 질소는 토양 미생물의 먹이가 되어 분해되거나 부동화가 일어날 수 있으므로 보다 정확한 혼성치환실험을 위한 추적자로 브롬(Br-)을 선택하였음.

○ 혼성치환실험은 정상류(steady-state flow) 조건에서 진행하였으며, degassing된 수돗물을 peristaltic pump를 이용하여 22 ml h-1의 속도로 주입하였음. 질산태 질소와 브롬이 담긴 용액 1 lm을 주사기를 이용하여 단일 주입하였음(pulse input). 2시간에 한 번씩 유출수(effluent)를 분획하여 질산태 질소와 브롬을 분석하였음. 각 토주의 유출수는 총 3 pore volume(PVs)까지 분획하였음. 실험은 알래스카 카운실의 하계 활동층의 지온과 유사하게 유지하기 위하여 영상 4도로 유지되는 냉장실에서 수행하였음.

(2) 연구 결과

○ 임의의 3지점에서 수행한 혼성치환실험 결과는 질산태 질소와 브롬의 출현곡선으로 명확하게 잘 나타났음 (Fig. 11.). 모든 토주에서 질산태 질소와 브롬의 출현곡선의 형태는 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 전기전도도 역시 유사한 양상형태를 나타냄. 그러나 각 토주의 출현곡선 형태에는 차이가 있으며, 특히 유출된 음이온 농도가 가장 높은 지점의 위치가 상이하였음. 보통 토양의 물질과 상호작용이 없을 경우, 출현곡선의 꼭짓점은 1 PV 부근에 위치하는데 C1 토주는 0.5 PV, C2와 C3 토주는 0.5와 1 PV 사이에서 형성되었음. 이렇게 토주별로 다른 출현곡선 양상을 보이는 이유는 토양 층위 때문으로 사료됨. 전체 토주 깊이에서 유기물층이 차지하는 비율이 C1, C2, C3 토주 각각 71.1 %, 41.0 %, 75.0 %로 각

기 다르게 분포함. 전체 유출수의 질산태 질소와 브롬의 회수율은 C1 토주에서 각각 99.7 %, 105.9 %이고, C2 토주에서는 101.4 %, 100.8 % 이며, C3 토주에서는 100.9 %, 102.6 % 임. 이는 질산태 질소가 토주 내에서 생화학적인 반응을 하지 않았음을 나타냄. 이 출현곡선을 통해 추가적으로 retardation factor, dispersion coefficient, pore water velocity, peclet number 등의 물질 수송 특성의 파라미터를 산출할 수 있고, 이들로부터 알래스카 카운실 영구동토층 토양의 물질 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있음.

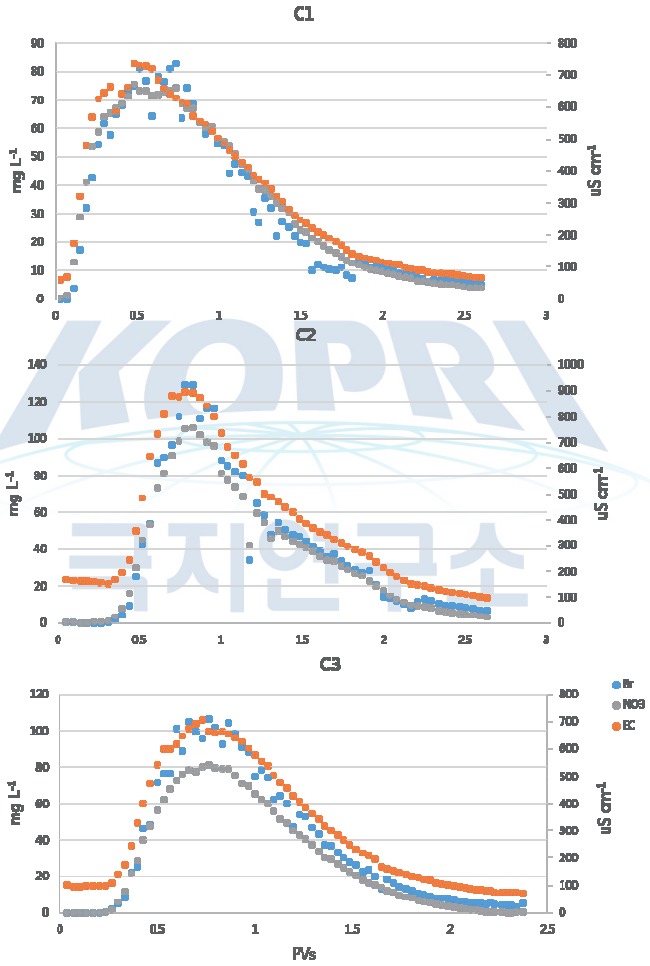


Fig. 11. Breakthrough curves of tracers (bromide and nitrate) in 50 cm soil cores through miscible displacement experiment.

마. 영구동토층 토양의 층위별 온실기체 발생 연구

○ 토양은 고상-액상-기상의 3상이 조화를 이루고 있는데, 일반적으로 기상이 대략 전체의 25 %를 차지함. 대기와의 수동적인 기체교환, 미생물의 호흡에 의한 기체 교환, 유기물 분해에 의한 메탄 및 이산화탄소 발생, 질소 순환에 의한 아산화질소 방출 등 토양에서는 다양한 종류의 온실가스가 대기 중으로 방출됨. 그러나 이러한 토양기체의 대기로의 기체 방출 과정에는 지표면의 식생과 지형적 특징뿐만 아니라 토양생태계의 다양한 물리화학적 환경요인이 관여하며 다양한 환경 조건이 영향을 끼치기 때문에 토양의 온실기체 발생의 원인을 규명하기란 결코 쉽지 않음.

○ 알래스카 카운실 영구동토층은 수분이 많은 지역으로 일정 깊이의 토양에서 환원적 환경이 조성될 가능성이 농후함. 메탄생성균 역시 발견되고 있으므로 메탄의 발생을 배제하기 어려움. 동토의 융해로 형성된 인근의 Thermokarst 상공의 대기에서 메탄이 검출되는 바 카운실의 영구동토층 토양에서도 향후 메탄방출의 가능성은 농후함. 특히 영구동토층의 경우 깊은 토양에서 생성된 메탄이 얼음이나 토양 공극에 갇혀 있다가 융해되면서 방출될 수 있으므로 토양에 갇힌 메탄(trapped gas)의 연구도 필요할 것으로 판단됨.

○ 본 연구진의 토양층위 분석결과 알래스카 카운실의 토양층위는 비교적 뚜렷하게 나뉘며 유기물층과 광물층의 탄소원의 함량 자체가 매우 크게 차이나고, 깊이별 온도 역시 현격하게 다르므로, 토양층위별로 온도 변화에 따른 이산화탄소 및 메탄 발생량의 연구 역시 의미 있을 것으로 생각됨.

(1) 연구 내용 및 방법

○ 온실기체 발생에 관한 연구는 알래스카 카운실에서 채취한 2 m 토주를 활용하였음. 2 m 토주는 총 3지점(SNU A, B, C)에서 채취하였는데, 이 중 유일하게 모재층까지 분포하였던 SNU-A 지점의 토주를 이용하였음. 이 토주의 층위분석은 Table 2에 상세히 기재되어 있음. 토층을 크게 Oi(0-8 cm), Oe(8-58 cm), A 58-84 cm), C(84-160 cm) 4개의 층으로 분리하여 실험을 진행함.

○ 4개의 층으로 분리하고, 각 층위를 세로로 나누어 일부는 토양 내에 갇혀 있는 메탄(Trapped methane)을 분석하고, 일부는 온도 변화에 따른 메탄 및 이산화탄소의 발생 실험을 진행하였음 (Fig. 12).

○ 36시간 간격으로 온도 변화 조건 (20℃, 10℃, 0℃, -10℃, -20℃)을 주어 토양이 동결-융해가 반복되는 배양 실험 동안 토양 층위에 따라 방출되는 이산화탄소의

실시간 플럭스를 측정하였음 (Fig. 13). 각 설정 온도에서 시료를 1.5일 (36시간) 동안 배양한 후 생성된 기체를 포집하여 메탄 생산량을 측정함 (Fig. 14).

○ 이산화탄소의 경우 기체 포집 후 이산화탄소 센서(SH-300DC, NDIR방식)를 통해 생산량 측정하였음. 이산화탄소 플럭스의 경우 1시간동안 전원을 공급하여 시료로부터의 가스가 내부로만 흐르도록 하고 30분 동안 전원을 차단하여 외부 공기로 환기를 하는 시스템을 구현하여 실험함 (Fig. 13).

○ 총 탄소 질소 및 pH, EC, 수분함량 등 기본적인 토양 물리화학적 특징을 일정 기간마다 분석함.

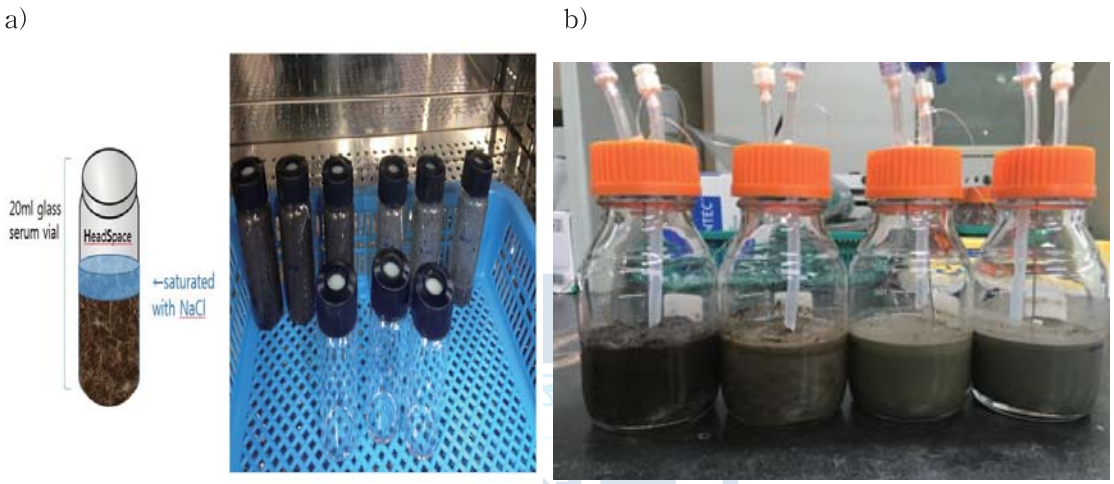


Fig. 12. Photos showing soil samples preperation: (a) soil sub-samples for trapped methane analysis and (b) soil sub-samples for green-house gases in response to repeated freeze-thaw condition.

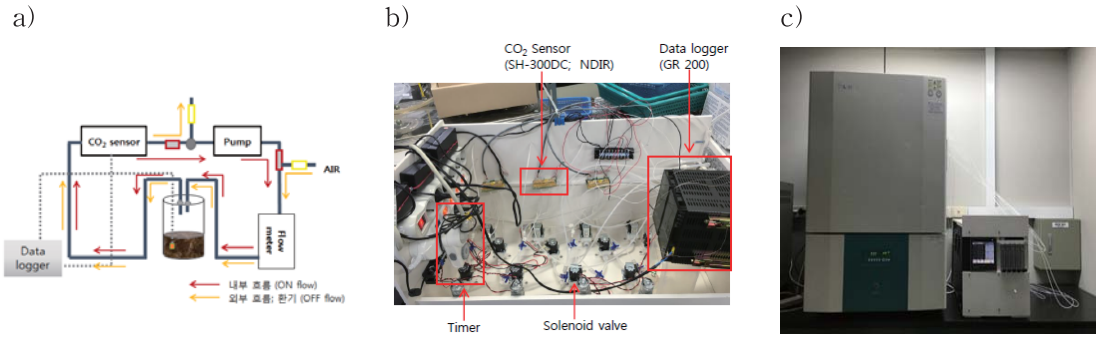


Fig. 13. Description of real-time measurement system for CO_2 flux : (a) a diagram for the system, (b) a photo for the system and (c) a photo for system with soil incubator.

a)

b)

*GC condition (hp6890)

· Inlets: split 20:1, heat 200 ℃

· Column: Agilent DB-5MS UI

(capillary 30m, 250um, 0.25um nominal)

· Oven: 50 ℃ (0.5min) → 80 ℃ (2.50min) 15℃/min

· Detector (FID): heat 270 ℃

· Gas flow: H2 (35mL/min), Air (350mL/min), N2 (30mL/min)

Fig. 14. Gas chromatograph for methane measurement: (a) a photo for the instrument and (b) an analytical condition for methane.

(2) 연구 결과

○ pH의 경우 3.7-5의 약산성 수준으로 나타났으며 (Table 10-a) 전반적으로 토양의 기본적인 물리화학적 특성은 온도 변화 및 토양 층위에 따른 유의적인 차이가 없었음. 이는 온도 변화의 간격이 짧았기 때문으로 생각되며 장기적인 배양 실험이 요구됨.

○ trapped methane은 토양의 깊이가 깊어질수록 증가하였으며 특히 C층에서 유기물층의 10배 이상의 높은 수준을 보임 (Fig. 15). 2 m 토주 내 A층 이하는 토양의 수분함량 자체는 낮지만 얼음이 상당량 분포되어 있었음. 메탄은 용해도가 낮기 때문에 토양보다는 얼음의 공기방울에 갇혀 있을 확률이 높음. 또한 토양의 깊이가 깊을수록 대기와의 기체교환이 어려우므로 표층에 위치한 O층보다 상대적으로 많은 trapped gas를 가질 수 있음.

○ Oi, Oe, A, C층별 이산화탄소 플럭스는 평균적으로 20도에서 각각 0.023, 0.012, 0.005, 0.005 μl soil g-1min-1 이었고, 10도에서는 각각 0.014, 0.007, 0.003, 0.003 μl soil g-1min-1이며, 0도에서 0.009, 0.006, 0.001, 0.001 μl soil g-1 min-1 이었음 (Fig. 16). 즉, 온도가 높아질수록 이산화탄소 플럭스가 증가하였으며 특히 유기물층 (Oi, Oe)의 이산화탄소 플러스는 다른 토층에 비해 온도에 더 민감하게 반응함. 이는 유기물층은 탄소함량이 높을 뿐만 아니라 온도의 변화에 민감하게 반응할 수 있는 이분해성 유기물 역시 많이 함유하고 있기 때문으로 사료됨.

○ 알래스카 카운실의 영구동토 지대는 수분이 많은 지역으로 계절적인 동결-융해의 작용으로 호기-혐기 상태가 번갈아 나타날 수 있음. 이러한 토양 환경변화는 토양의 pH, 산화환원 조건에 따른 토양 이온(Fe, Al, Mn, P 등)형태, 전자수용체 가용성 같은 토양 내 화학적 요소들을 변화시키고 이는 곧 토양유기물의 분해 과정에 차이를 만들어 낼 것으로 예상됨. 따라서 이를 반영한 추가적인 연구가 필요함.

Table 10. Change in soil physicochemical properties in soil profiles in response to repeated freeze-thaw condition

a) pH and EC values

EC [dS m^{-1}]

soil	20℃		10℃		0℃		0℃		10℃		20℃	
layer	pH	EC	pH	EC	pH	EC	pH	EC	pH	EC	pH	EC
Oi	3.74 (-)	0.28 (-)	3.82 (-)	0.24 (-)	3.6 (-)	0.29 (-)	3.84 (-)	0.24 (-)	3.9 (-)	0.22 (-)	3.69 (-)	0.32 (-)
Oe	4.65 (0.02)	0.09 (0)	4.79 (0.02)	0.05 (0)	4.59 (0.02)	0.08 (0.01)	4.44 (0.06)	0.10 (0.06)	4.56 (0.04)	0.1 (0)	4.47 (0.03)	0.09 (0)
A	4.03 (0.01)	0.05 (0)	4.07 (0.07)	0.05 (0)	4.03 (0.03)	0.06 (0)	4.01 (0.01)	0.08 (0)	3.04 (0.09)	0.05 (0)	5.09 (0.05)	0.05 (0)
C	4.05 (0.01)	0.09 (0)	3.96 (0.05)	0.10 (0)	4.03 (0.04)	0.11 (0)	4.02 (0.02)	0.11 (0)	1.93 (0.01)	0.07 (0)	5.28 (0.04)	0.09 (0)

b) Water contents

[g g^{-1}, %]

Soil layer	20℃	10℃	0℃	0℃	10℃	20℃
Oi	344.39 (-)	449.78 (32.35)	476.90 (-)	255.00 (70.19)	356.65 (111.21)	381.08 (64.00)
Oe	121.06 (24.62)	82.11 (32.09)	102.45 (12.47)	109.86 (4.91)	145.65 (13.42)	122.65 (10.46)
A	30.45 (1.30)	38.74 (0.62)	33.28 (1.31)	38.72 (1.02)	39.89 (1.26)	37.39 (0.50)
C	45.35 (1.93)	46.72 (3.82)	42.48 (22.88)	48.06 (2.56)	46.28 (1.58)	43.47 (1.21)

c) Total nitrogen and total carbon

[g kg^{-1}]

soil	20℃		10℃		0℃		- 10℃		- 20℃		- 10℃		0℃		10℃	
layer	TN	TC	TN	TC	TN	TC	TN	TC	TN	TC	TN	TC	TN	TC	TN	TC
Oi	15.34 (1.35)	435.19 (7.41)	13.70 (0.26)	416.16 (1.29)	14.7 (0.11)	433.87 (1.01)	13.1 (0.63)	412.49 (23.24)	14.05 (0.11)	399.35 (1.73)	6.61 (6.05)	188.71 (10.13)	11.26 (-)	307.20 (-)	9.36 (-)	282.66 (-)
Oe	3.54 (0.42)	74.55 (0.35)	3.70 (0.04)	88.39 (1.25)	3.18 (0.15)	76.78 (2.30)	3.16 (0)	73.65 (0.86)	4.00 (0.13)	92.9 (3.65)	5.77 (4.89)	147.16 (22.98)	4.12 (-)	99.27 (-)	6.93 (-)	157.90 (-)
A	0.85 (0.01)	17.18 (0.91)	0.86 (0.04)	18.06 (1.29)	0.83 (0.02)	16.67 (0.41)	3.06 (0.07)	87.93 (0.86)	3.76 (0.14)	111.79 (0.56)	3.74 (4.87)	105.12 (4.13)	0.82 (-)	16.34 (-)	0.85 (-)	16.63 (-)
C	1.12 (0.02)	17.70 (0.34)	1.14 (0.04)	18.4 (0.70)	1.11 (0.03)	17.44 (0.48)	1.97 (0.01)	34.67 (0.30)	2.36 (0.62)	36.25 (0.32)	2.97 (3.44)	64.16 (4.76)	1.04 (-)	16.36 (-)	1.12 (-)	17.94 (-)

d) C/N ratio

[C/N]

Soil layer	20℃	10℃	0℃	- 10℃	- 20℃	- 10℃	0℃	10℃
Oi	28.37	30.38	29.51	31.49	28.42	28.54	27.28	30.19
Oe	21.08	23.86	24.12	23.28	23.25	25.52	24.07	22.77
A	20.11	21.02	19.98	28.76	29.73	28.1	19.85	19.57
C	15.75	16.14	15.71	17.64	15.39	21.62	15.74	16.06

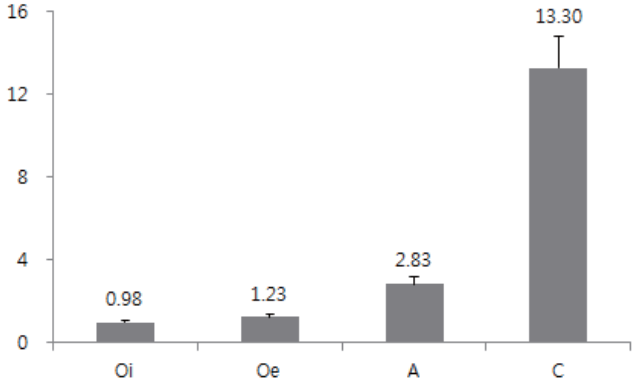


Fig. 15. Trapped methane concentration with soil profiles [ppmv].

Table 11. Methane production amounts for soil profiles during incubation experiment

[μl soil g^{-1} d^{-1}]

layer	20℃	10℃	0℃	- 10℃	- 20℃	- 10℃	0℃	10℃	20℃
Oi	0.013	0.009	0.006	0	0	0	0	0.002	0.004
Oe	0.012	0.008	0.006	0	0	0	0	0.001	0.003
A	0.010	0.007	0.005	0	0	0	0	0.001	0.002
C	0.008	0.006	0.004	0	0	0	0	0.011	0.009

Table 12. CO_2 production amounts for soil profiles during incubation experiment

[μl soil g^{-1} d^{-1}]

Soil layer	10℃	0℃	- 10℃	- 20℃	- 10℃	0℃	10℃	20℃
Oa	3.60	3.60	2.17	0.51	0.59	3.60	3.60	3.60
Oi	2.06	2.62	1.28	0.36	0.33	2.62	2.62	2.62
A	0.91	1.53	0.45	0.27	0.30	1.13	1.56	2.37
C	1.07	1.66	0.47	0.36	0.34	1.93	1.98	2.21

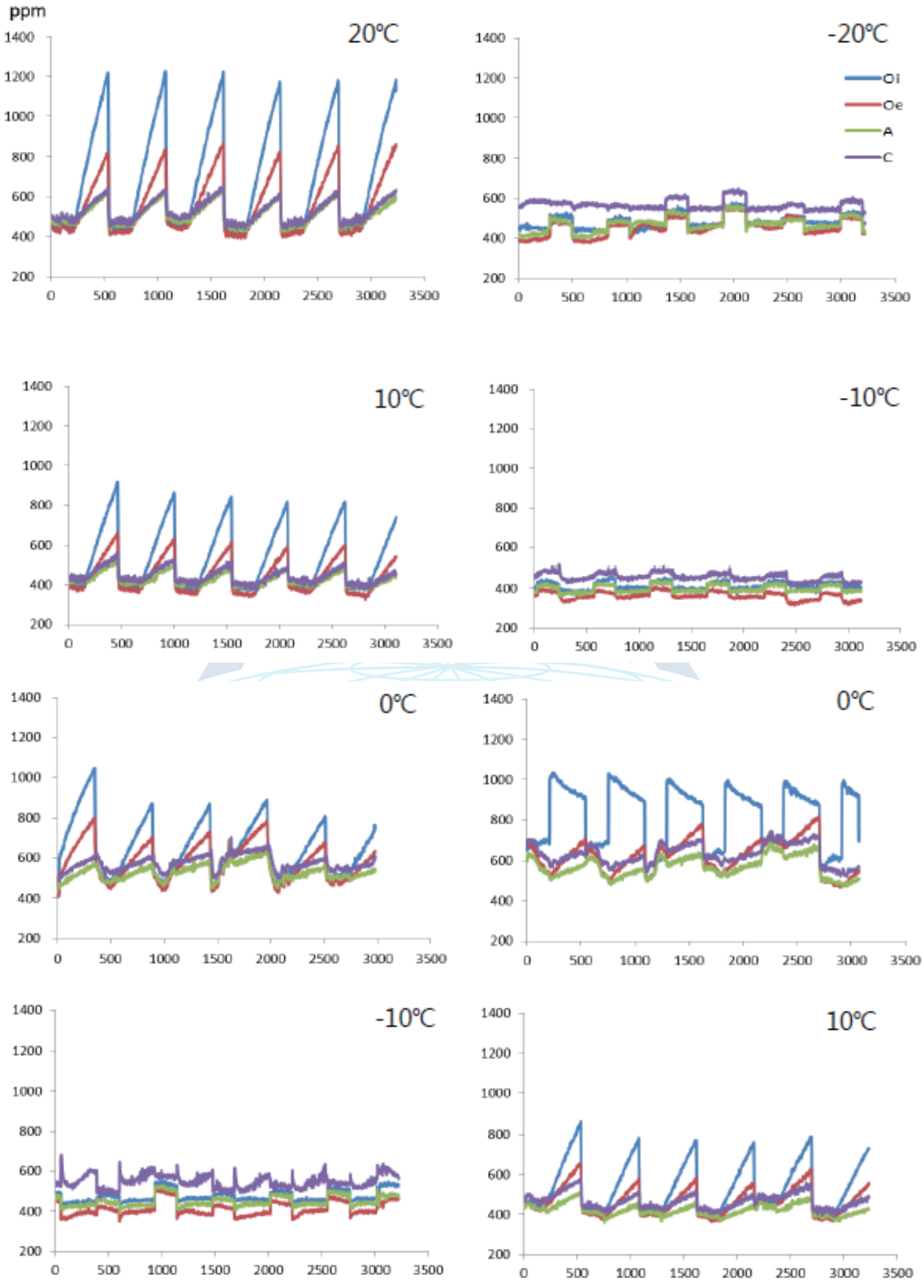


Fig. 16. Real-time CO_2 flux with each soil temperature condition.

2. 북극 생태계 식생의 분포와 적응 양상 연구

가. 동토층 식생 공간 분포와 지형·토양 환경 요인 분석

(1) 연구 내용 및 방법

○ 대표 식생 군락 지역을 선정 후 식생 분포 조사와 DGPS를 이용하여 지형 요인을 수집하고 식생 조사 지점에서 토양을 채집하였음. 채집한 토양의 성분은 이화학적 실험을 통해 분석하였음.

○ 조사 격자 지점에서 지형 및 토양 환경: 상대 고도, 경사도, 토양온도, 수분함량, 전기전도도, 유기물함량, pH, 총인, 총질소, C/N ratio, Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+}, moss 피도, lichen 피도를 분석하였음.

○ GIS의 Digital Elevation Model(DEM)을 이용해 지형 요인 추출하였음.

○ Data mining(Spatial regression, Artificial Neural Network, Support Vector Machine, Classification Tree, Ordination 등)기법을 이용해 식생의 분포와 환경 요인들과의 연관성 분석함.

(2) 연구 결과

○ 2013년 조사지인 site 1, site 2에서의 식생 중요도는 Fig. 17과 같음. Site 1에서는 북극콩버들>자주범의귀>다발범의귀 순으로 식생의 중요도가 높았음. Site 2에서는 북극콩버들>북극꿩의밥>자주범의귀 순으로 식생의 중요도가 높았음.

KOPRI 극지연구소

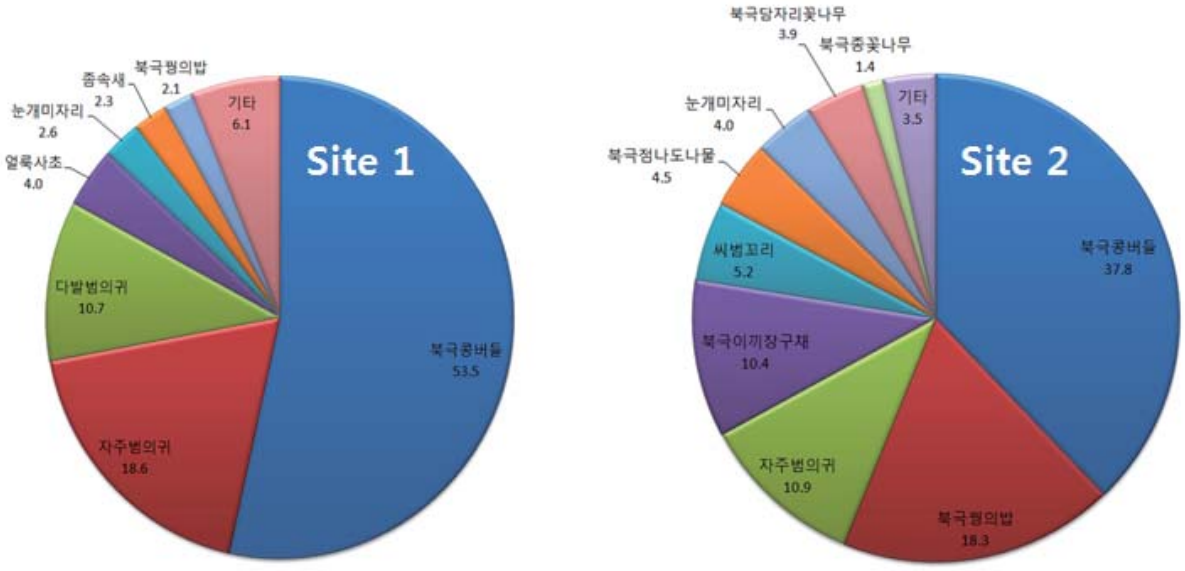


Fig. 17. Vegetation importance values at Site 1 and 2.

KOPRI 극지연구소

○ 2014년 조사지인 site 3에서의 식생 중요도는 Fig. 18과 같음. site 3에서는 북극펭의밥>자주범의귀>이끼장구채 순으로 식생의 중요도가 높았음.

○ Site 1의 다양도지수는 1.55이었고, site 2의 다양도지수는 1.95로 나타났음. Site 3에서의 다양도지수는 2.09로 조사지 중에서 가장 높은 것으로 확인하였음 (Fig. 18).

○ Fig. 17과 Fig. 18을 통해서 조사 지역마다 조금씩 식생의 중요도와 다양도가 다름을 확인할 수 있었고, 이를 통해 식물 분포와 환경 요인과의 관계의 중요성을 다시 한 번 확인할 수 있었음.

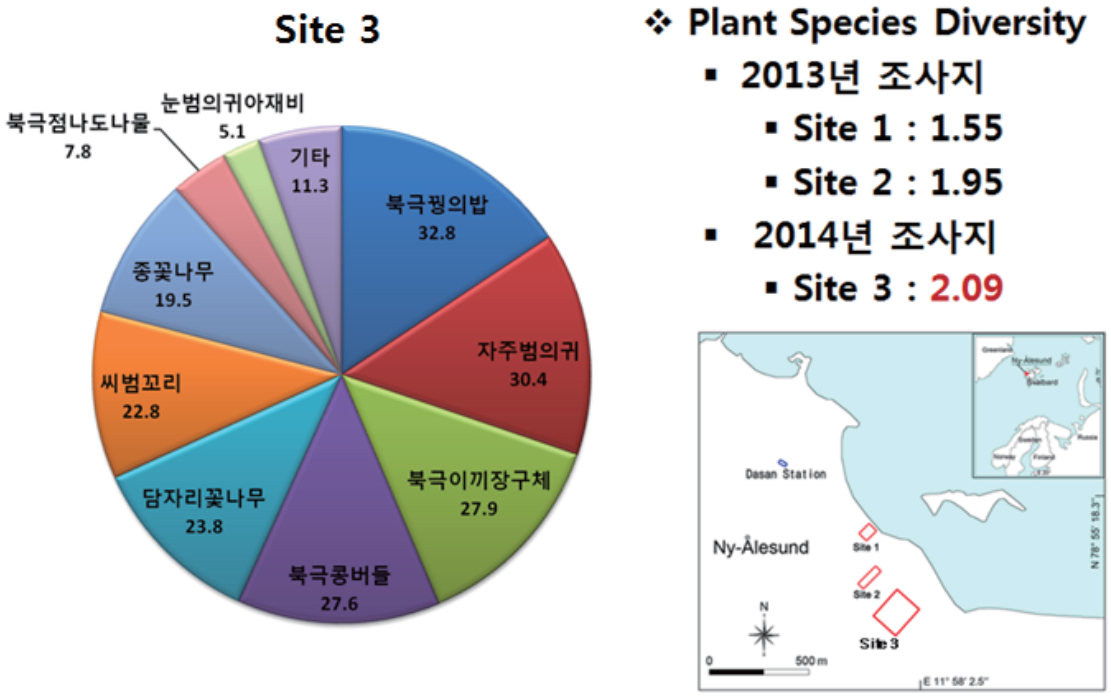


Fig. 18. Vegetation importance value and plant species diversity index.

○ Support Vector Machine으로 두 가지 유의미한 환경 요인들을 이용해 식물종의 분포를 분류한 결과 북극담자리꽃나무(DO)는 상대고도가 낮고 수분함량이 낮은 지점에서 발견 되었고, 북극콩버들(SP)은 수분함량이 많은 토양에서 발견됨. 그리고 북극종꽃나무(CT)는 다른 식물들에 비해 토양 내 총인 성분이 낮은 빈토에서 발견됨 (Fig. 19).

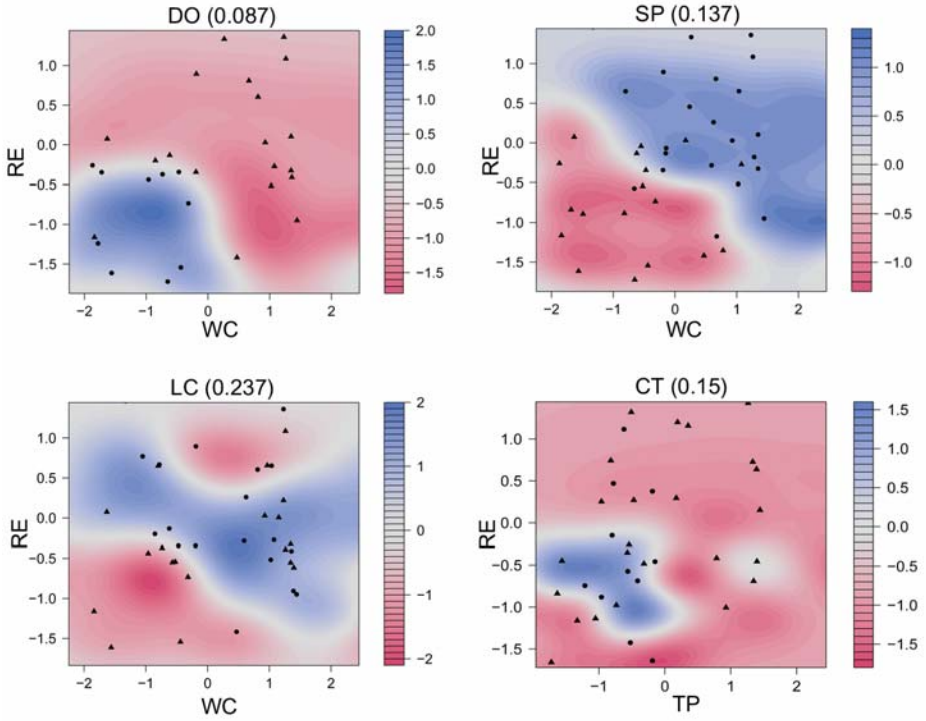


Fig. 19. Environmental factors and plant distribution analysis using support vector machine (DO: *Dryas octopetala*, SP: *Salix polaris*, LC: *Luzula confusa*, CT: *Cassiope tetragona*, RE: relative elevation, WC: water content, TP: total nitrogen). * Numbers are 10 fold cross validation, misclassification error rate.

KOPRI 극지연구소

○ Classification Tree로 분석한 결과, 식물 종 분포에 영향을 미치는 중요 환경 요인은 상대고도와 토양 수분함량으로 나타남. 특히 북극담자리꽃나무(DO)는 수분함량 13.9% 이하의 토양에서 북극콩버들(SP)는 18.8%이상의 토양환경에서 발견됨 (Fig. 20).

○ 다양한 통계적 가정이 필요 없는 비모수적 ordinatin 방법인 NMDS (Nonmetric Multi-Dimensional Scaling)를 이용해 다양한 환경 요인과 식물 종 분포간의 연관성을 분석함. 상대고도가 높은 지점에서 발견된 종은 눈개미자리(SN)이며 북극담자리꽃나무(DO)와 북극종꽃나무(CT)는 다른 종에 비해 낮은 지점에서 발견됨. 토양 pH 값에 의해서도 식물종의 분포가 유의미하게 나누어짐. 자주범의귀(SO), 북극점나도나물(CA)는 pH가 높은 지점에서 발견되고 씨범꼬리(BV), 북극이끼장구채(SA)는 pH가 낮은 지점에서 발견됨 (Fig. 21).

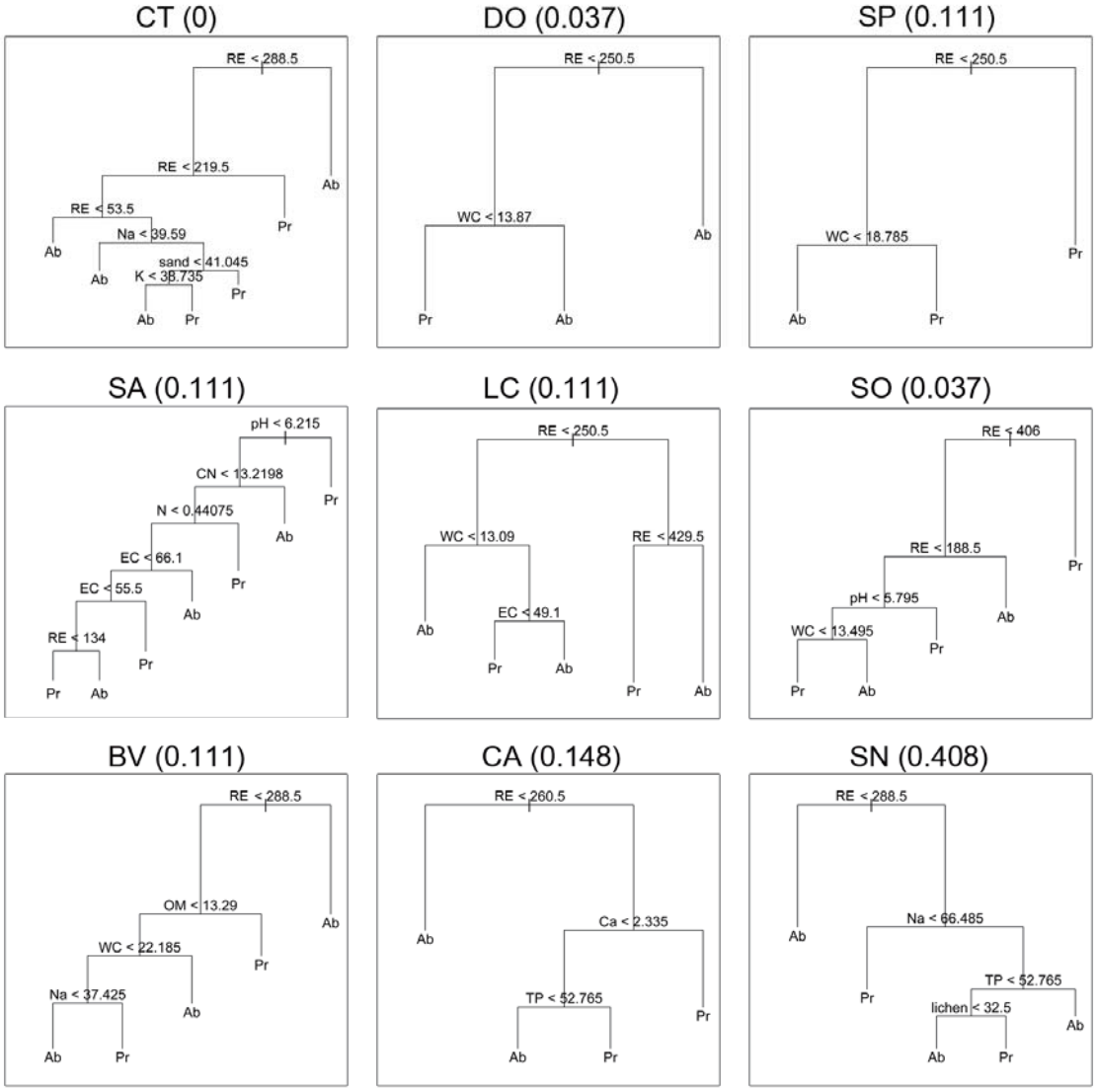


Fig. 20. Environmental factors and plant distribution analysis using a classification tree (CT: *Cassiope tetragona*, DO: *Dryas octopetala*, SP: *Salix polaris*, SA: *Silene acaulis*, LC: *Luzula confusa*, SO: *Saxifraga oppositifolia*, BV: *Bistorta vivipapa*, CA: *Cerastium arcticum*, SN: *Sagina nivalis*, Ab: not present, Pr: present). *Numbers are misclassification error rate.

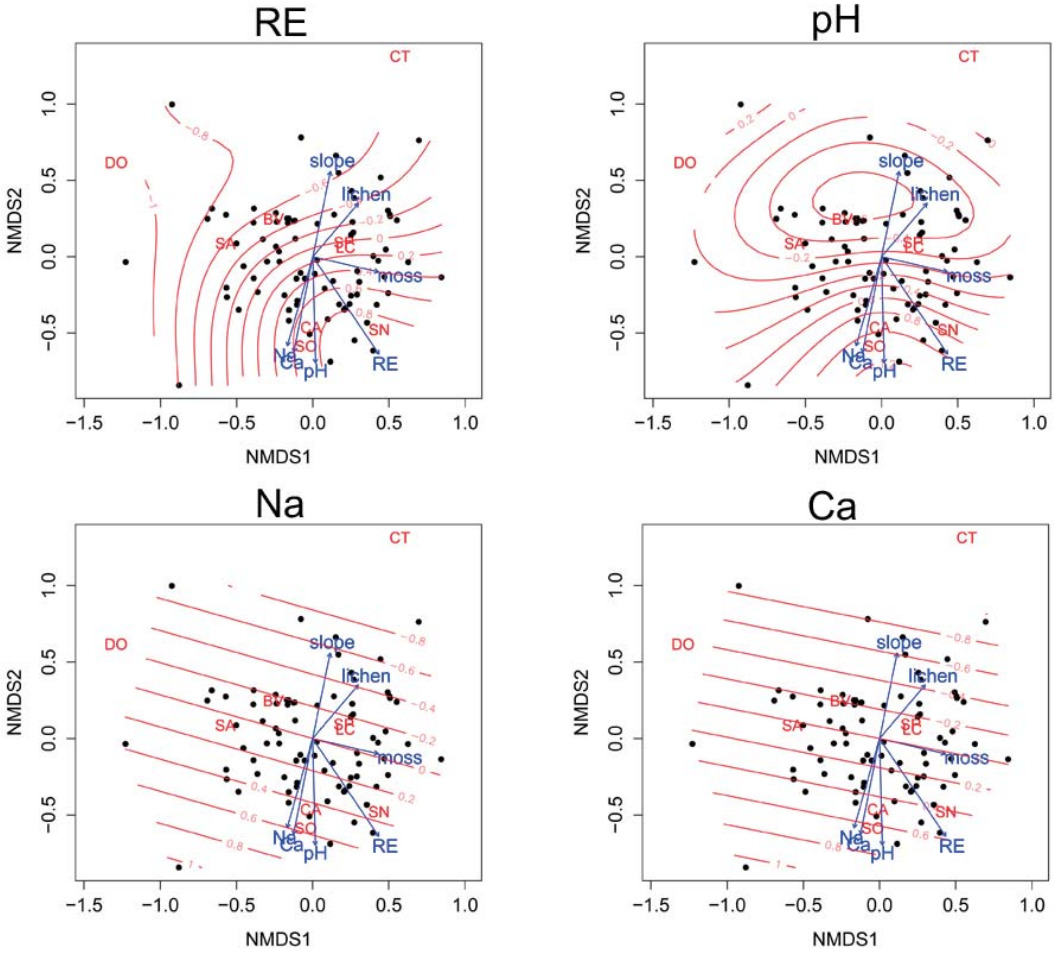


Fig. 21. Environmental factors and plant distribution analysis using a nonmetric multidimensional scaling method (CT: *Cassiope tetragona*, DO: *Dryas octopetala*, SP: *Salix polaris*, SA: *Silene acaulis*, LC: *Luzula confusa*, SO: *Saxifraga oppositifolia*, BV: *Bistorta vivipapa*, CA: *Cerastium arcticum*, SN: *Sagina nivalis*, RE: relative elevation).

○ Geographically Weighted Regression을 이용하여 식물 종 다양도과 환경 요인과의 연관성 분석하였음 (Fig. 22, 23).

○ 해안 지점(Site 1)의 경우 식물 종 다양도와 관련성이 높은 환경 요인은 상대고도(RE), 점토함량(Clay), 수분함량(WC), Ca^{2+} 등이었음. 즉, 고도가 높고 토양에 점토와 Ca^{2+} 함량이 높을수록 종 다양도가 높고, 토양수분 함량은 낮을수록 종 다양도가 높음 (Fig. 22).

○ Site 2에서 식물 종 다양도와 관련성이 높은 환경 요인은 pH, 총질소(N), Na^{+}, Ca^{2+} 이었음. 즉, pH가 높고 토양에 질소와 Na^{+} 함량이 높을수록 종 다양도가 높고, Ca^{2+} 함량은 낮을수록 종 다양도가 높음 (Fig. 23).

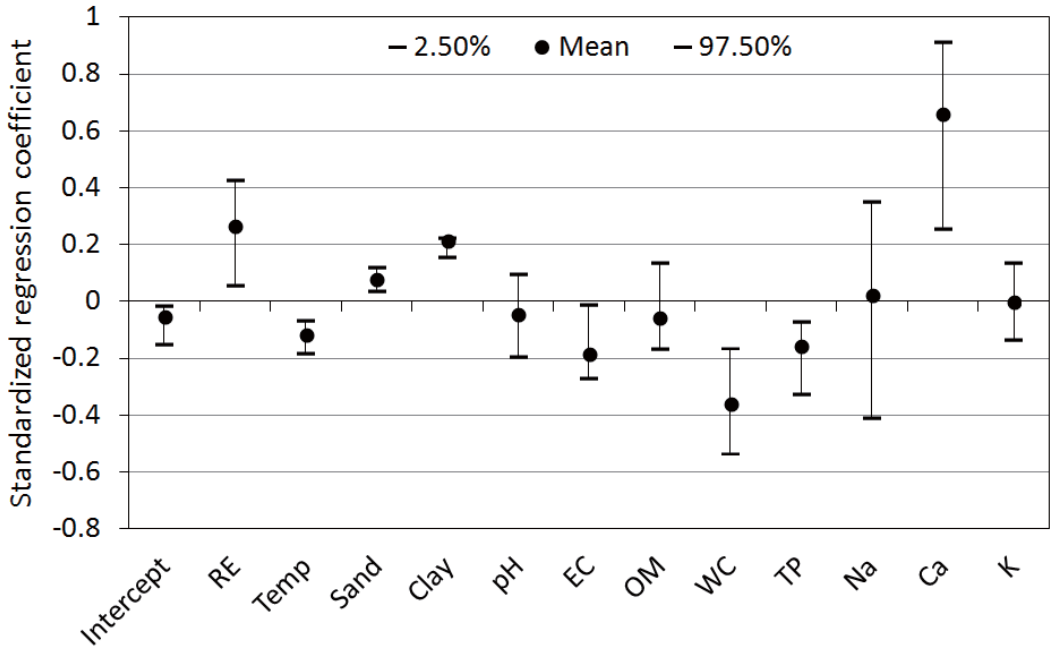


Fig. 22. Plant species diversity and environmental factors at seaside Site 1 (RE: relative elevation, Temp: soil temperature, EC: electrical conductivity, OM: organic matter, WC: water content, TP: total phosphorus).

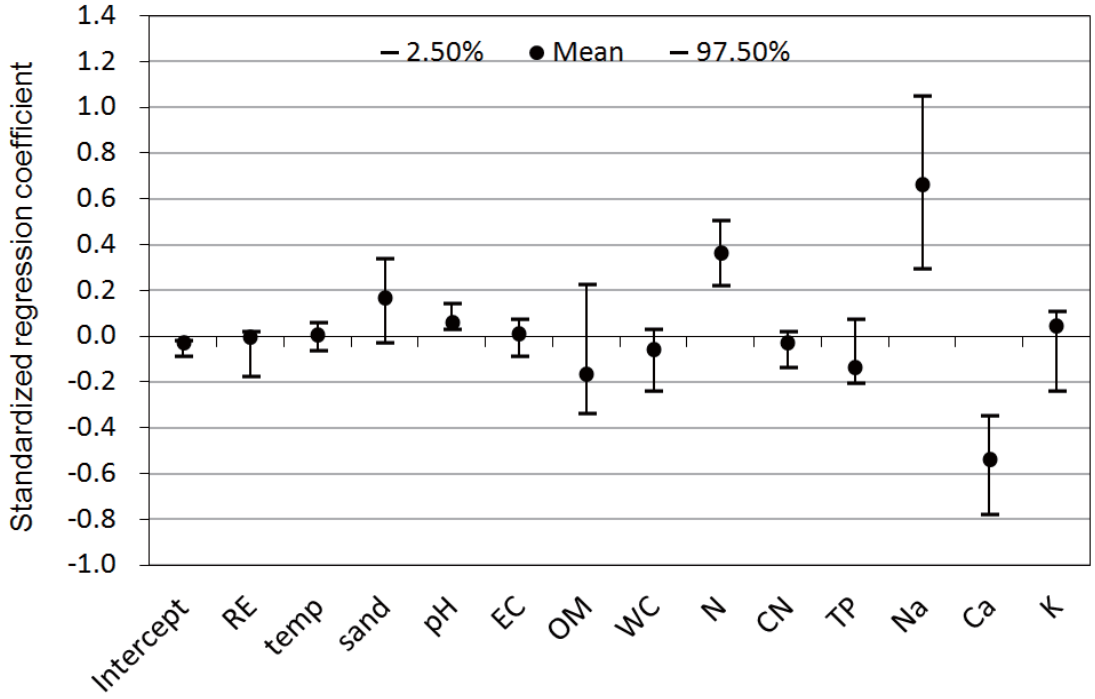


Fig. 23. Plant species diversity and environmental factors at Site 2 which is 200 meters away from seaside (RE: relative elevation, Temp: soil temperature, EC: electrical conductivity, OM: organic matter, WC: water content, TP: total phosphorus, TN: total nitrogen, CN: C/N ratio).

○ Kriging을 이용해 종 다양도 공간 내삽을 실시한 결과 site 3 내에서의 지점별 편차가 크고 뚜렷한 공간자기상관성이 보이지 않았음. 공간자기상관성이 비교적 높은 환경 요인은 상대고도, Na^+ 함량, 총인으로, 특히 Na^+의 경우 해풍에 실려 오는 바닷물의 영향을 받은 것으로 예상됨. 종 다양도와 공간적 상관성이 높은 환경 요인은 지온과 Na^+이었고, 지온은 종 다양도와 양의 공간 상관이 높은 것으로 확인됨 (Fig. 24).

○ RandomForest 방법을 이용해 종 다양도와 각 환경요인 간의 연관성을 비교한 결과 지온과 C/N ratio가 높은 지점에서 종 다양도도 높은 것을 확인할 수 있었음. 2014년은 지난해에 비해 강설량이 많았으며 지온이 높아 눈이 빨리 녹는 지역이 종 다양도도 높을 것으로 예상됨. 또한 토양 내 탄소의 함량이 높은 지역에서 종 다양도가 높았음. Na^+ 함량과 종 다양도는 음의 상관성을 가지고 있어 해풍의 영향을 받는 지역은 종 다양도가 낮아지는 것으로 예측됨 (Fig. 25).

KOPRI
극지연구소

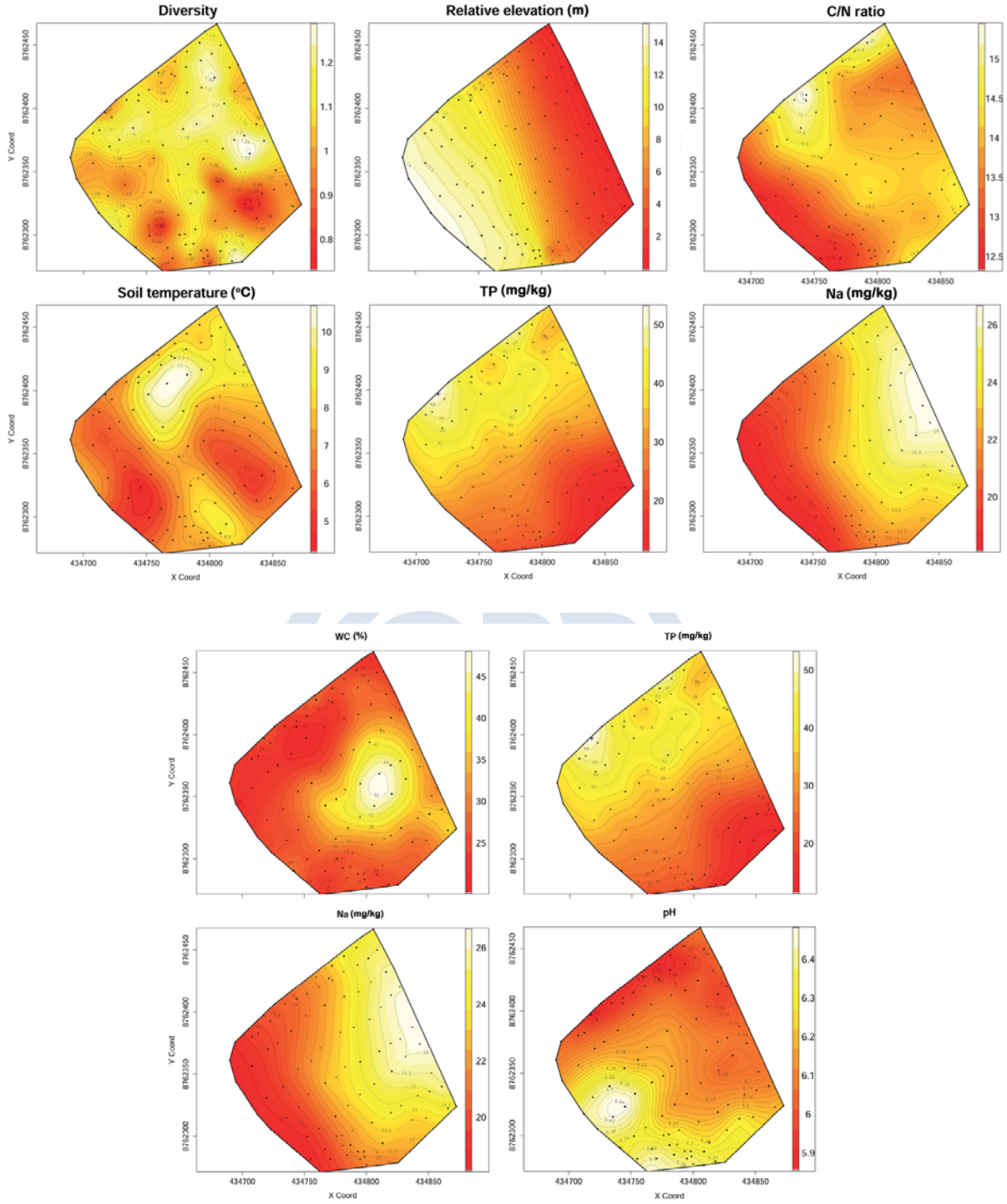


Fig. 24. Plant species diversity and spatial distribution at Site 3. (EC, relative elevation, slope, soil temperature, WC, TP, Na^{+}, soil pH).

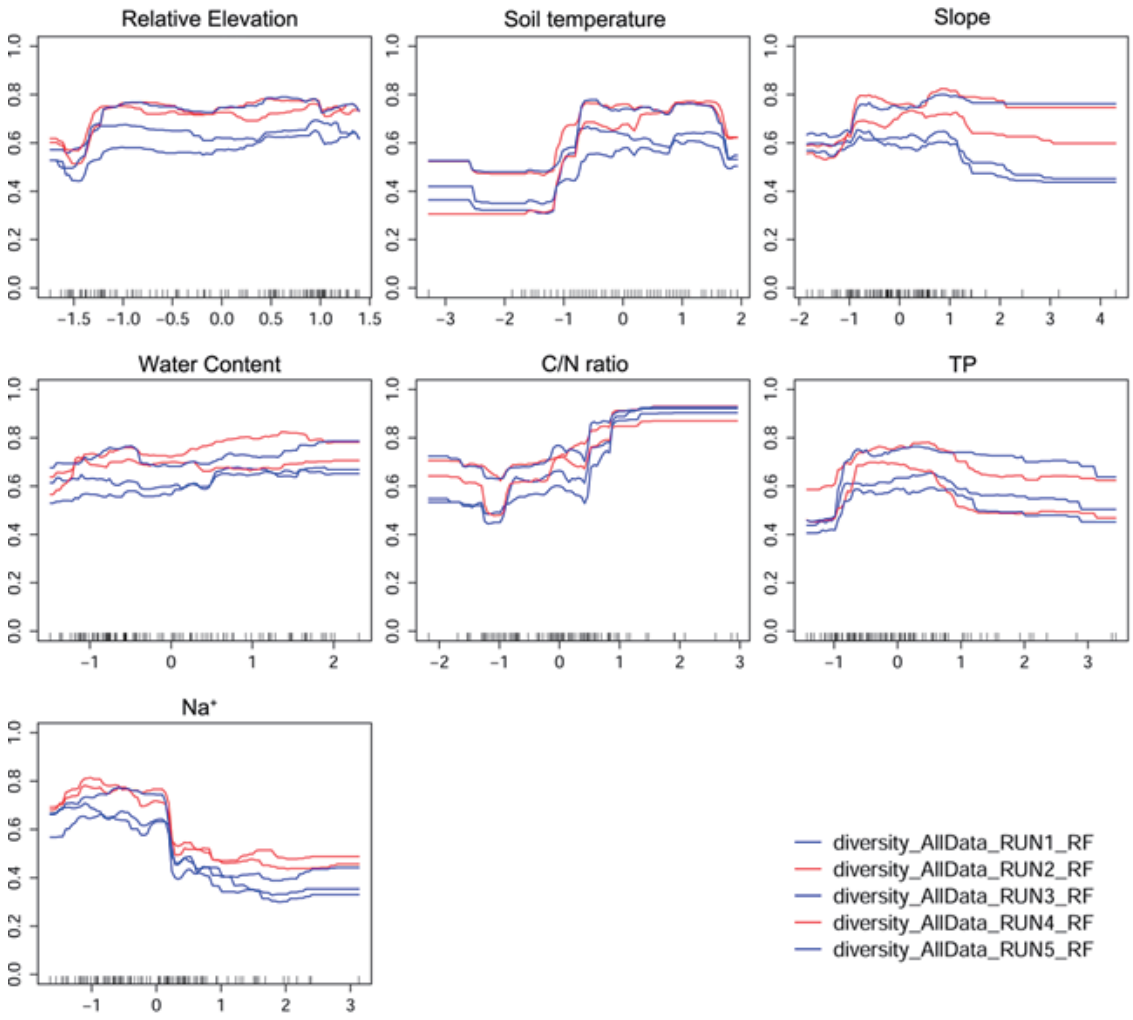


Fig. 25. Relationship analysis between major environmental factors and plant species diversity changes using a RandomForest method.

○ 주요 환경 요인인 상대고도, 지온, C/N ratio, Na^+ 함량이 동시에 영향을 미치게 될 경우 종 다양도의 변화를 예측했을 때, 지온이 높고 C/N ratio가 높은 지역이 종 다양도가 높음. 지온과 C/N ratio가 낮은 지점은 Na+ 함량이 높은 곳이 종 다양도가 높은 것을 확인함 (Fig. 26).

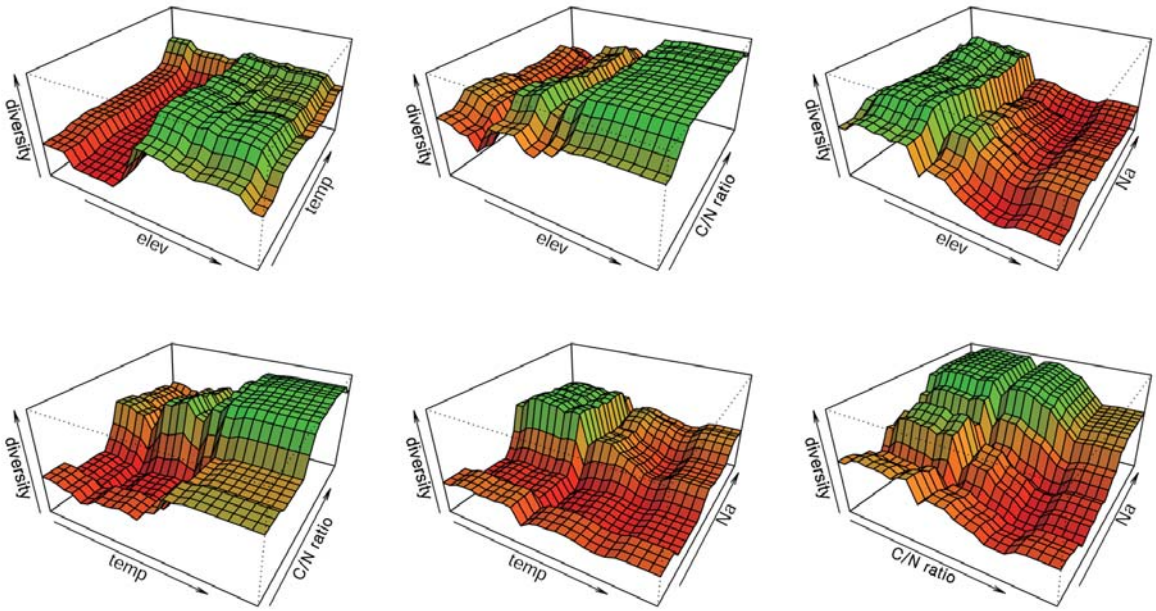


Fig. 26. Plant species diversity analysis with two major environmental factors.

KOPRI 극지연구소

나. 보육식물 (nurse plant)이 북극 생태계에 미치는 영향 분석

(1) 연구 배경

○ 극지나 사막과 같은 극한 환경에서 서식하는 일부 식물들은 facilitative effect를 통해서 다른 식물들이 잘 살아갈 수 있도록 환경을 개선시켜 주는 효과를 보인다. 이러한 식물들을 보육식물 (nurse plant)이라고 함 (I Badano *et al.* 2006).

○ 보육식물들은 대기와 토양의 온도 변화량을 감소시켜 주어 안정된 환경을 만들어 주며, 다른 식물들에게도 서식처를 제공해 주는 nurse effect를 보임 (Antonsson et al. 2009, Chen et al. 2015).

○ 본 연구에서는 니알슨 다산기지 주변에 서식하는 식물들의 nurse effect를 연구하고자 함.

(2) 연구 내용 및 방법

○ 니알슨 다산기지 주변에 우점하는 식물 3개 종(북극종꽃나무, 북극담자리꽃나무, 북극이끼장구채)을 선택하여 nurse effect를 조사하였음(Table 13).

○ 각 식물이 우점하는 장소에 1 m X 1 m 방형구를 설치하여 방형구 안의 식물종, 식물의 피도, 식물 방석의 둘레/길이 측정을 수행함.

○ 식물 방석의 밑에 온도센서와 수분센서(ECH2O)를 설치하여 연구기간 동안의 일별 토양온도와 토양수분 변화량을 측정하였음.

○ 식물 방석 밑의 토양과 식물이 없는 곳의 토양을 채취하여 풍건 후 토양 분석을 수행하였음.

○ 연구조사지는 다산기지에서 약 1.3 km 정도 떨어진 곳에 위치한 곳임(Fig. 27).

Table. 13. Main nurse plants for research

Cassiope tetragona (Abbr. : C.te) 북극종꽃나무	***Dryas octopetala*** (Abbr. : D.oc) 북극담자리꽃나무	***Silene acaulis*** (Abbr. : S.ac) 북극이끼장구채
다년생 관목	다년생 관목	다년생 초본
mat form	mat form	cushion form

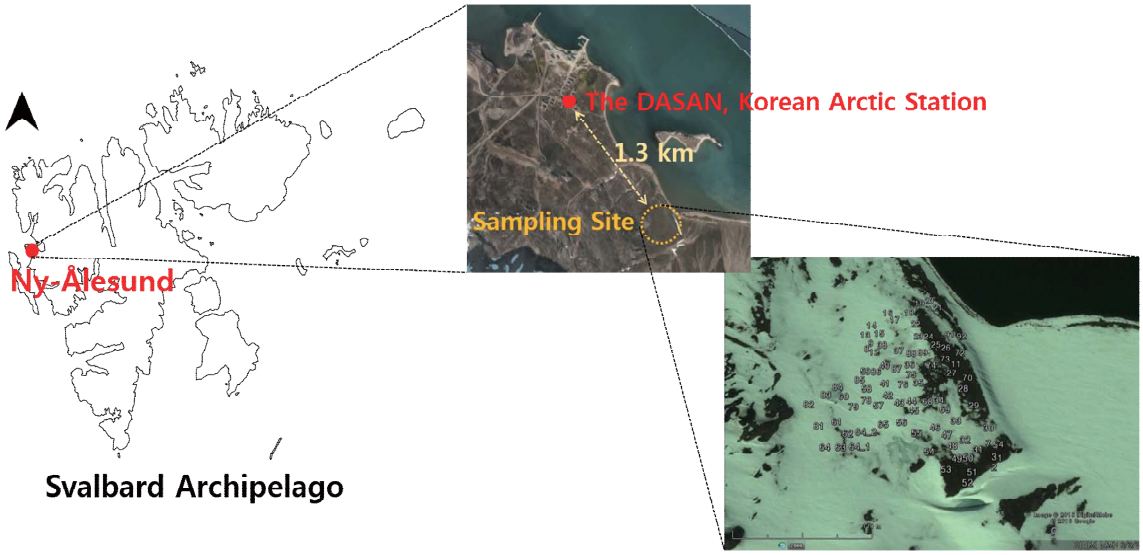


Fig. 27. Study site and sampling sites.

○ 연구가설은 다음과 같이 설정함(Fig. 28).

- Nurse plant는 일 온도 변화량을 감소시킴. 즉, nurse plant는 온도 변화의 완충작용을 할 것임.
- Nurse plant는 일 토양 수분 변화량을 감소시킴. 즉, nurse plant는 토양 수분 증발에 완충 작용을 할 것임.
- Nurse plant는 토양의 영양분을 증가시킴.
- Nurse plant는 식물 다양도를 증가시킴.

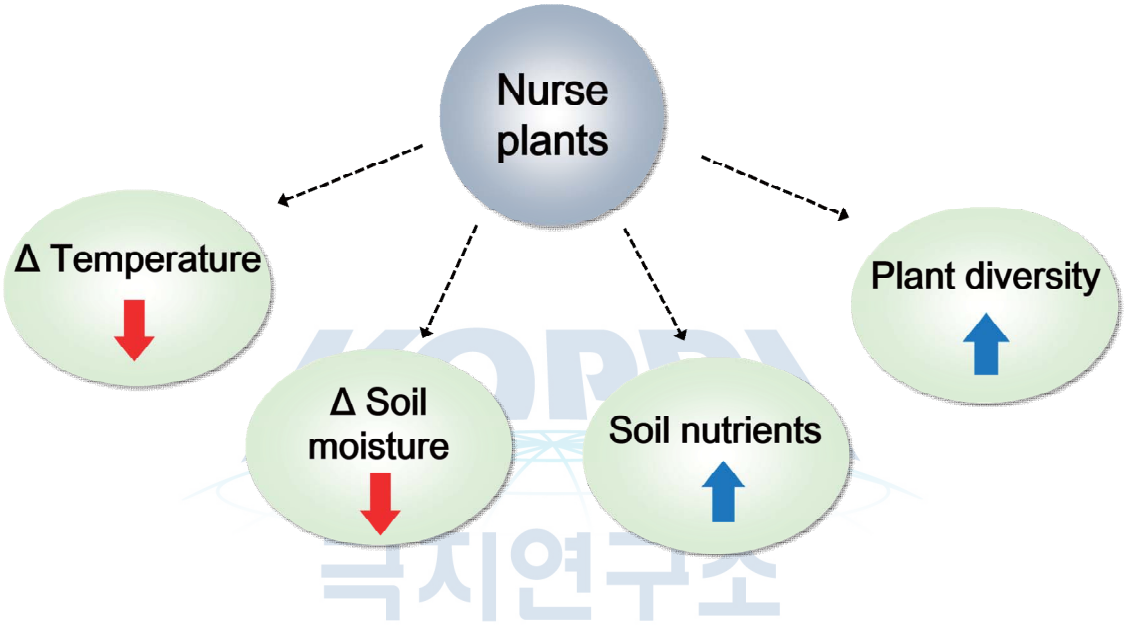


Fig. 28. Hypothesis of nurse effect on Arctic ecosystem.

(3) 연구 결과

○ Fig. 29는 2015년 조사기간 동안의 토양 온도 변화를 나타냄. 식물이 없는 bare-soil에서 일별 토양 온도 변화량이 가장 큰 것으로 나타났음. 북극담자리꽃나무(D.oc)와 북극이끼장구채(S.ac)의 식물 아래에서 측정한 토양 온도는 bare-soil 보다는 온도 변화량이 적었음. 특히, 북극종꽃나무(C.te)의 식물 밑에서는 토양 온도 변화가 가장 적었음.

○ Bare-soil, 북극이끼장구채, 북극담자리꽃나무, 북극종꽃나무에서 측정한 일 토양 온도 변화량을 anova 분석한 결과, 북극종꽃나무에서 온도 변화량이 가장 적었음. 북극종꽃나무가 북극에서 극심한 온도 변화에 대한 완충작용을 가장 잘 한다고 볼 수 있으며, 이를 nurse effect 라고 할 수 있음 (Fig. 30).

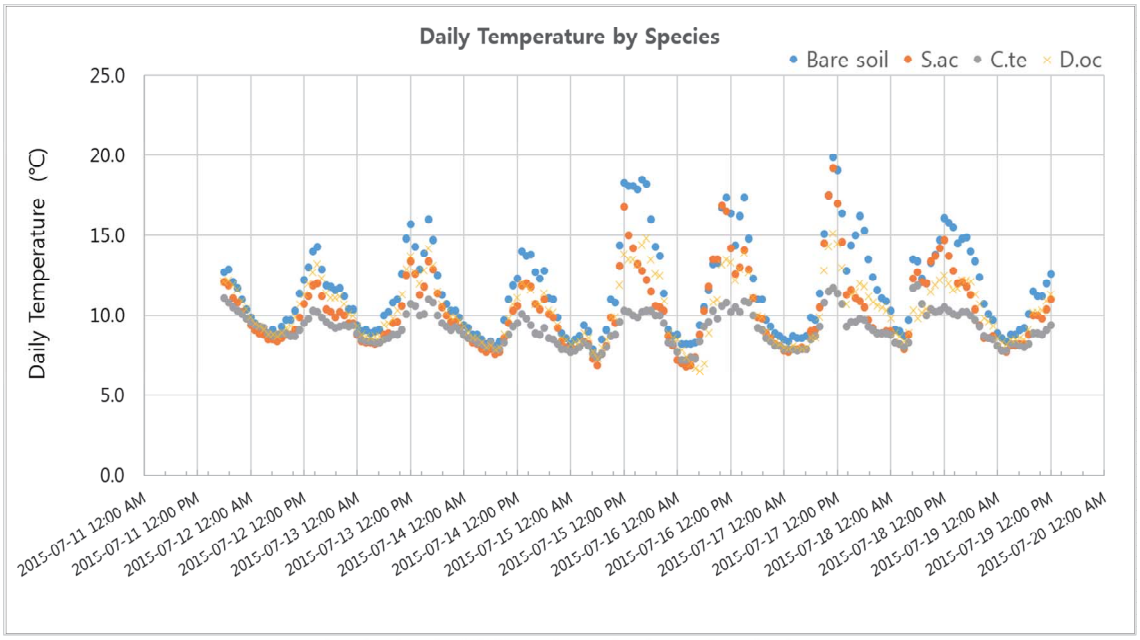


Fig. 29. Daily temperature fluctuation beneath nurse plants (Bare soil, C.te: *Cassiope tetragona*, D.oc: *Dryas octopetala*, S.ac: *Silene acaulis*).

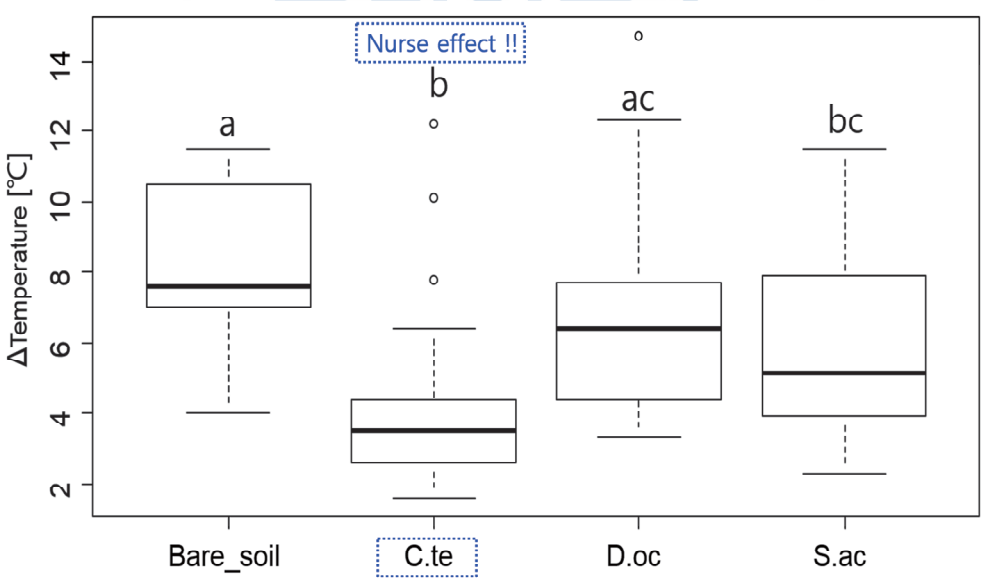


Fig. 30. Daily temperature differences by nurse plants (Bare soil, C.te: *Cassiope tetragona*, D.oc: *Dryas octopetala*, S.ac: *Silene acaulis*).

○ Fig. 31은 식물 방석 밑에서 일 토양 수분 변화량을 측정하여 anova 통계 분석을 한 결과임. 다른 식물종은 bare soil 지역과 별 차이가 없었지만, 북극종꽃나무(C.te)는 토양 수분 변화량을 줄여주어 토양 수분이 증발되는 것을 막아준다고 유추할 수 있음. 이는 북극의 극한의 환경에서 토양 수분이 급격히 감소하는 것을 북극종꽃나무가 가장 많이 막아주는 것으로 사료됨. 토양의 수분 함량의 변동을 줄여주는 것으로 보아 이를 nurse effect 중에 하나로 볼 수 있음.

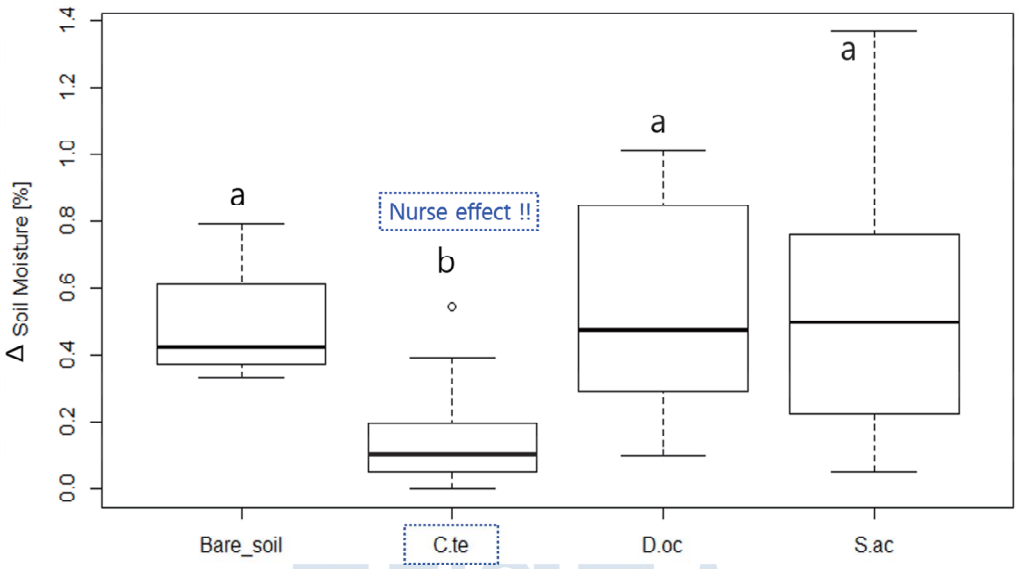


Fig. 31. Daily soil moisture differences by nurse plants (Bare soil, C.te: *Cassiope tetragona*, D.oc: *Dryas octopetala*, S.ac: *Silene acaulis*).

○ Fig. 32와 33은 식물 방석 각 장소에서의 토양 유기물 함량을 분석한 결과임. 북극종꽃나무, 북극담자리꽃나무, 북극이끼장구채가 있는 곳(P)의 유기물 함량이 각 식물이 없는 곳(A)의 유기물 함량보다 통계적으로는 유의하지는 않지만, 높은 경향을 보였음. 식물 종류에 상관없이 식물이 있는 곳(P)과 없는 곳(A)에서의 토양 유기물을 비교한 결과, 식물이 있는 곳(P)에서의 토양 유기물 함량이 식물이 없는 곳(A)에서의 토양 유기물 함량보다 더 높음을 알 수 있음($p<0.01$) (Fig. 33). 즉, nurse plant는 주변의 토양 유기물을 더 높임으로써 주변보다 토양의 비옥도를 높인다는 것을 알 수 있음.

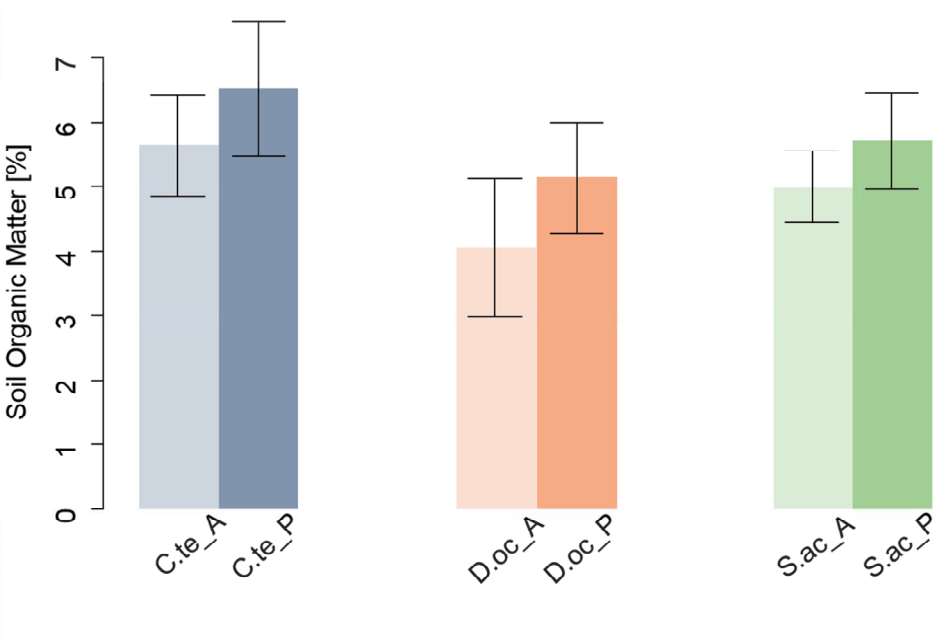


Fig. 32. Soil organic matter contents beneath the nurse plants (C.te: *Cassiope tetragona*, D.oc: *Dryas octopetala*, S.ac: *Silene acaulis*, P: plant presence, A: plant absence).

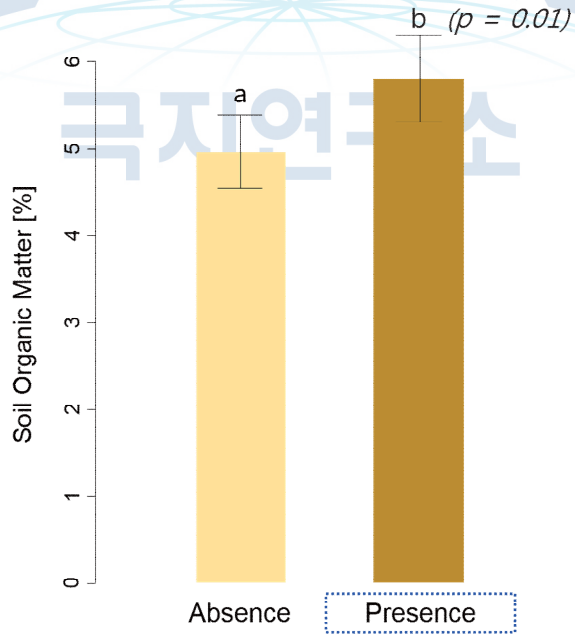


Fig. 33. Comparison of soil organic matter at plant present sites and plant absence sites (P: plant presence, A: plant absence).

○ 각 장소에서 다양도지수를 구한 결과, bare-soil에서는 1.86, 북극종꽃나무 군집에서는 1.99, 북극담자리꽃나무 군집에서는 1.95, 북극이끼장구채 군집에서는 2.01로 나타남. Bare-soil에서는 본 연구의 대상 식물인 북극담자리꽃나무, 북극종꽃나무, 북극이끼장구채는 없었으나 그 외의 북극콩버들, 자주범의귀 같은 다른 식물들은 존재하고 있어서 다양도지수가 1.86으로 나타남. 각 식물 군집의 다양도지수는 거의 비슷하게 나타남(Fig. 34).

○ 북극종꽃나무 군집에서 출현한 종의 수는 2.1, 북극담자리꽃나무 군집에서 출현한 종의 수는 2.1, 북극이끼장구채 군집에서 출현한 종의 수는 1.5로 조사됨. 각 세 군집에서 출현한 종의 수가 크게 차이가 나지 않아 다양도지수에서도 큰 차이가 없는 것으로 사료됨 (Fig. 34).

Nurse plants	Diversity Index
Bare soil	1.86
Cassiope tetragona (C.te)	1.99
Dryas octopetala (D.oc)	1.95
Silene acaulis (S.ac)	2.01

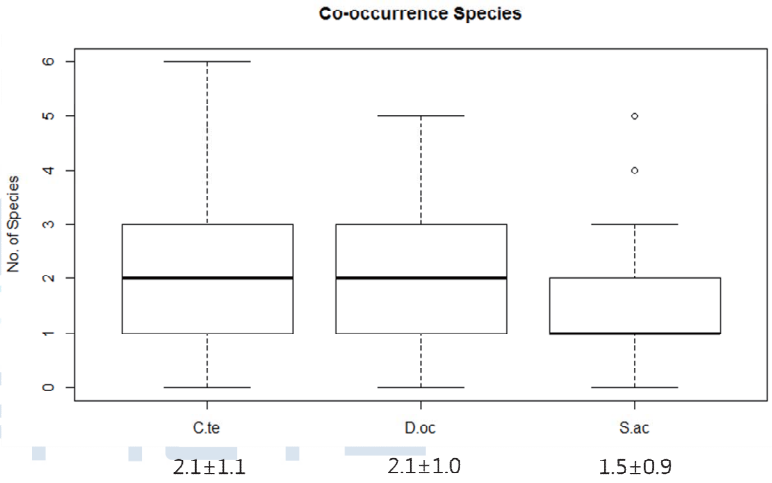


Fig. 34. Diversity indices and co-occurrence species in nurse plant community.

○ 전체적으로 nurse effect는 북극담자리꽃나무나 북극이끼장구채보다는 북극종꽃나무에서 그 특징이 가장 잘 나타남. 그 이유를 고찰해 보면, 북극종꽃나무가 다른 식물들에 비해서 식물의 매트(고사체 포함)의 두께가 가장 두꺼운 것을 알 수 있음(Fig. 35). 또한 북극종꽃나무의 매트 넓이도 북극이끼장구채에 비해서 더 넓은 것을 알 수 있음 (Fig. 36). 따라서 북극종꽃나무의 식물 매트의 두꺼운 두께와 넓은 면적이 토양 환경을 좀 더 온화하게 유지시켜 주어 토양 온도 변화나 수분 변화가 급격히 변하는 것을 막아주는 것으로 유추할 수 있음. 또한 북극종꽃나무의 두꺼운 고사체는 주변 토양에 유기물을 공급하여 주변의 토양보다 좀 더 비옥하게 만들어줌.

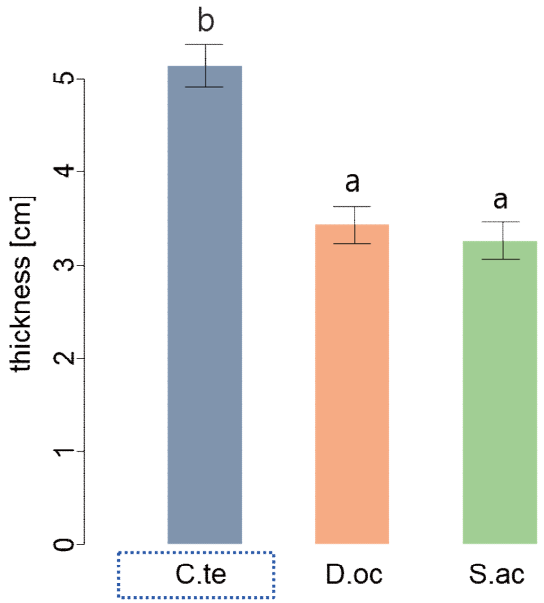


Fig. 35. Comparison of thickness of nurse plant mats (C.te: *Cassiope tetragona,* D.oc: *Dryas octopetala*, S.ac: *Silene acaulis*).

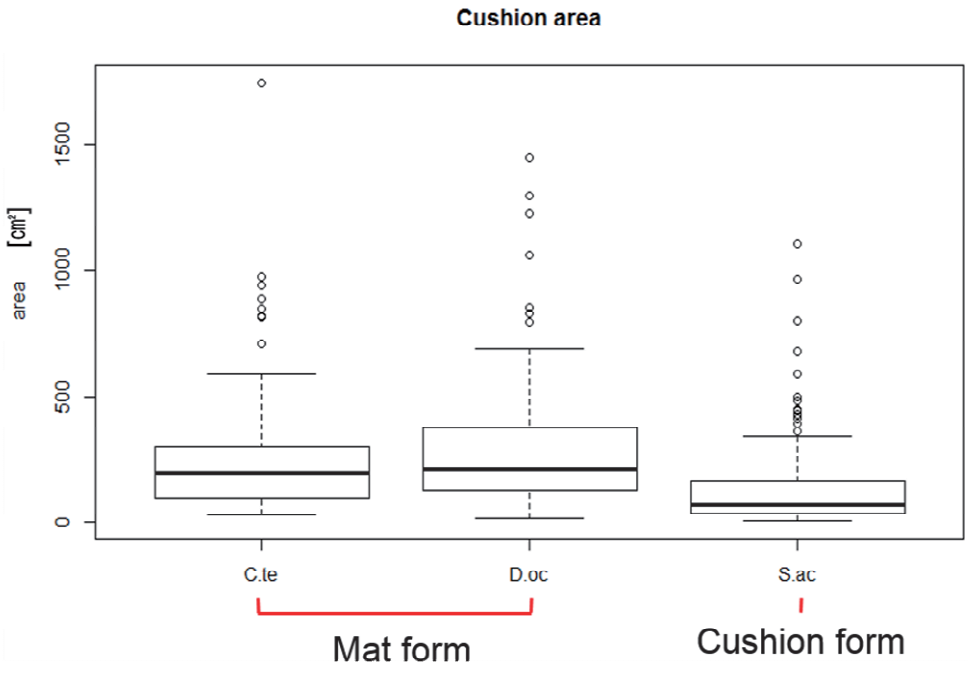


Fig. 36. Comparison of area of nurse plant mats (C.te: *Cassiope tetragona,* D.oc: *Dryas octopetala*, S.ac: *Silene acaulis*).

(4) 연구 결론

○ Nurse plant는 토양의 온도 변화량을 감소시킴. 즉, nurse plant는 북극의 극한 온도 변화에 대해서 완충작용을 함. 특히 온도 변화에 대한 완충작용은 북극종꽃나무 군집에서 가장 큰 효과를 보임.

○ Nurse plant는 토양 수분 변화량을 감소시킴. 즉, nurse plant는 토양 수분 증발에 완충 작용을 함. 특히 수분 변화에 대한 완충작용은 북극종꽃나무 군집에서 가장 큰 효과를 보임.

○ Nurse plant는 토양의 영양분을 증가시킴. 북극종꽃나무, 북극담자리꽃나무, 북극이끼장구채 식물이 있는 곳과 없는 곳에서 토양 유기물 함량 차이를 보였고, 이들 nurse plant는 토양의 유기물을 높임으로써 nurse effect를 보임.

○ Nurse plant가 있는 곳에서 식물 다양도가 높긴 하지만, 통계적으로는 유의하지 않음. 북극 환경에서 nurse plant 뿐만 아니라 크기가 작은 다른 식물들도 존재하기 때문에 넓은 면적을 이루며 군집을 이루는 북극종꽃나무, 북극담자리꽃나무, 북극이끼장구채 군집에서 통계적으로 유의하게 다양도가 높진 않았음.

○ Nurse effect를 가장 잘 나타내는 식물 종은 북극종꽃나무인데, 이는 식물의 매트 두께가 두껍고 면적이 넓어서 토양의 수분 증발을 효과적으로 막고, 온도 변화에 대해서도 완충작용이 탁월하기 때문임.

KOPRI 극지연구소

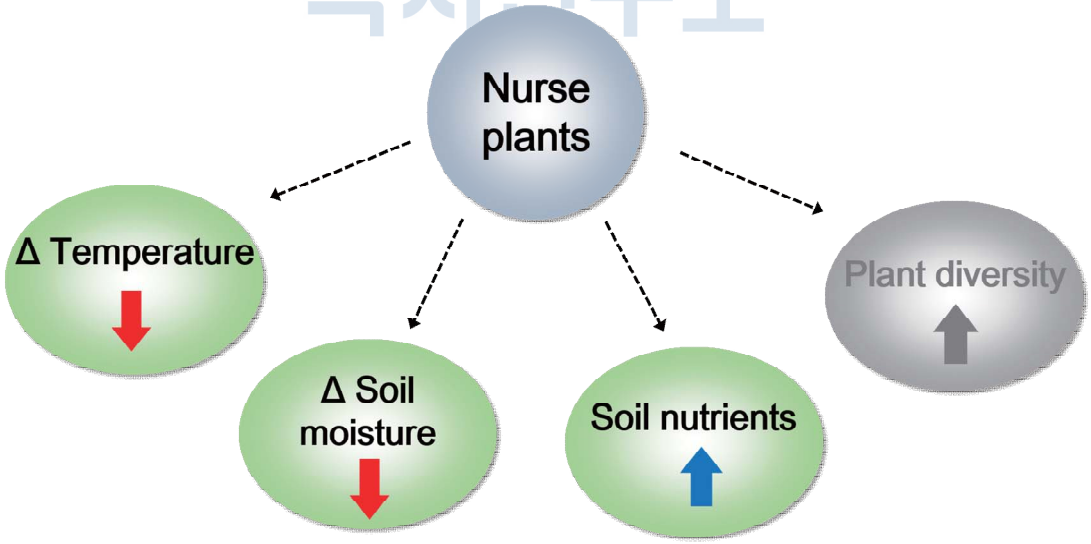


Fig. 37. Summary of nurse effect.

다. 북극다람쥐꼬리에 대한 생태 연구

(1) 연구 내용 및 방법

○ 북극다람쥐꼬리의 학명은 *Huperzia arctica* (Grossh. ex Tolm.) Sipliv. 이며, 다년생 상록성 초본임. Fig. 38에서 볼 수 있듯이 스발바르와 북유럽에서 분포함. *Huperzia* 속에 포함된 종은 약 400여종이 있음.

○ 니올레순에서 북극다람쥐꼬리를 발견한 곳은 두 곳으로 다산기지에서 약 1.5 km 떨어졌으며, 두 장소는 서로 약 0.8 km 떨어져있음 (Fig. 39).

○ 북극다람쥐꼬리가 제한된 장소에서 서식하는 이유를 고찰해보고자, 서식 장소의 토양 분석 및 개체의 특징 관찰, 미토콘드리아 유전체 분석 등을 실시하였음.

○ 또한 기후변화에 따른 기온상승에 따른 북극다람쥐꼬리의 생장 제한에 관하여 알아보기 위해 일부 무성아를 심어서 저온 챔버(8℃)와 고온 챔버(13℃)에서 관찰하였음.

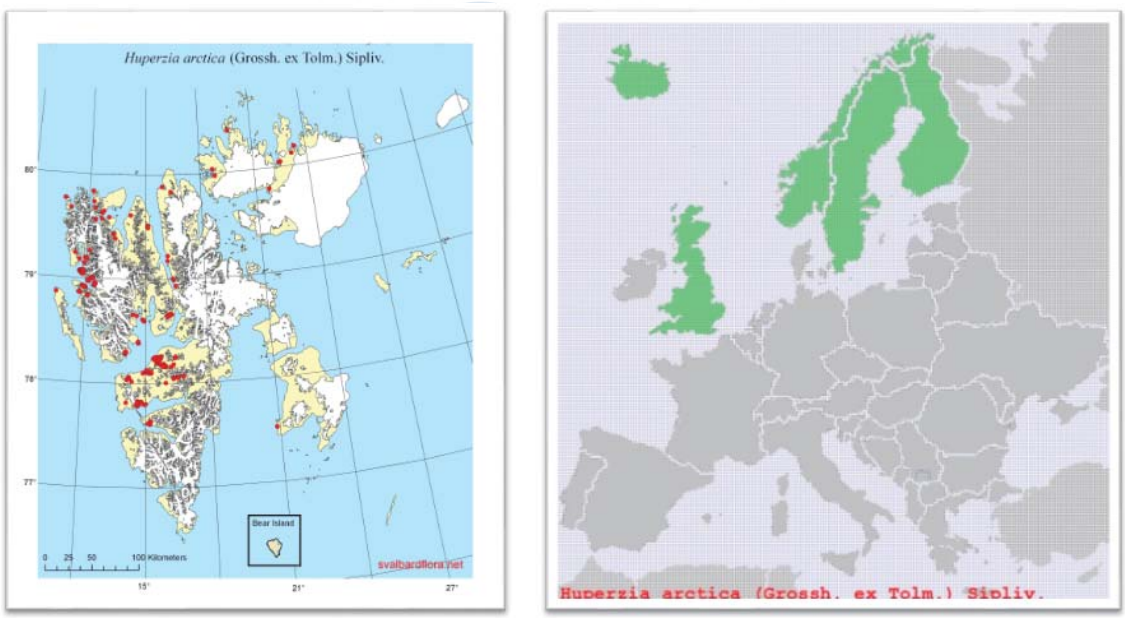


Fig. 38. Distribution map of *H. arctica* in Svalbard.

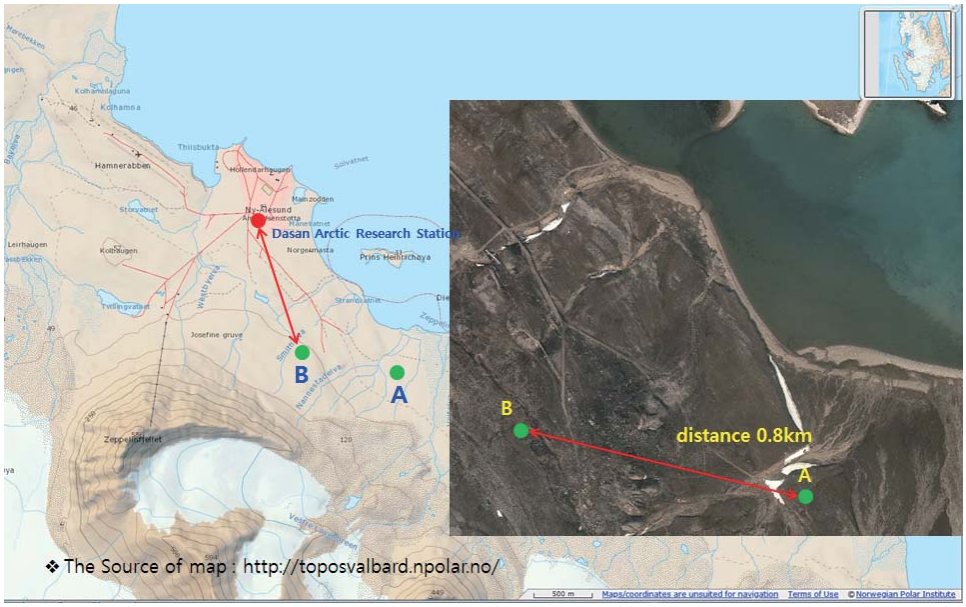


Fig. 39. Study sites of *H. arctic*a in Ny-Ålesund.

(2) 연구 결과

○ 니알슨 북극다람쥐꼬리 서식 지역 A (H-Hd-H03)의 토양 내 탄소양은 0.5%, 질소양은 5.7%이었음. 서식 지역 B (H-Ro-H03)의 토양 내 탄소양은 0.4%, 질소양은 5.6%으로 서식 지역 A와 B 지역의 토양 탄소와 질소양은 큰 차이가 없었음. A 지역의 토성은 모래 64%, 미사 14%, 점토 23% 이었으며, B 지역의 토성은 모래 56%, 미사 13%, 점토 31%이었음. B지역에서 점토 함량이 A지역보다 약 8% 높으며 이를 통해 B지역이 약간 더 습하다는 것을 알 수 있었음. 하지만, 니알슨에서 북극다람쥐꼬리가 발견된 두 곳의 토양 성분 및 유기물의 차이는 크게 나지 않음 (Fig. 40).

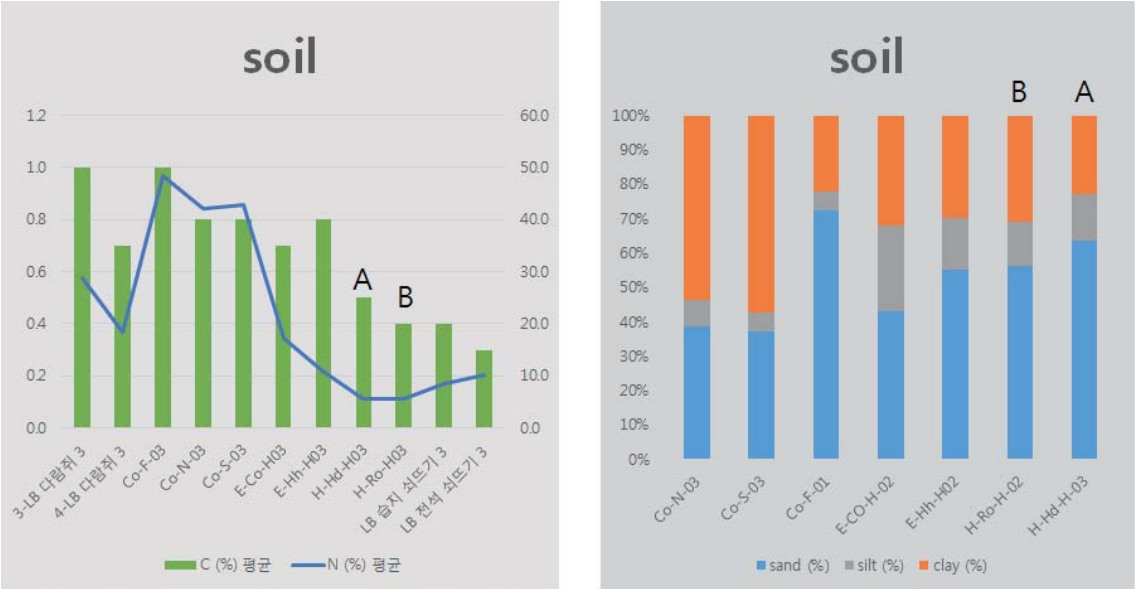


Fig. 40. Comparison of carbon, nitrogen contents, and soil texture of *H. arctica* habitats.

○ 북극다람쥐꼬리의 번식 방법은 무성아에 의한 영양번식과 포자에 의한 유성번식 두 가지임. 모체 주변에 어린 유식물이 자라고 있었음. 서식 장소가 제한되어 있으므로 그 수가 많지는 않으나 척박한 환경에서도 잘 적응하고 있음 (Fig. 41).

KOPRI 극지연구소

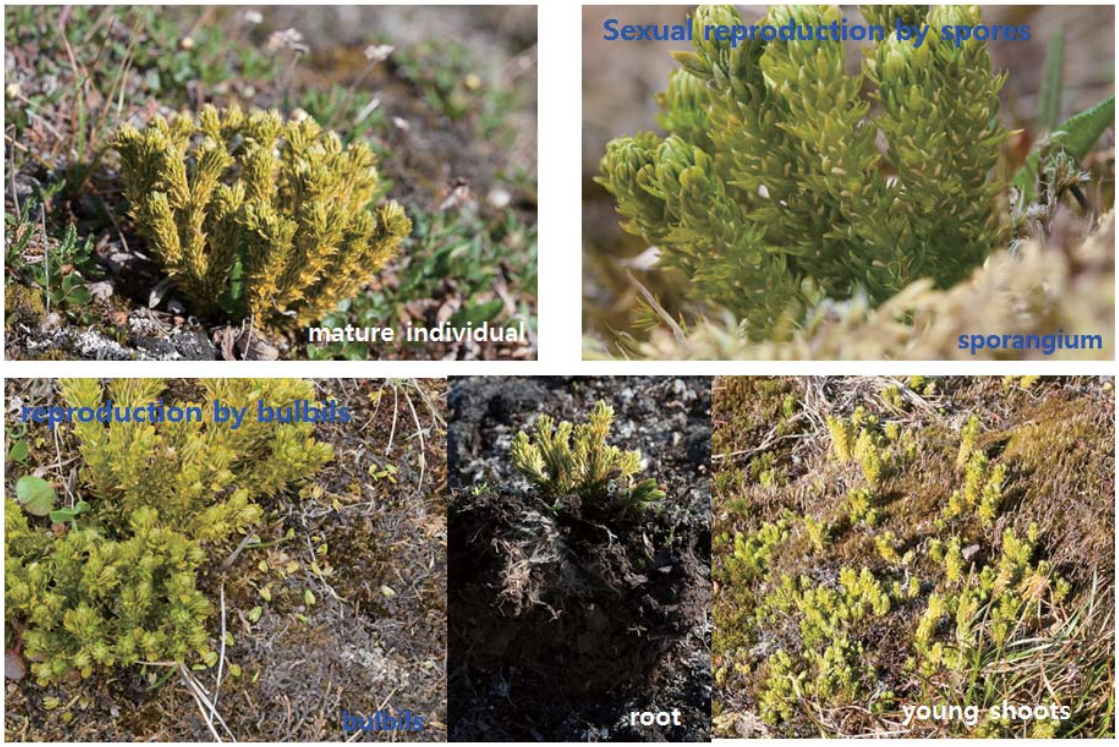


Fig. 41. Mature individuals and young shoots of *H. arctica.*

KOPRI
극지연구소

○ Fig. 42는 북극다람쥐꼬리의 무성아와 포자낭군의 모습임. 무성아의 구조는 종이 비행기 형태로 약한 압력에도 산포 용이함. 바람이 불지 않을 경우 모체 바로 아래에 떨어짐. 동물이 건드렸을 때는 10~30 cm 날아가고 바람이 세게 불면 더 멀리 나갈 수 있음.

Fig. 42. Bulbils, sporangium and spores of *H. arctica*.

○ 북극다람쥐꼬리의 6개체의 엽록체 DNA를 rbcL 분석방법으로 분석한 결과, 북극다람쥐꼬리 5, 6번 샘플은 캐나다 지역의 *Huperzia* 절과 더 가까운 유연관계를 나타냄. 북극다람쥐꼬리 1, 2, 3, 4번 샘플은 같이 묶여서 *H.selago*의 변종으로 보지 않고 종으로 본 것과 같은 결과를 보임. 캐나다, 핀란드, 중국의 유연종들과 오스트리아, 스웨덴 등의 종들의 위치 등을 다시 연구할 필요가 있음 (Fig. 43).

○ 북극다람쥐꼬리의 6개체의 엽록체 DNA를 rpL16 분석방법으로 분석한 결과, *Huperzia arctica* 5, 6번 샘플은 약간 다르나 *H. serago*(좀다람쥐꼬리), *H. myoshiana*(다람쥐꼬리)와 유사하게 묶임. 중국의 *H. emeiensis*, *H. nanchuanensis*는 함께 Sect *Huperzia* 로 보는 결과를 뒷받침하였음. 두 가지 결과와 *Huperzia arctica*의 전 세계 종들에 대한 재고찰 연구가 필요함 (Fig. 44).

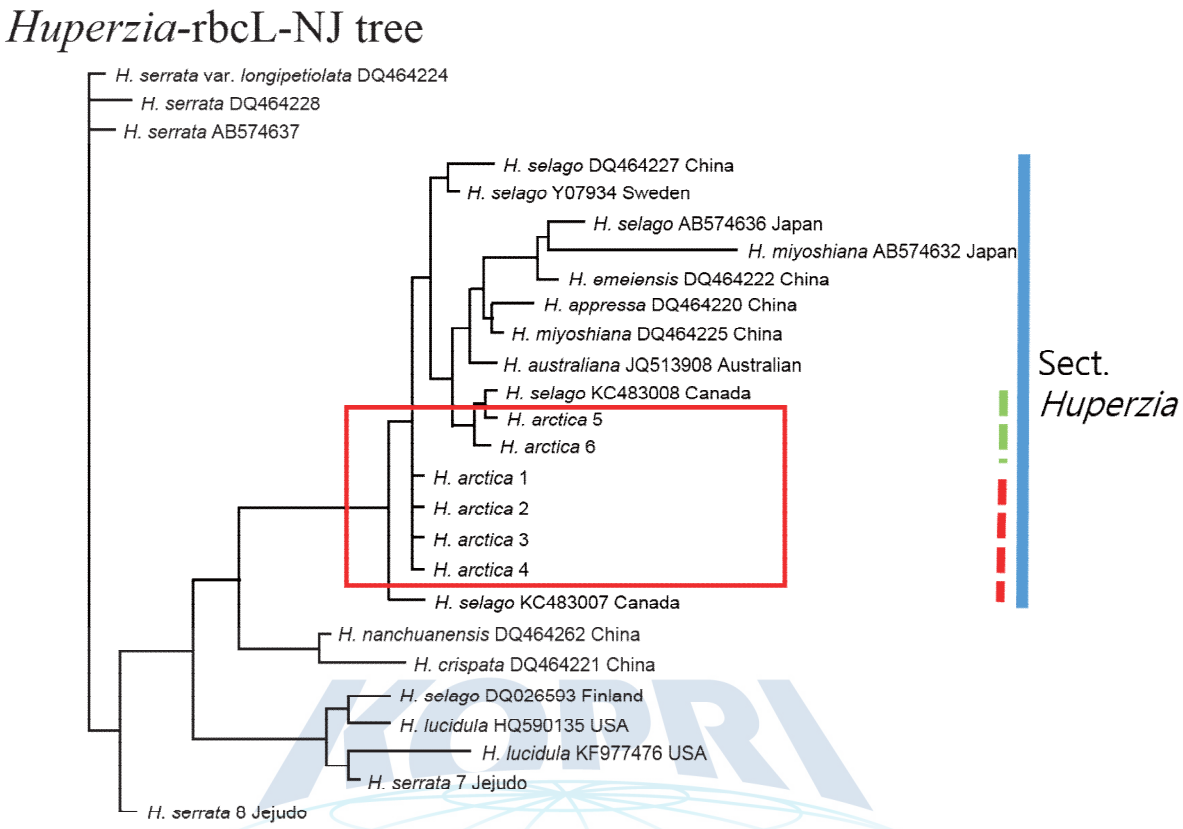


Fig. 43. Chloroplast DNA analysis of *H. arctica*, rbcL-NJ tree.

KOPRI 극지연구소

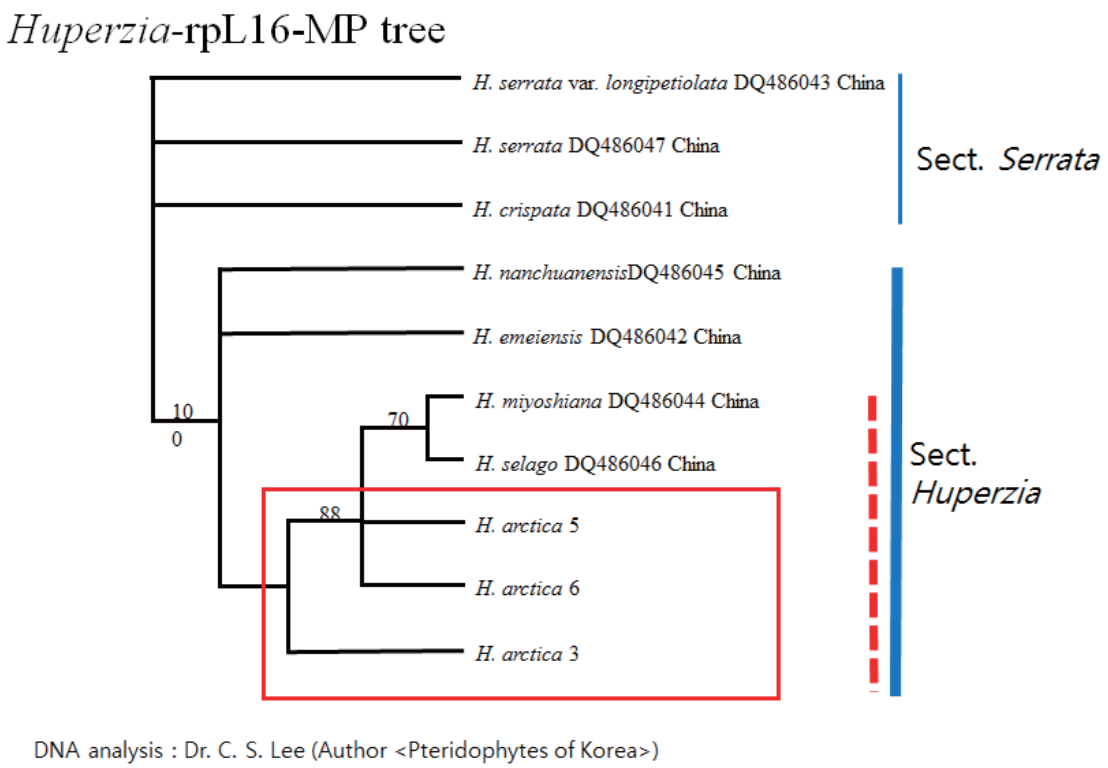


Fig. 44. Chloroplast DNA analysis of *H. arctica* , rpL16-MP tree.

극지연구소

○ 북극다람쥐꼬리 무성아를 8℃, 13℃로 세팅된 챔버에서 키운 결과, 저온인 8℃에서 북극다람쥐꼬리의 뿌리가 더 길고 튼튼하게 자랐음. 기후변화로 인해 북극 생태계의 여름 기온이 현재보다 올라간다면 북극다람쥐꼬리의 생육이 제한될 수 있을 것으로 유추할 수 있음 (Fig. 45).

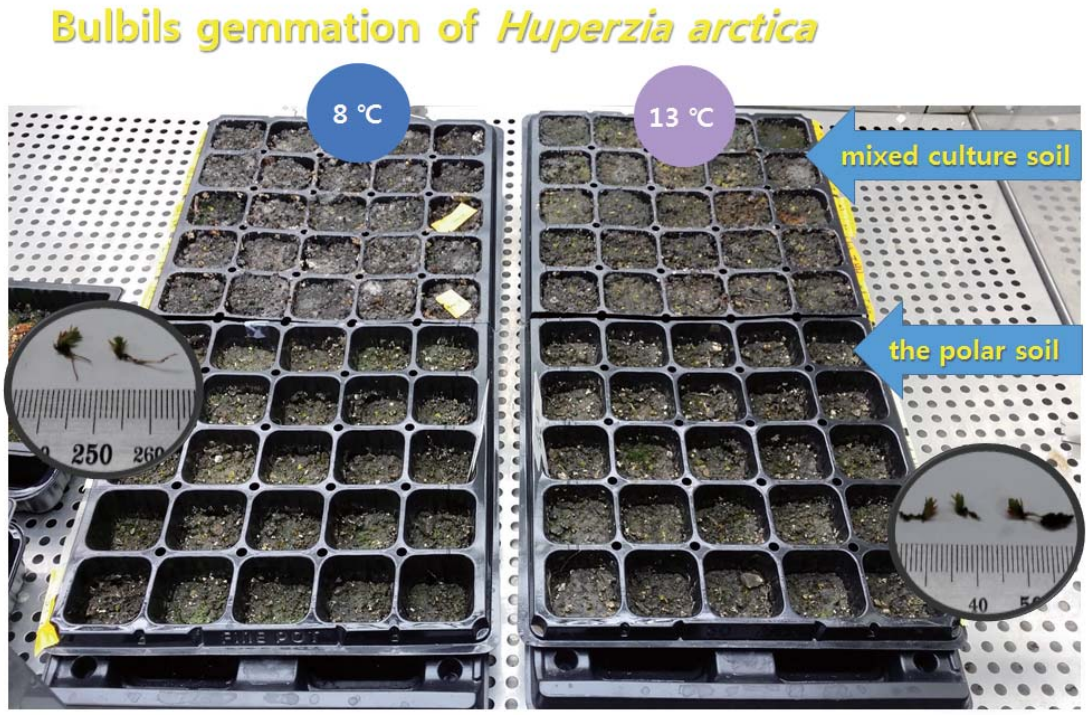


Fig. 45. Bulbils germination of *H. arctica* at different temperature condition (8℃, 13℃).

KOPRI
극지연구소

3. 북극 식물의 계통/다양성 연구

가. 북극이끼장구채의 번식특성

(1) 연구 배경

○ 1992년 생물다양성협약의 발효 이후 생물다양성 감소는 국제적, 국가적 이슈이지만 우리나라의 생물다양성 보전은 아직까지 대체로 목록화사업과 종 수준에서의 현황 파악에 그치고 있음. 예를 들어, 우리나라 식물의 성체제는 거의 미지의 세계임. 몇 편의 연구를 제외하면(e.g. Kang and Jang 2006) 성체제의 지리적 분포, 생육형, 수분매개자 등 생태특성에 대한 정보와 분석이 미흡함. 이에 반해 Renner(2014)는 최근에 자웅이주 15,600종의 DB에 근거하여, 자웅이주는 (1) 풍매의 경향이 있고, (2) 수명이 긴 식물이 많고(목본), (3) 자웅동주 또는 자성자웅이주(gynodioecy)와 동속에 존재함을 확인함.

○ Rønning(1996)에 근거하여 스발바르 현화식물 95종에 대한 분류적, 생태적 정보를 1차적으로 추출하였고 개화 상태에 있거나 관찰 가능한 종들은 2013년 7월 9 - 15일 동안 현지에서 다시 확인함.

○ 스발바르 현화식물은 총 95종(27과 60속)이었으나 과의 분포는 매우 한정적임. 즉, 석죽과 10종, 범위귀과 10종, 진달래과 9종, 사초와 벼과 각기 7종으로서 주요 5과가 45.3%를 차지함. 이들은 초본 77종, 포복성 관목이 18종으로서 스발바르 현화식물종 81.1%가 다년생 초본임. 또한 개화기가 짧고 대체로 충매화 경향이 있었으나 매개자 활동은 매우 빈약한 것으로 관찰됨. 따라서 스발바르 식물은 분류적, 생태적 다양성은 매우 낮은 것으로 사료됨.

(2) 연구 내용 및 방법

○ 니알슨 지역에서 2개 개체군(A와 B)을 선정(각기 N = 136과 121)하고 각기 50 x 30 m 방형구를 설치함. 이 때 방형구 내 성체제 별 GPS 정보도 확보함.

○ 북극이끼장구채의 성비 (암개체 수/ 총 개체 수)를 구함.

(3) 연구 결과

○ A와 B의 성비는 각기 0.6587과 0.4132로써 A는 B에 비해 양성화 개체에 비한 자성개체의 수가 1.6배나 더 많았음.

○ 북극이끼장구채의 크기와 성적 자원분배를 분석하였을 때 A와 B의 cushion 평균 장경은 각기 13.39 + 7.68 mg과 8.25 + 4.87 mg 이었음. 다른 번식특성과 달리 암

술건량은 성체제와 무관하게 A가 B에 비해 매우 높았고 그 결과 자성자원분배비(암술건량/ 꽃의 총건량) 도 A가 B에 비해 더 컸음. 이와 같은 개체군 간의 차이는 양성화의 균류 감염을 반영하는 것으로 사료되므로 북극이끼장구체의 균류 감염도 조사할 필요가 있음.

○ 동토해동과 탄소증가에 따른 북극 식생의 변화는 생물다양성과 생산력의 관점에서 매우 중요한 자료이므로 이 지역 식생에 대한 GIS/RS와 함께 현장에서의 지속적 모니터링이 필수적일 것으로 보임.

○ 적도에서 극지에 이르는 종 다양도의 위도기울기는 널리 알려진 현상임. 그러나 본 조사에서 밝혀진 바와 같이 현화식물의 단 5개 과가 우점한다는 결과는 이들 과가 극한기온에 선 적응 되었을 가능성을 시사함. 이 점을 확인하기 위해서는 다른 극지의 식물상과 비교분석할 필요가 있음.

나. 스발바르 식물상 DB 재구축을 위한 식물지 분석

(1) 연구 배경

○ 생물다양성, 생태계서비스, 지속가능 발전을 위한 소통과 지속가능 이용을 위한 과학-정책의 연계를 강화하기 위한 UN의 정부간 플랫폼인 IPBES(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)는 최근 전 세계 작물생산을 통해 생태계서비스에 기여하는 수분매개자를 평가하였음. 이 보고서는 경관 변화, 기후변화, 살충제 등의 요인들로 인한 수분매개자의 감소가 작물생산을 비롯하여 인간사회에 엄청난 부정적 영향을 미칠 것으로 예측함. 예를 들어, 유럽에서 9%의 벌류와 나비류가 위기상태이며 이들 개체군의 각기 37%와 31%가 감소하고 있음(IPBES 2016). 그러나 대부분의 연구는 미국과 유럽에서 수행되었고 우리나라는 종과 개체군의 변동에 대한 평가가 크게 부족한 상태임.

○ 극지식물과 곤충 간의 공생관계는 위기에 처한 극지식물의 보전과 나아가 우리나라 고산지역 식물과 관련 곤충의 보전에도 중요함. 벌을 비롯한 매개곤충의 감소는 세계적인 현상이므로 극지에서의 공생관계에 대한 이해는 차후 우리나라 매개곤충의 보전에도 기여할 것임. 최근의 IT 발달을 통해 big data 분석이 가능케 되었음. 이런 분석은 작은 스케일의 생태계에서 벗어나 지구적 양상에 이르는 거대 스케일의 규모와 기작에 대한 접근할 수 있는 결과를 산출하고 있음.

(2) 연구 내용 및 방법

○ 니알슨 현장에서 관찰하지 못한 종의 번식생태 정보를 보완하기 위해 웹사이트에서 종에 대한 번식특성과 위기등급에 대한 정보를 추출하였음. 본 연구에서는 스발바르제도에 자생하는 184종의 식물 중 167종의 분포, 형태, 생태, 위기등급에 대한 보다 세밀한 정보를 제공하는 웹사이트(http://svalbardflora.no/) 정보를 기본으로 스발바르 식물상의 DB를 재구축하였음. 그 외 스발바르 식물의 종자와 무성아의 발아율에 대한 최근의 자료(Alsos et al. 2013)를 추가하였음.

(3) 연구 결과

○ Lee *et al.*(2012)과 "Vascular Plants in Svalbard" (http://svalbardflora.no/)에 기재된 현화식물만을 대상으로 과별의 종 수를 비교하였음(Fig. 46). 전자는 24과 91종, 후자는 25과 158종을 다루고 있으나 과의 정체에는 차이가 있었음. 보다 많은 종을 다룬 후자는 전자에 출현하지 않았던 지치과(Boraginaceae), 초롱꽃과(Campanulaceae), 용담과(Gentianaceae), 쇠뜨기말과(Hippuridaceae), 통발과(Lentibulariaceae), 토필드과(Tofieldaceae)를 포함하고 있고 이들 각 과는 각기 1종씩만이 기재되어 있음. Lee et al.(2012)에는 위 6과가 포함되지 않은 대신, 후자에서 다루지 않은 암매과(Diapensiaceae, 1종), 콩과(Leguminosae, 5종), 바늘꽃과(Onagraceae, 1종), 갯질경이과(Plumbaginaceae, 1종), 앵초과(Primulaceae, 1종), 노루발과(Pyrolaceae, 1종)를 포함하고 있음. 자료를 확인한 결과 이들 6과의 종들은 캐나다 북부, 알래스카, 아이스란드, 러시아 등 스발바르 외의 북극권 지역에 서식하는 종들이었음. 실제 두 문헌에 출현한 종을 비교하였을 때 18과의 58종만이 공통으로 나타남. 따라서 25과 158종을 다룬 "Vascular Plants in Svalbard"가 스발바르의 현화식물상을 보다 포괄적으로 기재한 것으로 사료됨.

○ 스발바르에서 종 수가 많은 과는 벼과(Poaceae, 24종) > 사초과(Cyperaceae, 21종) > 십자화과(Brassicaceae, 20종) > 석죽과(Caryophyllaceae, 19종) > 범의귀과(Saxifragaceae, 13종) > 미나리아재비과(Ranunculaceae)와 장미과(Rosaceae, 각기 11종)의 순으로써 이들 7과가 스발바르 현화식물의 75.3%를 차지하였음(Fig. 46). 반면 자작나무과(Betulaceae) 등 12과는 각기 1 - 2종에 불과하였음. 지구상 현화식물은 총 405과, 14,554속, 304,419종이며 한국의 현화식물은 145과, 904속, 2,794종임(강혜순 미발표 자료). 이에 비추어볼 때 스발바르에는 지구상 현화식물 과의 2.8%, 종의 0.05%, 한국 현화식물 과의 17.2%, 종의 5.7%만이 서식하고 있음. 이는 종자를 비롯하여 주아와 식물조각 등 많은 산포체(propagules)가 그린란드, 러시아, 스칸디나비아 등 환북극 주변으로부터 스발바르에 도달하지만 가혹한 기후조건 하에서 실제 정착하는 확률은 매우 낮음을 시사함(Alsos *et al.* 2007).

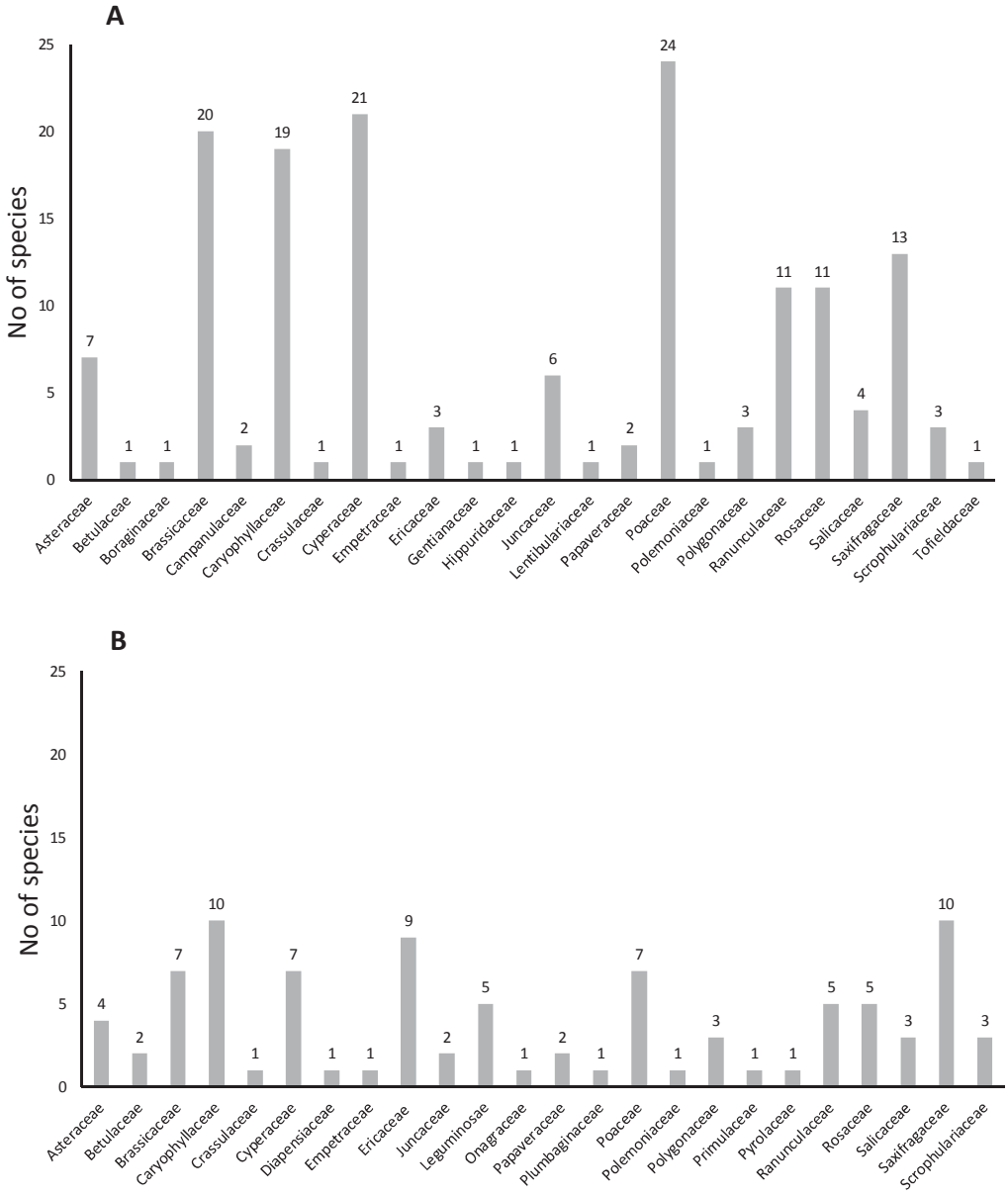


Fig. 46. Number of species for each family in two monographs treating Svalbard flora [A. Data from "Flora of the Svalbard" (http://svalbardflora.no/) and B. Data from Lee *et al.* (2012)].

○ 스발바르 현화식물은 거의 다년생 초본이었고(90.9%) 이어 관목이 5.8%, 일년생 초본(이년생 포함)은 3.2%이었음(Table 14). 일년생은 단 3종(*Cakile maritima* ssp. *islandica*, *Euphrasia wettsteinii*, *Koenigia islandica*), 이년생은 단 1종(*Cochlearia groenlandica*)이었음(*Comastoma tenellum*은 일년생 또는 이년생). 관목 역시 매우 적어 진달래과의 3종(*Cassiope tetragona*, *Harrimanella hypnoides*, *Vaccinium uliginosum* ssp. *microphyllum*), 장미과의 1종(*Dryas octopetala*). 버드나무과의 3종(*Salix herbacea*, *S. polaris*, *S. reticulata*) 등 총 9종이 있었음.

○ 총 종의 수가 10종을 넘는 스발바르의 주요 7과를 확인하였을 때도 장미과의 1종을 제외한 나머지 과(벼과, 사초과, 십자화과, 석죽과, 범의귀과, 미나리아재비과)도 모두 초본성이었음(Table 15). 전형적인 한국의 경우 다년생 초본종과 목본종(관목과 교목)이 각기 55.7%와 22.1%임(Kang and Jang 2006). 이에 반해, 과의 정체에 관계없이 스발바르 식물이 거의 다년생 초본이라는 사실은 극한기후 하에서 목본에 비한 다년생 초본의 높은 생존력을 의미하는 것으로 해석됨.

○ 종의 장기적 생존을 위해서는 유전다양성이 필요하고 식물은 다양한 성체제와 번식체제를 통해 유전다양성을 창출하고 유지함(Thompson and Barret 1981, Kang and Bawa 2003). 스발바르는 약 1만 년 전부터 빙하의 후퇴와 함께 서쪽(그린란드), 동쪽(러시아), 남쪽(스칸디나비아)에서 많은 식물이 이입하여 이루어진, 비교적 최근에 일어난 식물 진화의 현장임(Brochmann *et al.* 2004).

○ Brochmann *et al.*(2004)에 의하면 스발바르 식물의 유전다양성은 비교적 높음. 이들 저자는 많은 식물(78.3%)이 배수체(평균 배수성이 5.4인 6배체)이며 allopolyploidy가 이형체율을 높였다고 주장하였음. 성체제 또한 유전다양성에 기여함. 자웅이주 종은 식물종의 약 4%(Yampolsky and Yampolsky 1922) 또는 6%(Renner and Ricklefs 1995)를 차지하는 상당히 드문 성체제임. 자웅이주 종은 열대와 섬에서 빈도가 높은 경향이 있으며(Bawa 1980, Baker and Cox 1984) 온대는 2.0%(영국), 2.8%(미국 캘리포니아), 한국(6.6%) 등으로 2 - 6%에 달함(강혜순 미발표자료).

○ 스발바르 식물의 성체제를 확인했을 때 *Rhodiola rosea*(돌나물과), *Silene acaulis*(석죽과), *Rubus chamaemorus*(장미과), *Carex parallela*(사초과), 버드나무류 4종 등 총 8종, 즉 4.5%가 자웅이주였음. 전체 종 수가 작긴 하지만, 절대적 타가수분 종인 자웅이주 식물의 비율은 일반적 온대 수준과 크게 다르지 않음.

○ 번식체제인 유성번식에 대한 정보가 있는 총 155종 가운데 유성적으로 종자를 형성하는 종은 78종(50.3%), 주아 등으로 무성번식을 하는 종은 17종(11.0%), 유성과 무성을 겸비하는 종이 약 40%(60종, 38.7%)이었음(Table 14). 따라서 유성적으로

종자를 형성하거나 또는 유 · 무성을 겸비하는 종이 총 138종(89.0%)으로써 무성적으로만 번식하는 종의 8배에 달함. 유성과 무성번식의 겸비는 매개자 활동이 극히 빈약하며 기후의 변동성이 높은 극지환경에서 번식확률을 높일 수 있는 bet-hedging 전략으로 사료됨.

○ 수분매개의 양상을 풍매, 충매, 수매, 자가수분으로 구분하였을 때, 주아 또는 무수정생식(agamospermy)을 하는 5종을 제외하고, 풍매 (39종) > 충매 (16종) > 충매 또는 자가수분 (12종) > 자가수분 (6종) > 충매 · 풍매와 충매 · 수매가 각 1종이었음(Table 14). 다시 말해, 풍매종(풍매만 또는 풍매도 가능한)이 40종(49.4%), 충매종(충매만 또는 충매도 가능한)이 31종(38.3%), 자가수분종(자가수분만 또는 자가수분도 가능한)이 29종(35.8%)으로 나타남.

○ 주요 7과에 속하는 종에서도 유성번식과 수분의 양상을 확인한 결과(Table 15), 유성번식의 양상은 과에 따라 상당한 차이를 보였음. 예를 들어, 십자화과 종들은 거의 유성적으로 종자를 생산하였으나 벼과, 미나리아재비과, 장미과에서는 – 유성번식만 하거나 유 · 무성 번식을 겸비하는 종들이 다소 많았으나 – 3가지 번식양상이 모두 존재하였음. 벼과와 사초과는 전적으로 – 주아 생산 종은 제외 – 풍매로 나타났고 십자화과와 석죽과는 충매이거나 자가수분을 보였음. 종자와 주아 등 산포체의 발아율 또한 과 별로 상당한 차이를 보이고 있으며 이를 통해 Alsos *et al.*(2013)은 현지외 종자보존의 효율성을 평가하였음.

○ 지난 100년 간 전 지구 평균기온은 0.74℃ 상승하였으나 한국은 1.87℃ 상승하였음(Kang 2013). 기후변화 속도가 세계 평균에 비해 2.5배가 높은 한국에서도 다양한 산포체의 발아율에 근거하여 종자관리의 우선순위 결정에 도움을 줄 수 있을 것임.

(4) 연구 결론

○ 결론적으로, 1) 스발바르에서 절반 정도의 식물은 풍매를 하지만 곤충이 수분매개자로 작용하는 종이 약 40%에 이름; 2) 유성번식과 수분매개의 양상은 과에 따라 상당히 다름; 3) 배수성뿐만 아니라 성체제, 충매와 풍매를 통한 유성번식 등 번식적 특성이 매우 다양함. 이러한 번식적 다양성에 대한 이해는 기후변화와 인간활동의 증가로 인해 절멸의 확률이 높아지고 있는 스발바르 식물의 장기적 보전전략의 설정과 실행에 필수적임.

○ 스발바르의 총 167종 중 48종(28.7%, 현화식물 158종만 고려할 때 30.4%)이 절멸위기에 놓인 적색종으로 평가되었음(Table 16). 이들 48종은 다시 IUCN의 기준에 따라 위급종(Critically endangered species, CR), 위기종(Endangered species, EN),

취약종(Vulnerable species, VU), 근위협종(Near Threatened species, (NT)으로 구분되었음(Table 16). 스발바르 식물에 대한 유전적, 생태적 이해는 아직 크게 부족함. 그러나 종의 1/3이 위기상태라는 사실은 스발바르가 열대와 지중해성 기후지역을 벗어난 극지의 생물다양성 중점지역으로 평가되어질 가능성을 지적하고 있음.

KOPRI
극지연구소

Table 14. Ecological traits of 158 species of flowering plants in Svalbard (data from http://svalbardflora.no/)

Traits	No. species		Traits	No. species		Traits	No. species	
Growth habit			Reproduction			Pollination mode		
Annual herb	3	(1.9%)	Sexual	78	(50.3%)	Wind	39	(24.7%)
Biennial herb	1	(0.6%)	Assexual	17	(11.0%)	Insect	17	(10.8%)
Annual or biennial herb	1	(0.6%)	Sexual or asexual	60	(38.7%)	Selfing	6	(3.8%)
Perennial herb	140	(90.9%)	Unknown	3		Insect or wind	1	(0.6%)
Shrub	9	(5.6%)				Insect or selfing	12	(7.6%)
Unknown	4					Insect or water	1	(3.8%)
						Bulbil or agamospermy	5	(3.2%)
						Unknown	77	
Total	158			158			158	

Table 15. Ecological traits of flowering species of seven major famlies in Svalbard (data from http://svalbardflora.no/)

Traits	Brass-icaceae (20)	Caryo-phyllaceae (18)	Cyper-aceae (21)	Poaceae (24)	Ranun-culaceae (11)	Rosaceae (11)	Saxif-ragaceae (11)
Growth habit							
Annual or biennial herb	2	–	–	–	–	–	–
Perennial herb	17	18	21	24	11	10	14
Shrub	–	–	–	–	–	1	–
Unknown	1	–	–	–	–	–	–
Reproduction							
Sexual	18	10	10	9	5	3	5
Asexual	–	2	1	5	2	1	3
Sexual or asexual	1	6	10	10	4	7	6
Unknown	1	–	–	–	–	–	–
Pollen vectors							
Wind	–	–	21	13	–	–	–
Insect	11	5	–	–	2	–	2
Selfing	12	1	–	–	–	–	1
Bulbils	–	–	–	2	–	1	1
Unknown	4	13	–	9	8	10	10
Germination* (%)	71.2	33.8	6.9	35.9	34.0	38.8	61.1
	6.6 - 86.9	4 - 97.3	0 - 67.1	14.4 - 100	0 - 69	26.2 - 93.6	4.1 - 94.5

Table 16. Redlisted species among Svalbard flora (data from http://svalbardflora.no/)

IUCN category	No. species	%	Total no. species
Redlisted species	48	30.3%	158
Critically endangered (CR)	9	18.8%	
Endangered (EN)	11	22.9%	
Vulnerable (VU)	14	29.2%	
Near threatened (NT)	14	29.2%	

Percentages for CR, EN, VU, and NT are based on the total number of redlisted species.

다. 스발바르 식물상 DB 재구축 및 매개자 역할 연구

(1) 연구 내용 및 방법

○ 2015년 7월 8일 - 19일 동안 스발바르 니알슨의 다산기지 인근의 현장에서 개화중인 18종 식물을 동정, 관찰, 채집하였음. 스발바르 현화식물의 번식체제를 가늠하기 위하여 종별로 꽃을 채집하였음. 이때 무성번식의 양상[주아(bulbil)와 vivipary 등]이 있다면 이를 기록하였음. 다산기지 실험실의 해부현미경 하에서 채집된 꽃 내 화밀의 유무를 포함하여 꽃밥과 암술을 포함한 내부구조를 관찰하고 성체제(hermaphrodite vs. monoecy vs. dioecy)와 dichogamy 유형(protogyny vs. protandry)을 구분하였음.

○ 관찰기간 동안 꽃에서 꽃으로 비행하는 곤충은 거의 볼 수 없었음. 그러나 꽃의 내부에서 화밀을 섭식하는 곤충들을 잠재 매개자로 간주하여, 가능한 경우 채집하였음. 채집된 곤충들은 후에 실험실에서 과 수준까지 동정하였음.

(2) 연구 결과

○ *Papaver dahlianum*, *Draba alpina*, *Oxyira digyna*를 제외한 모든 종에서 꿀샘과 다량의 화밀을 관찰하였음. 또한 이들 종의 꽃은 대체로 작은 크기에도 불구하고 색채가 현저하고 향기를 가지고 있었음. 예를 들어, *Ranunculus pygmaeus*와 *Koenigia islandica*는 꽃의 직경이 수 mm에 불과하였으나 꿀샘이 있고 암수술의

크기 또는 색채가 현저하였음 (Fig. 47). 양성화의 경우 수술이 암술에 비해 시간적으로 빨리 성숙하는 protandry 현상이 현저하였음.

○ *Silene uralensis* ssp. *arctica*, *Cassiope tetragona*, *Papaver dahlianum*, *Oxyria digina*, *Saxifraga cespitosa*, *Pedicularis hirsuta* 등은 특히 현저한 protandry 현상을 보였음. Totland and Schulte-Herbrüggen(2003)에 의하면 *Cerastium alpinum*에서 암수술 성숙의 시간적 간격이 작을수록 자가수분이 많았음. 또한 많은 종에서 암술과 수술이 서로 밀접하게 접하는 모습이 관찰되었고 이는 결국 이들이 자가수분할 확률이 높음을 시사함.

Fig. 47. Even such tiny flowers of *Ranunculus pygmaeus* (A) and *Koenigia islandica* (B and C) possess sophisticated floral structures and reward systems such as nectar and fragrance.

극지연구소

○ 주아를 형성하여 영양생식을 하는 pseudoviviparous 종을 관찰하였음. 주아가 성숙했을 때 모식물에 부착한 상태로 잎을 내어 새로운 개체를 형성하였음 (Fig. 48). *Bistoria vivipara*는 줄기 상단에 희거나 분홍색의 작은 꽃들을 피우고 하단에 주아를 형성하였음. *Poa alpina*은 현장에서 꽃을 보지 못하였고 다수의 유묘가 모식물에 부착된 상태로 관찰되었음. *Saxifraga cernua*는 줄기 상단에 아름답고 꿀샘이 있는 양성화를 피우지만 개체당 주아의 수는 매우 많았음. 주아를 형성하는 이들 종들도 유전적 다양성이 높음. 따라서 거의 전적으로 주아로 번식하는 종들도 간헐적으로 유성번식을 통해 생산한 종자로 분산 · 정착하는 것으로 사료됨 (Gabrielsen and Brochmann 1998).

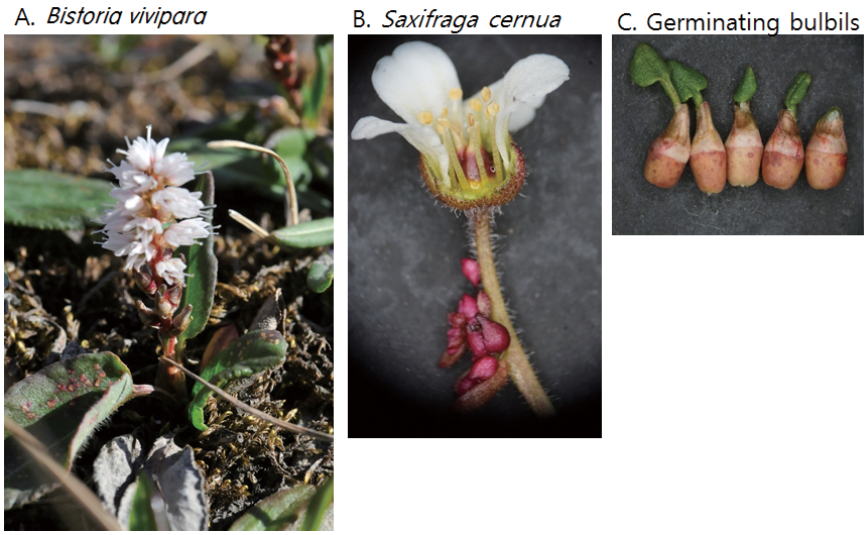


Fig. 48. Species reproduce via flowers as well as bulbils are relatively abundant in Svalbard.

○ 꽃의 과시와 화밀과 향기 등의 보상체제에 근거하여 일부 종들은 충매화, 다른 종들은 풍매화종으로 구분하고자 하였음. *Oxyria digina*, *Luzula confusa* 등 벼과와 사초과의 식물은 전형적인 풍매화종, *Silene uralensis*, *Dryas octopetala*, *Saxifraga aizoides* 등은 전형적인 충매화종으로 구분하였음 (Fig. 49). 그러나 충매화와 풍매화를 정확히 구분하기 위해서는 매개자 활동에 대한 현장에서의 장기간 모니터링이 수행되어야 함.

Fig. 49. Pollination syndrome (wind vs. insect) distinguished based on floral structures and reward systems such as nectar and fragrance.

○ 스발바르 식물의 꽃에는 다양한 파리류가 우점적인 활동을 보이며, 벌류는 상대적으로 적었음(Fig. 50, Table 17, 18). 조사된 꽃에서 출현한 곤충은 총 6종[(파리목(Diptera) 4종, 벌목(Hymenoptera) 2종]이었으며, 파리목의 곤충이 우점적인 활동을 보였음. 파리목에서는 Sciaridae(검정날개버섯파리과) 1종과 Culicidae(모기과) 1종, Calliphoridae(검정파리과) 1종, Empididae(춤파리과) 1종이 관찰되었고, 벌목은 Ichneutinae(잎벌살이고치벌아과) 1종, Orthocentrinae 1종이 각기 관찰되었음. Sciaridae 1종은 총 8종(노랑범의귀, 자주범의귀, 다발범의귀, 씨범꼬리, 북극이끼장구채, 눈범의귀아재비, 점나도나물, 북극담자리꽃나무)의 식물에서 관찰되었음.

○ 반면, Orthocentrinae 1종은 북극종꽃나무에서만 관찰되었음. Ichneutinae 1종은 Sciaridae 1종 다음으로 많은 꽃을 방문하였음. 이들은 콩버들, 노랑범의귀, 자주범의귀를 방문하였고, 화분 이송에 기여하였음. 가장 높은 species degree를 나타낸 식물종은 북극담자리꽃나무로 총 4종의 곤충이 방문했음. 자주범의귀는 가장 많은 상호관계를 가지는 Sciaridae 1종과 Ichneutinae 1종의 방문을 받았음 (Table 18). Fig. 51은 현장에서 관찰된 꽃과 매개자와의 흥미로운 네트워크 관계를 보여줌. 이 네트워크는 1년의, 또한 극히 짧은 시간의 조사활동에 근거하고 있다는 제한점을 가지고 있음. 그럼에도 불구하고 곤충에서는 Sciaridae와 Ichneutinae가, 식물에서는 *Saxifraga oppositifolia*와 *Dryas octopetala*가 다른 종들에 비해 종간 네트워크에서 폭넓은 연결망을 가지고 있음을 보여줌.

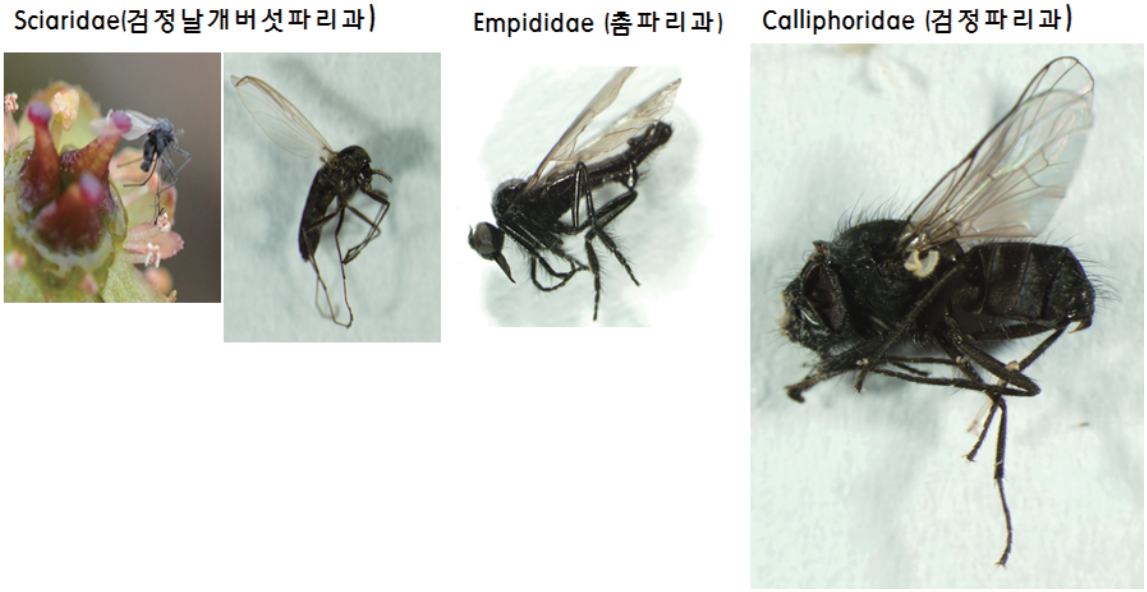


Fig. 50. Potential pollinators in Svalbard plants. Small flies, especially those of Sciaridae, were dominant, and observed in flowers with copious nectar.

Table 17. Plant species observed for insect activities within flowers in Svalbard during July 8 - 19 in 2015

Family	Species name
Salicaceae	*Salix polaris* (북극콩버들)
Polygonaceae	*Bistorta vivipara* (씨범꼬리)
Caryophyllaceae	*Cerastium arcticum* (북극점나도나물)
	Silene acaulis (북극이끼장구채)
Saxifragaceae	*Micranthes nivalis* (눈범의귀아재비)
	Saxifraga aizoides (노랑범의귀)
	Saxifraga cespitosa (다발범의귀)
	Saxifraga oppositifolia (자주범의귀)
Rosaceae	*Dryas octopetala* (북극담자리꽃나무)
Ericaceae	*Cassiope tetragona* (북극종꽃나무)

KOPRI 극지연구소

Table 18. Insect species observed and collected from flowers in Svalbard during July 8 - 19 in 2015

Order	Potential pollinator
Diptera	Nematocera – Sciaridae
	Nematocera – Culicidae
	Brachycera – Calliphoridae
	Brachycera – Empididae
Hymenoptera	Apocrita - Braconidae – Ichneutinae
	Apocrita - Ichneumonidae – Orthocentrinae

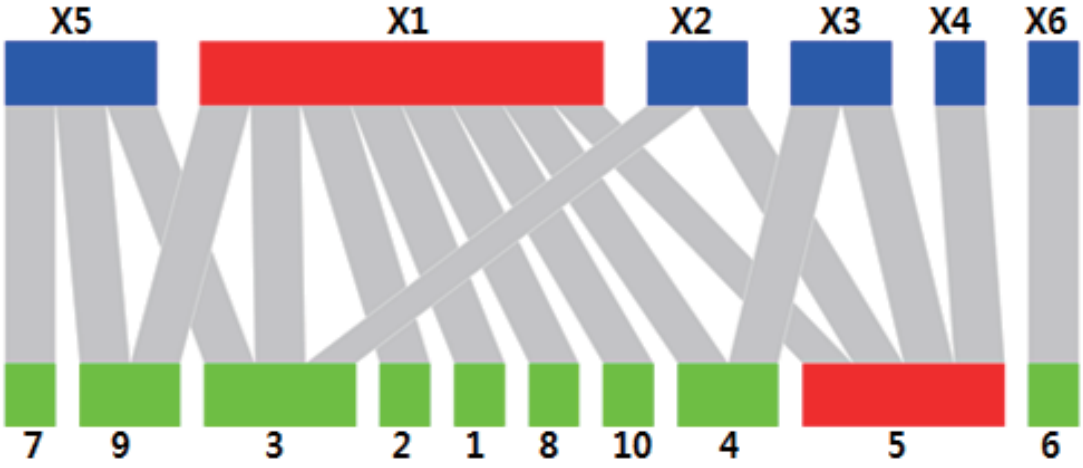


Fig. 51. Flower-pollinator network structure in Svalbard. Upper boxes with blue indicate pollinators, and lower boxes with green indicate flowers. Species with the highest degree are colored with red (X1 = Sciaridae, X2 = Culicidae, X3 = Calliphoridae, X4 = Empididae, X5 = Ichneutinae, X6 = Orthocentrinae; 1 = *Bistorta vivipara,* 2 = *Saxifraga cespitosa,* 3 = *Saxifraga oppositifolia,* 4 = *Cerastium arcticum,* 5 = *Dryas octopetala,* 6 = *Cassiope tetragona,* 7 = *Salix polaris,* 8 = *Silene acaulis,* 9 = *Saxifraga izoides,* 10 =*Micranthes nivalis*).

○ 스발바르 식물종에서 빈번하게 관찰된 파리류는 Sciaridae나 Culicidae와 같은 원시 분류군으로 나타남. Sciaridae는 원시분류군인 Nematocera(모기아목)에 속하는 무리이며, 이들의 생활사 및 습성에 대한 정보는 잘 알려지지 않았으며, 신종이 꾸준히 나오고 있어서 이에 대한 동정 및 기재가 필요한 분류군임(Marshall 2012). 스발바르에는 고등 분류군인 Brachycera(단각아목)와 하등 분류군인 Nematocera (모기아목)에 속하는 종들이 약 77%를 차지함(Coulson 2007). 따라서 주로 원시적인 분류군이 우점적으로 분포한다고 볼 수 있으며, 이들 중 Sciaridae 무리는 6속 13종이 분포하고 있음 (Coulson 2007).

○ 스발바르에는 일반적으로 벌목 곤충이 차지하는 비율이 매우 낮으며(39종), 이 중 Apocrita(벌아목)의 Braconidae(고치벌과)와 Ichneumonidae(맵시벌과)에 속하는 종이 각기 5종, 21종으로 높은 비율을 차지하고 있음 (Coulson 2007). 조사지역에서 출현한 Ichneutinae 1종은 Braconidae에 속하는 무리로 전 세계적으로 9속이 분포하며, 기생성임(Goulet and Huber 1993). 본 종은 꽃을 방문하는 과정 중 가슴(thorax)에 다량의 화분을 부착하였음. Orthocentrinae 1종은 Ichneumonidae에 속하며, Mycetophilidae(버섯파리과)나 조사지역에서 빈번하게 출현한 Sciaridae(검정날개버섯파리과)를 숙주로 삼아 기생함.

○ 최근에 IPBES(2016)는 전 세계적인 수분매개자의 종 구성과 밀도의 변동이 생물다양성과 생태계서비스의 측면에서 매우 위급하다고 평가하였음. 극지에서의 생물다양성과 더불어 주요 식물종과 매개곤충 간의 상호작용에 대한 이해는 더더욱 미비하므로 이에 대한 장기 조사가 필요할 것으로 사료됨.

4. 북극 생태계의 대사체 및 먹이 관계 연구

가. 다산기지 주변 연못생태계의 먹이 관계 분석

(1) 연구 배경

○ 눈과 얼음이 녹음으로써 짧은 기간 유지되는 극지역 (스발바르)의 담수 연못 (temporary pond)은 어류가 존재하지 않으며 휴면란에서 부화하는 물벼룩, 투구새우 등이 주요 서식 동물임. 깔따구 유충 등의 수서 곤충은 유충 생활시 수서 생태계 먹이 그물에 영향을 미치게 되며 우화 후 수분매개자로 육상생태계에도 영향을 미침. 또한 스발바르 순록 (*Rangifer tarandus platyrhynchus*), 흰뺨기러기 (barnacle goose, *Branta leucopsis*) 등의 육상 동물 및 조류의 섭식활동 및 배설물의 연못 유입은 수서생태계의 양분 순환에도 영향을 미치게 됨. 육상생태계 연구와 더불어 수서생태계 먹이그물에 대한 연구는 동토층 생태계 연구에 중요한 자료를 제공할 수 있을 것임.

(2) 연구 내용 및 방법

○ 스발바르 니알슨에 위치한 연못을 대상으로 2014년과 2015년 7월 하계 연구기간 동안 생물상 조사를 실시하였으며 주요 종에 대한 안정동위원소 분석을 통해 연못 생태계의 먹이관계를 파악하고자 하였음 (Fig. 52). 또한 스발바르 순록과 흰뺨기러기와 같은 육상동물 및 조류의 배설물이 수서생태계 먹이원에 주는 영향을 확인하고자 이러한 동물들의 영향이 큰 곳 (pond #1, #2)과 그렇지 않은 곳 (pond #3)의 연못을 대상으로 연구를 수행하였음.

○ 동결 건조를 비롯한 채집 시료의 전처리는 다산기지에서 수행하였으며 안정동위원소 및 DNA 분석은 전처리된 시료를 한국으로 운반하여 수행하였음.

Fig. 52. A) locations of sampling sites in Ny-Ålesund, Svalbard. (map from Norwegian Polar Institute), B) a sampling site: temporary pond (Pond #1) C) benthic conditions of the Pond #1.

(3) 연구 결과

○ 2014년, 2015년 7월 하계 현장조사를 통해 확인된 연못 생태계의 주요 출현종은 물벼룩, 깔따구 유충, 투구새우였으며 물벼룩과 투구새우가 우점하였음 (Fig. 53).

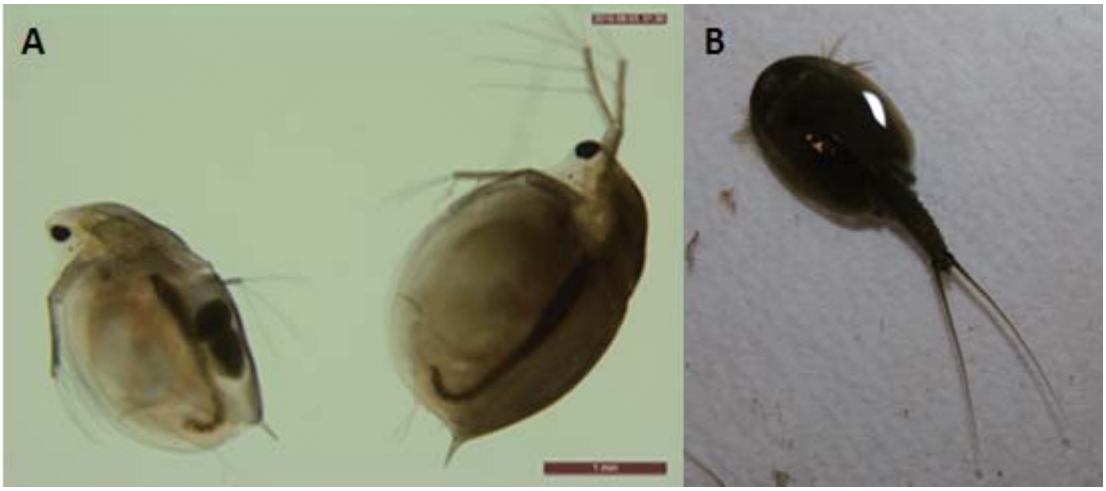


Fig. 53. A) *Daphnia pulicaria* and B) *Lepidurus arcticus* in the Pond #1 and #2.

○ 스발바르 지역에 서식하는 물벼룩은 *Daphnia pulex*, *D. tenebrosa*, *D. pulicaria* 등으로 알려져 있으며 (Weider and Hobæk 2003, Van Geest *et al.*, 2007,

Samchyshyna et al., 2008), 조사지 연못에서 채집한 물벼룩은 미토콘드리아 cytochrome c oxidase subunit I (COI) 영역의 DNA 분석을 통해 *D. pulicaria*로 동정되었음 (Table 19). 투구새우의 경우 형태 동정과 조사지에서 수행된 선행연구를 통해 *Lepidurus arcticus*로 판단됨 (Lakka, 2013).

Table 19. BLASTN results of *Daphnia* collected from the studied pond

Sample	Amplified region	BLAST result		
		Species	Similarity	Accession No.
물벼룩	COI	*Daphnia pulicaria*	99%	JN233925.1

○ 물벼룩과 투구새우를 중심으로 하는 두 연못 생태계의 먹이관계 파악을 위한 안정동위원소 분석 결과, 두 연못 모두 투구새우가 상위포식자로 물벼룩과 sediment 내 유기물을 먹이원으로 하는 것으로 판단됨. 여과포식자인 물벼룩의 경우 seston (부유성 입자)을 먹이원으로 하지만 먹이관계에서 영양단계를 나타내는 δ15N 값이 한 단계의 영양단계 차이인 3.4‰보다 다소 큰 차이를 나타내는 것으로 보아 외부에서 유입되는 다른 먹이원에 대한 영향도 있을 것으로 추정됨 (Fig. 54).

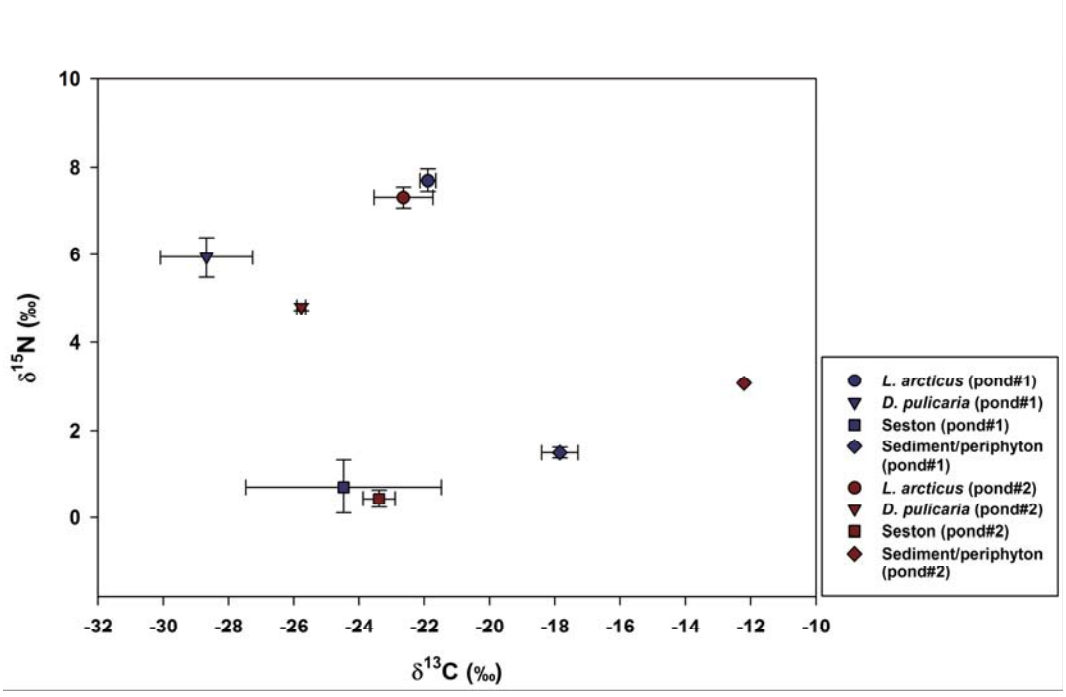
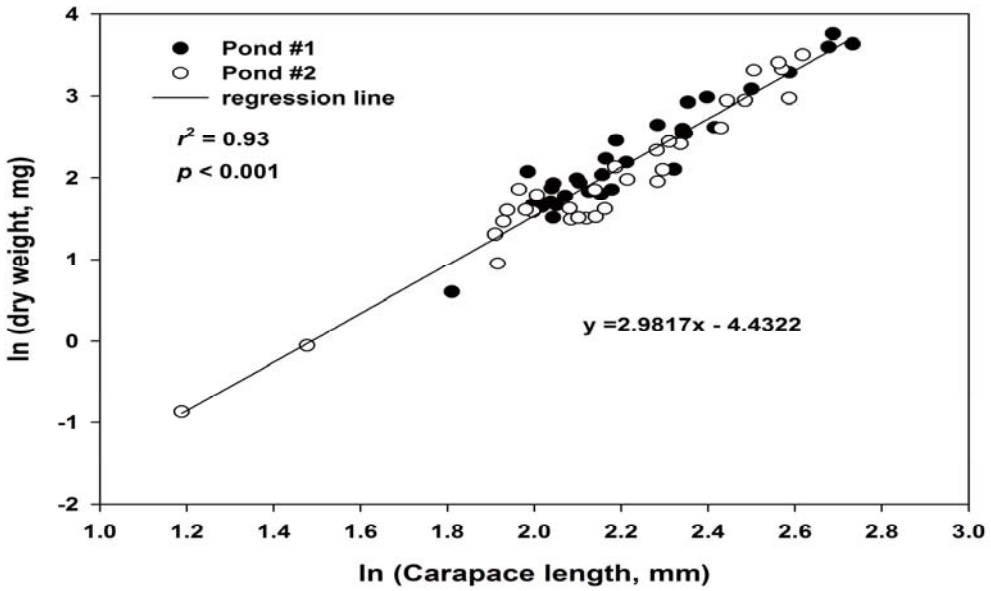


Fig. 54. δ^{13}C and δ^{15}N biplots of consumers and diet in studied ponds.

○ 안정동위원소 분석 결과 다른 수서 생태계에 비해 어류 등의 상위 포식자가 존재하지 않는 조사지 연못은 투구새우가 수서 생태계 내 최상위 포식자에 위치하며 두 연못에 출현하는 투구새우 개체군의 크기는 측정할 수 없었으나 갑각길이 - 무게 관계식을 통해 동시기의 투구새우의 생장은 두 연못 간에 큰 차이를 보이지 않는 것으로 파악됨 (Fig. 55).



극지연구소

Fig. 55. Relation between carapace length and dry weight of tadpole shrimp collected from studied ponds.

○ 수서생태계에 서식하는 생물은 내생기원의 먹이뿐만 아니라 외부로부터 유입되는 영양분 및 먹이원에 의해 영향을 받게 됨. 스발바르 순록 및 흰뺨기러기 등의 섭식활동 및 배설물은 연못 생태계에 영향을 주게 되며 먹이관계의 변화를 가져오게 됨. 연못 주변 및 연못 내에 이런 동물들의 배설물이 있는 연못들 (pond #1, pond #2)과 빙하퇴각지 주변에 위치하며 스발바르 순록의 접근 가능성은 있지만 육상동물 및 조류의 배설물이 없는 연못들 (pond #3)에 서식하는 물벼룩의 안정동위원소 분석 결과, 육상동물 및 조류의 배설물이 존재하는 연못의 물벼룩 δ 15N 값이 그렇지 않은 곳에 비해 높은 것으로 나타남 (Fig. 56). 이는 육상동물 및 조류의 활동에 의한 영양분의 유입이 북극 동토층 담수생태계에 직, 간접적으로 영향을 주는 것을 시사함.

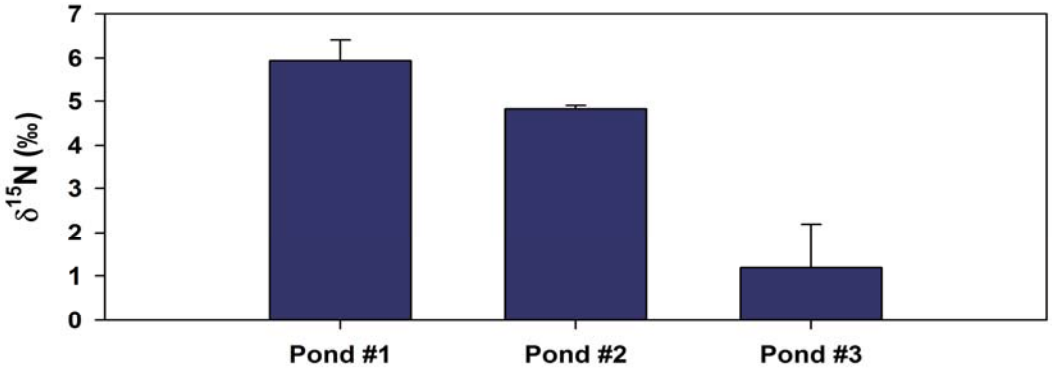


Fig. 56. Comparison of $\delta^{15}N$ of *Daphnia* sp. among sampling sites.

나. 기후변화 모사 챔버를 이용한 기후변화에 따른 북극권 식물의 대사체 변화 및 근권 미생물 군집 변화 연구

(1) 연구 배경

○ 전지구적인 기후변화에 의해 북극 동토층 생태계 또한 영향을 받게 되며 기온상승 및 강수량의 변화는 토양 미생물 군집 및 식물 대사체의 변화를 가져오게 됨. 토양 미생물 군집과 식물 대사체는 상호 작용에 의해 변화를 가져올 수 있으며 기후변사 모사 실험을 통해 식물 대사체의 변화와 토양 미생물 군집 변화를 확인하고자 함.

(2) 연구 내용 및 방법

○ 2013년 8월 하계 연구기간 동안, 캐나다 캠브리지 베이에 설치된 기후변화 모사 챔버 (대조군: NWNP, 온도증가: WNP. 강수량 증가: NWP, 온도증가-강수량증가: WP) 내 우점종인 민담자리 꽃나무 (*Dryas integrifolia*)를 현장에서 채집한 후, 드라이아이스를 이용하여 arctic college biology lab으로 운반하여 전처리함 (Fig. 57).

○ Artic college biology lab에서 식물 대사체 및 토양 sterol에 대한 1차 추출을 한 후, 저온을 유지하여 한국으로 운반함. 1차 추출된 시료는 유도화 과정을 거쳐 가스크로마토그래피-질량분석기 (GC-MS)를 이용하여 분석함.

○ 실온에서 건조한 식물의 근권 토양은 붓을 이용하여 분리한 후, 한국으로 운반하여 DNA 추출 및 차세대염기서열 분석(Next Generation Sequencing, NGS)을 수행함.

(3) 연구 결과

○ 2013년 8월, 현장조사 기간 동안 기후변화 모사 챔버 실험군의 (4 treatment x 5 block) 토양에 대한 전기전도도, 수분함량, pH, 온도를 측정한 결과, 기온변화를 모사한 온도증가 실험군 (WNP)과 온도증가 / 강수량 증가 (WP) 실험군에서 지온이 높아 진 것을 확인하였으며, 수분함량의 경우 강수량 증가 실험군 (NWP)과 온도증가 / 강수량 증가 실험군 (WP)에서 수분함량이 높은 것을 확인함 (Fig. 58).

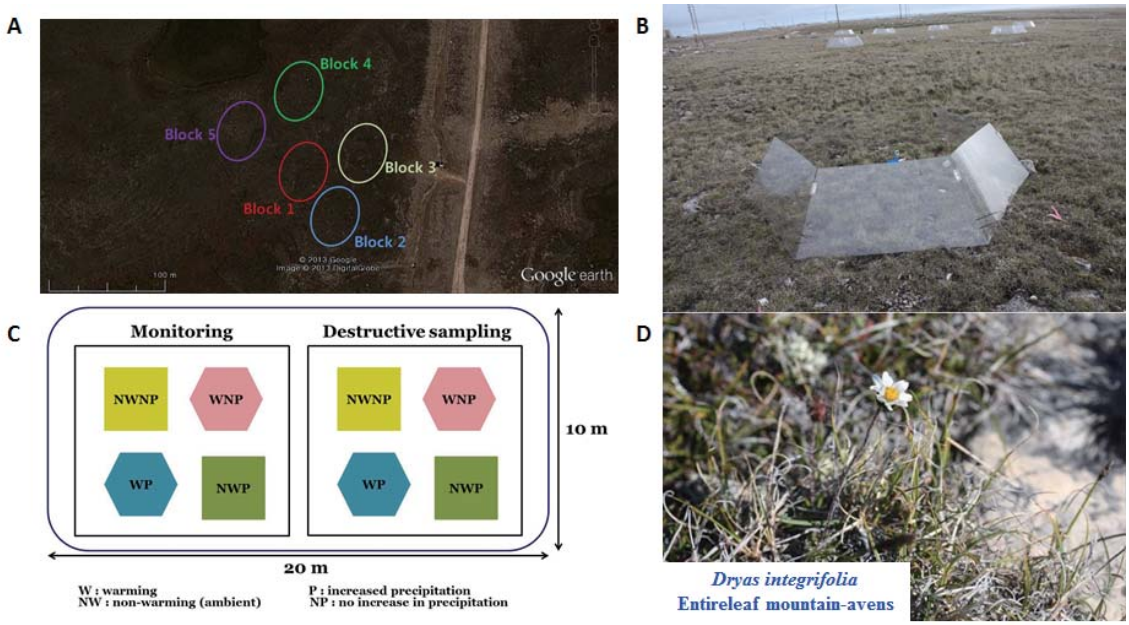


Fig. 57. A) locations of blocks of climate simulating treatments B) whole view of studied field C) schematic diagram of the study, D) *Dryas integrifolia*, dominant species in the field.

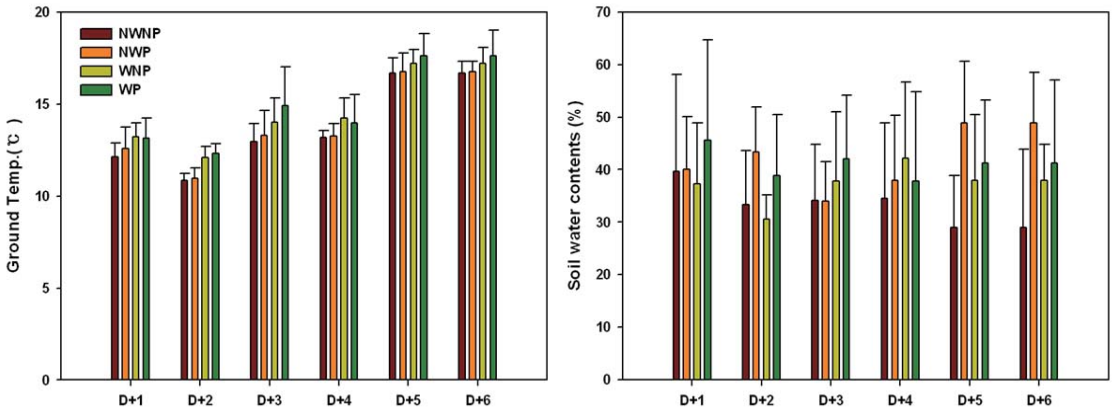


Fig. 58. Changes of soil temperatures and soil water contents in the climate simulating treatments during filed survey periods.

○ 현장조사 기간 동안, 실험군 별로 우점종인 민담자리 꽃나무 (*D. integrifolia*)의 잎을 채집하여 생중량을 비교한 결과, 기후변화 모사 실험군간의 차이보다는 block (기후변화 모사 챔버의 위치) 간에 유의한 차이를 보임 (Fig. 59).

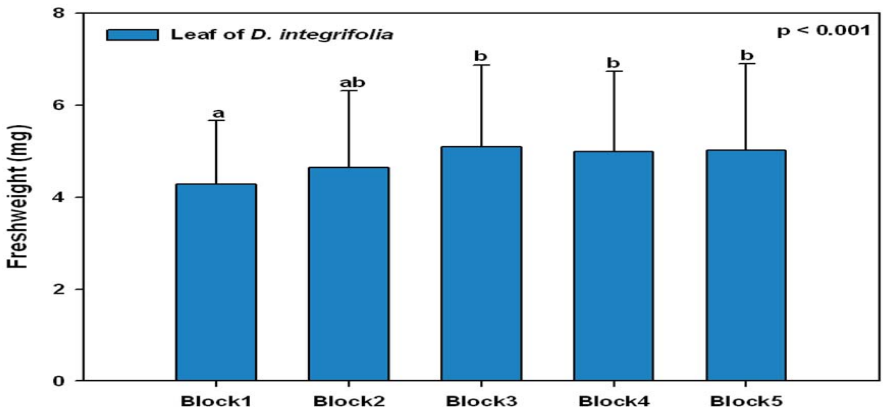


Fig. 59. Comparison of fresh weight of leaves of *D. integrifolia* among blocks.

○ 민담자리 꽃나무 (*D. integrifolia*) 잎의 대사체 프로파일 주성분 분석 결과, 온도 변화를 준 실험군과 그렇지 않은 실험군 간에 차이를 보이며, 식물 대사체 중 sucrose의 함량이 실험군 간에 유의한 차이를 보임 (Fig. 60). 기후변화 모사 챔버 내 온도의 증가는 민담자리 꽃나무의 sucrose 함량 증가를 가져오는 것으로 나타남. 민담자리 꽃나무의 뿌리에서는 큰 차이가 나타나지 않음.

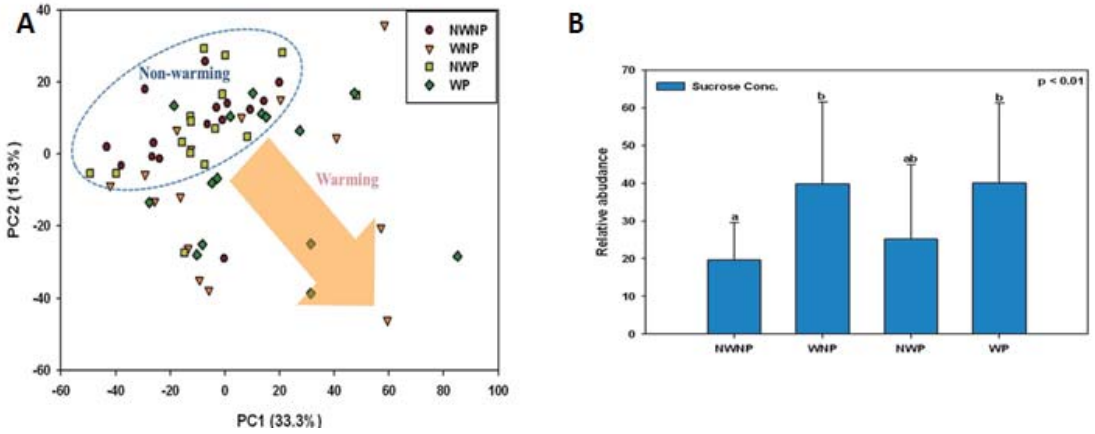


Fig. 60. A) PCA scores plot based on metabolite profiles of leaves of *D. integrifolia*, B) comparison of sucrose contents of *D. integrifolia* among treatments.

○ 진균류의 계통별 특징을 나타내는 sterol marker가 최근에 알려졌으며 (Weete et al., 2010), 이를 활용하여 기후변화 모사 챔버 실험군 간의 토양 내 sterol 프로파일을 비교한 결과 실험군 간에 큰 차이가 없는 것으로 나타났음.

○ 기후변화에 따른 식물 근권의 박테리아 군집변화를 확인하기 위해 민담자리 꽃나무의 근권 세균 군집을 차세대 염기서열 분석 (NGS)을 이용하여 비교한 결과, 온도를 증가시킨 실험군 (WNP)과 그렇지 않은 실험군 (NWNP)간에 차이가 나타났음 (Fig. 61).

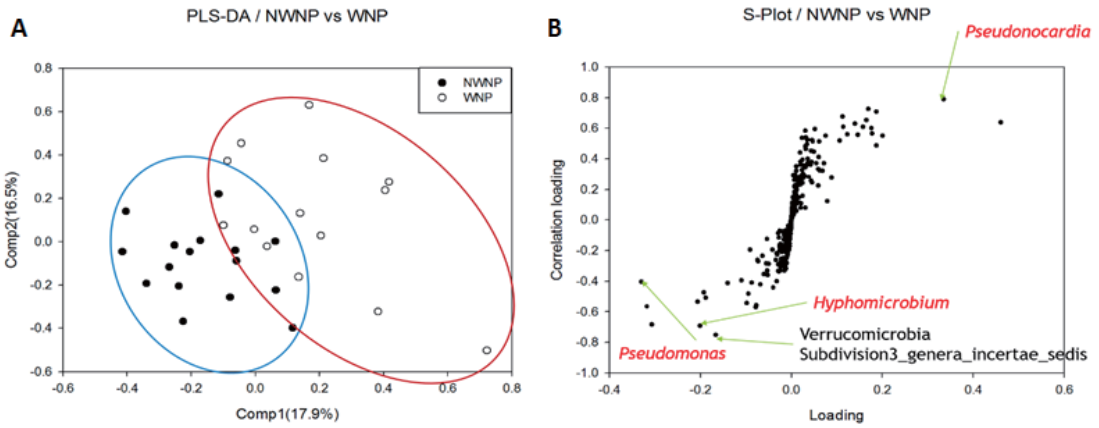


Fig. 61. A) PLS-DA plots based on the bacterial community structure in warming and non warming treatments analysed by NGS profiles and B) S-plot for the axis 1 of PLS-DA.

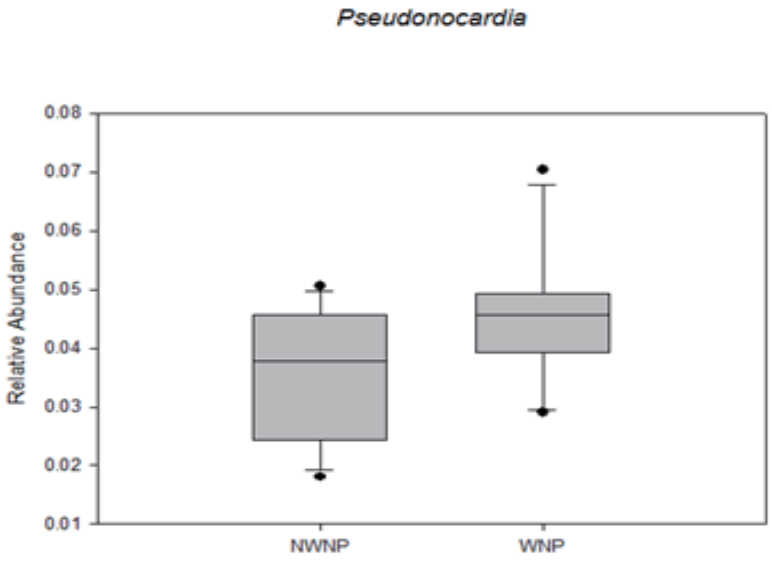


Fig. 62. Box plots of relative abundance of *Pseudonocardia* between warming and non warming treatments.

○ NGS 결과, 동정된 세균 속(genus) 중, *Pseudonacardia* 속이 대조군과 온도 증가를 시킨 실험군간의 상대 풍부도 차이가 가장 큰 것으로 나타났으며 (Fig. 61), 이는 온도가 증가하면 민담자리 꽃나무의 근권 내 세균 군집에서 *Pseudonacardia* 속의 비율이 다른 속에 비해 크게 증가할 수 있음을 나타냄 (Fig. 62.).

○ 본 실험의 결과는 기후변화 모사 챔버 설치 2년차 연구에서 수행된 것으로 기후 변화 모사 실험군에서 우점종 식물의 대사체 및 토양 미생물 군집의 변화를 일부 확인하였지만, 보다 뚜렷한 기후 변화의 영향을 확인하기 위해서는 장기적인 관점에서의 지속적인 채집 및 분석이 필요할 것으로 보임.

다. 빙하 퇴각에 따른 북극권 식물의 대사체 변화 및 근권 미생물 군집 변화 연구

(1) 연구 내용 및 방법

○ 2014년과, 2015년 7월 하계 연구 기간 동안, 노르웨이 스발바르 니알슨 지역에 위치한 중앙로벤빙하의 빙하퇴각 지역에서 우점식물 (자주범의귀: *Saxifraga oppositifolia*, 북극 콩버들: *Salix polaris*) 및 토양 시료 채집을 실시함. 이 지역에서 빙하퇴각선을 따라 빙하퇴각 시기별로 빙하퇴각이 가장 오래전에 일어난 지역 (plot #10)부터 가장 최근에 일어난 지역 (plot #1)까지 총 10지점에서 조사 및 채집을 수행함 (Fig. 63).

○ 현장에서 채집한 식물은 드라이아이스를 이용하여 다산기지로 운반한 후, 동결건조기로 건조시킴. 건조된 시료는 지상부와 지하부로 분리한 후 분쇄하여 한국으로 운반함. 분쇄된 시료는 Ball mill을 이용하여 재분쇄 후, 대사물질 추출을 하고 가스크로마토그래피-질량분석기 (GC-MS)를 이용하여 분석함.

○ 건조된 지하부 시료는 붓을 이용하여 근권토양을 분리한 후, 근권 미생물 군집 분석을 위한 DNA 추출을 함. 추출된 시료는 말단 제한효소 절편 길이 다형성 (Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism, T-RFLP) 분석과 NGS 분석을 실시하여 군집구조를 분석함.

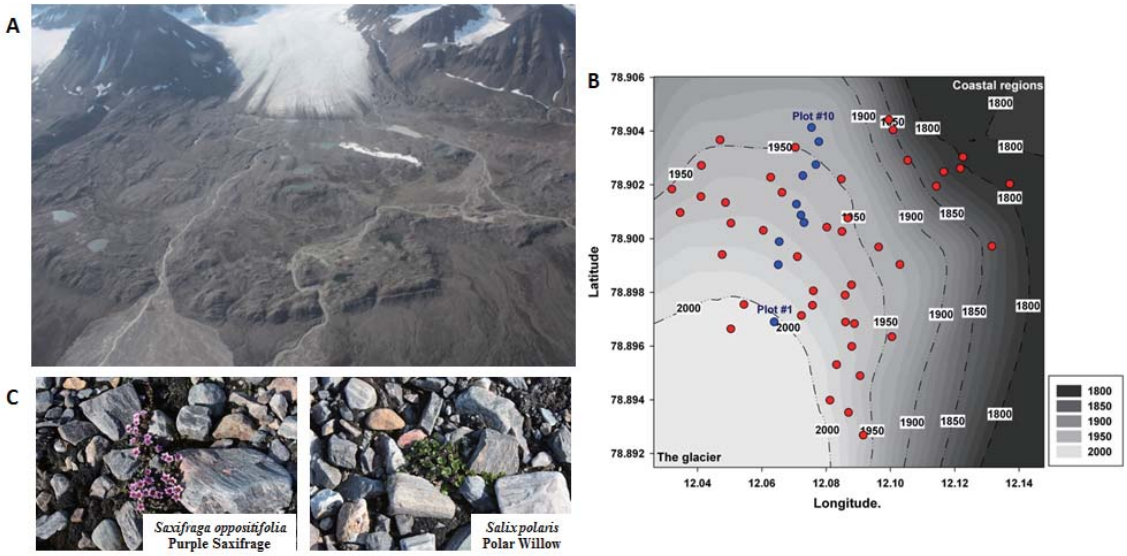


Fig. 63. A) Whole view of a glacial retreat area in front of Midtre Lovénbreen, Svalbard, B) sampling points in the glacial retreat area, C) dominant plants, *S. oppositifolia* and *S. polaris* in the site.

(2) 연구 결과

○ 중앙로벤빙하의 빙하퇴각지역에 우점하는 자주범의귀 (*S. oppositifolia*)와 북극콩버들 (*S. polaris*) 잎의 대사체 프로파일을 비교 분석한 결과, 빙하 퇴각 시기보다 종 간의 대사물질 프로파일의 차이가 큰 것으로 나타났으며, c335, c449 등의 물질에서 큰 차이가 있는 것으로 나타남 (Fig. 64).

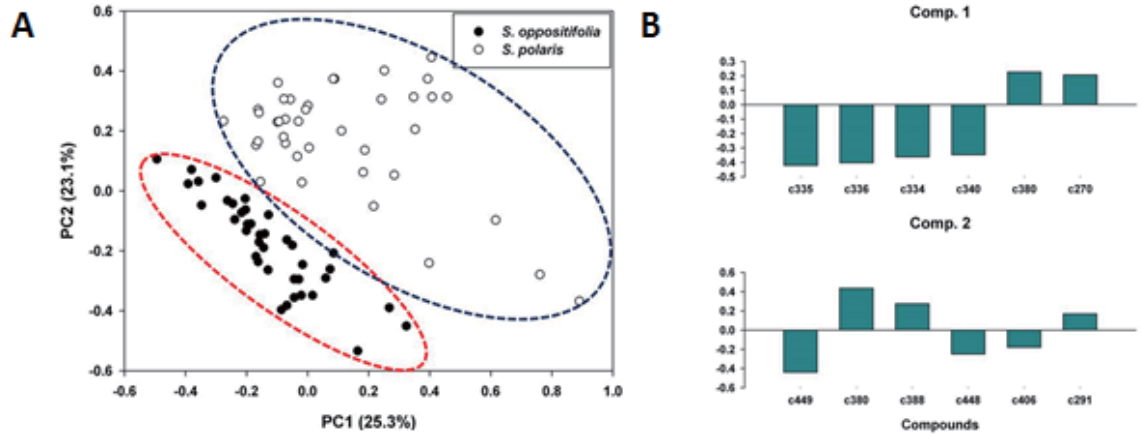


Fig. 64. A) PCA scores plot based on plant metabolite profiles of *S. oppositifolia* and *S. polaris* collected from the sites, B) loading values of first two axises of principal components.

○ 각 조사지점 (plot) 주변에 생육하는 식물의 대사물질 프로파일은 개체 간 차이를 크게 보이지 않았으며, 조사지 간의 차이를 보임 (Fig. 65). 하지만 빙하퇴각시기에 따라 지점별로 뚜렷한 차이를 보이지는 않음.

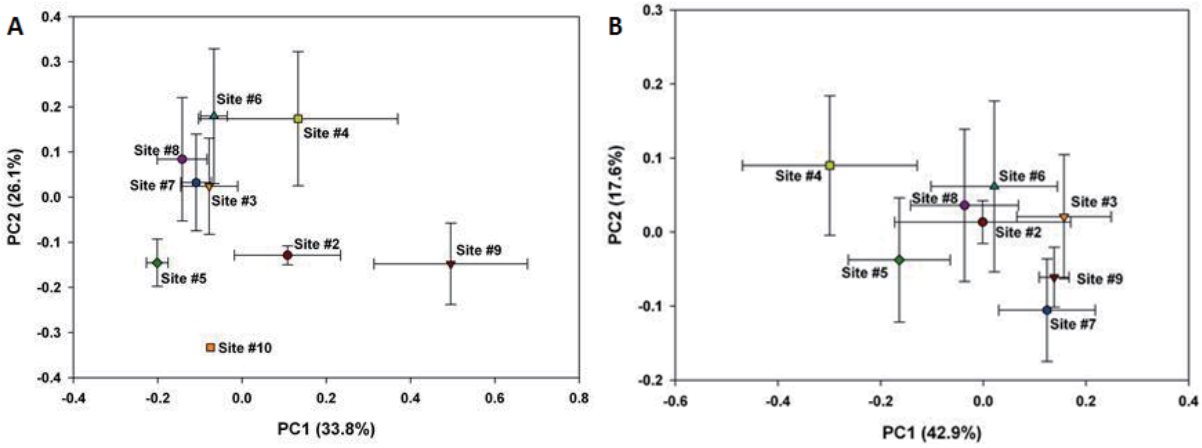


Fig. 65. PCA scores plot based on plant metabolite profiles in the glacial retreat area: (A) *S. polaris* and (B) *S. oppositifolia.*

○ 2014년 빙하퇴각지에서 채집한 자주범의귀 (*S. oppositifolia*)와 북극콩버들 (*S. polaris*)의 근권 토양에 대한 박테리아 T-RFLP 분석 결과, 식물의 대사물질 결과와 비슷하게 빙하퇴각시기에 따른 차이보다 두 식물 종간의 차이가 더 크게 나타남 (Fig. 66). 이는 근권 박테리아 군집이 식물 종에 대한 영향을 더 많이 받음을 의미함.

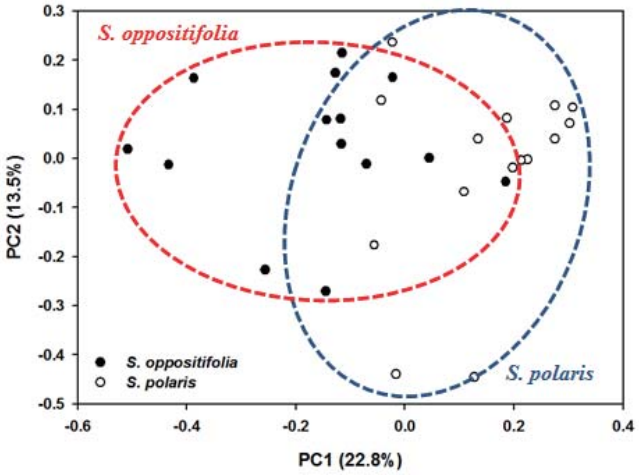


Fig. 66. PCA scores plot based on T-RFLP profile of the bacterial community structure in rhizosphere of *S. oppsitifolia* and *S. polaris*.

○ 2015년 빙하퇴각지에서 채집한 자주범의귀 (*S. oppositifolia*)와 북극콩버들 (*S. polaris*)의 근권 토양에 대해 박테리아 NGS 분석을 실시함. PLS-DA와 S-plot 분석을 통해 박테리아 군집 중, 북극콩버들은 *Pseudomonas*의 상대종풍부도가 높고 자주범의귀는 Acidobacteria_Gp3와 *Spartobacteria*의 상대종풍부도가 높은 것으로 나타남 (Fig. 67).

KOPRI 극지연구소

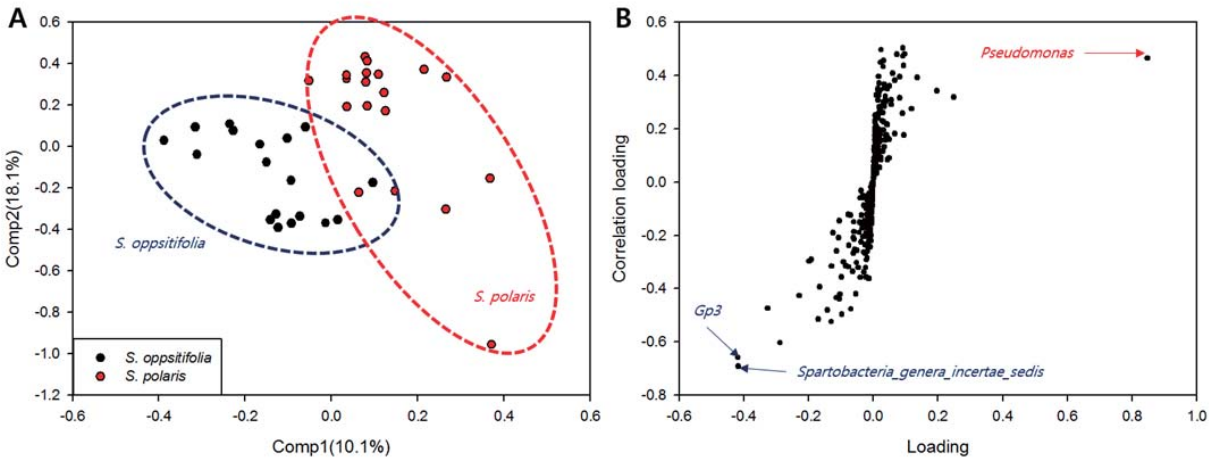


Fig. 67. A) PLS-DA plots based on the bacterial community structure analysed by NGS profiles and B) S-plot for the axis 1 of PLS-DA.

라. 스발바르 순록 섭식에 따른 먹이 식물의 대사체 변화 연구

(1) 연구 배경

○ 북극 다산기지가 위치한 스발바르 스피치베르겐섬에 서식하는 스발바르 순록(*Rangifer tarandus platyrhynchus*)은 상위 포식자가 없는 환경에서 개체수가 유지되고 있음. 스발바르 순록의 섭식활동은 스발바르 섬의 식생 구조에 영향을 주며 식물 대사체의 변화를 가져올 수 있고, 식물 대사체의 변화는 상호 작용하는 근권 미생물 군집에도 영향을 주게 됨. 따라서 스발바르 지역의 대형 초식동물인 스발바르 순록과 먹이식물과의 관계 연구는 북극 동토층 육상생태계 연구에 중요 자료를 제공할 수 있음.

(2) 연구 내용 및 방법

○ 스발바르 순록의 섭식활동에 의한 식물 대사체의 변화를 파악하기 위해 스발바르 니알슨 일대에서 스발바르 순록의 배설물을 채집하고 다산기지에서 DNA 추출 및 전처리를 한 후 추출물은 한국으로 운반함. 얻어진 염기서열 정보를 데이터베이스와 비교하여 먹이원을 추정함.

○ 스발바르 니알슨 일대에 설치되어 있는 fence (울타리)의 안과 밖에서 스발바르 순록의 먹이 식물 (북극콩버들: *S. polaris*, 씨범꼬리: *Bistorta vivipara*, 북극이끼장구채: *Silene acaulis*)을 드라이아이스를 이용하여 채집한 후, 다산기지에서 대사물질 분석을 위한 전처리를 함.

○ 하계연구 기간 동안 현장에서 먹이 식물의 한쪽 잎을 뜯어내는 인위섭식 실험(wounding experiment)을 실시하고 일정 주기로 드라이아이스를 이용하여 식물을 채집하고 다산기지에서 대사물질 분석을 위한 전처리를 함 (Fig. 68).

Fig. 68. Svalbard reindeer (*Rangifer tarandus platyrhynchus*) and whole view of study sites.

○ 대사물질 분석을 위한 시료는 건조 후 분쇄하여 한국으로 운반 후, 가스크로마토그래피-질량분석기 (GC-MS), 액체크로마토그래피-질량분석기 (LC-MS)를 이용하여 분석함.

(3) 연구 결과

○ 다산기지 주변 두 빙하지역에 서식하고 있는 북극순록들의 먹이 관계를 파악하기 위하여, 길이 이질성을 기초로 한 PCR 분석 (LH-PCR)을 적용하여 순록 배설물로부터 먹이원 검출을 시도함.

○ 배설물로부터 얻어진 길이 정보를 바탕으로 먹이원 분석을 수행하기 위해, 순록의 먹이원으로 이용될 수 있는 관속 식물(32종), 선태류(2종), 버섯 및 지의류(30종)에 대한 길이 데이터 베이스를 구축

○ 잠재 먹이원의 분석 대상 영역의 증폭 길이는 지의류인 *Ochrolechia* sp. (333.4 bp) 부터 선태류 *Polytrichum* sp. (494.1 bp)에 이르는 길이 범위를 보였으며, 전반적으로 지의류가 짧고, 버섯의 경우 380 ~ 450 bp의 범위에서 길이 차이에 따라 구분 되는 것을 확인함 (Fig. 69).

KOPRI 극지연구소

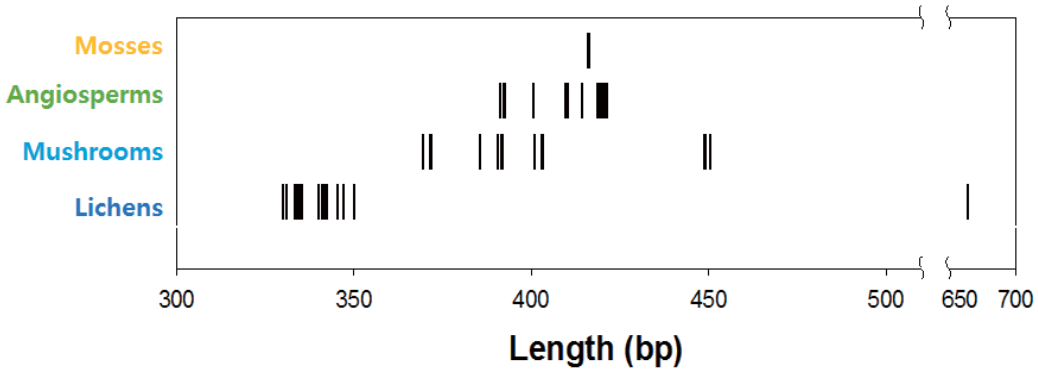
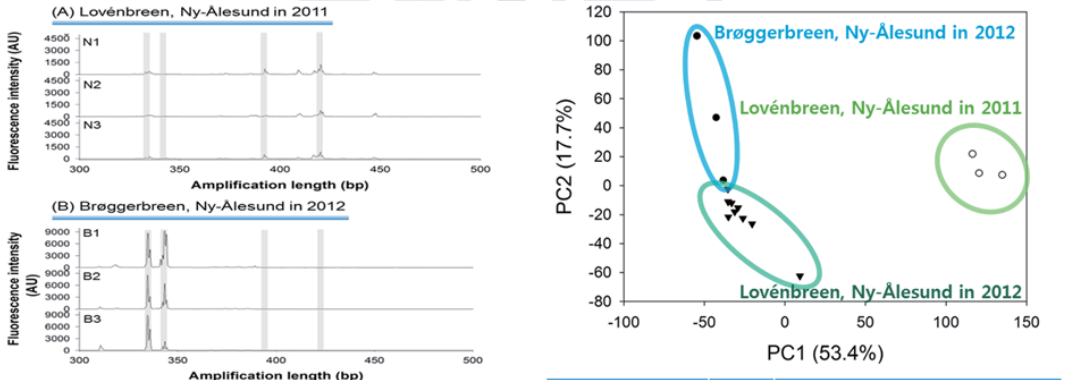


Fig. 69. Length of amplified region of potential food sources of *R. t. platyrhynchus*.

○ 2011년과 2012년에 채집된 순록 배설물에 대하여 LH-PCR 분석을 수행한 결과, 연도별·지역별 차이에 따라 섭식된 먹이 프로파일에 차이가 있음이 확인되었고, 이러한 차이는 주로 지의류 (*Stereocaulon* sp., *Ochrolechia* sp.)와 북극콩버들(*S. polaris*), 자주범의귀(*S. oppositifolia*) 섭식 차이에 따른 것으로 판단됨 (Fig. 70).



Sampling site	No. of sample	Diet composition (relative peak area, %)		
		Lichens	Mushrooms	Angiosperms
Lovénbreen in 2011	3	7.4±1.9	1.6±0.8	59.8±8.0
Brøggerbreen in 2012	3	20.8±7.0	0.5±0.8	-
Lovénbreen in 2012	9	26.0±9.2	-	-

Fig. 70. LH profiles of fecal samples of *R. t. platyrhynchus* collected in 2011 and 2012. PCA scores plot based on LH profiles of fecal samples.

○ 2014년 채집된 순록의 배설물에서 rbcL (RuBisCO large subunit), trnH-psbA, ITS2 (Internal Transcribed spacer 2) 영역을 증폭 및 클로닝을 진행하여 먹이 식물의 염기서열을 얻음.

○ 총 13개의 배설물 시료 중, 7개의 시료에서 16건의 염기서열을 얻었으며 3종의 식물이 검출되었음. 얻어진 염기서열을 BLAST search 한 결과, 니알슨에 실제 서식하지 않는 식물이 검출된 경우는 BLAST 상에 데이터베이스가 충분하지 않기 때문으로 예상되었음. 이러한 이유로 배설물을 이용한 먹이 분석 실험과 동시에 동일한 방법으로 예상 먹이 식물의 염기서열을 얻어 비교한 결과, 16건의 염기서열 중 가장 많이 검출된 식물은 북극콩버들 (62.5%) 이었으며, 다음은 버들이끼속의 식물 (*Sanionia uncinata*) (25%), 북극담자리꽃나무 (12.5%) 순으로 검출되었음 (Table 20).

Table 20. BLASTN results of dietary analysis using fecal samples of *R. t. platyrhynchus* collected in 2014

No.	Amplified region	Identification		
		Species	Korean name	Similarity (%)
1	rbcL	*Salix polaris*	북극콩버들	100
	trnH-psbA	*Salix polaris*	북극콩버들	99
2	rbcL	*Salix polaris*	북극콩버들	100
3	rbcL	*Sanionia uncinata*	버들이끼속	99
	trnH-psbA	*Salix polaris*	북극콩버들	99
	ITS2	*Sanionia uncinata*	버들이끼속	99
4	rbcL	*Salix polaris*	북극콩버들	100
	trnH-psbA	*Salix polaris*	북극콩버들	99
	ITS2	*Salix polaris*	북극콩버들	100
5	rbcL	*Dryas octopetala*	북극담자리꽃나무	100
	ITS2	*Dryas octopetala*	북극담자리꽃나무	98
6	rbcL	*Salix polaris*	북극콩버들	99
	trnH-psbA	*Salix polaris*	북극콩버들	100
	ITS2	*Salix polaris*	북극콩버들	100
7	rbcL	*Sanionia uncinata*	버들이끼속	100
	ITS2	*Sanionia uncinata*	버들이끼속	100

○ 2015년에는 중앙로벤빙하 퇴각지역, 한국 펜스 및 노르웨이 펜스 주변의 네 지역에서 순록의 배설물을 채집하였으며, 순록은 버섯과 지의류도 섭식한다고 알려져 있어, 앞서 분석한 세 영역 중 ITS2 영역을 증폭하여 먹이 분석을 실시하였음. 총

18개의 배설물 시료에서 21건의 염기서열을 얻었으며 5속 6종의 식물이 검출되었음. 순록의 배설물에서 가장 많이 검출된 식물은 자주범의귀 (52.4%) 였으며, 북극콩버들 (23.8%), 그린란드 고추냉이 (9.5%), 노랑범의귀 (4.8%) 및 철사이끼속과 손꼴가시이끼속의 이끼도 각 1회 검출되었음 (Table 21, Fig. 71).

KOPRI
극지연구소

Table 21. BLASTN results of dietary analysis using fecal samples of *R. t. platyrhynchus* collected in 2015

Sampling site	No.	BLASTN results		
		Species	Korean name	Similarity (%)
한국펜스 주변	1	*Bryum* sp.	철사이끼속	99
	2	*Salix polaris*	북극콩버들	99
	3	*Saxifraga oppositifolia*	자주범의귀	99
	4	*Salix polaris*	버드나무속	99
	5	*Saxifraga oppositifolia*	자주범의귀	99
	6	*Saxifraga oppositifolia*	자주범의귀	99
	7	*Saxifraga oppositifolia*	자주범의귀	99
	8	*Saxifraga oppositifolia*	자주범의귀	99
	9	*Saxifraga oppositifolia*	자주범의귀	99
	10	*Saxifraga oppositifolia*	자주범의귀	99
	11	*Ptilidium* sp.	손꼴가시이끼속	94
	12	*Salix polaris*	북극콩버들	99
노르웨이 펜스 주변	1	*Cochlearia groenlandica*	그린란드 고추냉이	99
	2	*Salix polaris*	북극콩버들	99
빙하퇴각지	1	*Saxifraga oppositifolia*	자주범의귀	94
	2	*Saxifraga oppositifolia*	자주범의귀	99
	3	*Cochlearia groenlandica*	그린란드 고추냉이	99
폐광산	1	*Saxifraga aizoides*	노랑범의귀	100
	2	*Salix polaris*	북극콩버들	99
	3	*Saxifraga oppositifolia*	자주범의귀	99

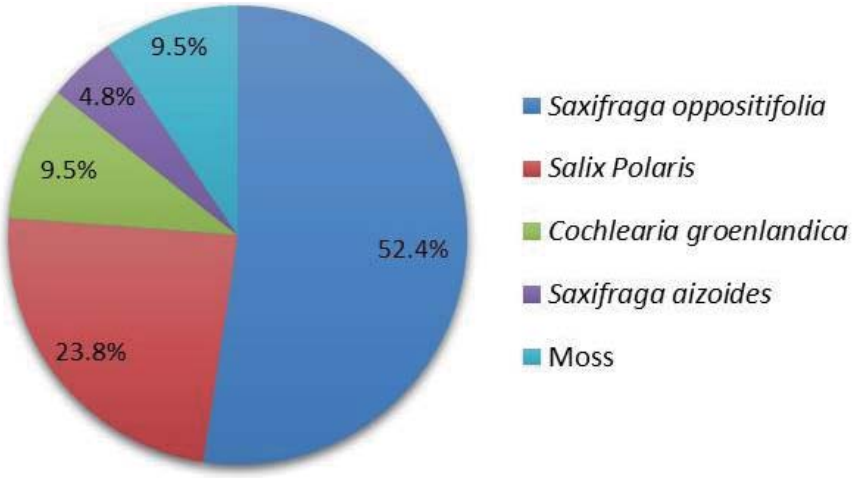


Fig. 71. Composition of forage plants in feces of *R. t. platyrhynchus.*

○ 스발바르 니알슨 일대에 서식하는 스발바르 순록의 섭식 활동에 의한 주요 먹이 식물의 대사물질 변화 양상을 파악하기 위해 2014년 하계 연구 기간 동안 다산기지 주변에 설치되어 있는 세 fence의 안과 밖에서 북극콩버들 시료를 채집한 후, 가스크로마토그래피 - 질량분석기 (GC-MS)를 이용하여 대사물질을 분석함.

○ 이를 통해 fence 안, 밖에 생육하는 식물간의 대사물질 프로파일이 차이가 나는 것을 확인하였으며, 식물의 대사물질의 차이는 fence가 위치하는 지역에 따라서 더 큰 차이를 보이는 것으로 나타남 (Fig. 72).

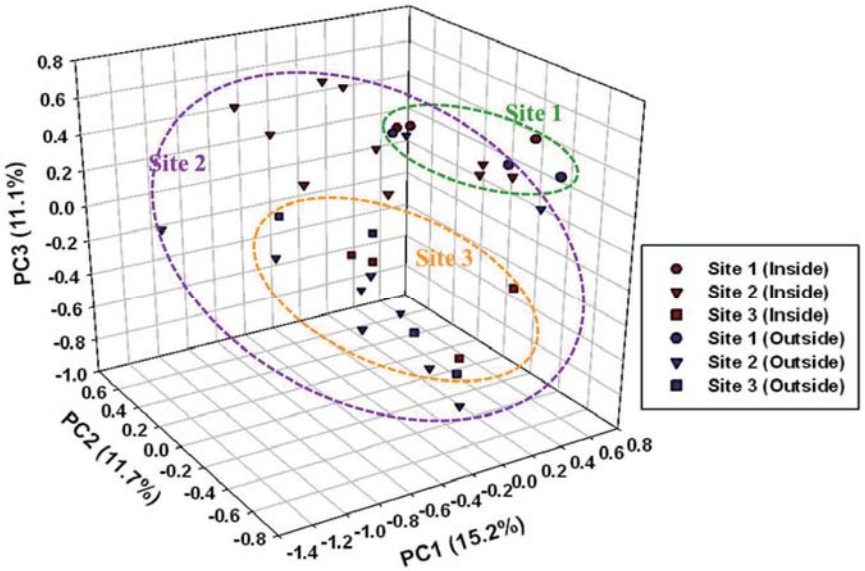


Fig. 72. PCA scores plot based on metabolite profiles of *S. polaris* collected from inside and outside of fences and different sites.

○ 섭식에 대한 상황을 모사하기 위해 인위적으로 일부 콩버들의 잎을 제거하는 인위 섭식실험을 야외에서 실시하였으며, 실험 시작 후 0, 1, 3, 5일 간격으로 시료를 채집하여 대사물질을 분석을 수행함.

○ Fence 안, 밖에 생육하는 식물간의 차이를 나타내는 대사물질과 인위섭식 실험을 통해 변화하는 대사물질을 찾기 위해 PLS-DA를 실시한 후, S-plot을 통해 주요 물질을 선별함 (Fig. 73, 74).

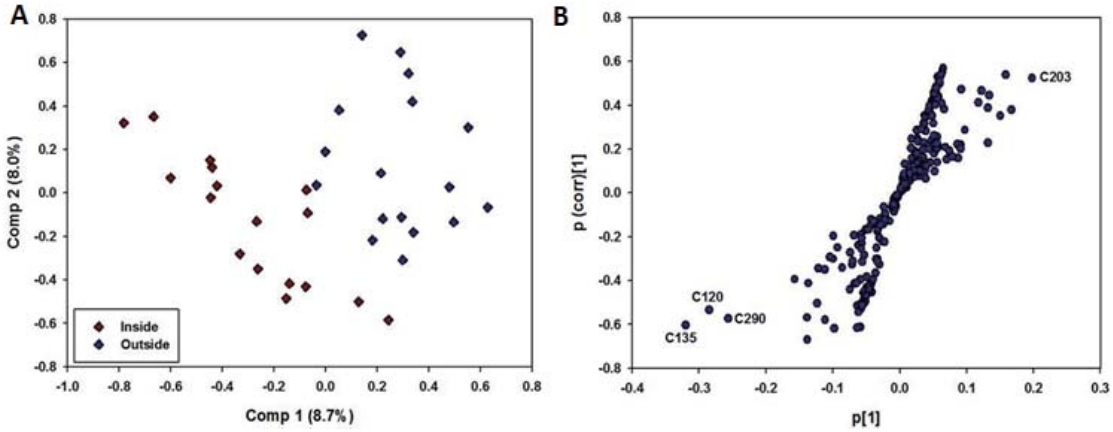


Fig. 73. A) PLS-DA plots based on metabolite profiles of *S. polaris* between inside and outside of fences and B) S-plot for the axis 1 of PLS-DA.

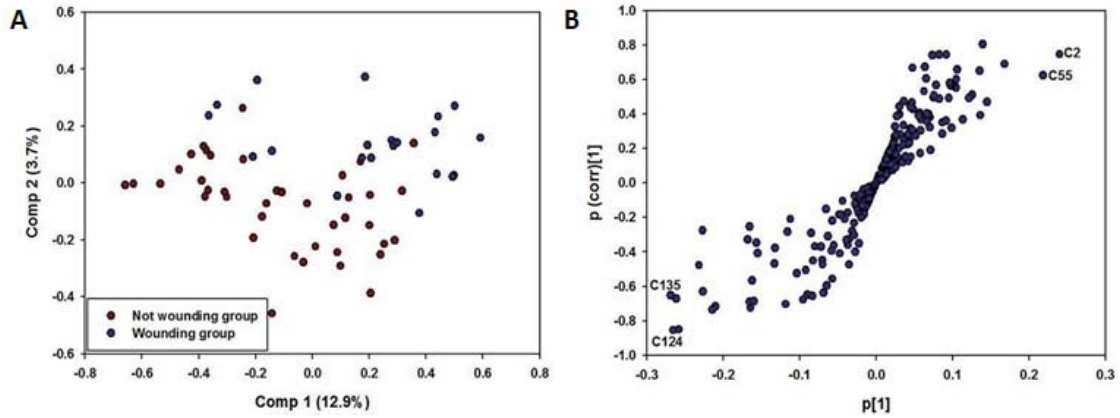


Fig. 74. A) PLS-DA plots based on metabolite profiles of *S. polaris* between wounding and non-wounding treatments and B) S-plot for the axis 1 of PLS-DA.

○ 두 실험에서 공통적으로 영향을 주는 물질을 선별하였으며, 이 물질에 대해 fence 안, 밖과 인위섭식 실험 후 시기별로 식물체 내 함량을 비교함 (Fig. 75).

○ Fence 실험을 통해 안, 밖에 채집한 시료간의 차이를 보이기는 하지만, fence 위치에 의한 차이가 더 큰 것으로 나타남.

○ 인위섭식실험을 통해서는 식물체에 인위섭식을 가한 후, 시간이 지날수록 대조구와 처리구 간의 차이를 보이기는 하였으나 짧은 실험 기간 내에서는 뚜렷한 변화를 확인할 수 없었음.

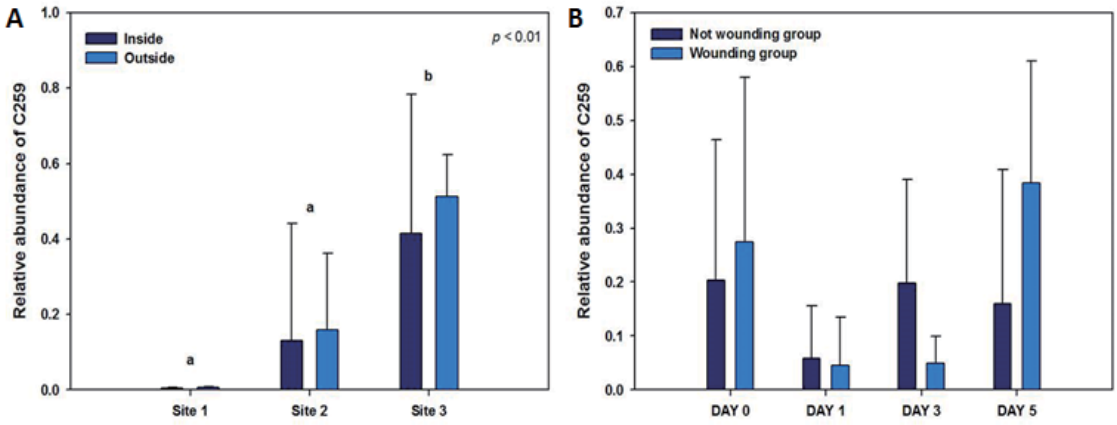


Fig. 75. Comparisons of important peaks contents (%) in *S. polaris* among sites and treatments in A) the fence experiment and B) the wounding experiment.

○ 2015년 하계 연구 기간 동안 다산기지 주변에 설치되어 있는 한 fence의 안과 밖에서 북극콩버들 (*S. polaris*) 씨범꼬리 (*B. vivipara*), 북극이끼장구채 (*S. acaulis*)를 채집한 후, 액체크로마토그래피 - 질량분석기 (LC-MS)를 이용하여 대사물질을 분석함.

○ 이를 통해 fence 안, 밖에 생육하는 식물간의 대사물질 프로파일이 차이가 나는 것을 확인하였으며, 식물의 대사물질의 차이는 종에 따라서 더 큰 차이를 보이는 것으로 나타남 (Fig. 76).

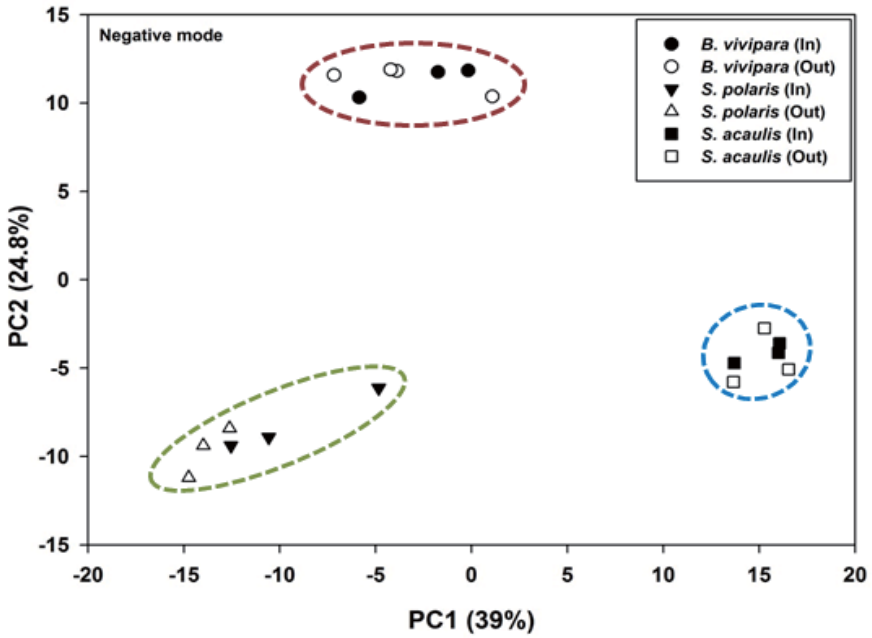


Fig. 76. PCA scores plot based on metabolite profiles of *B. vivipara*, *S. polaris* and *S. acaulis* from inside and outside of a fence.

○ 현장조사 기간 동안 세 식물을 대상으로 인위섭식실험을 실시하였으며 상처를 낸 후, 6일 뒤 시료를 채집하여 대사물질 분석을 함.

○ PLS-DA와 S-plot을 통해 fence 안과 밖, wounding에 의한 영향으로 차이를 나타내는 물질 peak를 선별하였음. 이를 통해 씨범꼬리 v202, 북극콩버들은 v139, 북극이끼장구채는 v213 peak가 중요 물질로 확인됨. 데이터베이스와의 비교를 통해 v202는 epicatechin, v139는 chlorogenic acid로 동정되었으나 표준물질을 이용한 추가 확인이 필요함. 북극이끼장구채의 주요물질인 v213은 데이터베이스 상에서 동정이 어려운 peak로 이를 동정하기 위해서는 NMR 등을 이용한 추가 분석이 필요함 (Fig. 77). 씨범꼬리와 북극콩버들에서는 fence의 바깥에서 채집한 개체와 wounding을 준 개체에서 각각 v202, v139의 상대 함량이 많았으나 v202은 fence 바깥에서 채집한 북극장구이끼채와 wounding을 한 개체에서 함량이 적은 것으로 나타남.

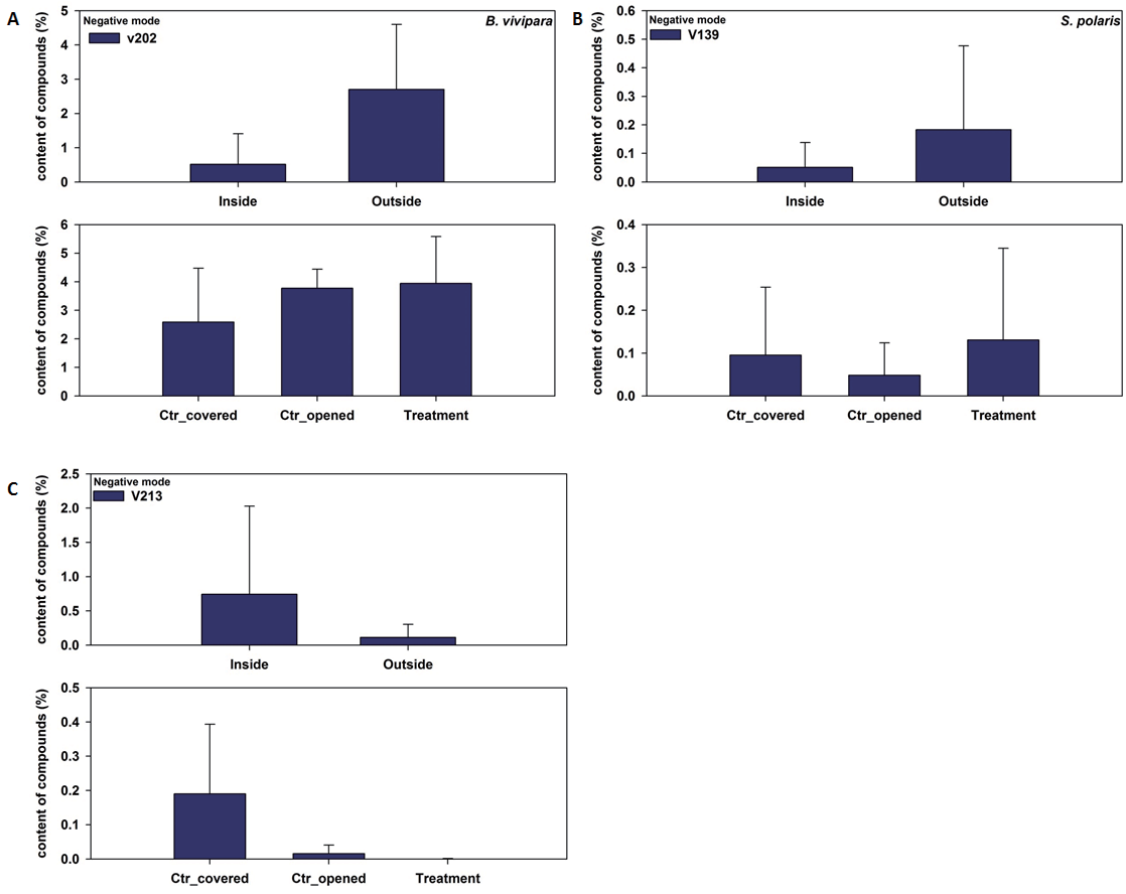


Fig. 77. Comparisons of important peaks contents (%) in plants between inside and outside of the fence and those among treatments in an wounding experiment A) *B. vivipara*, B) *S. polaris* and C) *S. acaulis.*

KOPRI
극지연구소

제 4 장
목표달성도 및 관련분야에의 기여도

KOPRI
극지연구소

KOPRI
극지연구소

제 1 절
북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발(세부과제 1)

○ 국내 연구진의 북극권 연구 영역 확대가 가능한 거점 관측지 확보
○ 북극 환경 변화의 핵심 과정에 대한 연구의 참여로 북극권 글로벌 이슈에 적극 동참
○ 환북극 거점 관측지 구축 및 환경 변화 연구는 우리나라의 북극이사회 옵저버 자격 획득에 기여
○ 사회적 파급효과가 큰 에너지, 원자력, 우주항공, 해양, 자원, 철도, 표준, 과학기술정보, 극지분야 등의 공공기술 분야에 IT/USN 기술의 접목이 요구되고 있는 현재의 시점에서 극지 환경 정보 수집을 위한 연구에 IT/USN 기술의 접목은 큰 의미를 가짐
○ IT/USN 기술은 인간의 개입 없이도 물리적인 현상을 파악하거나 조절, 사람이 접근할 수 없는 영역에서의 현상 수집, 과학적 연구 활동에 원천이 되는 중요한 데이터의 수집, 시공간으로 변하는 환경 인장의 지속적인 감지 증을 가능하게 하여 거점 관측지 확대에 기여
○ 산업체에서 독자적으로 수행하기 어려운 공공기술을 실제 개발하여 극지에 적용한 사업으로 국가 기반산업의 효율성 제고 및 과학기술 활동에 파급효과가 매우 큰 최초의 사례임

1. 연구개발의 최종목표

○ 북극권 글로벌 이슈 대응과 정부추진 미션 수행을 위한 환북극권 동토층 환경변화 관측 종합계획 수립 및 거점 확보
○ 지구온난화로 급속히 진행되는 북극권 지역에서의 환경변화와 기상현상, 지질학적, 생물학적 변화 감시 및 특성 연구를 위한 정밀 첨단 측정시스템/원천 요소기술 개발 적용으로 인프라 구축
○ 국제공동연구 및 산.학.연 공조 전문 연구 유니트 체제 구성

KOPRI 극지연구소

2. 연차별 연구개발 목표 및 내용

구분	년도	연구개발목표	연구개발내용	연구범위
1차년도	2011	종합 계획 수립	- 북극권 환경변화 감시 네트워크등 인프라 확보(4개 거점) 계획 수립	-자료 수집 -관측 거점 - 스템구축
		북극 동토층 지역 관측 거점 타당성 조사 및 선정 (**알래스카 동토층, 1 거점**)	- 미국 알래스카주립대학교/IARC와 공동으로 동토층 현장 관측 거점 조사 및 선정 - 제 1거점 - 캐나다 레졸루트(제 2거점), 그린랜드 (제3거점) 등 추가 관측 2 거점 동시 현장조사 - 1거점의 GPR 탐사 및 3차원 지하영상화로 동토층 하부 구조 해석	-현장조사/자료수집/기술정립/분석 (접근성/안전성 / 대 표 성 점검, 위성자료 분석, 공간 특성파악) - 거점 선정
		동토-대기간 온실기체 순환 및 에어로졸 관측 시스템 구축 및 거점 확보에 따른 활용	- 연구거점 확보에 따른 관측 시스템 인프라 확보 - Norway(Ny-Aleund)(다산과학기지)와 알래스카 동토층 지역 (관측 1 거점 활용) 설계 - 북극에어로졸 등 실시간 측정시스템 구축 및 평가 - USN 기반, cyber-infrastructure 기술 개발 및 1거점에 활용	-메탄 플럭스 및 에어로졸 관측 시스템 구축 설계 및 장비 확보 -극지형 감지센서, 전송네트워크 개발
		국제공동연구 프로그램 개발과 참여, 연구 유니트 조성	- 노르웨이/독일/프랑스/이태리 등과 스발바드 국제공동 인프라 활용 및 환경변화 감시 시스템 운영 - SIOS/IPA 연계 프로그램 수행	에러로졸/온실기체 플럭스 등 공동자료수집/분석
2차년도	2012	북극 동토층 지역 관측 거점 운영 및 추가 선정 (**캐나다 캠브리지, 관측 2 거점**)	- 미국 알래스카 동토층 (1 거점) 관측 거점 시스템 보완 및 정상 운영 - 캐나다 캠브리지 추가 (2 거점) 현장 조사/선정, 시스템 개발	- 알래스카 동토층 자료수집 - 추가 거점 현 장 조 사 / 자료수집/기술정립/분석
		동토층 장기 감시 기술 및 변화량 추적 기술개발	- 기상/물리.화학/생태/지구물리 등 동토층 현상의 종합 감시 요소 기술 개발(부분적 가능) - 동토의 공학적, 지질학적 특성 조사 (일부 수행) - USN 기반, cyber- infrastructure 기술 개발 및 2거점에 활용(일부 수행) - 다산과학기지에 GPS 활용기반조성 (불가)	-자료수집/기술정립/모델제시 -원격 관측센서 서버개발, 거점에 적용
		동토-대기간 온실기체 순환 이해를 위한 시스템과 에어로졸 및 블랙카본 관측 시스템 운영 및	- 알래스카(1 거점) 및 Norway (Ny-Ålеund)에 온실 기체 플럭스 관측 시스템 구축 및 운영 - 캐나다 캠브리지만(2 거점) 온실기체 및 블랙카본 시험 관측 - 에어로졸 관측 시스템 구축	-메탄/이산화탄소 플럭스 시스템 운영 및 자료 생산 -에어로졸 자료 생산

구분	년도	연구개발목표	연구개발내용	연구범위
		거점 추가에 따른 시스템 추가 구축	- 북극에서 에어로졸의 집중 발생이벤트 파악	-블랙카본 관측 시스템 확보
		연구 유니트 정상 가동	- 국제공동연구 및 산.학.연 공조 연구유니트 체제 구성 및 데이터분석 체계 확립 - 획득자료 DB화 및 KPDC 연계 웹서비스 공유 추진	-기능정립/DB 공동구축
3차년도	2013	북극 동토층 지역 관측 거점 운영 및 추가 선정 (**그린랜드, 제3 거점**)	- 미국 알래스카 (제1거점) 및 캐나다 동토지역 (제2거점)정상 운영 - 그린랜드 (제3거점) 현장 조사 및 타당성 평가, 선정 - SIOS/IPA 연계 프로그램 지속 수행	-관측 1, 2 거점 정상운영, 동토층 자료 수집 -추가 거점 현장조사/자료수집/기술정립/분석
		동토층 장기 감시 기술 및 변화량 추적 기술개발	- 기상/물리.화학/생태/지구물리 등 동토층 현상의 종합 감시 요소 기술 현장 적용 - 동토의 공학적, 지질학적 특성 조사 - USN 기반, cyber-infrastructure 기술 개발 및 3거점에 활용 - 다산과학기지에 GPS 가동, 타 거점 활용타당성 조사	-자료수집/기술정립/모델 제시
		동토-대기간 온실기체 순환 이해를 위한 시스템과 에어로졸 및 블랙카본 관측 시스템 운영 및 거점 추가에 따른 시스템 추가 구축	- 다산과학기지, 제1거점) 메탄/이산화탄소 플럭스 및 에어로졸 관측 시스템의 연속적 운영 - 캐나다 캠브리지 (제2거점) 블랙카본 시스템 구축 - 블랙카본의 흡습성, 휘발성, 구름형성 특성파악 - 그린랜드 (제3거점) 활용 설계 - 1, 2 거점 및 다산기지 관측 시스템 운영 매뉴얼 작성	-메탄/이산화탄소 플럭스 자료 생산 및 DB 구축 -에어로졸 자료 생산 및 DB 구축 -블랙카본 자료 생산 -매뉴얼 작성
		연구 유니트 정상 가동	- 공동연구 유니트 체제 지속 가동 및 데이터분석 체계 확립(DB, 웹서비스 시행) - 거점 기반 세부과제간 협력 및 신연구분야 도출	-기능정립/DB 공동구축 -연구분야도출
4차년도	2014	북극 동토층 지역 관측 거점 운영 및 추가 선정 **(시베리아, 제4거점)**	- 미국 알래스카 (제1거점), 2, 3 거점 정상 운영 - 러시아 시베리아 (제4거점) 현장 조사 및 선정 - SIOS/IPA 연계 프로그램 지속 수행 - 4거점의 GPR 탐사 및 3차원 지하영상화로 동토층 하부 구조 해석	-다산기지, 제1,2,3거점의 동토층 자료수집 -추가 거점 현장조사/자료수집/기술정립/분석
		동토층 장기 감시 기술 및 변화량	- USN 기반, cyber-infrastructure 기술 개발 및 4거점에 활용	-원격 제어기술 확립

구분	년도	연구개발목표	연구개발내용	연구범위
		추적 기술개발	- 동토의 공학적, 지질학적 특성 조사 - 다산과학기지에 GPS 가동 및 자료 분석, 타 거점에 설치	
		동토-대기간 온실기체 순환 이해를 위한 시스템과 에어로졸 및 블랙카본 관측 시스템 운영 및 거점 추가에 따른 시스템 추가 구축	- 다산과학기지와 관측 거점(제1거점, 제2거점) 메탄/이산화탄소 플럭스 및 에어로졸 관측 시스템의 연속적 운영 - 그린랜드 (제3거점) 온실기체 관측 시스템 구축 - 북극 에어로졸의 발생원, 성장기작 및 기후변화 영향 파악 - 아이스란드 레이캬비크 대학과 한-아이스란드 동토대기집중관측 거점' 추가 확보 가능성 타진	-메탄/이산화탄소 플럭스 자료 생산 및 DB 구축 -에어로졸 자료 생산 및 DB 구축 -블랙카본 자료 생산
		연구 유니트 정상 가동	- 공동연구 유니트 체제 지속 가동 및 데이터 공유, 공동분석	-자료수집/기술정립/모델제시
5차년도	2015	북극다산과학기지 및 환북극 동토층 관측 거점 정상 가동	- 스발바드/미국/캐나다/러시아/그린랜드 등 북극권 다산과학기지 및 4개 거점의 정상 운영 및 자료확보 - SIOS/IPA 연계 프로그램 지속 수행	-자료수집, 개발 요소기술 현장적용
		동토층 장기 감시 기술 및 변화량 추적 기술개발	- 동토층 관측 거점 종합 연계 USN 기반, cyber-infrastructure 기술 개발 및 적용 - 동토의 자체 공학적, 지질학적 특성 분석 - 동토층 환경변화 거동 영상 자료 확보 - GPS 자료 분석	-자료수집/결과해석
		동토-대기간 온실기체 순환 이해를 위한 시스템과 에어로졸 및 블랙카본 관측 시스템 운영 및 거점 추가에 따른 시스템 추가 구축	- 연구거점(다산과학기지, 제1,2,3거점) 메탄/이산화탄소 플럭스 및 에어로졸 관측 시스템의 연속적 운영 - 시베리아지역 (제4거점) 온실기체 및 에어로졸 및 블랙카본 관측 시스템 구축 - 북극내 동토층에서 녹은 물속에서의 입자상 물질의 특성 파악 - 아이스란드 동토대기 추가 거점 기험 관측 시작	-메탄/이산화탄소 플럭스 자료 생산 및 DB 구축 -에어로졸 자료 생산 및 DB 구축 -블랙카본 자료 생산
		연구 유니트 정상 가동	- 공동연구 유니트 체제 지속 가동 및 데이터 공유, 공동분석(DB, web-service 활용) - 알라스카대학 'Nome' 캠퍼스 내에 'KOPRI Lab' 설치 운영	-자료수집/비교분석/결과해석

3. 계획대비 달성도(선정시 제시된 연구목표)

번호	세부연구목표	달성내용	달성도(%)
1	북극 동토층 지역 관측 거점 운영 및 추가 선정	- 미국 알래스카 카운실(1 거점) 관측 거점 전력시스템 보완 - 복사계/에디 공분산 장비 정상 운영	100
2	동토층 장기 감시 기술 및 변화량 추적 기술개발	- 동토층 지역 기상/지면식생 종합 감시 요소 기술 개발 - 대기/지질학적 자료수집/기술정립 - 1거점에 설치된 USN 기반의 관측시스템을 설치하여 원격, 실시간으로 영상 및 기후 데이터 수집, 분석. - ICT/USN 극지환경 융합기술의 개발로 원격, 실시간, 광역(large area)에서의 극지 환경변화 관측	100
3	동토-대기간 온실 기체 순환 이해를 위한 시스템과 에어로졸 및 블랙카본 관측 시스템 운영 및 거점 추가에 따른 시스템 추가 구축	- 알래스카(1 거점)에 온실 기체 플럭스 관측 시스템 구축 및 운영 - 캠브리지 베이(2 거점)에 온실 기체 플럭스 관측 시스템 구축 및 운영 - 어로졸 관측 시스템 구축 및 북극에서 에어로졸의 집중 발생 이벤트 파악	100
4	연구 유니트 정상 가동	- 알래스카대학 연구팀과 데이터 공유 및 공동분석 진행 - 알래스카(1 거점) 에디 공분산 자료 KPDC 등록 - 이태리 CNR 데이터 공유 및 공동 분석	100

4. 위 연구목표(총연구기간)에서 중요도 순으로 4-5개 목표 추출 및 가중치 부여

번호	세부연구목표	가중치(%)
1	북극 동토층 지역 관측 거점 운영	30
2	동토층 장기 감시 기술 및 변화량 추적 기술개발	30
3	동토-대기간 온실 기체 순환 이해를 위한 시스템과 에어로졸 및 블랙카본 관측 시스템 운영 및 거점 추가에 따른 시스템 추가 구축	30
4	연구 유니트 정상 가동	10
계		100

KOPRI 극지연구소

※ 광주과기원 위탁과제

(1) 연구개발의 최종목표

북극 에어로졸의 물리화학적 특성 측정과 이동특성을 연구하여 장거리이동 에어로졸의 영향을 파악하고 에어로졸의 발생원, 생성기작, 이동경로, 기후변화 영향 연구를 수행하고자 한다.

(2) 연차별 연구개발 목표 및 달성도

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위	가중치	달성도
1차 년도 (2013)	북극해 에어로졸의 특성파악	아라온의 북극해 연구항해 구간을 따라서 다양한 에어로졸의 물리화학적인 특성에 대해 실시간 연속측정 수행 (2013년 9월 7일~2013년 10월 13일).	100%	100%
	북극해 에어로졸 특성과 동토층 에어로졸 특성 비교	북극해 에어로졸과 동토층 에어로졸 관측 자료 비교		
2차 년도 (2014)	북극 에어로졸의 발생원, 성장기작 및 기후변화 영향 파악	- 에어로졸의 흡습성, 휘발성 등 다양한 물리화학적 특성 데이터 분석.	50%	100%
		- 북극 에어로졸의 size distribution 분석, 형태학적 특성 및 화학적 성분 분석, 장거리이동 에어로졸의 이동특성 규명.	50%	
3차 년도 (2015)	북극 에어로졸의 발생원, 성장기작 및 기후변화 영향 파악	- Gruvebadet station에서 3 nm에서 60 nm 크기의 북극 에어로졸 size distribution 측정 (2015년 4월 1일~2015년 8월 31일) 및 분석.	50%	100%
		- 북극 에어로졸의 형태학적 특성 및 화학적 성분 분석과 장거리이동 에어로졸의 이동특성 규명.	50%	

(3) 관련분야의 기술 발전에의 기여도

기술명	기여형태
한 단계 upgrade된 에어로졸 모니터링 시스템 구축	기존 대기환경에서 사용하던 입자측정 및 분석 장치와 더불어 북극 환경에서 에어로졸입자의 종합적 분석 가능
실시간 감시기술 개발	북극환경에서 다양하게 존재하는 에어로졸 입자로 인한 환경적 피해 최소화
다양한 크기 (나노크기에서 마이크로미터크기)와 종류의 입자 특성을 실시간 직접적 측정 기술	대기환경측정사업, 반도체/부품 제조공정사업 (반도체 제조공정에서 발생하는 오염입자 모니터링), 나노입자 활용사업 (나노물질 제조공정 및 생산품의 품질관리), 클린디젤자동차 (자동차 배기입자 화학적 성분 실시간 모니터링) 등과 연관된 다양한 기업에 공통 활용
입자실시간 모니터링 전문가 네트워크를 구성	산/학/연을 포함하여 대기 에어로졸 측정 전문가 그룹 (대기오염물질 모니터링 기술 개발 기업), 수계 (물, 바닷물) 속 입자제어 및 모니터링 전문가 그룹 (정수기, 담수화 사업), 자동차 입자 배출 연구 전문가 그룹 (그린자동차 생산기업), 반도체 제조공정 중 오염입자 제어 전문가 그룹 (반도체생산 기업), 공장배출 오염입자 제거 전문가 그룹 (산업환경오염 모니터링 기관), 실내 대기오염입자 제어 전문가 그룹 (공기정화기, 이온발생기, 공기청정기 기업 등)과 개방형 혁신 연구에 기여

KOPRI 극지연구소

※ 서울대학교 위탁과제

(1) 연구개발의 최종목표

1차년도 (2015)	알래스카 카운실 플럭스 타워의 풋프린트 내에 위치한 식생 조사

(2) 연차별 연구개발 목표 및 달성도

세부연구목표	세부연구개발내용 및 범위	평가목표 및 착안점	가중치	달성도
잎 특성 관측	수종별 leaf mass per area, 광합성 파라미터(Vcmax, Jmax), 탄질비, 클로로필, 초고해상도분광반사율 관측	수종 별 잎 특성 자료 그래프	50%	80%
식생 군락 구조와 기능 관측	엽면적지수, 군락의 초고해상도분광반사율 관측	군락의 구조와 기능을 플랏별로 정량화한 그래프	50%	100%

KOPRI 극지연구소

제 2 절

북극권 동토층 생태계 특성 규명(세부과제 2)

1. 연구개발의 최종 목표

북극권 관측 거점 동토층의 물리학적 특성과 북극권 온실 기체 변동 요인인 동토층 유기탄소 및 미생물의 특성 이해

2. 연차별 연구개발 목표 및 내용

구분	연구개발목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도 (2013)	동토 온도변화에 따른 수분 유동현상 이해	- 온도, 시간에 따른 함수율 변화를 통한 지중 수분 유동현상 이해
	동토층 토양 특성과 미생물 군집 구조의 상관관계 분석 및 온도상승이 미생물 군집 구조에 미치는 영향 분석	- 알래스카 동토층의 깊이별 미생물 군집 및 토양 특성 분석 - 캐나다 캠브리지 베이의 기후 모사 실험지에서 처리 이전 T_0 상태의 토양 미생물 군집 및 토양 분석 - 그린란드 자켄버그의 기후변화모사 처리구에서 미생물 군집구조 분석
	동토층 탄소순환 연구방법론 정립 및 적용(위탁과제)	- 미생물 생태학적 연구방법론 정립 및 적용
2차년도 (2014)	해빙현상에 따른 동토의 물리적 특성 변화	- 지구물리 탐사 방법을 통한 활동층 모니터링 - 실측자료를 이용한 동토 특성 이해 - 알래스카 동토의 해방에 따른 활동층 변화와 활동층 상부의 물리적 특성 이해
	기후변화가 토양과 미생물에 미치는 영향 분석	- 토양 온도 상승 및 강수량 증가에 의한 미생물 군집구조 및 토양 유기물 특성 변화 분석 - 식물 생육기 동안 OTC설치 및 강수 증가 처리 - 모니터링 실험구에서 획득한 환경데이터 분석
	식물-미생물-토양환경-온실기체 플럭스 상관관계 규명	- 알래스카 동토층에서 획득한 1 m 깊이의 코어에서 미생물 군집구조, 토양 특성 등 분석 - 지중구조가 다른 지점에서 영구동토층을 포함한 토양 코어 샘플링 후 활성 미생물 계수 - 식생이 다른 지점에서 토양 시료 샘플링
	탄소순환/미생물 상관관계 규명 (위탁과제)	- 토양 및 식물체의 탄소/질소 안정동위원소 측정을 통해 질소이용가능도 추정 - 메탄 발생과 소멸과 관련된 미생물 생체량 분석 - 주요 식생별 체외효소 활성도 분석 - 토양미생물 활성과 온실기체와의 상관관계 확인

3차년도 (2015)	북극권 관측 지점에 대한 온도변화에 따른 동토의 물리적 특성 변화 해석	- 지구물리 탐사 방법을 통한 활동층 모니터링
	캐나다 캠브리지 베이 온도상승 챔버와 온습도 센서 운영 / 캐나다 캠브리지 베이의 온도상승 모사 3년차 토양과 미생물 군집 분석	- 식물 생육기 동안 기후변화 모사실험구 운영 - 모니터링 실험구에 NDVI 센서 설치 및 3년 동안 획득한 대기·토양 환경데이터 분석 - 유기물층과 미네랄층 토양의 물리·화학적 특성 및 활성미생물 군집 분석
	영구동토층 층위별 미생물-토양환경 상관관계 분석	- 알래스카 영구동토지역에서 토양 층위별 미생물 군집 구조, 기능 및 토양 환경 인자 분석 - 미생물 군집구조와 토양 환경 인자 사이 상관성 분석
	북극권 관측망 설치 지역의 토양 유기탄소 및 미생물 특성에 대한 종합적 분석	- 유기물이 많이 저장되어있는 지역과 건조하고 식생이 척박한 지역을 대상으로 토양 미생물 군집 분석 및 유기탄소의 분해 가능성에 따른 저장 풀 계산, py-GC/MS 방법을 이용한 유기탄소 특성 분석
	기후변화에 따른 동토층 유기물 분해 기작 규명 (위탁과제)	- 기후변화 모사 실험구 현장 방문 및 시료 채취 - 유기물 분해속도를 나타내는 지표로서 미생물 체외효소 활성도 측정 및 static chamber 방법을 이용한 온실기체 발생량 분석 - 안정성 동위원소 및 메탄의 생성과 소멸에 관련된 토양 내 미생물 생체량 분석
	캐나다 캠브리지 베이 기후변화 실험 모사구에서의 토양 지방산 분석 (위탁과제)	- 효율적인 지방회수 방법 적용을 통한 극지유래 토양 lipid marker 분석 - PLFA 지방산 라이브러리 구축을 통한 미생물 군집 분석 - 캠브리지 베이 주변 토양미생물 지질 대사체 분석을 통한 지질 대사체 라이브러리 구축

3. 계획대비 달성도(선정시 제시된 연구목표)

- 1차년도 (2013년)

번호	목 표	내 용	달성도 (%)
1	온도, 시간에 따른 함수율 변화를 통한 지중 수분 유동현상 이해	• 동토 상부의 수분이 활동층 얼음 쐐기를 통해 하부 이동 확인	100%
2	알래스카 동토층의 깊이별 미생물 군집 및 토양 특성 분석	• 알래스카 50 cm 깊이의 코어 시료로부터 박테리아 군집 분석 완료 • 영구동토층을 포함한 1 m 깊이의 코어 시료에서 토양수분, 가밀도 측정 완료	100%
3	캐나다 캠브리지 베이의 기후 모사 실험지에서 처리 이전 T_0 상태의 토양 미생물 군집 및 토양 특성 이해	• 2012년 기후변화 모사 실험 전 채취한 시료로부터 미생물 군집 구조 분석 완료 • 토양 유기탄소, 질소 등의 항목 분석 완료	100%
4	캐나다 캠브리지 베이 온도상승챔버와 온습도 센서 설치 및 운영	• 2013년 7월 초 OTC 설치 후 저장된 데이터 10월 초 수거 • 운영기간 동안 매주 강수 증가 처리, 온습도 지속적 모니터링	100%
5	그린란드 자켄버그의 기후변화모사 처리구에서 미생물 군집구조 분석	• 미생물 분석을 위해 pyrosequencing 분석 및 데이터 통계 분석	100%
6	미생물 생태학적 연구방법론 정립 및 적용 (위탁과제)	• 기후변화 모사 실험구에서 체외효소활성도 분석 완료 • 온실기체 발생량 분석 완료	100%

KOPRI 극지연구소

- 2차년도 (2014년)

번호	목 표	내 용	달성도 (%)
1	해빙현상에 따른 동토의 물리적 특성 변화	• 2014년 해빙에 따른 활동층의 하강을 지구물리 탐사(GPR탐사, EM탐사 및 전기비저항 탐사)를 이용해 지속적 관찰	100%
2	캐나다 캠브리지 베이 기후변화 모사 1년 후 토양 유기물 특성과 미생물 군집구조 변화	• 기후변화 모사 후 토양 유기탄소 분석 및 미생물 군집 구조 분석을 완료	100%
3	캐나다 캠브리지 베이 기후변화 모사 실험구와 온습도 센서 설치 및 운영	• 2014년 7월 초 OTC 설치 및 10월 초 데이터 수거 • 운영기간 동안 매주 강수 증가 처리, 온습도 지속적 모니터링	100%
4	알래스카 활동층과 영구동토층의 미생물 군집 및 토양 특성 분석	• 영구동토층을 포함한 1 m 깊이의 코어 시료로부터 미생물 군집 구조 분석 완료 • 토양 유기탄소, 총질소 등의 항목 분석 완료	100%
5	알래스카 토양 코어 샘플링/미생물의 활성 이해 및 식물 군집 - 토양유기탄소 - 미생물의 상관관계 분석	• 2014년 비저항탐사를 통한 시료 채취 지점 선정 후, 코어 시료 확보 • 식물 군집-토양 유기탄소, 미생물-토양환경인자 사이 상관관계 분석 완료	100%
6	동토층 유기물 분해 속도 및 관련 미생물, 효소의 상관관계 규명(위탁과제)	• 안정성 동위원소 분석 완료 • 미생물 생체량, 식생별 토양 미생물 체외활성도 분석 완료 • 식생별 미생물 활성과 온실기체 간의 상관관계 분석 완료	100%

- 3차년도 (2015년)

번호	목 표	내 용	달성도 (%)
1	북극권 관측 지점에 대한 온도변화에 따른 동토의 물리적 특성 변화 해석	• 지구물리 탐사 방법을 통한 활동층 모니터링	100%
2	캐나다 캠브리지 베이 온도상승 챔버와 온습도 센서 운영 / 캐나다 캠브리지 베이의 온도상승 모사 3년차 토양과 미생물 군집 분석	• 2015년 6월 말부터 9월 말까지 OTC 및 강수량 증가 유지 모니터링 실험구에 NDVI 센서 설치 완료 • 3년 동안 획득한 대기·토양 환경데이터 분석 완료 • 유기물층과 미네랄층 토양 특성 및 미생물 군집 분석 완료	100%
3	영구동토층 층위별 미생물-토양환경 상관관계 분석	• 알래스카 영구동토지역에서 토양 층위별 미생물 군집 구조, 기능 및 토양 특성 비교 분석 완료 • 미생물 군집구조와 토양 환경 인자 사이 상관성 분석	100%
4	북극권 관측망 설치 지역의 토양 유기탄소 및 미생물 특성에 대한 종합적 분석	• 4개 북극권 관측망 설치 지역 토양 특성, 유기물 저장량, 유기물 특성, 미생물 군집 조성 분석 완료	100%
5	기후변화에 따른 동토층 유기물 분해 기작 규명 (위탁과제)	• 장기적 조작실험 이후(3년) 유기물 분해속도 관련 미생물 체외효소 활성도 측정 및 static chamber 방법을 이용한 온실기체 발생량 분석 • 식물체 안정성 동위원소 및 토양 내 메탄생성균, 메탄산화세균 풍부도 분석	100%
6	캐나다 캠브리지 베이 기후변화 실험 모사구에서의 토양 지방산 분석 (위탁과제)	• PLFA 분리 정제 방법에 대하여 최적화 연구 수행 • PLFA 통합 라이브러리 구축 및 미생물 군집 분석 수행 • 미확인 미생물의 LPS를 추출하고 Lipid A 구조를 분석하여 미생물 3종에 대한 독성 평가	100%

4. 관련분야의 기술 발전에의 기여도

기술명	기여형태
동토 토양 유기탄소 분석 기술	• 현재까지 국내에서는 토양을 대상으로 pyrolysis GC/MS 분석 방법을 이용하여 유기물 특성 분석을 시도한 사례가 없었으나, 본 연구팀이 최초로 북극 동토를 대상으로 구성 유기물 유래를 파악하는데 성공적으로 활용함
동토 미생물 군집 분석 기술	• 북극권 동토를 대상으로 최신의 NGS기법을 이용하여 토양 메타지놈 분석을 수행한 것은 국내 첫 시도임 • 동토에 서식하는 박테리아 뿐만 아니라 균류와 같은 진핵생물, 바이러스까지 파악할 수 있었음
지구물리 탐사 기술	• 지구물리 탐사(GPR탐사, EM탐사 및 전기비저항 탐사)를 이용해 동토의 교란 없이 지하의 물리적 특성 지속적 관찰 • 여름에 일시적으로 녹았다가 겨울에 다시 얼어붙는 활동층을 동토층과 구분할 수 있으으며, 활동층이 알래스카 카운실에서 깊어지고 있음을 확인함
기후변화 모사 기술	• 온도상승챔버(Open Top Chamber)를 설치하고 현지 연구 기관과 공조하여 여름철 온도상승과 강우량 증가를 모사하는 실험구 지속적으로 운영 • 모니터링 실험구에 온도, 습도, NDVI 센서 등을 설치하여 기후변화 정도를 정량적으로 측정 • 강풍으로 인한 챔버 훼손, 동물에 의한 전선 절단 등 다양한 경험을 통해 북극에서 안정적을 장비를 운영하는 기술 축적
국내 최초 북극 식물 도감 제작 및 동토층 이해 확산을 위한 도서 발간	• 북극 식물에 공식적으로 국명을 부여하여 연구자들이 학명뿐만 아니라 우리말 이름으로 식물을 연구하도록 기준 제시 • 연구자뿐만 아니라 일반인들도 북극 식물을 쉽게 구분할 수 있도록 국-영문 혼용 식물 도감 제작 • 일반인들이 북극 동토층을 쉽게 이해할 수 있도록 <툰드라 이야기> 도서 발간

KOPRI 극지연구소

※ 숭실대학교 위탁과제

구분	년도	세부연구목표	세부 연구개발내용 및 범위	평가목표 및 착안점	가중치	목표 달성도
1차년도	2015	극지 토양 lipid marker 분석	토양 시료로부터 효율적인 지방 회수 방법 적용을 통한 토양 극지 토양 lipid marker 분석	PLFA marker 20 종 이상 분석 가능 여부	40%	캠브리지 베이 토양 샘플로부터 total lipid 추출 후 PLFA 분리 정제 방법에 대하여 최적화 연구 수행. 기존 연구와 본 연구의 PLFA 통합 라이브러리 구축. 총 25종의 PLFA를 라이브러리 매칭을 통해 미생물 군집 분석 수행. 달성도: 100%
			PLFA 지방산 라이브러리 구축을 통하여 미생물 군집 분석에 활용		40%	
		토양 미생물 지질 대사체 분석	토양 시료 분석법 구축 및 활용을 통한 실제 적용 개시	극지 미생물 3종이상의 지질 대사체 분석	10%	극지 토양 내 미생물들에 대한 지질라이브러리 구축의 선행 연구로써, 미확인 미생물의 LPS 추출 및 Lipid A 분리 정제 후 구조 분석을 수행. 미확인 1종(Pseudomonas sp. psy2), Pseudomonas Moorei, Pseudomonas chicoli 총 3종에 대한 구조 분석 및 독성 평가를 실시. 달성도: 100%
			캠브리지 베이 주변 토양미생물 지질 대사체 분석을 통한 지질 대사체 라이브러리 구축		10%	

KOPRI 극지연구소

제 3 절
급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현(세부과제 3)

1. 연구개발의 최종목표

- 급격히 진행되고 있는 북극권 동토층의 기후변화 현상 진단 및 메커니즘 규명 - 동토층 생태계 환경 변화 재현 및 미래 예측을 통해 과학적 근거에 기반한 국가 기후변화 대응전략 수립에 필요한 북극권 미래 환경변화 시나리오 도출

2. 연차별 연구개발 목표 및 내용

구분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도 (2013)	영구동토층 사이트 관측에 기반을 둔 국지 지면-생권 모델링 시스템 구축	- 영구 동토층 사이트 관측 자료를 활용하여 국지 지면-생권 모델 구동 및 검증 - 기후 변화 시나리오에 따른 영구동토층 내 식생 및 탄소순환 변화 예측 - 유라시아 눈덮임 변화 및 동토층 식생변화가 동아시아 지역 기후에 미치는 영향
2차년도 (2014)	북극권 토양-식생-수문 통합 기후모델 개발	- 탄소순환, 메탄 방출 모듈 검증 및 접합 - 영구동토층 지표-식생-수문 통합 모델 완성 - 동토층 생태계 내 탄소 흐름의 분석 및 탄소순환 모델결과와 비교 검증 - 유라시아 눈덮임이 동토층 융해에 미치는 영향
3차년도 (2015)	국가 기후변화 대응 전략 수립에 필요한 북극권 미래 환경변화 시나리오 도출	- 빙권 기후변화 재현 및 미래기후 종합 모의 - 대기/해양-식생-지면 종합 모델링, 기후변화 시나리오 제시 - 유라시아 눈덮임 변화의 미래예측 및 평가

KOPRI 극지연구소

3. 계획대비 달성도(선정시 제시된 연구목표)

번호	세부연구목표	달성내용	달성도(%)
1	영구동토층 사이트 관측자료를 활용하여 국지 지면-생권 모델 구동 및 검증	관측자료를 수집 분석 및 국지모델 실험 구동 완료	100
2	기후 변화 시나리오에 따른 영구 동토층 내 식생 및 대기순환 변화 예측	대기-식생 상호작용 모의실험 수행 및 정확도 파악	100
3	유라시아 눈덮임 변화 및 식생변화가 동아시아 지역 기후에 미치는 영향	계절별 눈 덮임과 식생의 연관성 확인	100
4	탄소순환, 메탄 방출 모듈 검증 및 접합	탄소순환 모듈의 성공적인 접합 여부를 확인하는 모델 실험 완료. 이를 활용하여 미래기후변화시나리오 도출	100
5	영구 동토층 지면-식생-수문 통합모델 완성	탄소순환 접합된 지면-식생-수문 통합모델 구축완료	100
6	영구동토층 및 해빙 융해에 따른 급격한 기후 변화 수치적 재현	관련연구 수행 결과 논문게재 완료	100
7	유라시아 눈 덮임이 동토층 융해에 주는 영향	5개 이상의 위성자료 합성을 통해 유라시아 눈 덮임 자료 분석 완료 및 동토층 융해에 중요한 기후인자 관련성 분석 완료	100
8	빙권 기후변화 재현 및 미래기후 종합 모의	기후변화에 빙권이 미치는 영향 분석	100
9	대기/식생/해빙/지면/수문 종합 모델링 및 기후 변화 시나리오 제시	개발된 모델을 이용하여 기후 변화 시나리오 도출 완료	100
10	유라시아 눈 덮임 변화의 미래예측 및 평가	지면-생권 모델링 시스템 구축 완료	100
11	동토층 빙권 및 생권의 변화 통계 분석	극지 지면 변화의 특성 분석	100
12	동토층 환경 변화 예측 및 북극권 미래 환경 변화 시나리오 도출	동토층 환경 변화 및 미래기후 시나리오 도출	100

4. 위 연구목표(총연구기간)에서 중요도 순으로 4-5개 목표 추출 및 가중치 부여

번호	세부연구목표	가중치
1	동토층 환경 변화 예측 및 북극권 미래 환경 변화 시나리오 도출	30
2	탄소순환, 메탄 방출 모듈 검증 및 접합	20
3	기후 변화 시나리오에 따른 영구 동토층 내 식생 및 대기순환 변화 예측	25
4	영구 동토층 지면-식생-수문 통합모델 완성	25
계		100

제 4 절

북극권 동토층 생태계 특성 규명(세부과제 4)

1. 연구개발의 최종목표

- 기후환경변화가 북극 동토층 생태계에 미치는 영향을 파악하기 위하여 북극 동토층의 생산·소비·분해 과정 및 토양 환경 이해
- 북극 동토층 생태계 연구를 위한 인프라를 구축하며, 범지구적 기후변화에 의한 생태계의 변화 예측 방법 개발
- 다양한 분야에서 국제 경쟁력 확보

2. 연차별 연구개발 목표 및 내용

구분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도	○ 식생 인자 연속 모니터링 ○ 기온상승에 의한 북극 동토의 특이 생태계 서식처 파악 ○ 동토층 토양 특성 분석 및 동결-융해 모사 실험 ○ 기후변화요인에 의한 식물대사체 변화 모니터링	○ 생물량, 방형구 내의 식생인자 분석, 전년도 대비 식생인자 등의 변화 양상 파악 ○ Freshwater temporary wetland 생태계 세부 특성 파악 ○ Melting stream slope 및 노출되는 해안 서식처 특성 파악 ○ 동토층 토양 분류 및 토성 분석 ○ 동결-융해 실험 후 동토 코어의 토양 구조 및 물질 수송 특성 변화 분석 ○ 우점식물 지하부 및 지상부 시료 채집 및 대사체 분석
2차년도	○ 식생 인자 연속 모니터링 ○ 기온상승에 의한 북극 동토의 특이 생태계 서식처 파악 ○ 동토층 토양 특성 분석 및 동결-융해 모사 실험 ○ 빙하퇴각시기에 따른 식물대사체 변화 모니터링	○ 생물량, 방형구 내의 식생인자 분석, 전년도 대비 식생인자 등의 변화 양상 파악 ○ Melting stream slope 및 노출되는 해안 서식처 세부 특성 파악 ○ 알래스카 동토층 토양 분류 및 토성 분석 ○ 동결-융해 실험 후 동토 코어의 토양 구조 및 물질 수송 특성 변화 분석 ○ 우점식물 생육지 환경요인 조사 ○ 우점식물 지하부 및 지상부 시료 채집 및 대사체 분석 ○ 토양 진균류 및 선충류 군집 시료 채집 및 sterol 분석

구분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
3차년도	○ 식생 인자 연속 모니터링 ○ 기온상승에 의한 북극 동토의 특이 생태계 서식처 파악 ○ 동토층 토양 특성과 동결-융해 교차순환에 의한 동토의 구조적 특성 이해 ○ 기후변화요인과 빙하퇴각시기에 따른 식물대사체 변화 종합	○ 기후변화에 따른 생물량, 방형구 내의 식생인자 분석, 전년도 대비 식생인자 등의 변화 양상 파악북극 식생의 변화 양상 파악 ○ 북극 동토층 특이 서식처의 상호연관성 파악 ○ 동토층 토양의 구조 특성 종합 비교 분석 ○ 동결-융해 교차순환 장기 모니터링에 의한 토양 구조 변화의 종합적 분석 ○ 토양미생물 pyrosequencing 결과와 sterol 결과 비교 분석 ○ 토양생물군집과 식물 대사체 변화 결과 종합

3. 계획대비 달성도(선정시 제시된 연구목표)

번호	세부연구목표	달성내용	달성도(%)
1	동토의 특성 파악 및 알래스카 장기모니터링	○ 알래스카 활동층 및 영구동토층에 이르는 토주를 확보하여 층위분석 및 화학성 분석 완료 ○ 입자분포모델 및 수분보유곡선 예측 ○ 유입된 질소가 연안에서 제거되는 기작 제시	100
2	환경요인과 식물의 공간적 분포 연관성 연구	○ 출현 식물종의 분포 특성을 geostatistic 기법 이용해 분석 ○ 격자 지점 환경요인 측정 ○ 식생 분포와 환경 요인과의 연관성을 다양한 data mining 방법을 이용해 도출	100
3	북극이끼장구채 번식특성의 진화적 양상 분석	○ 북극이끼장구채 성체제 및 크기, 성비, 성적 자원분배 분석	100
4	북극 피자식물종의 계통과 생태특성 자료 추출과 분석	○ 식물지와 웹정보 확보 ○ 다양한 수준의 계통과 생태정보 추출	100

5	식물 대사물질 변화 분석 및 북극 먹이망 관계 파악	○ 기후변화 모사 챔버에서 민담자리 꽃나무 (*Dryas integrifolia*)와 토양을 채집하여 식물대사물질 및 토양 streol 분석을 실시함 ○ 채집된 순록 배설물에 대하여 LH-PCR 분석을 수행한 결과, 연도별·지역별 차이에 따라 차이가 있음이 확인함	100
6	동토층 토양 특성 분석 및 동결-융해 모사 실험	○ 동결-융해 교차순환의 영향에 의한 토양 내 탄소/질소 역학변화를 현장 토주실험을 통해 파악하고, 토양층위별 온실기체 동태를 평가함 ○ 질소안정성동위원소를 이용하여 질소가 영구동토 토양탄소에 미치는 영향 이해 ○ 영구동토의 융해정도에 따른 수리특성 비교	100
7	식생 환경인자 연속 모니터링	○ DGPS를 이용한 대표 식생 군락의 식생 공간 분포 조사 ○ 데이터 마이닝 기법을 이용한 환경 요인들과의 연관성 분석	100
8	빙하퇴각시기에 따른 식물대사체 변화 모니터링	○ 우점식물 지하부 및 지상부 시료 채집 및 대사체 분석 ○ 토양 시료 채집 및 진균류 군집 분석	100
9	스발바르 순록의 섭식활동에 의한 식물 대사물질 변화 분석	○ 스발바르 니알슨 다산기지 주변 exclosure 안, 밖에서 북극콩버들 (*Salix polaris*) 잎 채집 분석 ○ 야외 인위섭식 실험을 통한 주기별 북극콩버들 (*S. polaris*) 잎 채집	100
10	알래스카 영구동토의 특성 및 작용 연구	○ 알래스카 영구동토 토양의 수리특성을 실내 및 현장실험 병행을 통해 분석, 혼성치환 실험으로 물질수송 특성을 이해함	100

번호	세부연구목표	달성내용	달성도(%)
11	식생 환경인자 연속 모니터링 및 주요 식생의 nurse plant effect 연구	○ 식생 공간 분포 조사 및 환경 요인들과의 연관성 분석 ○ 북극종꽃나무외 외 2종의 nurse effect 특성 및 서식처 종다양도 파악	100
12	북극식물의 분류, 생태적 다양성과 진화 연구	○ 북극 툰드라 식물에 대한 최신 웹사이트 정보와 문헌 확보와 함께 피자식물종의 계통, 번식생태, 위기등급에 대한 자료 추출과 분석 ○ 현장에서 개화 중인 식물의 꽃 관찰, 동정, 채집 ○ 개화 중인 꽃의 잠재 수분매개자 관찰, 동정, 채집 ○ 식물과 매개곤충 간의 네트워크 작성	100
13	북극다람쥐꼬리의 서식 분포 특성 및 균근과의 공생 관계 규명	○ 북극다람쥐꼬리 서식환경 세부 특성 파악 ○ 북극다람쥐꼬리와 공생하는 균근 특성 규명	70
14	기후변화요인과 빙하퇴각시기에 따른 식물대사체 변화 분석	○ 인위 섭식 실험, exclosure 내·외 식물 채집 및 대사물질 분석 ○ 토양 미생물 (세균, 진균류) 군집 변화 다변량분석 ○ 식물 대사체 다변량분석 및 주요 변화 물질 탐색	100

4. 중요 연구 목표 및 가중치 부여

번호	세부연구목표	가중치(%)
1	동토의 물리화학적 특성 및 구조에 대한 데이터베이스 구축	25
2	북극 생태계의 대표 식생 분포와 환경인자 규명 및 nurse effect 연구	25
3	북극 식물상의 계통/생태 다양성 및 진화 연구	25
4	환경요인의 변화 및 빙하퇴각시기에 따른 식물대사체 변화 종합	25
계		100

KOPRI
극지연구소

제 5 장

연구개발결과의 활용계획

KOPRI
극지연구소

KOPRI
극지연구소

제 1 절
북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발(세부과제 1)

○ 북극권 연안을 대상으로 한 북극권 기후연구 측정시스템 확보를 통한 활동영역 확대 및 관련 연구 분야 (대기질, 동토층, 생물종다양성 연구, 전송기술 등) 확대
- Ny-Ålesund에서 자동실시간 연속 이산화탄소,메탄 연속관측장비를 구축함으로서 Zeppelin GAW 관측소와 비교관측 연구 수행의 능력 향상
- Ny-Ålesund에서 최초로 실시간 메탄플럭스 관측과 연구를 위한 한-이태리간 협력 체제 구축

○ 동토층의 융해로 인한 지중, 지표, 대기층의 교란 및 인간에게 미칠 수 있는 영향 평가 자료 확보와 대응책 마련 정책 제시

○ 대기-동토-해양-모델링의 융합연구를 통하여 북극권 기후변화 관련연구에 대해 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, EU 그룹 등과 대등한 위치 또는 수월성 연구 분야 역량 확보 및 북극활동의 위상 제고

○ 극지형 원격 환경변화 관측 시스템 IT 기술 및 장비 개발의 독자 기술 확보

○ 향후 북극 전 해역 탐사 추진에 필요한 중.장기 국제공동연구시스템 구축에 활용 자료 확보

○ 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의·예측할 수 있는 모형 개발을 통해 북극권의 기후변화 뿐 아니라, 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용

○ 관측 거점에서의 USN 기반의 실시간 원격 환경 수집 시스템과 플럭스 관측 시스템을 활용한 무인 거점 관측지로의 관측 시스템 확대를 통한 북극 환경변화 감시

○ 본 과제로 설계.개발된 결과물인 USN 기반의 실시간 원격 환경 수집 시스템은 원격에서 인간의 개입 없이 환경정보를 수집하는 분야에 널리 활용 가능할 것으로 사료됨

○ 자연 환경을 실시간으로 원격에서 수집하기 위한 기술로써 해양극지 뿐 아니라 자연환경, 기후 등을 연구하기 위한 신뢰성 있는 데이터를 수집하기를 원하는 응용 분야에 널리 활용될 수 있을 것으로 판단됨.

○ 광주과기원 위탁과제

- 북극 에어로졸 입자의 흡습성과 휘발성을 파악하고 화학적 조성을 간접적으로 예측

함으로써 입자의 발생원, 생성경로, 성장기작, 물리/화학적 변화 등의 역할을 파악하는데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

- 북극 에어로졸 입자의 구름형성 응축핵 모니터링을 통해 에어로졸의 구름형성 및 기후변화 역할에 대한 과학적 이해증진에 도움이 될 것이다.
- 대기 중 황사, 미세입자, 극초미세입자와 나노입자의 발생원, 생성경로, 성장기작 등을 규명하여 환경오염입자 자료를 제공할 수 있다.
- 한반도에 발생하거나 또는 동아시아 장거리 이동 에어로졸입자 (황사입자)의 대기 중 거동 실시간 파악 및 국제 환경협약 및 대책 수립에 공헌할 수 있다.
- 대기 에어로졸의 종합적인 화학적 성분결과와 구름형성응축특성 자료를 활용하여 기후변화 역할 규명에 활용할 수 있다.
- 미세입자의 종합적 특성을 실시간으로 측정하여 입자로 인한 환경적, 경제적 피해 최소화를 위한 실시간 감시기술과 경보기술에 활용할 것으로 기대된다 (일반 대기 오염 감시기관에서 활용).
- 공장에서 배출되는 입자 측정 및 제거를 위한 화학적 성분 실시간 감시기술에 활용할 것이다.
- 자동차 배출입자, 농작물 연소입자, 산불 등에서 배출되는 입자의 실시간 종합적 특성 감시기관에서 활용할 수 있다.
- 실내 발생 에어로졸 화학적 조성 실시간 모니터링에 활용할 수 있다 (공기정화기 제조기업).
- 다양한 매체내 존재하는 입자의 실시간 화학적 성분 측정기술에 활용될 수 있음. 즉, 수계, 바닷물 속 존재하는 입자의 화학적 조성 실시간 측정에 활용할 것으로 생각된다 (담수화 기업, 정수기, 물정화기 제조업체 등).
- 반도체제조 공정에서 발생하는 입자의 실시간 화학적 성분 모니터링에 활용할 수 있다 (반도체 제조기업, 부품 제조업체 등).
- 다매체 존재 나노물질의 화학적 성분 실시간 감시로 자연계내 매체간 이동/거동 및 환경영향 파악에 활용할 수 있다.
- 유해성 판단을 위한 입자의 화학적 성분 자료 실시간 제공하는데 이용할 수 있다 (보건의료업계에서 활용).
- 나노입자을 포함한 입자 제조업체 /화학적 성분 입자 제조를 위한 중요한 도구로 활용될 수 있다.
- 대기 중 방사능 오염물질 감시 및 경보 산업에 활용 될 수 있다.

○ 서울대학교 위탁과제

- 동토층 식생의 광합성 변수 및 잎 특성에 대한 관측결과는 향후 동토층의 탄소순환 모형을 개발하는데 필수적인 자료로 활용될 것이다.
- 동토층 식생의 분광특성에 대한 자료는 위성영상 기반의 생태계 모니터링의 검증자료로 활

용될 수 있다.

- 동토층 식생의 엽면적지수는 위성영상 기반의 엽면적지수 예측 결과들을 검증하는데 활용될 수 있다.
- 동토층 식생의 잎과 군락 규모의 구조와 기능에 대한 연구는 매우 미비하다. 목본류와 달리, 이끼류는 잎의 구조와 기능을 관측하는 것이 기술적으로 난해하다. 이 과제를 통해 알래스카 카운실 지역에 서식하는 여러 이끼, 관목류들의 구조를 관측하는 방법을 제안함으로써, 향후 다른 연구그룹들에서의 발전에 기여할 것이다.
- 동토층 탄소순환에 대한 기초자료 구축을 통해, 향후 대한민국이 극지 연구에서 글로벌 리더쉽을 취하는데 기여할 것이다.

KOPRI
극지연구소

제 2 절

북극권 동토층의 환경변화 특성 규명(세부과제 2)

○ 기후변화 연구는 전지구적 수준의 연구가 필요하여 다양한 형태의 국제공동연구가 존재하는데, 본 과제의 결과물을 토대로 향후 국제공동연구에 주도적으로 참여

○ 본 연구과제에서 획득한 토양 시료를 미국 Argonne National Laboratory와 연계하여 Near Infrared (NIR) spectroscopy 분석예정. 환북극권 토양의 유기물 양을 NIR 분석으로 추정하려는 시도에 참여

○ 연구 대상지역 동토의 물리적 특성과 토양 유기탄소의 특성을 이해하고, 이들 특성과 이산화탄소 플럭스의 관계를 이해함으로써 기후변화 예측 모델에 근간이 되는 과학적 자료 제공

○ 온실기체, 온도 변화, 생물 상의 변화 및 생산된 메타데이터는 KPDC(Korea Polar Data Center)에 기탁하여 데이터베이스화 할 예정이며 DB를 동토층 관련 국제기구(International Permafrost Association)를 통해 세계 연구자들에게 공개하여 지속적인 모니터링에 이용

○ 북극권 연구를 통해 획득한 지식을 강연 또는 집필 작업을 통해 일반인에게 널리 알릴 계획임

○ 본 과제를 통해 발간한 도서 <극지과학자가 들려주는 툰드라 이야기>와 <북극 툰드라 식물>을 활용하여 북극 동토층 연구 홍보 및 대국민 관심 유도

○ 우리나라의 연구 활동 영역을 한반도를 넘어서 북극 전역으로 확대함으로써 청소년의 세계관 확장에 기여 및 국민적 자긍심 고취

○ 북극이사회 <북극 모니터링 및 평가 프로그램, AMAP> 전문가 보고서에 데이터를 제공하는 등 국제기구에 연구 성과로 기여

○ 미래 지구 온난화와 같은 환경적 변화로 인해 나타날 수 있는 생태계의 변화를 예측하는데 균주의 지방 표지 인자 정보를 활용할 수 있을 것으로 예상됨.

○ 지방 대사체 프로파일링 기술을 이용한 신규 토양 미생물의 대사산물 규명을 통해 뛰어난 생리활성을 가진 유용 생물 소재 확보 기술에 적극 활용될 수 있음.

○ 토양 내 유기물 변화의 관측을 통한 토양과 토양 미생물 및 식물 사이의 상호적인 관계를 파악함으로써 향후 기후 변화에 따라 미생물 및 식물이 받을 수 있는 영향을 예측하는데 활용될 수 있음.

○ 본 연구에서 수행된 지방산 분석법은 국내 일반토양에도 적용하여 추가적인 연구를 수행할 수 있으며 친환경 제제나 오염원들에 의한 토양 미생물 군집 변화 연구 등에도 충분히 활용될 수 있음.

(1) 기술적 측면

- 본 연구의 연구결과는 캠브리지 베이 미생물 연구에서 동토층과 토양 미생물 균주

들에 대한 체계적인 연구로 토양의 유기물 변화를 모니터링하며, 토양 미생물을 통한 저온 미생물의 기능 및 대사체 분석에 활용될 수 있음.
- 본 연구에서 발견된 지방 표지 인자나 특정 균주의 지방 표지 인자 정보는 이후 기후 온난화 정보 시에 유용한 표지 인자로 활용될 수 있으며, 이를 통한 지구 온난화로 인한 미래 생태계 변화의 예측 등에 활용될 수 있음.
- 본 연구를 통하여 주로 유전체 사업에 초점을 맞춘 국내 연구의 다각화에 기여할 수 있으며 산업적으로 중요한 균주 및 단백질의 원천으로써의 극지 연구소의 위상도 올라갈 것으로 보임.

(2) 경제적·산업적 측면
- 전술한 바와 같이 캠브리지 베이의 토양 내 미생물 연구 플랫폼의 구축은 다양한 토양 미생물 연구에 활용되어 토양 미생물 연구의 저변 확대 및 산업적 영향력을 극대화 할 것임. 그 결과로 풍부한 자원의 보고이지만 접근이 쉽지 않고 어렵게 느껴졌던 연구에 대한 인식 전환과 유전체 기반의 연구를 대사체/단백질 기반의 연구들로 다각화 할 수 있는 계기가 될 수 있을 것으로 기대함.
- 동토층의 유기물 변화의 관측은 토양 미생물의 성장에 영향을 미치는 인자를 파악할 수 있는 좋은 자료가 됨으로 미래의 기후 변화에 따른 영향을 예측할 수 있는 근거가 되어 식량자원이나 관광자원 관련 산업에 큰 영향을 미칠 것으로 사료됨.

KOPRI 극지연구소

제 3 절
급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현(세부과제 3)

○ 북극 기후변화 원인 규명 및 모델 개발을 통한 미래 온난화 하에서 전구 기후 예측에 활용

○ 한반도 및 동아시아의 중장기 기후 예측에서 극지의 역할 자료 제시에 활용

○ 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의/예측할 수 있는 통합 모형 개발을 통해 북극권의 기후 변화 뿐 아니라 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용

○ 지구시스템 모델링을 통해 극지 빙권 기후 시뮬레이션과 실측 환북극 영구동토층 관측 자료의 비교/검증을 통해 현재 빙권 기후변화 이해 수준을 정확히 진단하고, 정확한 미래 예측을 위해 어떠한 영구동토층 관측자료 획득에 집중해야 하는지에 대한 진단정보 제공

KOPRI
극지연구소

제 4 절

북극권 동토층 생태계 특성 규명(세부과제 4)

○ 기후변화에 따른 북극권 극지 동토의 물리화학적 특성 모니터링을 통한 극지 동토 환경의 기본 DB 제공

○ 극지 동토생태계의 식생, 토양탄소 등의 정보를 생태계 모델링에 접목하여 보다 정확한 기후변화 시나리오 예측 모델 구현에 활용

○ 극지 동토를 중심으로 한 물질 거동 특성 연구를 기반으로, 연구 거점이 연안에 인접해 있다는 점을 고려하여 연구거점과 연안을 잇는 횡단 관측 연구로 확대할 필요 있음.

○ 극지에서 적응한 식물들의 분포 및 환경요인간의 관계를 바탕으로 기후변화에 의한 북극생태계 생물상 변화의 예측과 대응방안 수립 가능

○ 극지에서의 생물다양성과 더불어 주요 식물종과 매개곤충 간의 상호작용에 대한 이해는 더더욱 미비하므로 이에 대한 장기 조사가 필요할 것으로 사료됨.

○ 식물 대사물질 변화 등의 기초자료와 북극 동토층에 서식하는 초식자에 의한 식물의 적응 기작 등을 연구할 수 있는 기초자료를 제공할 수 있음.

KOPRI 극지연구소

KOPRI
극지연구소

제 6 장

연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

KOPRI
극지연구소

KOPRI
극지연구소

○ 미국 노던아리조나대학 Ted Schurr 교수를 중심으로 미국, 독일, 영국, 스웨덴 등의 연구자들이 Permafrost Carbon Network을 결성하고 Study of Environmental Arctic Change (SEARCH) project의 일환으로 동토층에 저장되어 있는 유기탄소량을 분석

○ 미국 에너지성의 지원을 받는 NGEE (Next-Generation Ecosystem Experiments)-Arctic project는 지난 5년간 알래스카 Barrow를 중심으로 동토층 모델링과 현장 관측을 수행했고 2016년부터 카운실 연구지가 위치한 수어드 반도에서 동토층의 기후 변화와 이로 인한 생태계 변화를 모니터링

○ 독일은 PAGE21(Changing Permafrost in the Arctic and its Global Effects in the 21st Century 과제는 2011년 6월부터~2016년 5월까지 5년간 수행하며, 육상에서 해양으로의 환경 천이에 따른 동토 생태 연구 수행

○ 캐나다는 극지연구를 담당하는 정부부처인 북극지식청(Polar Knowledge Canada)를 신설하고 북극 동토층 변화가 풍경, 물, 야생 생물, 이러한 자원에 의존하는 북부 사회와 산업에 미치는 영향을 중심으로 연구 과제

○ 국제공동 네트워크인 Global Terrestrial Network for Permafrost(GTN-P)에서는 북극을 포함한 125개 지역의 영구동토층 활동층의 깊이, 온도, 온실 기체 등의 관측자료 확보로 영구동토층의 변화 추적

○ 영구동토층에서 일어나는 기후 변화를 관측하고 모니터링하며 예측하기 위한 전 지구적 네트워크를 구성하고 데이터 공유

○ IEEE Std 802.15.4TM-2006 Part 15.4 : Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY)Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).

○ ZIGBEE SPECIFICATION : ZigBee Document 053474r17.

○ Ung Heo “Gateway Architecture for Ubiquitous Access to ZigBee-Based Sensor Networks” .

○ ZigBee Alliance, www.zigbee.org.

○ Chi Kwan Lee; Sinan Li; Hui, S.Y.; , “A design methodology for smart LED lighting systems powered by weakly regulated renewable power grids,“ Smart Grid, IEEE Transactions on , vol.2, no.3, pp.548-554, Sept. 2011 doi: 10.1109/TSG.2011.2159631.

○ Drew Gislason, “ZigBee Wireless Networking” .

○ Shahin Farahani, “ZigBee Wireless Networks and Transceivers” .

○ Ata Elahi, Ph.D. with Adam Gschwender, “ZigBee Wireless Sensor and Control Network” .

○ Ember Corporation, EmberZNet Application Developer’s Reference Manual,

October 2009.
○ Analog Devices, http://www.analog.com/
○ ember, http://www.ember.com/
○ DaintreeNetworks, http://www.daintree.net/
○ NAL research corporation, http://www.nalresearch.com/
○ 국제동토층네트워크 (Global Terrestrial Network on Permafrost) : 국제영구동토층협회 (International Permafrost Association, IPA) 주도하에 1990년대 시작된 민간 동토층모니터링 네트워크로서 전지구지표관측망 (Global Terrestrial Observing Network, GTOS) 및 전지구기후관측시스템 (Global Climate Observation System, GCOS) 조직과 연계되어 있음

○ GTN-P는 기존에 주로 미국, 캐나다, 러시아 대학 및 연구소에 의해 운영되던 CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) 및 TSP (Thermal State of Permafrost) 프로그램을 기반으로 하되 시공간적 대표성을 보완하고 체계적인 모니터링 체제로 전환하기 위해 제안되었음

○ 2013년 5월 스위스 제네바에서 개최된 제 1차 GTN-P 워크샵에서는 GTN-P 데이터베이스시스템을 공개하였고 우선적으로 2012년부터의 전지구 동토층 모니터링 자료를 이 DB에 저장/품질관리/배포하도록 구성하기로 하였음

○ 본 과제와 관련하여 환북극 동토층 환경변화 모니터링 데이터를 GTN-P와 연계한다면 기존의 동토층 모니터링 데이터를 확보하고 동토층 모니터링 수준을 빠른 시일 내에 끌어올릴 수 있을 것으로 기대함

기술명	기술 상태	선진국 대비 수준
식생 모델 개발 기술	스웨덴의 lund university, 미국의 harvard university에서는 상세 격자로 식생을 모의할 수 있는 식생 모델 개발이 활발히 진행 중이나, 우리나라는 아직 초기 단계임	10%
북극권 식생 변화 분석 기술	미국의 Univ. Alaska Fairbank나 Russia의 Petersburg State University에서는 북극권의 장기간 식생변화를 관측하고 기후 변화와의 상관관계를 분석하고 있으나, 우리나라에서는 아직 초기 단계임	20%
식생/지면/해양-대기 모델 접합 기술	미국, 유럽 등 많은 나라의 연구기관에서 접합 모델 개발을 진행 중이나 그 초점이 극지에 맞춰져 있지 않아, 선진국과의 격차가 크지 않음	80%

워크샵 결과보고서

작성일 : 2011. 11. 8

부 서 명	극지기후연구부	일 시	2011. 11. 7
참가 인원	총 35명(이방용외 34명)	장 소	극지연구소 15층 세미나실/외부
토의 주제	교과부의 '환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구' 사업 참여자와 위탁연구 책임자 및 참여자, 소외 전문가 및 관련자들이 모여, 연구수행에 대한 진행사항 자체 점검 및 2012년 업무 계획 논의와 자료 공유, 향후 계획 수립 등		

워크샵을 통한 도출 결과	○ 분야별 사업 수행 발표 및 점검, 학술활동과 국제 공조활동 강화 ※ 2011년 연구사업 진행사항 요약 보고 (극지연구소 이방용) ※ 1주제: 북극권 동토층 환경변화 관측거점 확보 및 관측기술 개발 (극지연구소 이방용) ※ 2주제: 북극권 동토층의 환경변화 특성 규명 (극지연구소 이유경) ※ 3주제: 급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현 (극지연구소 김백민) ※ 4주제: 북극권 동토층 생태계 특성 규명 (서울대학교 이은주 ○ 극지 지구물리 탐사 기술 발표 ※ 북극에서의 자료처리 기술 (배재대학교 손호웅) ※ Superconducting Gravimetry - Principle and Applications to Geodynamics and Geohazard (캐나다 캘거리대학교 김정우) ○ Canada Cambridge Bay 소개 ※ 캐나다 동토지역에서의 기초환경 답사 결과 보고 ○ KAMP 위탁과제 발표 (미국 알래스카주립대학교 김용원)

건의 사항 등	없음

KOPRI 극지연구소

세미나 결과보고서

작성일 : 2011. 11. 14

부 서 명	인프라운영부	일 시	2011. 11. 14
참가 인원	총 14명(이방용외 13명)	장 소	극지연구소 15층 세미나실/외부
토의 주제	알래스카 카운실 지역에 설치된 USN 시스템의 가동현황 및 작동방해 요소 도출과 개선방향 진행 논의		

워크샵을 통한 도출 결과	○ 극지연구소의 알래스카 동토층을 비롯한 환북극 관측시스템 설치와 관련 기술개발에 대한 필요성 및 현황, 개선방향에 대한 개요 발표(극지연구소 이방용) ○ 알래스카 동토층 설치 운영 중인 USN 시스템 현황 및 자료 확보 현황(한양대학교 이찬길 교수와 참여자 등 발표) - 현장에서 운영 중인 온/습도 자료의 신뢰도 점검을 위한 reference 센서 동반 설치와 테스트 필요성 제안 - Mother gateway와 Child nodes 간의 통신 두절 현상에 대한 배터리 long-run 기능 보완 및 backhaul 체계 개선 필요성 제안 ○ 현재 개발된 Zigbee 무인 영상 촬영시스템의 개요 및 현황(네오씨-텍 함석현 대표 발표) - 촬영하고자 하는 대상의 사이즈 또는 거리 등 선정 및 focusing 기능 부여의 필요성 제안 - 촬영된 영상의 해상도 및 자료 전송 기능에 대한 기술적 업그레이드 필요성 제안 ○ GTN-P(Global Terrestrial Network on Permafrost)에 관한 국제동향 안내 및 우리나라 참여방안 제안(극지연구소 이유경) - 극지연구소의 동토층 연구에 대한 국제연구프로그램 또는 연구체계와의 동등성 확보를 위한 구체적 접근 필요성 제안 등 ○ 상기 관련 획득 자료 분석, 운영 상 문제점 도출 및 개선방향 논의 - 국내 한양대학교 내 테스트베드 마련과 극지역 동토층에서와의 유사 환경 조성으로 사전 충분한 테스트를 거쳐 완벽한 시스템을 현장에 구축하는 것이 필요함 - 시공간적으로 접근이 용이하지 않은 동토층 현장에서 양질의 자료를 정확하게 전송받기 위한 하드웨어 제어용 소프트웨어 개발과 적용 - 알래스카 현장에서의 완벽한 시스템 구축을 롤 모델로 하여 향후 캐나다, 스발바르, 그린란드, 러시아 등의 관측 거점에 적용해야 함

건의 사항 등	없음

워크샵 결과보고서

작성일 : 2012. 03. 19

부 서 명	극지기후연구부	일 시	2012. 03. 16
참가 인원	총 30명(이방용외 29명)	장 소	극지연구소 15층 대회의실/외부
토의 주제	**목적:** '환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구 (PN11060, 총괄책임자: 이방용)' 사업 참여자와 관련자들이 모여 사업의 진행사항 자체점검 및 업무수행내용 발표와 자료 공유, 향후계획 수립 **내용:** - 2011년 과제 분야별 사업 수행내용 발표 및 점검 - 2012년 하계 북극권 현장연구 수행계획 점검 - 향후 동토지역 연구계획 수립		

워크샵을 통한 도출 결과	○ 분야별 사업 수행 발표 및 점검, 학술활동과 국제 공조활동 강화 ※ 2011년 연구사업 총괄 진행사항 요약 보고 (극지연구소 이방용) 및 세부 과제별 발표 ■ 제1주제: 북극권 동토층 환경변화 관측거점 확보 및 관측기술 개발(위탁과제 포함) - 극지연구소 이방용 ■ 제2주제: 북극권 동토층의 환경변화 특성 규명 - 극지연구소 이유경 ■ 제3주제: 급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현 - 극지연구소 김백민 ■ 제4주제: 북극권 동토층 생태계 특성 규명 (위탁과제 포함) - 서울대학교 이은주 ○ 극지 지구물리 탐사 기술 발표 ※ 북극권 동토층 지반특성 연구 (배재대학교 손호웅) ○ 논의 - 연구현장 사이트에 대한 체계적 접근 정리필요성 강조 - 획득되는 자료의 QC시스템 개발 및 적용 필요 - 연구현장에 대한 정밀한 공통 기상자료 획득방안 적용 필요 - 기타 사업수행 기간에 부합되는 현장 조사기간 도출 및 적용 필요

건의 사항 등	없음

워크샵 결과보고서

작성일 : 2012. 11. 01

부 서 명	극지인프라운영본부	일 시	2012. 10. 31
참가 인원	총 25명(이방용외 24명)	장 소	극지연구소 15층 대회의실/외부
토의 주제	**목적:** '환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구' (PN12060, 총괄책임자: 이방용) 사업 참여자와 전문가들이 모여 사업의 진행사항 중간 점검 및 자료 공유, 향후계획 수립 **내용:** - 2012년 과제 분야별 사업 수행내용 발표 및 점검 - 향후 동토지역 연구계획 수립		

워크샵을 통한 도출 결과	○ 워크샵 개요 총괄 발표 - 극지연구소 이방용 ○ 분야별 수행업무 및 향후계획 발표 ■ 제1주제(60분) - 북극권 동토층 환경변화 관측거점 확보 및 관측기술 개발 : 윤영준 - 위탁과제(광주과학기술원) : 박기홍 - USN 기술개발(한양대학교) : 이찬길 ■ 제2주제(30분) - 북극권 동토층의 환경변화 특성 규명 : 극지연구소 이유경 ■ 제3주제(30분) - 급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현 : 극지연구소 김백민 ■ 제4주제(30분) - 북극권 동토층 생태계 특성 규명 : 서울대학교 이은주(노희명), 연세대학교 강호정 사업 포함 ○ 향후 과제수행 및 협력방안 토의 ○ 논의 - 사업의 상위평가에 대한 안내 및 성과 확보 방안 논의 - 사업별 수행주제에 대한 정보교류 및 분석기법 공유 - 연구현장에 대한 효과적인 운영과 개선방안 도출 등

건의 사항 등	없음

워크샵 결과보고서

작성일 : 2013. 06. 12

부 서 명	극지인프라운영본부	일 시	2013. 06. 11
참가 인원	총 30명(이방용 등 29명)	장 소	연구소 본관3층 회의실/외부
토의 주제	**목적:** '환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구' (PN12060, 총괄책임자: 이방용)(세부사업 PN12061, 12062,12063 포함) 사업과 '북극권 동토 연구 인프라를 활용한 공동연구 네트워크 구축' (PE13140, 연구책임: 윤영준) 사업 책임자 및 참여자와 전문가들이 모여 사업의 진행사항 중간 점검 및 자료 공유, 향후계획 수립(내부결재 극지인프라운영본부-114('13.6.10)) **내용:** - 2013년 사업 단계평가 자체점검 및 분야별 사업 수행내용 논의 - 향후 동토지역 연구 및 관측거점 운영 계획 수립 등 논의 **참석자 소속기관:** 극지연구소(인프라운영본부, 기후연구부, 생명과학연구부, 미래전략실, 기획부장, 연구관리팀 등), 서울대, 연세대, 한양대, 캐나다 캘거리대, 네오씨-텍, 지오북(자료 별첨)		

워크샵을 통한 도출 결과	○ 워크샵 총괄 안내 및 전체 발표(극지연 이방용, 총괄사업책임자)(30분) ▪ 제1주제 논의(30분) - 북극권 동토층 환경변화 관측거점 확보 및 관측기술 개발(극지연 윤영준) - 위탁과제(포함) ▪ 제2주제 논의 - 북극권 동토층의 환경변화 특성 규명(극지연 이유경) ▪ 제3주제 논의 - 급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현(극지연 김백민) ▪ 제4주제 논의 - 북극권 동토층 생태계 특성 규명(서울대 이은주) ○ 향후 과제수행 및 협력방안 토의 ○ 단계평가시 지적사항 및 제언사항 종합검토

건의 사항 등	없음

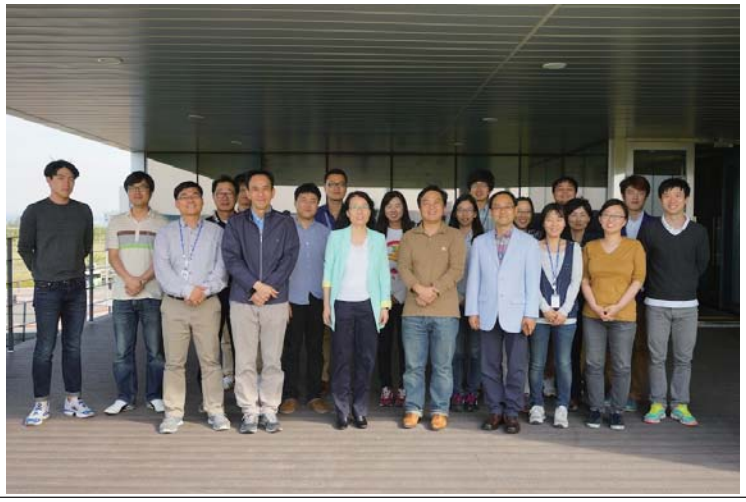
워크샵 결과보고서

작성일 : 2013년 10월 02일

부 서 명	북극 환경 자원 연구센터	일 시	2013년 09월 27일
참가 인원	23명	장 소	극지연구소 3층 세미나실/외부
토의 주제	2013년 1차 환북극 동토층 환경변화 연구사업 진행논의		

토의 주제	**목적** :북극권 동토층 지역에 관측거점을 확보하고 환경변화에 대한 진단과 미래 예측을 위한 연구사업인 '환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구'(PN13080, 총괄책임자 이방용, 세부과제 PN13081, PN13082, PN13083, 서울대학교 제4세부과제) 와 '북극권 동토 연구 인프라를 활용한 공동연구 네트워크 구축' (PE13140, 연구책임자: 윤영준) 사업의 성공정인 수행을 위하여, (1) 2013년도 사업의 진행사항 자체점검 (2) 업무수행 발표와 자료공유, 향후계획 수립 (관련 내부결재 : 극지기후연구부-504, 2013.09.10) **내용:** - 2013년도 3차년도 사업 자체 점검 및 분야별 사업내용 논의 - 세부과제간 정보 공유로 결과의 수월성 제고 방안 논의
워크샵을 통한 도출 결과	○ 워크샵 안내 및 목적 소개 -총괄과 각 세부과제: 3차년도 과제 수행의 목적 및 성과 재고 방안 발표 -분야별 (사업의 4대 주제) 3차년도 수행 업무 및 향후 계획 발표 ○ 향후 과제 수행 및 협력방안 토의 : -세부과제간 협력강화로 동토 연구 네트워크 강화 -현장 사이트의 특성상 유지 관리 및 현장연구 계획 수립의 적절성 확인 -현지 인력 활용의 편의성 제고 논의

건의 사항 등	없음



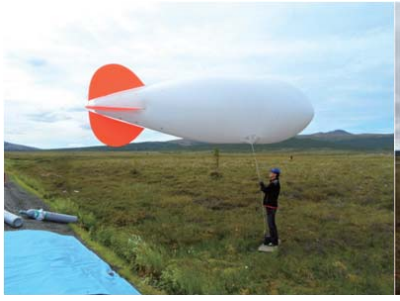
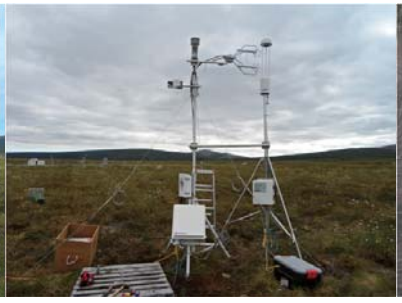
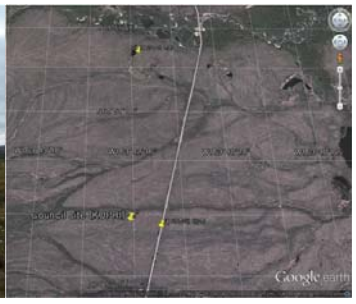
워크샵 결과보고서

작성일 : 2014. 08. 08

부 서 명	북극환경·자원연구센터	일 시	2014. 08. 07
참가 인원	총 56명	장 소	연구소 본관3층 국제회의실/외부
토의 주제	**목적:** '환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구'(PN14081 등, 총괄책임자: 이방용) 연구과제의 2014년 2단계 2차년도 사업 개시에 따른 착수회의 및 2014년도 북극 하계 현장조사 수행 결과 공유와 사업 진행사항 자체점검 및 현안사항 토의 **내용:** - 2단계 2차년도 사업 전체 안내(총괄과제) - 미국 알래스카, 캐나다 캠브리지베이, 노르웨이 스발바드 등 2014년도 북극 하계 현장조사 결과 공유 및 그린란드 노르드 거점 확보 계획 논의 - 미국 알래스카 놈 (UAF NWC) KOPRI-Lab. 구축 관련 시행 계획 논의 - 기타 토의 및 향후 동토지역 연구계획 등 수립, 논의 **참석자 소속기관:** 극지연구소(북극환경자원연구센터,기후변화연구부,생명과학연구부,연구관리팀,대외협력팀,인프라운영부 등),경인여대,서울대,연세대,이화여대,인하대,충북대,한양대,한국건설기술연구원,네오씨-텍,지오북 등(자료 별첨)		

워크샵을 통한 도출 결과	○ 워크샵 총괄 개요 발표, 연간 추진계획 안내 등 공지 ▪ 사업 총괄(개요, 추진계획 등) 발표(극지연 이방용) ▪ 미국 알래스카 현장 참관 및 UAF 방문활동 등(이화여대 박영일) ▪ 미국 알래스카 카운실 거점 활동(극지연 박상종) - 미국 알래스카 놈(UAF NWC) KOPRI-Lab. 구축(안) 안내 ▪ 캐나다 캠브리지베이 거점 활동(극지연 유재일) ▪ 노르웨이 스발바드 거점 활동(서울대 이은주, 지오북 황영심) ○ 캐나다 캠브리지베이 거점(CHARS) 활성화 계획 토론 ○ 기타 토의 및 향후 동토지역 연구계획 등 수립, 논의

건의 사항 등	없음

워크샵 결과보고서

작성일 : 2014. 11. 03

부 서 명	북극환경·자원연구센터	일 시	2014. 10. 30
참가 인원	총 53명	장 소	연구소 본관3층 세미나실/외부
토의 주제	**목적:** 2014년 2단계 2차년도 사업에 대한 북극 하계 현장조사 시행과 업무에 대한 중간 점검 및 차기년도와 향후 5개년 사업의 세부계획 수립 등 토의 **내용:** - 미국 알래스카, 캐나다 캠브리지베이, 노르웨이 스발바드 등 2014년도 북극 하계 현장조사 시행 중간 점검 - 미국 알래스카 놈 (UAF NWC) KOPRI-Lab. 구축 관련 업무 진행 및 시행 계획 논의 - 2015-'16년 차기년도 사업 기획 관련 내용 토의 - 2016-'20년 5개년 사업 구성 및 기타 안건 등에 관한 토의 - 북극연구 컨소시엄 구축관련 진행사항 안내 등 **참석자 소속기관:** 극지연구소(북극환경자원연구센터,기후변화연구부,지구시스템연구부,생명과학연구부,해양환경연구부 등),경인여대,서울대,연세대,인하대,한양대,네오씨-텍,지오북 등(자료 별첨)		

워크샵을 통한 도출 결과	○ 사업 총괄(개요, 연간 추진계획 안내 등) ■ 미국 알래스카, 캐나다 캠브리지베이, 노르웨이 스발바드 등 2014년도 북극 하계 현장조사 시행 중간 점검 ■ 미국 알래스카 놈 (UAF NWC) KOPRI-Lab. 구축 관련 시행 계획 논의 ■ 2015-'16년 차기년도 사업 기획 관련 내용 토의 ■ 2016-'20년 5개년 사업 구성 및 기타 안건 등에 관한 토의 ○ 향후 동토지역 연구확산 계획 등 수립, 논의

건의 사항 등	없음

워크샵 결과보고서

작성일 : 2015. 04. 17

부 서 명	북극환경·자원연구센터	일 시	2015. 04. 14
참가 인원	총 48명	장 소	연구소 본관3층 세미나실/외부
토의 주제	**목적:** 2014년 2단계 2차년도 사업 진행 진도관리 및 차기년도와 향후 5개년 사업의 세부계획 수립 등 토의 **내용:** - 미국 알래스카, 캐나다 캠브리지베이, 노르웨이 스발바드 등 2015년도 북극연구 진도 발표 및 관리, 점검 - 2014~'15년(2단계 2차년도) 사업 연차실적계획서 작성 논의 - 2015~'16년 차기년도 사업 기획 관련 내용 토의 - 2016~'20년 5개년 사업 구성 및 기타 안건 등에 관한 토의 **참석자 소속기관:** 극지연,광주과기원,경인여대,서울대,숭실대,아주대,연세대,을지대,인하대,한양대,한국건설기술연구원,가이아쓰리디,네오씨-텍,지오북,미국 UAF/IARC 등 15개 기관(자료 별첨)		

워크샵을 통한 도출 결과	○ 사업 총괄(개요, 연간 추진계획 안내 등) ■ 미국 알래스카, 캐나다 캠브리지베이, 노르웨이 스발바드 등 2014년-2015년도 북극 하계 현장조사 시행 중간 점검 ■ 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발 ■ 장거리 이동에 의한 북극에어로졸 특성 연구 ■ 동토층 환경변화 특성 규명 ■ 온도 상승에 따른 동토층 토양 유기물 분해 효소 기작 연구 ■ 동토층 환경변화의 수치적 재현 ■ 동토층 생태계 특성 규명 ■ 미국의 동토층 연구현황(알래스카페어뱅크스대) ○ 2014~'15년(2단계 2차년도) 사업 연차실적계획서 작성 논의 - 2015~'16년 차기년도 사업 기획 관련 내용 토의 - 2016~'20년 5개년 사업 구성 및 기타 안건 등에 관한 토의

건의 사항 등	없음

워크샵 결과보고서

작성일 : 2015. 12. 02

부 서 명	북극환경·자원연구센터	일 시	2015. 12. 01
참가 인원	총 59명	장 소	연구소 본관3층 세미나실/외부
토의 주제	**목적:** 2015년~'16년 5차년도 사업 진행 진도관리, 성과점검 및 차기년도와 향후 5개년 사업의 세부계획 수립 등 논의와 상위평가 지표설정 등 안내 **내용:** - 미국 알래스카, 캐나다 캠브리지베이, 노르웨이 스발바드, 그린란드 노르드 등 2015년도 현장조사 북극연구 진도 발표 및 관리, 점검 - 2016~'20년 5개년 사업 구성 및 기타 안건 등에 관한 토의 **참석자 소속기관:** 극지연,광주과기원,경인여대,경희대,서울대,성신여대,숭실대,아주대,연세대,을지대,인하대,한양대,한국건설기술연구원,네이버시스템,지오북 등 산·학·연 기관 연구참여자, 외부 전문가 및 관계자 (59명)		

워크샵을 통한 도출 결과	○ 사업 총괄(개요, 연간 추진계획 안내 등), 세부과제별 수행내용 등 발표 ■ 미국 알래스카, 캐나다 캠브리지베이, 노르웨이 스발바드, 그린란드 노르드 등 2015년도 북극 관측거점 하계 현장조사 시행 중간 결과 발표 ■ 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발(극지연) ■ 북극권 에어로졸의 특성 연구(광주과기원) ■ 알래스카 카운실에서의 캐노피 구조와 기능(서울대) ■ 동토층 환경변화 특성 규명(극지연) ■ 온도 상승에 따른 동토층 토양 유기물 분해 효소 기작 연구(연세대) ■ 캐나다 캠브리지베이 기후변화 실험 모사구 지방산 분석(숭실대) ■ 동토층 환경변화의 수치적 재현(극지연) ■ 동토층 생태계 특성 규명(서울대) ■ 미국의 동토층 연구현황(알래스카페어뱅크스대) ■ 한국건설기술연구원, 경희대 등 공간정보 활용 기술 및 북극 연구현황 ○ 2013~2015년 사업 단계 상위평가 성과지표 건 논의 ○ 2016~'20년 5개년 사업 구성 내용 소개 등에 관한 토의

건의 사항 등	없음

워크샵 결과보고서

작성일 : 2016. 05. 02

부 서 명	북극환경·자원연구센터	일 시	2016.04.28～04.29
참가 인원	총 39명	장 소	대부도펜션타운
토의 주제	**목적:** CAPEC project의 5차년도 사업 종료 평가를 대비한 성과점검 및 향후 5개년 사업의 세부계획 수립, 한국북극연구컨소시엄 동향,우리나라 북극 미래 정책 분석 및 토의, 정보공유 **내용:** 1) 한국연구재단 극지기초원천기술개발사업(북극환경자원연구센터) - CAPEC 최근 3개년 수행내용 평가 대비 총괄발표 : 현장조사 및 목표 대비 실적 등) - 스발바르 등 북극 이슈 국제 과학연구 동향 발표 및 토의 2) 우리나라 북극과학 연구 및 2016ASSW 동향 정보 공유(북극환경자원연구센터) 3) 북극권 국가의 연구동향 (미국과 ICARPIII 중심) 및 우리나라 북극 미래 정책 등(미래전략실) **참석자 소속기관:** 소내 북극환경자원연구센터, 기후변화연구부, 미래전략실 등 사업참여자, 외부 세부 및 위탁사업 참여자, 외부 전문가 (인하대, 네오씨-텍, 지오북 등) 및 관계자 (39명))		

워크샵을 통한 도출 결과	○ 사업 총괄(개요, 연간 추진계획 안내 등), 세부과제별 수행내용 등 발표 ■ 미국 알래스카, 캐나다 캠브리지베이, 노르웨이 스발바드, 그린란드 노르드 등 동토층 관측거점에서의 지난 연구경과 및 성과 발표와 점검 ■ 향후 5개년 사업평가 결과 설명 및 점검 사항 안내와 계획 논의 등 ■ 스발바르 니알슨 주변 생태변화 현황(지오북) ○ 2016~'20년 5개년 사업 진행 경과 및 향후 계획 등 논의

건의 사항 등	없음

KOPRI
극지연구소

제 7 장

연구시설·장비 현황

KOPRI
극지연구소

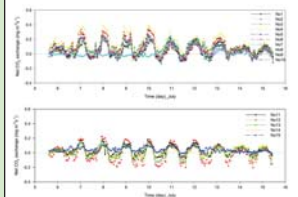
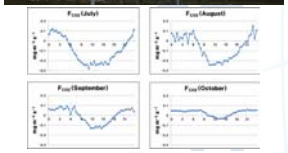
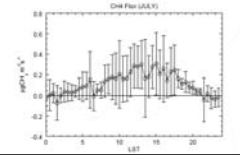
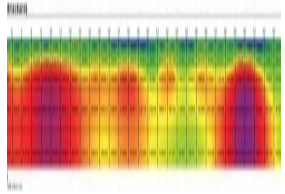
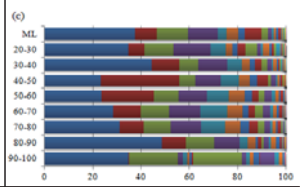
KOPRI
극지연구소

※ 연구기간 중 3천만원 이상 기장비 확보 내역

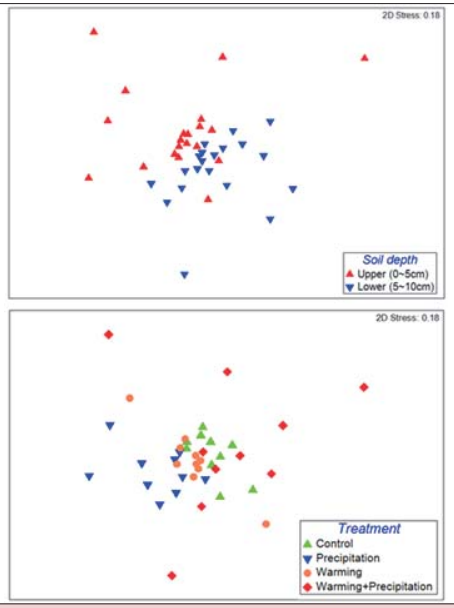
기자재명	구매금액 (원)	구매일자	기자재 활용용도	보관장소
Open path CO2/H2O analyzer 및 CSAT3A 3D sonic anemometer	39,824,156	구매 중	관측 2 거점 동토층과 동토층과 대기 간의 이산화탄소 플럭스 측정	극지연구소
Aethalometer, Black Carbon Monitor (모델명 AE22)	38,342,920	2012.2.21	관측 2 거점 동토층에 영향을 주는 대기중 블랙카본농도 연속관측	극지연구소

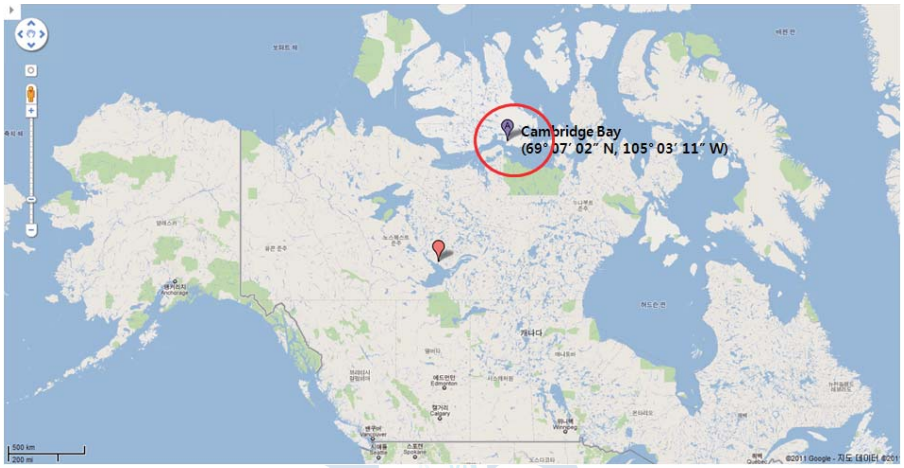
KOPRI
극지연구소

[환북극 동토층 관측 거점별 연구 및 시설 · 장비 운영 현황]

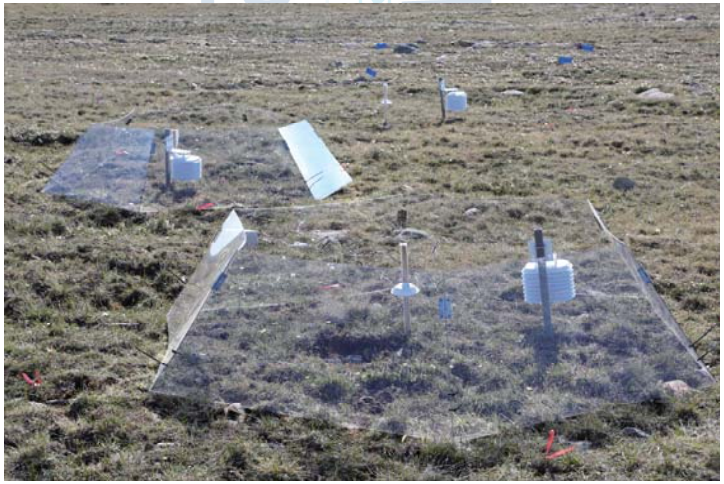
관측 거점	1 거점				
관측지명	미국 알래스카 카운실 (64° N, 165° W)				
선정 연도 및 연구 기간	현장 답사 및 선정 완료(2011. 8) / 2011년 8월~현재				
상대 연구 기관과의 협약 체결(연월일)	미국 국제북극권연구센터 (IARC) MOU(2007. 5.17, 2012. 6. 2) 5년단위 갱신		미국 UAF-NWC(알래스카페어뱅크스대학교 북서캠퍼스)와 MOA 교환(2012. 5. 9), 한-미(KOPRI-IARC/UAF 북극공동연구실 개소, 2015.7.29)		
연구 수행 핵심 내용		 			
	동토층 식생종류별 이산화탄소 흡수/배출량 분석	동토층 에너지, 온실기체 흡수/배출량 분석 (이산화탄소, 메탄)	USN 기술적용 토양-대기 입체 관측시스템 개발	동토층 지중구조 및 물리특성 조사	토양코어(1.5m) 다수 확보 및 깊이별 미생물 특성 분석
설치 기장비 및 시스템, 또는 사용 기자재	SIPRI soil corer (영구동토층 코어링), 광합성측정장비(Li 6400), 전기비저항탐사(Terrameter LS, 활동층 경계 및 동토 지층 구조 탐색), 레이더탐사(GPR, 쉴드 500 MHz), 전자탐사 (Genoics EM38MK2), 에디공분산 플럭스 시스템, 복사계(CNR4), 식생카메라(CC5MPX), NDVI 센서(서울대 제작), 테더존데(Anasphere), 자동기상관측장비(AWS), 태양광발전시스템(1KW,1500Ah 급), 지중온도/수분센서 등 USN 지중온습도/지표온습도/영상 원격관측시스템 개발 설치				

미국 알래스카 Nome(숙소지 및 알래스카대학교 NWC 소재) 및 관측거점 Council의 위치도와 측정시스템 모습(상, 하)

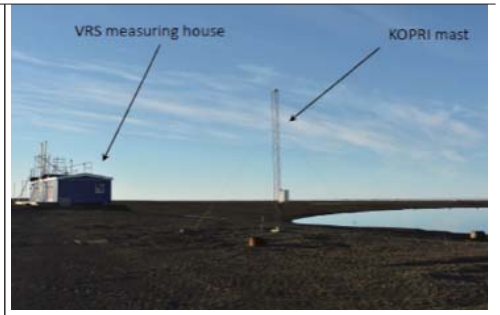
<table>
<tr><td>관측 거점</td><td colspan="4">2 거점</td></tr>
<tr><td>관측지명</td><td colspan="4">캐나다 캠브리지베이 (69° N, 105° W)</td></tr>
<tr><td>선정 연도 및 연구 기간</td><td colspan="4">현장 답사 시행(2011. 7) / 선정 완료(2012. 7) / 2012년 7월~현재</td></tr>
<tr><td>상대 연구 기관과의 협약 체결(연월일)</td><td colspan="2">캐나다 국립천연자원부
(NRCan) MOU
(2010. 2. 2),(2015. 2.13) 5년단위 갱신</td><td colspan="2">캐나다 누나부트연구소
(NRI)와 Scientific Research License 교환
(2012. 6. 11) 5년단위 갱신</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구 수행 핵심 내용</td><td> </td><td> </td><td> </td><td>  </td></tr>
<tr><td>에디공분산 장비 설치/운영- 대기-동토층 에너지 및 온실기체 교환 감시</td><td>Aethalometer 설치/운영 - Black Carbon 관측(농도 100 ng m^{-3} 이하)</td><td>기후변화 모사실험구(온도 및 강수량 증가) 운영</td><td>기후변화모사 1.5년 후, 강수증가와 대조구 사이 박테리아 군집 차이 규명 난분해성 유기물 분해 체외효소 증가 확인</td></tr>
<tr><td>설치 기장비 및 시스템, 또는 사용 기자재</td><td colspan="4">온도상승 챔버 (지름 2 m, 20개 설치, 기후변화 모사), 토양 온도, 수분 센서, 대기 온습도 센서, NDVI 센서 설치, 전기비저항탐사(Terrameter LS 4ch), 에디 공분산 플럭스 시스템, Black carbon 관측 (Aethalometer)</td></tr>
</table>



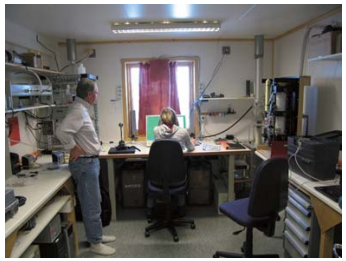
캐나다 캠브리지베이 관측 거점 위치도



캠브리지베이 거점에 온도 및 강수량 증가 실험을 위해 설치된 챔버

<table>
<tr><td>관측 거점</td><td colspan="3">3 거점</td></tr>
<tr><td>관측지명</td><td colspan="3">그린란드 자켄버그 (74° N, 20° W) / (노르드*)(81° N, 16° W)</td></tr>
<tr><td>선정 연도 및
연구 기간</td><td colspan="3">현장 답사 시행(2011. 8) / 1차 선정(자켄버그) 완료(2012. 8) / 2012년 8월~현재
(2015년 9월 노르드 거점 확대 선정)</td></tr>
<tr><td>상대 연구
기관과의 협약
체결(연월일)</td><td colspan="3">덴마크 Aarhus대학교
MOU (2012. 9. 9) 기간없음</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구 수행
핵심 내용</td><td> </td><td>
</td><td> 

</td></tr>
<tr><td>장기 기후변화 모사 실험구에서
토양 시료 확보</td><td>자켄버그와 노르드 위치</td><td>노르드 기지에 설치된 기상 및
플럭스 시스템 타워
구축(2015.09)(상)
장기 기후변화 모사 실험구 설치
(2015.09)(하)</td></tr>
<tr><td>설치 기장비 및
시스템, 또는
사용 기자재</td><td colspan="3">Split tube sampler (토양 코어링), 에디 공분산 플럭스 시스템 (노르드)</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td>관측 거점</td><td colspan="4">4 거점</td></tr>
<tr><td>관측지명</td><td colspan="4">노르웨이, 스발바르 (79° N, 12° W)</td></tr>
<tr><td>선정 연도 및 연구 기간</td><td colspan="4">선정 완료(2012. 7) / 2012년 7월~현재</td></tr>
<tr><td>상대 연구 기관과의 협약 체결(연월일)</td><td colspan="2">노르웨이 극지연구소 (NPI) MOU (2012. 9. 20)
5년단위 자동 연장</td><td colspan="2">이태리 국립연구회 (NRC) 지구환경부 (DEE) MOU
(2012. 2. 22) 기간없음</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구 수행 핵심 내용</td><td>
제플린 대기 관측 기지
(해발 고도 474m)
 
에어로졸 특성 (CCN 등) 분석실</td><td>
대기 황(DMS) 자동 분석기
(제플린 기지 내 설치)</td><td>
Climate Change Tower (CCT)

온실가스 플럭스 분석기
(CCT 하단부 설치)</td><td>
Gruvebadet 관측기지

대용량 대기 입자시료 포집기</td></tr>
<tr><td>한-노르웨이-스웨덴 공동연구(북극 대기 에어로졸 특성 연구)</td><td>한-노르웨이 공동 연구 (기후 냉각 황성분 변화 연구)</td><td>한-이태리 공동 연구 (대기-동토층 에너지 및 온실기체 교환 감시/극지 대기 경계층 과정 이해)</td><td>한-이태리 공동연구 (북극 대기 입자 특성 연구)</td></tr>
<tr><td>설치 기장비 및 시스템, 또는 사용 기자재</td><td colspan="4">에디 공분산 플럭스 시스템(초음파풍속계, H_2O/CO_2 고속분석기, CH_4 고속분석기), 지면모니터링카메라, CRDS방식 CO_2/CH_4 측정기, Portable DGPS, Soil water-temp logger</td></tr>
</table>

KOPRI
극지연구소

제 8 장

참고문헌

KOPRI
극지연구소

KOPRI
극지연구소

(세부과제 1)

Shaw G. E. (1986) Cloud condensation nuclei associated with Arctic haze, *Atmospheric Environment*, 20, 1453-1456.

Arnold, S. R., D. V. Spracklen, S. Gebhardt, T. Custer, J. Williams, I. Peeken, and S. Alvain (2010), Relationships between atmospheric organic compounds and air-mass exposure to marine biology, *Environ. Chem.*, 7(3), 232-241, doi:10.1071/EN09144.

Arrigo, K. R., G. van Dijken, and S. Pabi (2008), Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19603, doi:10.1029/2008GL035028.

Dacey, J. W. H., and S. G. Wakeham (1986), Oceanic dimethylsulfide: production during zooplankton grazing on phytoplankton, *Science*, 233, 1314-1316, doi:10.1126/science.233.4770.1314.

Draxler, R. R., and G. D. Hess (1998), An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition, *Aust. Meteorol. Mag.*, 47(4), 295-308.

Keller, M. D., W. K. Bellows, and R. R. L. Guillard (1989), Dimethylsulfide production in marine phytoplankton, in Biogenic sulfur in the environment, pp. 167-182, edited by E. S. Saltzman, and E. M. Cooper, *American Chemical Society*, Washington, D. C.

Leck, C., and C. Persson (1996), Seasonal and short term variability in dimethyl sulfide, sulfur oxide and biogenic sulfur and sea salt aerosol particles in the Arctic marine boundary layer during summer and autumn, *Tellus*, 48B, 272-299, doi:10.1034/j.1600-0889.48.issue2.1.x.

Park, K.-T., K. Lee, Y.-J. Yoon, H.-W. Lee, H.-C. Kim, B.-Y. Lee, O. Hermansen., T.-W. Kim, and H. Kim (2013), Linking atmospheric dimethyl sulfide (DMS) and the Arctic Ocean spring bloom, *Geophys. Res. Lett.*, 40. 1-6, doi:10.1029/2012GL054560.

Park, K.-T, K. Lee, K. Shin, H. J. Jeong, and K. Y. Kim (2014), Improved method for minimizing sulfur loss in analysis of particulate organic sulfur, *Anal. Chem.*, 86(3), 1352-1356. doi:10.1021/ac403649m.

Sharma, S., L. A. Barrie, D. Plummer, J. C. McConnell, P. C. Brickell, M. Levasseur, M. Gosselin, and T. S. Bates (1999), Flux estimation of oceanic dimethyl sulphide around North America, *J. Geophys. Res.*, 104(D17), 21,327-21,342, doi:10.1029/1999JD900207.

Stefels, J., M. Steinke, S. Turner, G. Malin, and S. Belviso (2007), Environmental constraints on the production and removal of the climatically active gas dimethylsulphide (DMS) and implications for ecosystem modeling, *Biogeochemistry*,

83(1), 245-275, doi:10.1007/s10533-007-9091-5.

Sunda W, D. J. Kieber, R. P. Kiene, and S. Huntsman (2002), An antioxidant function for DMSP and DMS in marine algae, *Nature*, 418, 317-319, doi:10.1038/nature00851.

Zemmelink, H. J., J. W. H. Dacey, E. J. Hintsa, W. R. McGillis, W. W. C. Gieskes, W. Klaassen, H. W. de Groot, and H. J. W. de Baar (2004), Fluxes and gas transfer rates of the biogenic trace gas DMS derived from atmospheric gradients, *J. Geophys. Res.*, 109, C08S10, doi:10.1029/2003JC001795.

Burba, G.G., Anderson, D.J., Xu, L., McDermitt, D.K., 2006. Additional term in the Webb-Pearman-Leuning correction due to surface heating from an open-path gas analyzer. Eos Trans. AGU 87 (52), *Fall Meet. Suppl.*, C12A-03.

Grelle A, Burba GG (2007) Fine-wire thermometer to correct CO2 fluxes by open-path analyzers for artificial density fluctuations. *Agricultural and Forest Meteorology,* 147, 48-57.

Nguyen, Q.T. H. Skov, L. L. Sørensen, B. J. Jensen, A. G. Grube, A. Massling, M. Glasius, and J. K. Nøjgaard (2013) Source apportionment of particles at Station Nord, North East Greenland during 2008-2010 using COPREM and PMF analysis, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 35-49, 2013

Webb EK, Pearman GI, Leuning R (1980) Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 106, 85-100.

(광주과기원 위탁과제)

ACIA (2005). *Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge, UK.

Behrenfeldt, U., R. Krejci, J. Ström and A. Stohl (2008). "Chemical properties of Arctic aerosol particles collected at the Zeppelin station during the aerosol transition period in May and June of 2004." *Tellus*, SeriesB: Chemical and Physical Meteorology. 60 B(3): 405-415.

Browse, J., K. S. Carslaw, S. R. Arnold, K. Pringle and O. Boucher (2012). "The scavenging processes controlling the seasonal cycle in Arctic sulphate and black carbon aerosol." *Atmospheric Chemistry and Physics*. 12(15): 6775-6798.

Frossard, A. A., P. M. Shaw, L. M. Russell, J. H. Kroll, M. R. Canagaratna, D. R. Worsnop, P. K. Quinn and T. S. Bates (2011). "Springtime Arctic haze contributions of submicron organic particles from European and Asian combustion sources." *J. of Geophys. Res.*, D:Atmospheres. 116(5).

Gantt, B. and N. Meskhidze (2013). "The physical and chemical characteristics of

KOPRI 극지연구소

marine primary organic aerosol: A review." *Atmospheric Chemistry and Physics.* 13(8): 3979-3996.

Hansen, J. and L. Nazarenko (2004). "*Soot climate forcing via snow and ice albedos.*"Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America101(2): 423-428.

Heintzenberg, J., C. Leck, W. Birmili and E. K. Bigg (2004). "The modal structure of the summer Arctic aerosol and its connection to aerosol processes." *Journal of Aerosol Science*. 35(SUPPL. 2): S723-S724.

Hirdman, D., J. F. Burkhart, H. Sodemann, S. Eckhardt, A. Jefferson, P. K. Quinn, S. Sharma, J. Ström and A. Stohl (2010). "Long-term trends of black carbon and sulphate aerosol in the Arctic: Changes in atmospheric transport and source region emissions." *Atmospheric Chemistry and Physics*. 10(19): 9351-9368.

Kulmala, M., H. Vehkamaki, T. Petaja, M. Dal Maso, A. Lauri, V.-M. Kerminen, W. Birmili, P.H. McMurry (2004). "Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations." *Journal of Aerosol Science.* 35(2):143-176.

Law, K. S. and A. Stohl (2007). "Arctic air pollution: Origins and impacts." *Science,* 315(5818): 1537-1540.

Modini, R. L., Z. D. Ristovski, G. R. Johnson, C. He, N. Surawski, L. Morawska, T. Suni and M. Kulmala (2009). "New particle formation and growth at a remote, sub-tropical coastal location." *Atmospheric Chemistry and Physics,* 9(19): 7607-7621.

O'Dowd, C. D., M. C. Facchini, F. Cavalli, D. Ceburnis, M. Mircea, S. Decesari, S. Fuzzi, J. Y. Young and J. P. Putaud (2004). "Biogenically driven organic contribution to marine aerosol." *Nature,* 431(7009): 676-680.

Prather, K. A., T. H. Bertram, V. H. Grassian, G. B. Deane, M. D. Stokes, P. J. DeMott, L. I. Aluwihare, B. P. Palenik, F. Azam, J. H. Seinfeld, R. C. Moffet, M. J. Molina, C. D. Cappa, F. M. Geiger, G. C. Roberts, L. M. Russell, A. P. Ault, J. Baltrusaitis, D. B. Collins, C. E. Corrigan, L. A. Cuadra-Rodriguez, C. J. Ebben, S. D. Forestieri, T. L. Guasco, S. P. Hersey, M. J. Kim, W. F. Lambert, R. L. Modini, W. Mui, B. E. Pedler, M. J. Ruppel, O. S. Ryder, N. G. Schoepp, R. C. Sullivan and D. Zhao (2013). "Bringing the ocean into the laboratory to probe the chemical complexity of sea spray aerosol." Proceedings of the National

Academy of Sciences of the United States of America 110(19): 7550-7555.

Serreze, M. C. and R. G. Barry (2011). "Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis." *Global and Planetary Change*, 77(1-2): 85-96.

Shindell, D. T., G. Faluvegi, D. M. Koch, G. A. Schmidt, N. Linger and S. E. Bauer (2009). "Improved attribution of climate forcing to emissions." *Science*, 326(5953): 716-718.

Vuollekoski, H., V. M. Kerminen, T. Anttila, S. L. Sihto, M. Vana, M. Ehn, H. Korhonen, G. McFiggans, C. D. O'Dowd and M. Kulmala (2009). "Iodine dioxide nucleation simulations in coastal and remote marine environments." *Journal of Geophysical Research*, Atmospheres 114(2).

Whitehead, J. D., G. B. McFiggans, M. W. Gallagher and M. J. Flynn (2009). "Direct linkage between tidally driven coastal ozone deposition fluxes, particle emission fluxes, and subsequent CCN formation." *Geophysical Research Letters,* 36(4).

Yoon, Y. J., C. D. O'Dowd, S. G. Jennings and S. H. Lee (2006). "Statistical characteristics and predictability of particle formation events at Mace Head." *Journal of Geophysical Research*, Atmospheres 111(13).

(서울대학교 위탁과제)

Farquhar, G.D., Caemmerer, S.V., & Berry, J.A. (1980). A biochemical model of photosynthetic CO2 assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, 149, 78-90

Bubier, J.L., Rock, B.N., & Crill. P.M., (1997). "Spectral reflectance measurements of boreal wetland and forest mosses." *Journal of Geophysical Research* 102(D24): 483 - 494.

Sharkey, T.D., Bernacchi, C.J., Farquhar, G.D., & Singsaas, E.L. (2007). Fitting photosynthetic carbon dioxide response curves for C-3 leaves. *Plant Cell and Environment*, 30, 1035-1040

van Wijk, M.T., & Williams, M. (2005). Optical instruments for measuring leaf area index in low vegetation: Application in Arctic ecosystems. *Ecological Applications,* 15, 1462-1470

Kattge, J., Diaz, S., Lavorel, S., Prentice, C., Leadley, P., Bonisch, G., Garnier, E., Westoby, M., Reich, P.B., Wright, I.J., Cornelissen, J.H.C., Violle, C., Harrison, S.P., van Bodegom, P.M., Reichstein, M., Enquist, B.J., Soudzilovskaia, N.A., Ackerly, D.D., Anand, M., Atkin, O., Bahn, M., Baker, T.R., Baldocchi, D.,

Bekker, R., Blanco, C.C., Blonder, B., Bond, W.J., Bradstock, R., Bunker, D.E., Casanoves, F., Cavender-Bares, J., Chambers, J.Q., Chapin, F.S., Chave, J., Coomes, D., Cornwell, W.K., Craine, J.M., Dobrin, B.H., Duarte, L., Durka, W., Elser, J., Esser, G., Estiarte, M., Fagan, W.F., Fang, J., Fernandez-Mendez, F., Fidelis, A., Finegan, B., Flores, O., Ford, H., Frank, D., Freschet, G.T., Fyllas, N.M., Gallagher, R.V., Green, W.A., Gutierrez, A.G., Hickler, T., Higgins, S.I., Hodgson, J.G., Jalili, A., Jansen, S., Joly, C.A., Kerkhoff, A.J., Kirkup, D., Kitajima, K., Kleyer, M., Klotz, S., Knops, J.M.H., Kramer, K., Kuhn, I., Kurokawa, H., Laughlin, D., Lee, T.D., Leishman, M., Lens, F., Lenz, T., Lewis, S.L., Lloyd, J., Llusia, J., Louault, F., Ma, S., Mahecha, M.D., Manning, P., Massad, T., Medlyn, B.E., Messier, J., Moles, A.T., Muller, S.C., Nadrowski, K., Naeem, S., Niinemets, U., Nollert, S., Nuske, A., Ogaya, R., Oleksyn, J., Onipchenko, V.G., Onoda, Y., Ordonez, J., Overbeck, G., Ozinga, W.A., Patino, S., Paula, S., Pausas, J.G., Penuelas, J., Phillips, O.L., Pillar, V., Poorter, H., Poorter, L., Poschlod, P., Prinzing, A., Proulx, R., Rammig, A., Reinsch, S., Reu, B., Sack, L., Salgado-Negre, B., Sardans, J., Shiodera, S., Shipley, B., Siefert, A., Sosinski, E., Soussana, J.F., Swaine, E., Swenson, N., Thompson, K., Thornton, P., Waldram, M., Weiher, E., White, M., White, S., Wright, S.J., Yguel, B., Zaehle, S., Zanne, A.E., & Wirth, C. (2011). TRY - a global database of plant traits. *Global Change Biology*, 17, 2905-2935

KOPRI 극지연구소

(세부과제 2)

손병후. 2012. 토양 열전도도와 수분함량이 수평형 지중열교환기 설계 길이에 미치는 영향. 한국지열에너지학회논문집. 8: 21-31

Buurman, P., F. Peterse, G. A. Martin. 2007. Soil organic matter chemistry in allophanic soils: a pyrolysis-GC/MS study of a Costa Rican Andosol catena. *European Journal of Soil Science,* 58, 1330-1347

Caporaso JG, Kuczynski J, Stombaugh J et al. 2010. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nat Methods,* 7, 335-8211;336.

Chun J, Kim KY, Lee JH and Choi Y. 2010. The analysis of oral microbial communities of wild-type and toll-like receptor 2-deficient mice using a 454 GS FLX Titanium pyrosequencer. *BMC Microbiol.,* 10, 101.

Gough, L., C. W. Osenberg, K. L. Gross, S. L. Collins. 2000. Fertilization effects on species density and primary productivity in herbaceous plant communities. *OIKOS*. 89, 428-439

Hambrey, M.J., Quincey, D.J., Glasser, N.F., et al. 2008. Sedimen-tological, geomorphological and dynamic context of debris-mantled glaciers, Mount Everest (Sagarmatha) region, *Nepal. Quaternary Science Reviews*. 27, 2361-2389

Hugelius, G., Tarnocai, C., Broll, G., Canadell, J.G., Kuhry, P. and Swanson, D.K. 2013. The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: spatially distributed datasets of soil coverage and soil carbon storage in the northern permafrost regions. *Earth System Science Data,* 5, 3-13

IPCC. 2007. *Climate Change 2007*. Impacts, adaptation and vulnerability. Working Group II Report

Kaal, J. and C. Rumpel. 2009. Can pyrolysis-GC/MS be used to estimate the degree of thermal alteration of black carbon?. *Organic Geochemistry*. 40, 1179-1187

Klindworth A, Pruesse E, Schweer T et al. 2013. Evaluation of general 16S ribosomal RNA gene PCR primers for classical and next generation sequencing-based diversity studies. *Nucleic Acids Res.*, 41

Knicker, H., F. J. Gonzalez-Vila, O. polvillo, J. A. Gonzalez, G. Almendros. 2005. Fire-induced transformation of C- and N- forms in different organic soil fractions from a Dystric Cambisol under a Mediterranean pine forest (Pinus pinaster). *Soil Biology & Biochemistry*. 37, 701-718

Kogel-Knabner, I. 2002. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*. 34, 139-162

Koven, C.D., Ringeval, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., Cadule, P., Khvorostyanov, D., Krinner, G. and Tarnocai, C. 2011. Permafrost carbon-climate feedbacks

accelerate global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108, 14769-14774

Kuhn, T. K., E. S. Krull, A. Bowater, K. Grice, G. Gleixner. 2010. The occurrence of short chain n-alkanes with an even over odd predominance in higher plants and soils. *Organic Geochemistry.* 41, 88-95

Schellekens, J., P. Buurman, X. Pontevedra-Pombal. 2009. Selecting parameters for the environmental interpretation of peat molecular chemistry; A pyrolysis-GC/MS study. *Organic Geochemistry*. 40, 678-691

Schirmer M, Ijaz UZ, D′ Amore R, et al. 2015. Insight into biases and sequencing errors for amplicon sequencing with the Illumina MiSeq platform. *Nucleic Acids Res 43,* 37.

Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schadel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J., Hugelius, G., Koven, C.D., Kuhry, P., Lawrence, D.M., Natali, S.M., Olefeldt, D., Romanovsky, V.E., Schaefer, K., Turetsky, M.R., Treat, C.C. and Vonk, J.E. 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*. 520, 171-179

Thomas Ingeman-Nielsen, Anders V. Christiansen, Inooraq Brandt, Torleif Dahlin, and Bo Elberling. 2016. Effect of electrode shape on grounding resistances - Part 2 : Experimental results and cryospheric monitoring. *Geophysics*. 81, 169-182. doi: 10.1190/GEO2015-0148.1

Stankiewicz, B. A., J. C. Hutchins, R. Thomson, D. E. G. Briggs, R. P. Evershed. 1997. Assessment of bog-body tissue preservation by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 11, 1884-1890

Thomas A. Douglas, M. Torre Jorgenson, Dana R. N. Brown, Seth W. Campbell, Christopher A. Hiemstra, Stephanie P. Saari, Kevin Bjella, and Anna K. Liljedahl. 2016. Degrading permafrost mapped with electrical resistivity tomography, airborne imagery and LiDAR, and seasonal thaw measurements. *Geophysics*. 81,71-85. doi: 10.1190/GEO2015-0149.1

Treat, C. C., W. M. Wollheim, R. K. Varner, A. S. Grandy, J. Talbot, S. Frolking. 2014. Temperature and peat type control CO2 and CH4 production in Alaskan permafrost peats. *Global Change Biology.* 20, 2674-2686

(세부과제 3)

Anthony, K. M. W., Anthony, P., Grosse, G., & Chanton, J., 2012: Geologic methane seeps along boundaries of Arctic permafrost thaw and melting glaciers. *Nature Geoscience*, 5(6), 419-426.

Bonan, G. B., S. Levis, L. Kergoat, and K. W. Oleson, 2002: Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles*, 16, 5-1-5-23.

CD Koven, WJ Riley, ZM Subin, JY Tang, MS Torn, WD Collins, GB Bonan, DM Lawrence, and SC Swenson, 'The Effect of Vertically Resolved Soil Biogeochemistry and Alternate Soil C and N Models on C Dynamics of Clm4', *Biogeosciences*, 10 (2013), 7109-31

Chae, Y., S. M. Kang, S.-J. Jeong, B. Kim, and D. M. W. Frierson, 2015: Arctic greening can cause earlier seasonality of polar amplification. *Geophys. Res. Lett.,* 42, doi: 10.1002/2014GL061841.

Collins, W. D., and Coauthors, 2004: *Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0).* Technical Note TN-464+ STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.

Deser, C., R. A. Tomas, and L. Sun, 2015: The role of ocean-atmosphere coupling in the zonal mean atmospheric response to Arctic sea ice loss, *Journal of Climate,* doi: http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00325.1.

Dickinson, R. E., and Coauthors, 2006: The Community Land Model and its climate statistics as a component of the Community Climate System Model. *Journal of Climate*, 19, 2302-2324.

Falloon, P., R. Dankers, R. Betts, C. Jones, B. Booth, and F. Lambert, 2012: Role of vegetation change in future climate under the A1B scenario and a climate stabilisation scenario, using the HadCM3C Earth system model. *Biogeosciences,* 9, 4739-4756.

Friedman, A. R., Y.-T. Hwang, J. C. Chiang, and D. M. Frierson, 2013: Interhemispheric temperature asymmetry over the twentieth century and in future projections. *Journal of Climate*, 26, 5419-5433.

Hanson, P. J., Edwards, N. T., Garten, C. T., & Andrews, J. A., 2000: Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry,* 48(1), 115-146.

Hicks Pries, C. E., Schuur, E. A., & Crummer, K. G., 2013: Thawing permafrost increases old soil and autotrophic respiration in tundra: partitioning ecosystem respiration using δ13C and$\triangle$ 14C. *Global Change Biology*, 19(2), 649-661.

Holland, M. M., and C. M. Bitz, 2003: Polar amplification of climate change in coupled

models. *Climate Dynamics*, 21, 221-232.

Hwang, Y.-T., and D. M. Frierson, 2013: *Link between the double-Intertropical Convergence Zone problem and cloud biases over the Southern Ocean*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110, 4935-4940.

Jeong, J. H., Kug, J. S., Linderholm, H. W., Chen, D., Kim, B. M., & Jun, S. Y. (2014). Intensified Arctic warming under greenhouse warming by vegetation-atmosphere-sea ice interaction. *Environmental Research Letters*, 9(9), 094007.

Jeong, S.-J., C.-H. Ho, T.-W. Park, J. Kim, and S. Levis, 2011: Impact of vegetation feedback on the temperature and its diurnal range over the Northern Hemisphere during summer in a 2× CO2 climate. *Climate Dynamics,* 37, 821-833.

Jeong, S. J., Ho, C. H., Kim, B. M., Feng, S., & Medvigy, D., 2013: Non-linear response of vegetation to coherent warming over northern high latitudes. *Remote sensing letters,* 4(2), 123-130

Kang, S. M., D. M. Frierson, and I. M. Held, 2009: The tropical response to extratropical thermal forcing in an idealized GCM: The importance of radiative feedbacks and convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66, 2812-2827.

Kang, S. M., I. M. Held, D. M. Frierson, and M. Zhao, 2008: The response of the ITCZ to extratropical thermal forcing: Idealized slab-ocean experiments with a GCM. *Journal of Climate*, 21, 3521-3532.

Kang, S. M., Kim, B. M., Frierson, D. M., Jeong, S. J., Seo, J., & Chae, Y. (2015). Seasonal dependence of the effect of Arctic greening on tropical precipitation. *Journal of Climate*, 28(15), 6086-6095.

Lawrence, D.M., K.W. Oleson, M.G. Flanner, P.E. Thornton, S.C. Swenson, P.J. Lawrence, X. Zeng, Z.-L. Yang, S. Levis, K. Sakaguchi, G.B. Bonan, and A.G. Slater, 2011: Parameterization improvements and functional and structural advances in version 4 of the Community Land Model. *J. Adv. Model. Earth Sys.* 3. DOI:10.1029/2011MS000045.

Levis, S., G. Bonan, M. Vertenstein, and K. Oleson, 2004: *The Community Land Model's dynamic global vegetation model (CLM-DGVM)*: Technical description and user's guide. NCAR Tech. Note TN-459+ IA, 50.

Li, H., J. Sheffffield, and E. F. Wood, 2010: Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching, *J. Geophys. Res.,* 115, D10101, DOI:10.1029/2009JD012882.

Lloyd, A. H., 2005: Ecological histories from Alaskan tree lines provide insight into

future change. *Ecology*, 86, 1687-1695.

McCarthy, M., J. Sanjay, B. Booth, K. Krishna Kumar, and R. Betts, 2012: Influence of vegetation on the ITCZ and South Asian monsoon in HadCM3. *Earth System Dynamics Discussions,* 3, 91-111.

Oleson, K., Lawrence, D. M., Bonan, G. B., Drewniak, B., Huang, M., Koven, C. D., Levis, S., Li, F., Riley, W. J., Subin, Z. M., Swenson, S. C., Thornton, P. E., Bozbiyik, A., Fisher, R., Heald, C. L., Kluzek, E., Lamarque, J.-F., Lawrence, P. J., Leung, L. R., Lipscomb, W., Muszala, S., Ricciuto, D. M., Sacks, W., Sun, Y., Tang, J., and Yang, Z.-L.: *Technical Description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM), NCAR Technical Note NCAR/TN-503+STR*, Boulder, Colorado, 420 pp., 2013.

Oleson, K. W., and Coauthors, 2004: *Technical description of the community land model (CLM)*, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.

Simpson, 2009, *The Peril below the Ice*, Scientific American 19, 30 - 37 (2009) doi:10.1038/scientificamericanearth0609

Swann, A. L., I. Y. Fung, and J. C. Chiang, 2012: *Mid-latitude afforestation shifts general circulation and tropical precipitation.* Proceedings of the National Academy of Sciences, 109, 712-716.

Swann, A. L., I. Y. Fung, S. Levis, G. B. Bonan, and S. C. Doney, 2010: *Changes in Arctic vegetation amplify high-latitude warming through the greenhouse effect*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107, 1295-1300.

Swann, A. L., I. Y. Fung, Y. Liu, and J. C. Chiang, 2014: Remote vegetation feedbacks and the mid-Holocene Green Sahara. *Journal of Climate*, 27, 4857-4870.

Taylor, K., and Coauthors, 2007: Estimating shortwave radiative forcing and response in climate models. *Journal of Climate*, 20, 2530-2543.

Zhang, R., and T. L. Delworth, 2005: Simulated tropical response to a substantial weakening of the Atlantic thermohaline circulation. *Journal of Climate,* 18, 1853-1860.

(세부과제 4)

ACIA. 2004. *Impacts of a Warming Arctic*: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press. 146 pp. http://www.acia.uaf.edu.

Allison, S. D., & Treseder, K. K. 2008. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. *Global Change Biology*, 14(12): 2898-2909.

Alsos, I. G., P. B. Eidesen, D. Ehrich, I. Skrede, K. Westergaard, G. H. Jacobsen, J. Y. Landvik, P. Taberlet, and C. Brochmann. 2007. Frequent long-distance plant colonization in the changing arctic. *Science*, 316: 1606-1609.

Alsos, I. G., E. Mùller, and P. B. Eidesen. 2013. Germinating seeds or bulbils in 87 of 113 tested Arctic species indicate potential for ex situ seed bank storage. *Polar Biology*, 36: 819-830.

Antonsson, H., R. G. Björk, and U. Molaua. 2009. Nurse plant effect of the cushion plant silene acaulis (L.) jacq. in an alpine environment in the subarctic scandes, Sweden. *Plant Ecology and Diversity*, 2: 17-25.

Baker, H. G. and P. A. Cox. 1984. Further thoughts on dioecism and islands. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 71: 244-253.

Bawa, K. S. 1980. Evolution of dioecy in flowering plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 11: 15-39.

Bezemer, T. M., & van Dam, N. M. 2005. Linking aboveground and belowground interactions via induced plant defenses. *Trends in Ecology & Evolution*, 20(11): 617-624.

Bjorbækmo, M. F., Carlsen, T., Brysting, A., Vrålstad, T., Høiland, K., Ugland, K. I., & Kauserud, H. 2010. High diversity of root associated fungi in both alpine and arctic *Dryas octopetala*. *BMC Plant Biology*, 10(1): 244.

Blaalid, R., Davey, M. L., Kauserud, H., Carlsen, T., Halvorsen, R., Høiland, K., & Eidesen, P. B. 2014. Arctic root associated fungal community composition reflects environmental filtering. *Molecular ecology,* 23(3): 649-659.

Brochmann, C., A. K. Brysting, I. G. Alsos, L. Borgen, H. H. Grundt, A.-C. Scheen, and R. Elven. 2004. Polyploidy in arctic plants. *Biological Journal of the Linnean Society,* 82: 521-536.

Cairney, J. 2000. Evolution of mycorrhiza systems. *Naturwissenschaften,* 87(11): 467-475.

Chen, J., Y. Yang, J. Stöcklin, L. A. Cavieres, D. Peng, Z. Li, and H. Sun. 2015. Soil nutrient availability determines the facilitative effects of cushion plants on other plant species at high elevations in the south-eastern Himalayas. *Plant Ecology & Diversity,* 8: 199-210.

KOPRI 극지연구소

Coulson, S. J. 2007. The terrestrial and freshwater invertebrate fauna of the High Arctic archipelago of Svalbard. *Zootaxa*, 1448: 41-58.

Deslippe, J., Hartmann, M., Mohn, W., & Simard, S. 2011. Long term experimental manipulation of climate alters the ectomycorrhizal community of Betula nana in Arctic tundra. *Global Change Biology*, 17(4): 1625-1636.

Effmert, U., J. Kalderás, R. Warnke, and B. Piechulla. 2012. Volatile mediated interactions between bacteria and fungi in the soil. *Journal of Chemical Ecology*, 38: 665-703.

Gabrielsen, T. M. and C. Brochmann. 1998. Sex after all: high levels of diversity detected in the arctic clonal plant *Saxifraga cernua* using RAPD markers. *Molecular Ecology*, 7: 1701-1708.

Goulet, H. and J. T. Huber. 1993. *Hymenoptera of the world:* An identification guide to families. Minister of Supply and Services, Ottawa, Canada. 668 pp.

Grogan, P., M. Anders, P. Ambus, S. Jonasson. 2004. "Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms". Soil Biology and Biochemistry, 36(4): 641-654.

I Badano, E., C. G Jones, L. A Cavieres, and J. P Wright. 2006. Assessing impacts of ecosystem engineers on community organization: a general approach illustrated by effects of a high-Andean cushion plant. *Oikos*, 115: 369-385.

Insam, H., and M. S. A. Seewald. 2010. Volatile organic compounds (VOCs) in soils. *Biology and Fertility of Soils*, 46: 199-213.

IPBES. 2016. *Summary for policymakers of the assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production.* Potts, S. G., V. L. Imperatriz-Fonseca, H. T. Ngo, J. C. Biesmeijer, T. D. Breeze, L. V. Dicks, L. A. Garibaldi, R. Hill, J. Settele, A. J. Vanbergen, M. A. Aizen, S. A. Cunningham, C. Eardley, B. M. Freitas, N. Gallai, P. G. Kevan, A. Kovács-Hostyászki, P. K. Kwapong, J. Li, X. Li, D. J. Martins, G. Nates-Parra, J. S. Pettis, R. Rader, and B. F. Viana (eds.). Draft.

Kang, H. 2013. Ecological responses of plants to climate change: research trends and its applicability in Korea. *Journal of Ecology and Environment*, 46: 319-331. (in Korean).

Kang, H. and K. S. Bawa. 2003. Effects of successional status, habit, sexual systems, and pollinators on flowering patterns in tropical rain forest trees. *American Journal of Botany,* 90: 865-876.

Kang, H. and S. Jang. 2006. Ecological correlates of flowering seasons in Korean angiosperms. *Journal of Ecology and Field Biology,* 29: 353-360.

Lakka, H. K. 2013. The ecology of a freshwater crustacean: *Lepidurus arcticus* (Brachiopoda; Notostraca) in a High Arctic region.

Lee, Y. K., J. Y. Jung, Y. Hwang, K. Lee, D. Han, and E. J. Lee. 2012. *Arctic Tundra Plants.* Korea Polar Research Institute, Incheon. (in Korean).

Marshall, S. A. 2012. Flies: *The Natural History and Diversity of Diptera.* Firefly Books, Ontario, Canada. 616 pp.

Morgenstern, A.,Grosse, G., Günther, F., Fedorova, I., Schirrmeister, L. 2011. Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta. *The Cryosphere*, 5(4): 849-867.

Paytan, A., A. L. Lecher, N. Dimova, K. J. Sparrow, F. G. Kodovska, J. Murray, S. Tulaczyk, J. D. Kessler. 2015. "Methane transport from the active layer to lakes in the Arctic using Toolik lake, Alaska, as a case study". *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 112(17): 3636-3640.

Rasmann, S., and A. A. Agrawal. 2008. In defense of roots: a research agenda for studying plant resistance to belowground herbivory. *Plant Physiology,* 146: 875-880.

Renner, S. S. 2014. The relative and absolute frequencies of angiosperm sexual systems: dioecy, monoecy, gynodioecy, and an updated online database. American *Journal of Botany*, 101: 1588-1596.

Renner, S. S. and R. E. Ricklefs. 1995. Dioecy and its correlates in the flowering plants. *American Journal of Botany*, 82: 596-606.

Rowland, J. C., Jones, C. E., Altmann, G., Bryan, R., Crosby, B. T., Hinzman, L. D., Kane, D. L., Lawrence, D. M., Mancino, A., Marsh, P., McNamara, J. P., Romanvosky, V. E., Toniolo, H.,Travis, B. J., Trochim, E., Wilson, C. J., Geernaert, G. L. 2010. Arctic Landscapes in Transition: Responses to Thawing Permafrost. Eos, *Transactions American Geophysical Union*, 91(26): 229-230.

Rønning, O. 1996. The Flora of Svalbard. Norwegian Polar Institute, Oslo.

Samchyshyna, L., Hansson, L. A., & Christoffersen, K. 2008. Patterns in the distribution of Arctic freshwater zooplankton related to glaciation history. *Polar Biology*, 31(12): 1427-1435.

Singh, B. P., B. J. Hatton, B. Singh, A. L. Cowie, and A. Kathuria. 2010. Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. *Journal of Environmental Quality*, 39: 1224-1235.

Sjursen, H., A. Michelsen, M. Holmstrup. 2005. "Effects of freeze-thaw cycles on microarthropods and nutrient availability in a sub-Arctic soil". *Applied Soil Ecology*, 28(1): 79-93.

Sturm, M., Racine, C., & Tape, K. 2001. Climate change: Increasing shrub abundance

in the Arctic. *Nature,* 411(6837): 546-547.

Thompson, J. D. and S. C. H. Barrett. 1981. Selection for outcrossing, sexual selection, and the evolution of dioecy in plant. *American Naturalist*, 118: 443-449.

Totland, Ø. and B. Schulte-Herbriiggen. 2003. Breeding system, insect flower visitation, and floral traits of two alpine Cerustium species in Norway. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research,* 35: 242-247.

Tree of Sex: *A database of sexual systems*. 2014. Scientific Data, 1. doi: 10.1038/sdata.2014.15

Van Geest, G. J., Spierenburg, P., Van Donk, E., & Hessen, D. O. 2007. Daphnia growth rates in arctic ponds: limitation by nutrients or carbon?. *Polar Biology*, 30(2): 235-242.

Weider, L. J., & Hobæk, A. 2003. Glacial refugia, haplotype distributions, and clonal richness of the Daphnia pulex complex in arctic Canada. *Molecular Ecology*, 12(2): 463-473.

Weete, J. D., Abril, M., & Blackwell, M. 2010. Phylogenetic distribution of fungal sterols. *PLoS One,* 5(5), e10899.

Yampolsky, C. and H. Yampolsky. 1922. Distribution of sex forms in the phanerogamic flora. *Bibliotheca Genetica*, 3: 1-62.

Yoshikawa, K. L.D. Hinzman. "Shrinking thermokarst ponds and groundwater dynamics in discontinuous permafrost near council, Alaska". *Permafrost and Periglacial Processes*, 14(2): 151-160.

http://svalbardflora.no/ Vascular plants in Svalbard.

KOPRI 극지연구소

[별지 제12호서식]

연구개발결과 활용계획서(총괄)

1. 연구성과 및 활용 현황

가. 과학기술/학술적 연구성과

과학기술/학술적 연구성과(단위 : 건)													
전문학술지 논문게재				초청 강연 실적	학술대회 논문발표		지식재산권				수상 실적	출판실적	
국내논문		국외논문			국내	국제	출원		등록			저역서	보고서
SCI	비SCI	SCI	비SCI				국내	국외	국내	국외			
0	5	26	0	0	18	46	0	0	0	0	0	10	1

나. 전문학술지 논문게재 성과 정보

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제 번호	게재연월	논문제목	총저자 명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci 여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2011-00210064	201202	Exploiting Potentials from Interdisciplinary Perspectives with Reference to Global Atmosphere and Biomass Burning Management	Hossain, A. M. M. Maruf; Park, Kihong;	SCI	AEROSOL AND AIR QUALITY RESEARCH	12(1)	국외	SCI 등재	1.79	아니오	100
2011-00210064	201204	Combination of transmission electron and atomic force microscopy techniques to determine volume equivalent diameter of submicrometer particles	Tumolva, Laarnie; Park, Ji-Yeon; Park, Kihong;	SCI	MICROSCOPY RESEARCH AND TECHNIQUE	75(4)	국외	SCI 등재	1.792	아니오	100

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021064	201302	Linking atmospheric dimethyl sulfide and the Arctic Ocean spring bloom	Park, Ki-Tae; Lee, Kitack; Yoon, Young-Jun; Lee, Hyun-Woo; Kim, Hyun-Cheol; Lee, Bang-Yong; Hermansen, Ove; Kim, Tae-Wook; Holmen, Kim;	SCI	GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS	40(1)	국외	SCI 등재	3.982	예	40
2011-0021071	201302	Organic Layer Serves as a Hotspot of Microbial Activity and Abundance in Arctic Tundra Soils	Lee, Seung-Hoon; Jang, Inyoung; Chae, Namyi; Choi, Taejin; Kang, Hojeong;	SCI	MICROBIAL ECOLOGY	65(2)	국외	SCI 등재	3.277	아니오	50
2011-0021064	201302	Organic Layer Serves as a Hotspot of Microbial Activity and Abundance in Arctic Tundra Soils	Lee, Seung-Hoon; Jang, Inyoung; Chae, Namyi; Choi, Taejin; Kang, Hojeong;	SCI	MICROBIAL ECOLOGY	65(2)	국외	SCI 등재	3.277	아니오	50

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021069	201302	Non-linear response of vegetation to coherent warming over northern high latitudes	Jeong, Su-Jong; Ho, Chang-Hoi; Kim, Baek-Min; Feng, Song; Medvigy, David;	직접입력	REMOTE SENSING LETTERS	4(2)	국외	SCI등재	1.615	아니오	0
2011-0021064	201304	Mixing State of Size-Selected Submicrometer Particles During Photochemical and Combustion Events Measured with the Tandem System	Kim, Jaeseok; Maskey, Shila; Yoon, Young Jun; Park, Kihong;	SCI	AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY	47(7)	국외	SCI등재	2.78	예	10
2011-0021064	201304	A new approach for determination of fouling potential by colloidal nanoparticles during reverse osmosis (RO) membrane filtration of seawater	Park, Ji Yeon; Lim, Sungil; Park, Kihong;	SCI	JOURNAL OF NANOPARTICLE RESEARCH	15(4)	국외	SCI등재	2.175	아니오	4
2011-0021064	201305	Chemical characteristics of fine particulate matters measured during severe winter haze events in Ulaanbaatar, Mongolia	Batmunkh, Tsatsral; Kim, Young J.; Jung, Jin Sang; Park, Kihong; Tumendemberel, Bulgan;	SCI	JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION	63(6)	국외	SCI등재	1.204	예	4

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021067	201306	Isolation of facultatively anaerobic soil bacteria from Ny-lesund, Svalbard	Kim, Hye Min; Chae, Namyi; Jung, Ji Young; Lee, Yoo Kyung;	SCI	POLAR BIOLOGY	36(6)	국외	SCI등재	2.006	아니오	50
2011-0021064	201401	Mixing State of Size-Selected Submicrometer Particles in the Arctic in May and September 2012	Park, Kihong; Kim, Gibaek; Kim, Jae-suk; Yoon, Young-Jun; Cho, Hee-joo; Strom, Johan;	SCI	ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY	48(2)	국외	SCI등재	5.481	예	70
2011-0021071	201403	Use of Length Heterogeneity Polymerase Chain Reaction (LH-PCR) as Non-Invasive Approach for Dietary Analysis of Svalbard Reindeer, Rangifer tarandus platyrhynchus	Joo, Sungbae; Han, Donguk; Lee, Eun Ju; Park, Sangkyu;	SCI	PLOS ONE	9(3)	국외	SCI등재	3.234	아니오	40
2011-0021069	201407	A physical mechanism of the precipitation dipole in the western United States based on PDO-storm track relationship	Sung, Mi-Kyung; An, Soon-Il; Kim, Baek-Min; Woo, Sung-Ho;	SCI	GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS	41(13)	국외	SCI등재	4.456	아니오	80

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021067	201408	Bacterial community structure and soil properties of a subarctic tundra soil in Council, Alaska	Kim, Hye Min; Jung, Ji Young; Yergeau, Etienne; Hwang, Chung Yeon; Hinzman, Larry; Nam, Sungjin; Hong, Soon Gyu; Kim, Ok-Sun; Chun, Jongsik; Lee, Yoo Kyung;	SCI	FEMS MICROBIOLOGY ECOLOGY	89(2)	국외	SCI등재	3.875	예	100
2011-0021069	201409	Intensified Arctic warming under greenhouse warming by vegetation-atmosphere-sea ice interaction	Jeong, Jee-Hoon; Kug, Jong-Seong; Linderholm, Hans W.; Chen, Deliang; Kim, Baek-Min; Jun, Sang-Yoon;	SCI	ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS	9(9)	국외	SCI등재	4.09	예	50

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021064	201410	Constraint of soil moisture on CO2 efflux from tundra lichen, moss, and tussock in Council, Alaska, using a hierarchical Bayesian model	Kim, Y.; Nishina, K.; Chae, N.; Park, S. J.; Yoon, Y. J.; Lee, B. Y.;	SCI	BIOGEOSCIENCES	11(19)	국외	SCI등재	3.753	예	80
2011-0021064	201507	The relationship between cloud condensation nuclei (CCN) concentration and light extinction of dried particles: indications of underlying aerosol processes and implications for satellite-based CCN estimates	Shinozuka, Y.; Clarke, A. D.; Nenes, A.; Jefferson, A.; Wood, R.; McNaughton, C. S.; Strom, J.; Tunved, P.; Redemann, J.; Thornhill, K. L.; Moore, R. H.; Lathem, T. L.; Lin, J. J.; Yoon, Y. J.;	SCI	ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS	15(13)	국외	SCI등재	5.053	예	30

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021069	201507	Temperature Variation over East Asia during the Lifecycle of Weak Stratospheric Polar Vortex	Woo, Sung-Ho; Kim, Baek-Min; Kug, Jong-Seong;	SCI	JOURNAL OF CLIMATE	28(14)	국외	SCI등재	4.435	아니오	50
2011-0021069	201508	Seasonal Dependence of the Effect of Arctic Greening on Tropical Precipitation	Kang, Sarah M.; Kim, Baek-Min; Frierson, Dargan M. W.; Jeong, Su-Jong; Seo, Jeongbin; Chae, Yoojeong;	SCI	JOURNAL OF CLIMATE	28(15)	국외	SCI등재	4.435	예	15
2011-0021064	201510	Comparison of Hygroscopicity, Volatility, and Mixing State of Subnnicrometer Particles between Cruises over the Arctic Ocean and the Pacific Ocean	Kim, Gibaek; Cho, Hee-joo; Seo, Arom; Kim, Dohyung; Gim, Yeontae; Lee, Bang Yong; Yoon, Young Jun; Park, Kihong;	SCI	ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY	49(20)	국외	SCI등재	5.33	아니오	100

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021067	201510	Domibacillus tundrae sp nov., isolated from active layer soil of tussock tundra in Alaska, and emended description of the genus Domibacillus	Gyeong, Hye Ryeon; Baek, Kiwoon; Hwang, Chung Yeon; Park, Key Hun; Kim, Hye Min; Lee, Hong Kum; Lee, Yoo Kyung;	SCI	INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMATIC AND EVOLUTIONARY MICROBIOLOGY	65()	국외	SCI등재	2.511	아니오	50
2011-0021064	201512	Size-resolved cloud condensation nuclei concentration measurements in the Arctic: two case studies from the summer of 2008	Zabori, J.; Rastak, N.; Yoon, Y. J.; Riipinen, I.; Strom, J.;	SCI	ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS	15(23)	국외	SCI등재	5.053	예	50
2011-0021067	201512	Warming and increased precipitation enhance phenol oxidase activity in soil while warming induces drought stress in vegetation of an Arctic ecosystem	Seo, Juyoung; Jang, Inyoung; Jung, Ji Young; Lee, Yoo Kyung; Kang, Hojeong;	SCI	GEODERMA	N	국외	SCI등재	2.772	아니오	100

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci 여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021064	201602	CO2 efflux from the biological soil crusts of the High Arctic in a later stage of primary succession after deglaciation, Ny-Alesund, Svalbard, Norway	Chae, Namyi; Kang, Hojeong; Kim, Yongwon; Hong, Soon Gyu; Lee, Bang Yong; Choi, Taejin;	SCI	APPLIED SOIL ECOLOGY	98(0)	국외	SCI 등재	2.644	예	80
2011-0021064	201603	Measurement of environmental parameters in polar regions based on a ubiquitous sensor network	Chae, Namyi; Yang, Heekwon; Lee, Bang Yong; Lee, Chankil;	SCI	COLD REGIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY	123()	국외	SCI 등재	1.367	아니오	25
2011-0021064	201606	An analytical system enabling consistent and long-term measurement of atmospheric dimethyl sulfide	Jang, Sehyun; Park, Ki-Tae; Lee, Kitack; Suh, Young-Sang;	SCI	ATMOSPHERIC ENVIRONMENT	134(0)	국외	SCI 등재	3.281	아니오	30
2011-0021071	201203	북극권 스피츠베르겐 섬의 관속식물 국명 목록	현진오, 황영심, 이유경	KCI	Ocean and Polar Research	34(1)	국내	SCI 미등재		아니오	100
2011-0021067	201405	Soil organic carbon characteristic relating to geomorphology near Vestre Lovenbreen moraine in Svalbard	Ji Young Jung; Kyoo Lee ;Hyoun Soo Lim ;Hyun-cheol Kim;Eun Ju Lee;Yoo Kyung Lee	KCI	Journal of Ecology and Environment	37(2)	국내	SCI 미등재		아니오	100

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021071	201406	Geostatistical analyses and spatial distribution patterns of tundra vegetation in Council, Alaska	Jeong Soo Park ; Eun Ju Lee	KCI	Journal of Ecology and Environment	37(2)	국내	SCI미등재		아니오	100
2011-0021067	201409	Microbial community structure of the active layer soil from resolute, Canadian High Arctic	Ok Sun Kim;Hye Min Kim;Hong Kum Lee;Yoo Kyung Lee	한국기후변화학회지	Journal of Climate Change Research	5(3)	국내	SCI미등재		아니오	70
2011-0021067	201510	Soil development and bacterial community shifts along the chronosequence of the Midtre Lovenbreen glacier foreland in Svalbard	Hye Young Kwon; Ji Young Jung; Ok-Sun Ki; Dominique Laffly3; Hyoun Soo Lim;Yoo Kyung Lee	KCI	Journal of Ecology and Environment	38(4)	국내	SCI미등재		아니오	35

KOPRI 극지연구소

다. 지식재산권 성과 정보

과제 번호	출원등록 연월	재산권 구분	출원등록 구분	발명제목	출원 등록인	출원 등록국	발명자명	출원등록번호	활용형태	기여도

라. 산업지원 및 연구성과 활용

(단위: 건)

기술확산			연구성과활용(사업화 및 후속연구과제 등)		
기술이전	기술지도	기술평가	후속연구추진	사업화추진중	사업화완료

마. 국내외 기술료 징수 현황 (기업화 완료 또는 기술실시계약 체결 시 기재)

징 수 조 건	
징 수 현 황	백만 원(전년도말 현재)

바. 기업화 성과 (기업화 완료 또는 추진 중인 경우 반드시 기재)

업 체 명		기업화 완료[ ] 기업화 예정[ ]	년 월 일
제 품 명		제 품 용 도	
기업화이용유형 중 택일	신제품개발[ ], 기존제품 개선[ ], 신공정개발[ ], 기존공정개선[ ], 기타[ ]		

사. 경제적 파급 효과 (지난 1년간 실적)

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원 수)	그 밖의 효과

아. 향후 경제적 기대 효과

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원 수)	그 밖의 효과

KOPRI 극지연구소

2. 연구개발결과 활용 계획 (해당항목에 "○" 표시)

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

가. 당해연도 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

○ 연구 주체 : 극지연구소를 중심으로 한 국내 산·학·연 및 미국, 캐나다, 그린란드, 노르웨이, 러시아(예정) 등 북극 연구팀(연구 유니트)

○ 기 간 : 2011. 6 ~2016. 6

○ 연구 사이트 : 미국, 캐나다, 그린란드, 노르웨이, 러시아(예정) 등 동토층 관측 거점 현장

○ 환경변화 연구 : 대기-생태-식생-토양 등의 온난화로 인한 변화 현황 진단 및 분석

○ 측정 방법 :

- 이산화탄소,메탄 연속관측장비 구축 및 에어로졸 현장 측정, 자료 위성전송기술개발, 적용
- 동토층 토양 특성과 미생물 군집 구조의 상관관계 분석 및 동토 온도변화에 따른 수분 유동현상 이해
- 알래스카 동토층에서 획득한 1 m 깊이의 코어에서 미생물 군집구조, 토양 특성 등 분석
- 토양 및 식물체의 탄소/질소 안정동위원소 측정을 통해 질소이용가능도 추정
- 모니터링 실험구에 NDVI 센서 설치 및 3년 동안 획득한 대기·토양 환경데이터 분석
- 유기물이 많이 저장되어있는 지역과 건조하고 식생이 척박한 지역을 대상으로 토양 미생물 군집 분석 및 유기탄소의 분해 가능성에 따른 저장 풀 계산, py-GC/MS 방법을 이용한 유기탄소 특성 분석
- 영구동토층 사이트 관측자료를 활용하여 국지 지면-생권 모델 구동 및 검증
- 영구동토층 및 해빙 융해에 따른 급격한 기후 변화 수치적 재현
- 동토층 환경 변화 예측 및 북극권 미래 환경 변화 시나리오 도출
- 동토의 특성 파악 및 알래스카 장기모니터링과 환경요인과 식물의 공간적 분포 연관성 연구
- 동토층 토양 특성 분석 및 동결-융해 모사 실험

○ 목 적 :

- 지구온난화로 급속히 진행되는 북극권 지역에서의 환경변화와 기상현상, 지질학적, 생물학적 변화 감시 및 특성 연구를 위한 정밀 첨단 측정시스템/원천 요소기

KOPRI 극지연구소

술 개발 적용으로 인프라 구축

- 북극권 관측 거점 동토층의 물리학적 특성과 북극권 온실 기체 변동 요인인 동토층 유기탄소 및 미생물의 특성 이해
- 급격히 진행되고 있는 북극권 동토층의 기후변화 현상 진단 및 메커니즘 규명
- 기후환경변화가 북극 동토층 생태계에 미치는 영향을 파악하기 위하여 북극 동토층의 생산·소비·분해 과정 및 토양 환경 이해
- 동결-융해 교차순환의 영향에 의한 토양 내 탄소/질소 역학변화 규명

나. 활용방법

○ 북극권 연안을 대상으로 한 북극권 기후연구 측정시스템 확보를 통한 활동영역 확대 및 관련 연구 분야 (대기질, 동토층, 생물종다양성 연구, 전송기술 등) 확대

○ 동토층의 융해로 인한 지중, 지표, 대기층의 교란 및 인간에게 미칠 수 있는 영향 평가 자료 확보와 대응책 마련 정책 제시

○ 대기-동토-해양-모델링의 융합연구를 통하여 북극권 기후변화 관련연구에 대해 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, EU 그룹 등과 대등한 위치 또는 수월성 연구 분야 역량 확보 및 북극활동의 위상 제고

○ 극지형 원격 환경변화 관측 시스템 IT 기술 및 장비 개발의 독자 기술 확보

○ 대기/식생/해빙/지면/수문 종합 모델링 및 기후 변화 시나리오 제시

다. 차년도 이후 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

○ 연구 주체 : 극지연구소를 중심으로 한 국내 산·학·연 및 미국, 캐나다, 그린란드, 노르웨이, 러시아, 아이슬란드 등 북극 연구팀과의 지속적인 공조 체제 지속으로 효과적인 북극 환경변화 연구수행

○ 기 간 : 2016. 5 ~2020. 12

○ 연구 사이트 : 미국, 캐나다, 그린란드, 노르웨이, 러시아, 아이슬란드(예정) 등 동토층 관측 거점 현장의 안정적 운영으로 양질의 자료 생산

○ 환경변화 연구 :

- 대기-생태-식생-토양 등의 온난화로 인한 변화 현황 진단 및 분석과 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의·예측할 수 있는 모형 개발을 통해 북극권의 기후변화 뿐 아니라, 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용
- PLFA 지방산 라이브러리 구축을 통하여 미생물 군집 분석에 활용
- 북극권 동토를 대상으로 최신의 NGS기법을 이용하여 토양 메타지놈 분석 수행

○ 측정 방법 :

KOPRI 극지연구소

- 이산화탄소,메탄 연속관측장비 구축 및 에어로졸 현장 측정, 자료 위성전송기술개발, 적용
- 토양을 대상으로 pyrolysis GC/MS 분석방법을 이용하여 유기물 특성 분석 시도
- 동토층 토양미생물 지질 대사체 분석을 통한 지질 대사체 라이브러리 구축
- 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의/예측할 수 있는 통합 모형 개발을 통해 북극권의 기후 변화 뿐 아니라 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용

○ 목 적 : 구축된 관측 거점을 기반으로 지구온난화로 급속히 진행되는 북극권 지역에서의 환경변화와 기상현상, 지질학적, 생물학적 변화 감시 및 특성 연구를 위한 정밀 첨단 측정시스템/원천 요소기술 개발 적용과 미래 변화 예측(한반도와 북극권과의 변화 관계성 규명 등)

3. 기대효과

- 기술적 효과

○ 관측 거점에서의 USN 기반의 실시간 원격 환경 수집 시스템과 플럭스 관측 시스템을 활용한 무인 거점 관측지로의 관측 시스템 확대를 통한 북극 환경변화 감시 활용

○ 본 과제로 설계, 개발된 결과물인 USN 기반의 실시간 원격 환경 수집 시스템은 원격에서 인간의 개입 없이 환경정보를 수집하는 분야에 널리 활용 가능

○ 자연 환경을 실시간으로 원격에서 수집하기 위한 기술로써 해양극지 뿐 아니라 자연환경, 기후 등을 연구하기 위한 신뢰성 있는 데이터를 수집하기를 원하는 응용 분야에 널리 활용

○ 미세입자의 종합적 특성을 실시간으로 측정하여 입자로 인한 환경적, 경제적 피해 최소화를 위한 실시간 감시기술과 경보기술에 활용

○ 국가 기후변화 대응전략 수립에 필요한 북극권 미래 환경변화 시나리오 도출

○ 본 연구를 통하여 주로 유전체 사업에 초점을 맞춘 국내 연구의 다각화에 기여할 수 있으며 산업적으로 중요한 균주 및 단백질의 원천으로써의 극지 연구소의 위상제고

○ 토양 내 미생물 연구 플랫폼의 구축은 다양한 토양 미생물 연구에 활용되어 토양 미생물 연구의 저변 확대 및 산업적 영향력 극대화

○ 북극 식물다양성의 진화적 양상을 확인하기 위하여 스발바르 식물상의 계통과 생태적 특성에 대한 DB를 구축함. 기후변화와 서식지 파괴, 남벌 등 인간활동에 특히 취약한 자웅이주 식물의 보전에 기여

○ 극지 토양의 물질수송과 수리특성에 관한 연구를 통하여 극지의 육상생태계와 해

양생태계를 연계할 수 있는 연구 기반 마련

○ 극지생태계의 인위적 교란 영향 평가 및 기후변화 영향의 정확한 평가, 생태계 모델에 이용될 수 있는 새로운 생태 인자 제시를 통한 모델의 예측력 향상에 기여

- 사회·경제적 효과

○ 대기-동토-해양-모델링의 융합연구를 통하여 북극권 기후변화 관련연구에 대해 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, EU 그룹 등과 대등한 위치 또는 수월성 연구 분야 역량 확보 및 북극활동의 위상 제고

○ 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의·예측할 수 있는 모형 개발을 통해 북극권의 기후변화 뿐 아니라, 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용

○ 한반도에 발생하거나 또는 동아시아 장거리 이동 에어로졸입자 (황사입자)의 대기 중 거동 실시간 파악 및 국제 환경협약 및 대책 수립에 공헌

○ 극지에서 적응한 식물들의 분포 및 환경요인간의 관계를 바탕으로 기후변화에 의한 북극생태계 생물상 변화의 예측과 대응방안 수립 가능

○ 본 과제를 통해 새로운 학문영역의 석박사 인력을 배출함으로서 극지 관련 연구를 수행할 전문 인력 양성에 기여

※ 향후 연구개발결과 활용에 따른 기술적, 사회·경제적 파급효과(정량적, 정성적)를 전문가 입장에서 구체적으로 작성

- 예상매출액(단위: 백만 원), 수입대체효과(단위: 백만 원), 수출증대효과(단위: 백만 원), 원가절감(단위: 백만 원, 기존대비%), 에너지절감효과(단위: 백만 원, 기존대비%), 생산성 향상(단위: 백만 원, 기존대비%) 인력양성 또는 고용창출효과(단위: 명), 투자유치실적((단위: 백만 원), 인프라구축 효과 등

4. 문제점 및 건의사항(※ 연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점) :

○ 본 연구에서 진행된 실험실 내 모사실험과 함께, 실제 환경변화에 따른 동토층의 변화를 살펴보기 위한 장기적 연구 필요성 있음.

○ 또한, 전지구적 환경변화에 미치는 극지의 생태계 변화 영향을 분석하기 위해서는 각기 다른 연구팀과의 연구장소 통일, 현장 조사 시기 일치, 원활한 정보보유가 요구됨.

○ 북극에서의 현장 조사가 짧은 시기 동안 진행되기 때문에 현장실험에 필요한 조건(실험장비, 소모품 조달, 사전협의 등)이 반드시 충복되어야 좋은 결과 도출 가

능함.

○ 전체 실험 주제를 통일하는 것이 바람직하지는 않지만 각기 다른 실험 주제 중에는 같은 연구 주제 도출과 협동연구는 필요함. 예를 들면 탄소의 저장과 유출입이라는 주제로 각기 다른 실험 결과를 분석하는 것은 필요해 보임.

○ 각 실험에 대한 명문화된 방법론을 확립하여 차후 연구에 활용할 수 있는 제공하는 것이 필요하며 본 연구에서 얻어진 소중한 자료는 훼손에 민감한 북극 환경과 생태계 복원에 활용될 것으로 기대됨.

KOPRI
극지연구소

[별지 제12호서식]

연구개발결과 활용계획서(세부과제-1)

1. 연구성과 및 활용 현황

가. 과학기술/학술적 연구성과

과학기술/학술적 연구성과(단위 : 건)													
전문학술지 논문게재				초청 강연 실적	학술대회 논문발표		지식재산권				수상 실적	출판실적	
국내논문		국외논문			국내	국제	출원		등록			저역서	보고서
SCI	비SCI	SCI	비SCI				국내	국외	국내	국외			
0	0	15	0	0	5	17	0	0	0	0	0	1	1

나. 전문학술지 논문게재 성과 정보

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제 번호	게재 연월	논문제목	총저자 명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci 여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2011-0021064	201202	Exploiting Potentials from Interdisciplinary Perspectives with Reference to Global Atmosphere and Biomass Burning Management	Hossain, A. M. M. Maruf; Park, Kihong;	SCI	AEROSOL AND AIR QUALITY RESEARCH	12(1)	국외	SCI 등재	1.79	아니오	100
2011-0021064	201204	Combination of transmission electron and atomic force microscopy techniques to determine volume equivalent diameter of submicrometer particles	Tumolva, Laarnie; Park, Ji-Yeon; Park, Kihong;	SCI	MICROSCOPY RESEARCH AND TECHNIQUE	75(4)	국외	SCI 등재	1.792	아니오	100

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제 번호	게재 연월	논문제목	총저자 명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci 여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2011-0021064	201302	Linking atmospheric dimethyl sulfide and the Arctic Ocean spring bloom	Park, Ki-Tae; Lee, Kitack; Yoon, Young-Jun; Lee, Hyun-Woo; Kim, Hyun-Cheol; Lee, Bang-Yong; Hermansen, Ove; Kim, Tae-Wook; Holmen, Kim;	SCI	GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS	40(1)	국외	SCI 등재	3.982	예	40

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
2011-0021064	201302	Organic Layer Serves as a Hotspot of Microbial Activity and Abundance in Arctic Tundra Soils	Lee, Seung-Hoon; Jang, Inyoung; Chae, Namyi; Choi, Taejin; Kang, Hojeong;	SCI	MICROBIAL ECOLOGY	65(2)	국외	SCI 등재	3.277	아니오	50
2011-0021064	201304	Mixing State of Size-Selected Submicrometer Particles During Photochemical and Combustion Events Measured with the Tandem System	Kim, Jaeseok; Maskey, Shila; Yoon, Young Jun; Park, Kihong;	SCI	AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY	47(7)	국외	SCI 등재	2.78	예	10
2011-0021064	201304	A new approach for determination of fouling potential by colloidal nanoparticles during reverse osmosis (RO) membrane filtration of seawater	Park, Ji Yeon; Lim, Sungil; Park, Kihong;	SCI	JOURNAL OF NANOPARTICLE RESEARCH	15(4)	국외	SCI 등재	2.175	아니오	4

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021064	201305	Chemical characteristics of fine particulate matters measured during severe winter haze events in Ulaanbaatar, Mongolia	Batmunkh, Tsatsral; Kim, Young J.; Jung, Jin Sang; Park, Kihong; Tumendemberel, Bulgan;	SCI	JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION	63(6)	국외	SCI등재	1.204	예	4
2011-0021064	201401	Mixing State of Size-Selected Submicrometer Particles in the Arctic in May and September 2012	Park, Kihong; Kim, Gibaek; Kim, Jae-suk; Yoon, Young-Jun; Cho, Hee-joo; Strom, Johan;	SCI	ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY	48(2)	국외	SCI등재	5.481	예	70
2011-0021064	201410	Constraint of soil moisture on CO2 efflux from tundra lichen, moss, and tussock in Council, Alaska, using a hierarchical Bayesian model	Kim, Y.; Nishina, K.; Chae, N.; Park, S. J.; Yoon, Y. J.; Lee, B. Y.;	SCI	BIOGEOSCIENCES	11(19)	국외	SCI등재	3.753	예	80

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci 여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021064	201507	The relationship between cloud condensation nuclei (CCN) concentration and light extinction of dried particles: indications of underlying aerosol processes and implications for satellite-based CCN estimates	Shinozuka, Y.; Clarke, A. D.; Nenes, A.; Jefferson, A.; Wood, R.; McNaughton, C. S.; Strom, J.; Tunved, P.; Redemann, J.; Thornhill, K. L.; Moore, R. H.; Lathem, T. L.; Lin, J. J.; Yoon, Y. J.;	SCI	ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS	15(13)	국외	SCI 등재	5.053	예	30
2011-0021064	201510	Comparison of Hygroscopicity, Volatility, and Mixing State of Subnnicrometer Particles between Cruises over the Arctic Ocean and the Pacific Ocean	Kim, Gibaek; Cho, Hee-joo; Seo, Arom; Kim, Dohyung; Gim, Yeontae; Lee, Bang Yong; Yoon, Young Jun; Park, Kihong;	SCI	ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY	49(20)	국외	SCI 등재	5.33	아니오	100

KOPRI 극지연구소

전문학술지 논문게재 성과정보											
과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지구분	sci여부	impact Factor	국제공동연구논문	기여도
2011-0021064	201512	Size-resolved cloud condensation nuclei concentration measurements in the Arctic: two case studies from the summer of 2008	Zabori, J.; Rastak, N.; Yoon, Y. J.; Riipinen, I.; Strom, J.;	SCI	ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS	15(23)	국외	SCI등재	5.053	예	50
2011-0021064	201602	CO2 efflux from the biological soil crusts of the High Arctic in a later stage of primary succession after deglaciation, Ny-Alesund, Svalbard, Norway	Chae, Namyi; Kang, Hojeong; Kim, Yongwon; Hong, Soon Gyu; Lee, Bang Yong; Choi, Taejin;	SCI	APPLIED SOIL ECOLOGY	98(0)	국외	SCI등재	2.644	예	80
2011-0021064	201603	Measurement of environmental parameters in polar regions based on a ubiquitous sensor network	Chae, Namyi; Yang, Heekwon; Lee, Bang Yong; Lee, Chankil;	SCI	COLD REGIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY	123()	국외	SCI등재	1.367	아니오	25
2011-0021064	201606	An analytical system enabling consistent and long-term measurement of atmospheric dimethyl sulfide	Jang, Sehyun; Park, Ki-Tae; Lee, Kitack; Suh, Young-Sang;	SCI	ATMOSPHERIC ENVIRONMENT	134(0)	국외	SCI등재	3.281	아니오	30

KOPRI 극지연구소

다. 지식재산권 성과 정보

과제 번호	출원등록 연월	재산권 구분	출원등록 구분	발명제목	출원 등록인	출원 등록국	발명자명	출원등록번호	활용형태	기여도

라. 산업지원 및 연구성과 활용

(단위: 건)

기술확산			연구성과활용(사업화 및 후속연구과제 등)		
기술이전	기술지도	기술평가	후속연구추진	사업화추진중	사업화완료

마. 국내외 기술료 징수 현황 (기업화 완료 또는 기술실시계약 체결 시 기재)

징 수 조 건	
징 수 현 황	백만 원(전년도말 현재)

바. 기업화 성과 (기업화 완료 또는 추진 중인 경우 반드시 기재)

업 체 명		기업화 완료[ ] 기업화 예정[ ]	년 월 일
제 품 명		제 품 용 도	
기업화이용유형 중 택일	신제품개발[ ], 기존제품 개선[ ], 신공정개발[ ], 기존공정개선[ ], 기타[ ]		

사. 경제적 파급 효과 (지난 1년간 실적)

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원 수)	그 밖의 효과

아. 향후 경제적 기대 효과

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원 수)	그 밖의 효과

KOPRI 극지연구소

2. 연구개발결과 활용 계획 (해당항목에 "○" 표시)

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

가. 당해연도 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

○ 연구 주체 : 극지연구소를 중심으로 한 국내 산·학·연 및 미국, 캐나다, 그린란드, 노르웨이, 러시아(예정) 등 북극 연구팀(연구 유니트)

○ 기 간 : 2011. 6 ~2016. 6

○ 연구 사이트 : 미국, 캐나다, 그린란드, 노르웨이, 러시아(예정) 등 동토층 관측 거점 현장

○ 환경변화 연구 : 대기-생태-식생-토양 등의 온난화로 인한 변화 현황 진단 및 분석

○ 측정 방법 : 이산화탄소,메탄 연속관측장비 구축 및 에어로졸 현장 측정, 자료 위성 전송기술개발, 적용

○ 목 적 : 지구온난화로 급속히 진행되는 북극권 지역에서의 환경변화와 기상현상, 지질학적, 생물학적 변화 감시 및 특성 연구를 위한 정밀 첨단 측정시스템/원천 요소기술 개발 적용으로 인프라 구축

나. 활용방법

○ 북극권 연안을 대상으로 한 북극권 기후연구 측정시스템 확보를 통한 활동영역 확대 및 관련 연구 분야 (대기질, 동토층, 생물종다양성 연구, 전송기술 등) 확대

○ 동토층의 융해로 인한 지중, 지표, 대기층의 교란 및 인간에게 미칠 수 있는 영향 평가 자료 확보와 대응책 마련 정책 제시

○ 대기-동토-해양-모델링의 융합연구를 통하여 북극권 기후변화 관련연구에 대해 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, EU 그룹 등과 대등한 위치 또는 수월성 연구 분야 역량 확보 및 북극활동의 위상 제고

○ 극지형 원격 환경변화 관측 시스템 IT 기술 및 장비 개발의 독자 기술 확보

다. 차년도 이후 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

○ 연구 주체 : 극지연구소를 중심으로 한 국내 산·학·연 및 미국, 캐나다, 그린란드, 노르웨이, 러시아, 아이슬란드 등 북극 연구팀과의 지속적인 공조 체제 지속으로 효과적인 북극 환경변화 연구수행

○ 기 간 : 2016. 5 ~2020. 12

○ 연구 사이트 : 미국, 캐나다, 그린란드, 노르웨이, 러시아, 아이슬란드(예정) 등 동토층 관측 거점 현장의 안정적 운영으로 양질의 자료 생산

○ 환경변화 연구 : 대기-생태-식생-토양 등의 온난화로 인한 변화 현황 진단 및 분석과 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의·예측할 수 있는 모형 개발을 통해 북극권의 기후변화 뿐 아니라, 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근

거로 활용

○ 측정 방법 : 이산화탄소,메탄 연속관측장비 구축 및 에어로졸 현장 측정, 자료 위성 전송기술개발, 적용

○ 목 적 : 구축된 관측 거점을 기반으로 지구온난화로 급속히 진행되는 북극권 지역에서의 환경변화와 기상현상, 지질학적, 생물학적 변화 감시 및 특성 연구를 위한 정밀 첨단 측정시스템/원천 요소기술 개발 적용과 미래 변화 예측(한반도와 북극권과의 변화 관계성 규명 등)

3. 기대효과

- 기술적 효과

○ 관측 거점에서의 USN 기반의 실시간 원격 환경 수집 시스템과 플럭스 관측 시스템을 활용한 무인 거점 관측지로의 관측 시스템 확대를 통한 북극 환경변화 감시

○ 본 과제로 설계.개발된 결과물인 USN 기반의 실시간 원격 환경 수집 시스템은 원격에서 인간의 개입 없이 환경정보를 수집하는 분야에 널리 활용 가능

○ 자연 환경을 실시간으로 원격에서 수집하기 위한 기술로써 해양극지 뿐 아니라 자연환경, 기후 등을 연구하기 위한 신뢰성 있는 데이터를 수집하기를 원하는 응용 분야에 널리 활용

○ 미세입자의 종합적 특성을 실시간으로 측정하여 입자로 인한 환경적, 경제적 피해 최소화를 위한 실시간 감시기술과 경보기술에 활용

- 사회·경제적 효과

○ 대기-동토-해양-모델링의 융합연구를 통하여 북극권 기후변화 관련연구에 대해 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, EU 그룹 등과 대등한 위치 또는 수월성 연구 분야 역량 확보 및 북극활동의 위상 제고

○ 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의·예측할 수 있는 모형 개발을 통해 북극권의 기후변화 뿐 아니라, 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용

○ 한반도에 발생하거나 또는 동아시아 장거리 이동 에어로졸입자 (황사입자)의 대기 중 거동 실시간 파악 및 국제 환경협약 및 대책 수립에 공헌

※ 향후 연구개발결과 활용에 따른 기술적, 사회·경제적 파급효과(정량적, 정성적)를 전문가 입장에서 구체적으로 작성

- 예상매출액(단위: 백만 원), 수입대체효과(단위: 백만 원), 수출증대효과(단위: 백만 원), 원가절감(단위: 백만 원, 기존대비%), 에너지절감효과(단위: 백만 원, 기존대비%), 생산성 향상(단위: 백만 원, 기존대비%) 인력양성 또는 고용창출효과(단위: 명), 투자유치실적((단위: 백만 원), 인프라구축 효과 등

4. 문제점 및 건의사항(※ 연구성과의 제고를 위한 제도·규정 및 연구관리 등의 개선점) : -

주관연구기관의 자체평가 의견서(세부과제-1)

1. 과제현황

과제코드	2011-0021071

부처사업명(대)	거대과학기술개발				
사업명(중)	해양극지 기초·원천기술개발사업				
세부사업명(소)	환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구				
부처 기술분류	(대)	(중)	(소)	국가기술지도 (NTRM)	B030308
국가과학기술 표준분류체계	(E)	(E05)	(E0503)		
총 괄 과 제	환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구		총괄책임자(기관)		이방용 (극지연구소)
과 제 명	북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발		연 구 단 계		2단계
연 구 기 관	극지연구소		연 구 책 임 자		이방용

연 구 기 간 연 구 비 (천원)	연차	기간	정부출연금	민간출연금	계
	1차연도	2013.06.23-2014.06.22	890,000		890,000
	2차연도	2014.06.23-2015.06.22	890,000		890,000
	3차연도	2015.06.23-2016.06.22	890,000		890,000
	4차연도				
	5차연도				
	계		2,670,000		2,670,000

참 여 기 업			
상 대 국		상대국 연구기관	

비 고 : 총괄과제란은 총괄과제에 해당하는 경우에만 기재합니다.

2. 평가일: 2016.06.29

3. 평가자

소 속	직 위	성 명
극지연구소	책임연구원	이방용

4. 평가자 확인

본인은 평가대상 과제의 연구결과를 객관적으로 기술하고, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 이 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

서 명	이 방 용

210㎜×297㎜[백상지 80g/㎡(재활용품)]

Ⅰ. 연구개발실적

1. 연구개발성과의 우수성 및 창의성

○ 최근 북극은 지구 이상기후에 따른 자연환경적인 변화의 척도이자 에너지와 자원·식량문제 해결을 위한 개발 가능성 고조

※ 북극과 같은 미개척 영역에서의 과학·공학 시장의 선점 측면에서의 정밀 기후환경변화 진단과 예측, 미래 에너지 자원 개발 및 첨단원천기술의 확보와 실용화 등 국가차원의 연구개발 및 원천기술 확보와 현장 적용이 시급한 실정임

※ 또한, 글로벌 이슈에 대응과 국제사회 동참 및 우리나라의 국익 확보와 과학발전에 기여할 접근성 강화 필요가 있음

○ 한편, 북극권의 급격한 환경변화에 대한 동토층 지역 관측 거점 확보와 ICT 융·복합 관측기술 개발·적용을 통해 예측 기초연구의 선제적 착수 필요성에 의해 수행된 국내 유일의 북극이사회 국가내 동토층 환경변화 연구사업임

○ 이에 본 과제에서는 북극권 글로벌 이슈 대응과 정부추진 미션 수행을 위해, 2011년 6월 23일부터 시작하여 2016년 6월 22일까지 5개년 동안, 북극해를 둘러싼 미국, 캐나다, 그린란드(덴마크), 노르웨이, 러시아 등 북극이사회 국가를 대상으로 환북극권 동토층 지역(Circum-Arctic Permafrost Area) 환경변화 관측 거점을 확보하고, 관측 거점에 적용할 첨단 측정시스템/원천 요소기술을 국제 공동 및 산학연 공조 유니트 체제하에서 개발하여, 북극권 환경 변화 과정 이해 및 예측을 위한 정보 제공을 목표로 하고 있는 국내외적으로 매우 차별화된 창의적인 사업임

2. 연구개발성과의 파급효과

○ 관측 거점에서의 USN 기반의 실시간 원격 환경 수집 시스템과 플럭스 관측 시스템을 활용한 무인 거점 관측지로의 관측 시스템 확대를 통한 북극 환경변화 감시 활용

○ 본 과제로 설계, 개발된 결과물인 USN 기반의 실시간 원격 환경 수집 시스템은 원격에서 인간의 개입 없이 환경정보를 수집하는 분야에 널리 활용 가능

○ 자연 환경을 실시간으로 원격에서 수집하기 위한 기술로써 해양극지 뿐 아니라 자연 환경, 기후 등을 연구하기 위한 신뢰성 있는 데이터를 수집하기를 원하는 응용 분야에 널리 활용

○ 대기-동토-해양-모델링의 융합연구를 통하여 북극권 기후변화 관련연구에 대해 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, EU 그룹 등과 대등한 위치 또는 수월성 연구 분야 역량 확보 및 북극활동의 위상 제고

○ 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의·예측할 수 있는 모형 개발을 통해 북극권의 기후변화 뿐 아니라, 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용

3. 연구개발성과에 대한 활용가능성

○ 북극권 연안을 대상으로 한 북극권 기후연구 측정시스템 확보를 통한 활동영역 확대 및 관련 연구 분야 (대기질, 동토층, 생물종다양성 연구, 전송기술 등) 확대

○ 동토층의 융해로 인한 지중, 지표, 대기층의 교란 및 인간에게 미칠 수 있는 영향평가 자료 확보와 대응책 마련 정책 제시

○ 대기-동토-해양-모델링의 융합연구를 통하여 북극권 기후변화 관련연구에 대해 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, EU 그룹 등과 대등한 위치 또는 수월성 연구 분야 역량 확보 및

북극활동의 위상 제고

4. 연구개발 수행노력의 성실도

○【환경변화에 따른 사업관리 적절성】

- 우리나라의 북극이사회 정식옵서버 획득(’13.5) 및 스발바르 조약 체결(‘12년)에 따라 북극에서 과학적 연구 활동 확대 추진
- 극지 분야의 기초·원천기술 연구에 대한 성과활용·확산의 체계적인 운영을 위해 기술전문가, 기술사업화 전문가, 변리사 등으로 연구유니트를 구성하여, 사업의 효과적 수행

○【평가결과 등의 사업개선 반영도】

- ‘13년 중간평가 지적사항을 반영하여 대학연구 지원(학연 연계의 다학제적 연구) 확대(‘13~) 및 목표관리(’15년~) 강화를 실시하였음
- ‘14년 예산안 국회 미방위 지적사항을 반영하여 범부처 차원의 북극정책 수립·시행, 대학지원 확대 등을 실시하였음

○【환경변화에 따른 사업관리 적절성】

- 우리나라의 북극에서 위치 변화에 따른(북극이사회 정식옵서버 획득, 스발바르 조약체결 등) 북극 연구범위 및 연구비 확대, 연구성과확산 조직인 연구유니트 구성의 적절성이 인정됨

5. 공개발표된 연구개발성과(논문 · 지적재산권 · 발표회 개최 등)

○ 논문

Park, Kihong, Kim, Gibaek, Kim, Jae-suk, Yoon, Young-Jun, Cho, Hee-joo, and Strom, Johan. Mixing State of Size-Selected Submicrometer Particles in the Arctic in May and September 2012. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 48(2), 909-919 (2014)

Kim, Y., Nishina, K., Chae, N., Park, S. J., Yoon, Y. J., and Lee, B. Y., Constraint of soil moisture on CO2 efflux from tundra lichen, moss, and tussock in Council, Alaska, using a hierarchical Bayesian mode. BIOGEOSCIENCES, 11(19), 5567-5579 (2014)

Shinozuka, Y., Clarke, A. D., Nenes, A., Jefferson, A., Wood, R., McNaughton, C. S., Strom, J., Tunved, P., Redemann, J., Thornhill, K. L., Moore, R. H., Lathem, T. L., Lin, J. J, and Yoon, Y. J. The relationship between cloud condensation nuclei (CCN) concentration and light extinction of dried particles: indications of underlying aerosol processes and implications for satellite-based CCN estimates. ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS, 15(13), 7585-7604 (2015)

Kim, Gibaek, Cho, Hee-joo, Seo, Arom, Kim, Dohyung, Gim, Yeontae, Lee, Bang Yong, Yoon, Young Jun, and Park, Kihong. Comparison of Hygroscopicity, Volatility, and Mixing State of Subnnicrometer Particles between Cruises over the Arctic Ocean and the Pacific Ocean, ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 49(20), 12024-12035 (2015)

Kim, J., Maskey, S., Yoon, Y. J. and Park, K., Mixing state of size-selected submicrometer particles during photochemical and combustion events measured with the tandem system. Aerosol Science and Technology 47, 746-754 (2013)

Zabori, J., Rastak, N., Yoon, Y. J., Riipinen, I., and Strom, J., Size-resolved cloud condensation nuclei concentration measurements in the Arctic: two case studies from the summer of 2008. ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS, 15(23), 13803-13817 (2015)

Chae, Namyi; Kang, Hojeong; Kim, Yongwon; Hong, Soon Gyu; Lee, Bang Yong; Choi, Taejin;, CO2 efflux from the biological soil crusts of the High Arctic in a later stage of primary succession after deglaciation, Ny-Alesund, Svalbard, Norway, APPLIED SOIL ECOLOGY, 98, 92-102 (2016)

Chae, Namyi, Yang, Heekwon, Lee, Bang Yong, and Lee, Chankil, Measurement of environmental parameters in polar regions based on a ubiquitous sensor network, COLD REGIONS SCIENCE AND

TECHNOLOGY, 123, 22-31 (2016)

○ 학술발표_구두

Kihong Park, Gibaek Kim, Young Jun Yoon,” Shipborne measurement of hygroscopicity and volatility of fine particles during the Artic cruise”, The 12th Annual UNU & GIST Joint Programme Symposium, Oct 27-29, DaNang, Vietnam, 2014.

Gibaek Kim, Young Jun Yoon, Hee-joo Cho, and Kihong Park*, “Characterization of Arctic Aerosol Particles during the Arctic Ocean Expedition in 2013", American Association for Aerosol Research, Oct 20-Oct 24, Orlando, Florida, USA, 2014.

Gibaek Kim, Young-Jun Yoon, Hee-joo Cho, and Kihong Park*, “Hygroscopicity, Volatility, Morphology, and Elemental Composition of Ultrafine Particles during the Arctic Ocean Expedition in 2013”, International Aerosol Conference, Aug 28-Sep 2, Busan, Korea, 2014.

Kihong Park, Gibaek Kim, Jaesuk Kim, Young Jun Yoon, Heeju Cho, and Johan Ström," Hygroscopicity, volatility, and mixing state of submicrometer particles in the Arctic (Ny-Alesund, Svalbard)", Asian Aerosol Conference (AAC), 2-5 December, Sydney, Australia, 2013.

Kihong Park, Gibaek Kim, Jaesuk Kim, Young Joon Yoon, and Heeju Cho, "Mixing state ofsize-selected submicrometer particles in the Arctic (Ny-Ålesund, Svalbard) in the spring and fall of 2012", Americal Association for Aerosol Research, Sep 29-Oct 4, Portland, USA, 2013.

김기백, 윤영준, 박기홍, “선박관측을 통한 북극해와 태평양에서의 에어로졸 흡습성, 휘발성, 혼합특성 측정” Proceedings of the 58th Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 153, November 5-7, Yeosu Expo Convention, Korea, 2015.

Kihong Park*, Gibaek Kim, and Young Jun Yoon, “Shipborne measurements of hygroscopicity and volatility of fine particles during the Arctic cruise", 2014 UMS-GIST symposium, Sep 23-Sep 24, Gwangju, Republic of Korea, 2014.

김기백, 윤영준, 박기홍 “레이저유도 플라즈마 분광분석 장치와 TEM/EDS를 이용한 북극 에어로졸의 원소성분 및 형태학적 분석”, Proceedings of the 14th Korean conference on Aerosol and Particle Technology, pp197, July 3-5, Yongpyung, Korea, 2013.

KaYan Chong, Kihong Park “CCN activity of mixed black carbon particles with core-shell structure”, Proceedings of the 14th Korean conference on Aerosol and Particle Technology, pp36, July 3-5, Yongpyung, Korea, 2013.

김기백. 이희성. 윤영준. 박기홍 "북극 에어로졸의 흡습성, 휘발성 특성 측정 연구" Proceedings of the 56th Korean Society for Atmospheric Environment. p115, September 5-6, BEXCO, Korea, 2013.

○ 도서

- 박병권, 이방용, 윤영준(공 번역), *이누이트의 일상생활*, 한국해양과학기술원, 299쪽 (2013)

○ 기타

- 북극사진전시전. 2014년 4월 15일~20일. 서울메트로미술관.

비 고 :각 평가항목에 따라 자체평가한 내용을 상세하게 기술(각 항목별 200자 이내)

Ⅱ. 연구목표 달성도

번호	세 부 연 구 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
1	북극 동토층 지역 관측 거점 운영	○ 자료수집, 개발 요소기술 현장적용 ○ 제1거점 공학적/열적물질 특성 탐측, 영구동토층 및 활동층 동하중 특성 파악	80 (러시아 거점 선정

		○ 제4거점 관측 안정화 ○ 제5거점 러시아 북극 동토기반 연구거점 후보지 답사 및 후보지 선정, 차기년도 한-러 공동연구를 위한 연구 협력시스템 구축	추진 연기)
2	동토층 장기 감시 기술 및 변화량 추적 기술개발	○ 대기/지질학적 자료수집/특성분석 ○ 동토층 관측 거점 종합 연계 USN 기반, cyber-infrastructure 기술 안정화 정착 및 각 거점 최적 적용	100
3	동토-대기간 온실 기체 순환 이해를 위한 시스템과 에어로졸 및 블랙카본 관측 시스템 운영 및 거점 추가에 따른 시스템 추가 구축	○ 메탄/이산화탄소 플럭스 자료 생산 및 DB 구축, 에어로졸 자료 생산 및 DB 구축, 블랙카본 자료 생산 및 DB 구축 ○ 한-노르웨이 제플린관측소 동토대기 구름응결핵 연속관측 DB구축	100
4	공동연구 유니트 체제 지속 가동 및 데이터 공유, 공동분석	○ 국제공동연구 주도권 확립, 자료공유/배분/분석의 체계 확립(국내 · 외 산 · 학 · 연 연구 협연 체제 구축, 시행) ○ 자료수집/비교분석/결과해석/국제공동연구 지속적인 수행 ○ 극지연구소의 KPDC와 연계, 자료공유, 활용성 제고	100
5	북극에어로졸의 물리화학적 특성 및 이동 특성 연구	○ 장거리이동 에어로졸의 이동특성 규명	100
6	USN 기반, cyber-infrastructure 기술, 항온기술 개발	○ 원격 제어 및 현장 적응기술 개발 확립	100
7	알래스카 카운실 사이트 식생특성 정량화	○ 알래스카 카운실 사이트의 잎 특성, 식생군락의 구조와 기능 정량화	100

KOPRI 극지연구소

Ⅲ. 종합의견

1. 연구개발성과에 대한 종합의견

■ 제한된 시간 및 재원에도 불구하고, 연구대상에 대해 도전적이고 종합적 접근을 실현하였고, 어려운 여건 속에서 밑바탕이 되는 연구의 기반을 확보하는 연구로서, 향후 여타 북극 관련 연구의 활성화를 위해 노력한 결과가 보임

■ 북극을 극지 극한이라는 연구 모델로 인식하고, 장기적 비전 반영 및 학문적 실익도 높이는 방향으로 추진할 것을 예상하며, 신연구분야 제시로 예산의 추후 증액 가능성도 기대함

■ 관측지를 위한 타국의 연구기관과 보다 유기적인 자료공유와 상호보완적인 연구방향을 잡아간다면, 더 많은 성과를 이룰 수 있을 것임

■ 동토측 환경변화 관측 시스템 2곳에 설치하였고, 기술 개발이 적절하게 되었음. 대한민국의 북극 옵서버 지위 확보는 대한민국 위상을 매우 높였다고 생각됨

■ 환경제약이 많은 상황에서, 관측시스템구축 및 데이터 취득은 우수사례로 평가되며, 북극이사회 진출이 미래극지 연구환경 조성을 위해 중요한 기회로 평가됨

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

■ 실질적인 연구비의 부족으로 (실제 사용가능한 직접비는 총액 대비 약 60%에 해당) 분야간 연구비 균형 배분이 충족되지 못하였고, 향후 연구결과 도출을 위해 필요한 과정으로서 반영할 것을 요구함

■ 극지 연구의 애로사항(접근성)을 극복하기 위한 국제 공동 연구 기반 조성을 잘 진행해 가는 것으로 인식되며, 이를 위해서 각 국가간 협약을 체계하고 제약적인 요소가 많은 국제사회에서의 높은 벽을 넘어 효과적으로 국제공동연구를 수행하고 있음을 고려해 줄 것을 요구함

3. 연구개발성과의 활용방안 및 향후 조치에 대한 의견

■ 북극권 실제적으로 밀접한 연구결과가 도출되어야 한다고 생각되며, 이를 위해서는 국가적 차원의 차별화된 과감한 투자와 지속적 지원이 이루어져야 한다고 사료됨. 이를 통해 초보적인 극지, 동토층 연구를 위한 기초 기반시스템 구축에 일차적으로 성공하여 향후 우수한 관측자료 획득이 기대되며, 타 연구팀에 이러한 자료를 제공하여 국내 연구개발 수준 제고에 기여할 것으로 판단됨

■ 극지의 장기적인 기후, 환경변화를 이해하기 위해서는, 기본적인 inventory 연구에서 확장된 process (미생물-기후-동토층 지화학)를 종합적으로 규명 할 수 있는 연구 방안을 마련하여, 보다 수월적 연구 수행을 계획하고 있음.

Ⅳ. 보안성 검토

1. 연구책임자의 의견

없음

2. 연구기관 자체의 검토결과

■ 극지 연구기반을 조성하는데 있어서, 중요한 사업으로 인식함

■ 대한민국의 북극 옵서버 지위 확보는 대한민국 위상을 매우 높였다고 생각됨

210㎜×297㎜[백상지 80g/㎡(재활용품)]

성과소개서(세부과제-1)

과제 및 연구자 정보

과제번호	2011-0021064			
과제명	북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발			
사업분류	거대과학연구개발사업>해양극지기초원천기술개발사업>해양극지기초원천기술개발사업			
총 연구기간	2011/06/23 ~ 2016/06/22			
총 연구비	3,990,000,000 원			
과제 개요	○ 환북극권 입체형 무인 원격 정밀 관측 거점(Node) 설치 및 정밀자료 확보와 안정화 기술개발 - 미국 알래스카/캐나다 캠브리지 베이/노르웨이 스발바드/그린란드 자켄버그 및 노르드/러시아 틱시 등 북극권 연안 동토층 지역 - 동토 활동층의 열적특성, 동토층 하부의 3차원 영상화 및 기하학적 분포 특성 연구, 토양의 공학적 특성 분석 - 극지역 무인 원격 입체형 정밀종합관측시스템 및 첨단 유비쿼터스 센싱 네트워크(USN), 기반 설계/개발/적용 등 융복합 기초원천기술 개발, cyber-infrastructure 운영기술 개발과 GPS 연구 기반구축 ○ 국제공동연구 수행 - 북극연구계획국제컨퍼런스(ICARP; International Conference on Arctic Research Planning)를 근거로 확정된 12개 장기 연구프로젝트 참여방안 도출 - 스발바드종합북극측정체계(SIOS; Svalbard Integrated Arctic Observing System), WMO 프로그램, 국제영구동토층협회(IPA; International Permafrost Association) 등과 긴밀한 공동연구 수행 ○ 환북극 연구유니트(Arctic Environment Research Unit) 체계 구축 - 다학제 산?학?연 연구진이 참여하는 영구동토층 연구 분야별 유니트 구성 - 주관연구기관의 자료센터와 연계한 DB 및 웹서비스 공유 기반구축			
연구자	성명	이방용	소속	한국해양과학기술원 부설 극지연구소
	전화번호	032-760-5302	이메일	bylee@kopri.re.kr

성과기본정보

성과명	북극권 동토층 환경변화 관측 거점 확보 및 관측기술 개발		
성과요약	○ 환북극권 동토층 환경변화 정밀 측정 관측 거점(Node) 확보 및 미국, 캐나다, 노르웨이, 그린란드 등 거점별 환경변화 자료 수집과 특성 분석 · 미국 알래스카 카운실 거점 동토-대기간 온실 기체 순환 이해 · 캐나다 누나봇 주 캠브리지 베이 거점 대기-동토 온실기체 교환 특성 · 노르웨이 스발바르 거점 북극 대기에서의 구름응결핵(CCN)의 계절별 특성, DMS 농도 변화 관측 · 그린란드 노르드 거점 복사, 에디 공분산 시스템 측정 구축 및 분석 ·러시아 동토 기반 거점 구축을 위한 한-러 국제공동 추진 ○ 극지환경 센서관측네트워크, 전송시스템 개발 및 현장적용(2011년 국내 최초시행) · 국내 대학-중소 산업체와의 측정시스템 개발, HW/SW 개발, 현장 적용 · USN 기반 기술 개발 및 현장 적용 ○ 국내·외 연구 유니트 조성		
국문 키워드	관측 거점	온실 기체	구름응결핵
	센서관측네트워크	연구 유니트	
영문 키워드	Permafrost Monitoring Node	Greenhouse gas	Cloud condensation nuclei
	Ubiquitous Sensor Network	Arctic Research Unit	
이미지			

성과분류

성과유형	이론	방법/기법	알고리즘/메커니즘	소재/물질	종자/종	
	□	■	□	□	□	
	기술/공정	SW	데이터(Data)	표준/규제	정책입안/신규프로젝트	기타(노하우 등)
	□	□	□	□	□	□

과학기술표준분류	대분류	중분류	소분류
	[ND]지구과학(지구/대기/해양/천문)	[ND11]극지과학	[ND1103]극지환경감시/극지 생지화학 순환
	-	-	-
	-	-	-

한국표준산업분류	분류1	분류2	분류3	분류4	분류5
	[M]전문, 과학 및 기술 서비스업	[M73]기타 전문, 과학 및 기술 서비스업	[M739]그외 기타 전문, 과학 및 기술 서비스업	[M7390]그외 기타 전문, 과학 및 기술 서비스업	[M73909]그외 기타 분류안된 전문, 과학 및 기술 서비스업
	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-

활용분야	대분류	중분류	소분류
	[A17]기타	[A1701]기타	-
	-	-	-
	-	-	-

완성도 및 혁신성

연구단계(공통)	기능 및 개념 검증
연구단계(신약)	과학지식기반리뷰
혁신성	기존 지식을 개선하는 발견/발명(Minor improvement 27.1%)

기존지식/기술 대비 차별성

내용	- 북극권 글로벌 이슈 대응과 정부추진 미션 수행을 위해, 2011년 6월 23일부터 시작하여 2016년 6월 22일까지 5개년 동안, 북극해를 둘러싼 미국, 캐나다, 그린란드(덴마크), 노르웨이, 러시아 등 북극이사회 국가를 대상으로 환북극권 동토층 지역(Circum-Arctic Permafrost Area) 환경변화 관측 거점을 확보하고, 관측 거점에 적용할 첨단 측정시스템/원천 요소기술을 국제 공동 및 산학연 공조 유니트 체제하에서 개발하여, 북극권 환경 변화 과정 이해 및 예측을 위한 정보 제공을 목표로 한다. ※ 북극 5개 연안국 동토지역 대상 환북극 관측거점 확보 실적 - 미국 알래스카 거점 확보(2011년) : 100% 수준 운영 - 노르웨이 스발바르 거점 확보(2012년) : 100% 수준 운영 - 캐나다 캠브리지베이 거점 확보(2012년) : 100% 수준 운영 - 그린란드 노르드 거점 확보(2015년) : 50% 수준 운영(측정시스템 강화 계획)
유형	선진 연구와 경쟁(Advanced)

연구결과가 주는 혜택

내용	○ 북극권 연안을 대상으로 한 북극권 기후연구 측정시스템 확보를 통한 활동영역 확대 및 관련 연구 분야 (대기질, 동토층, 생물종다양성 연구, 전송기술 등) 확대 - Ny-Ålesund에서 자동실시간 연속 이산화탄소,메탄 연속관측장비를 구축함으로서 Zeppelin GAW 관측소와 비교관측 연구 수행의 능력 향상 - Ny-Ålesund에서 최초로 실시간 메탄플럭스 관측과 연구를 위한 한-이태리간 협력 체제 구축 ○ 동토층의 융해로 인한 지중, 지표, 대기층의 교란 및 인간에게 미칠 수 있는 영향평가 자료 확보와 대응책 마련 정책 제시 ○ 대기-동토-해양-모델링의 융합연구를 통하여 북극권 기후변화 관련연구에 대해 미국, 러시아, 캐나다, 노르웨이, EU 그룹 등과 대등한 위치 또는 우월성 연구 분야 역량 확보 및 북극활동의 위상 제고 ○ 극지형 원격 환경변화 관측 시스템 IT 기술 및 장비 개발의 독자 기술 확보 ○ 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의·예측할 수 있는 모형 개발을 통해 북극권의 기후변화 뿐 아니라, 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용
유형	새로운 지평을 개척할 수 있는 발견/발명(Wow)

추가지원 (추가개발 불필요)

추가연구지원 항목	심화기초연구	원천기술 개발	상용화연구	기타(사업명/부처)
	□	■	□	■

추가연구 필요성	o 우리나라는 2013년 5월 북극이사회 정식옵서버 지위를 획득하였으며 동년 12월 정부 주도의 '북극정책기본계획'을 발표. 이에 따라 북극이사회 워킹그룹에의 참여 확대 등 국제협력활동과 북극권 연구인프라 및 연구활동 확충을 중점 사항으로 추진 중임. 선행연구과제 (2011년 6월~2016년 6월: 기초·응용 단계)를 통하여 환북극 동토층 환경변화에 관한 이러한 국내외적 환경에 부합하는 활동을 수행해왔으며 향후 지속적인 지원을 통해 우리나라의 북극권 대상 활동영역을 넓히고 국제적 위상을 제고할 수 있으리라 예상됨 - 정부의 북극정책기본계획(2013. 12)과 북극정책시행계획(2015. 4)에 명시된 '과학조사 및 연구 활동'의 구체적 시행 필요 - 북극권 환경변화에 대한 정밀 진단과 분석, 미래 예측 및 사회·경제적 활용을 위한 국가차원의 연구개발 및 원천기술 확보 필요 - 글로벌 이슈 대응과 국제사회 동참 및 우리나라의 국익 확보와 과학발전에 기여할 적극성 강화 필요 - 극지 환북극 지역에 최적화된 생지화학 순환 결합 기후모델 구축을 통하여 10년 예측 기술을 개발, 가까운 미래의 기후변화 재현	
추가연구 상세내용	후속과제명	북극권 동토 관측 거점을 활용한 환경변화 감시와 예측
	추진내용	○ 동토 관측거점 기반 환경변화 인자 연속관측 및 대기-동토-생태계 상호관계 규명으로 미래 환경변화 예측 기반 확보 ○ 환북극 동토기후변화 관측거점의 안정적 운영과 확대 ○ 생지화학-기후 접합 모델을 활용한 환북극 지역 10년 미래 환경변화 예측 모델 개발
	추진기간 및 예산	8 개월 1383백만원

연구결과 활용/ 확산을 위한 후속조치 (후속조치 불필요 √)

희망후속조치	기술마케팅	사업화 컨설팅 (가치평가 등)	지재권 확보지원	표준화 활동지원	기타
	□	□	□	□	□

후속조치 상세내용	추가연구 필요성	
	추진내용	
	예상 추진기간 및 예산	0 개월 0백만원

라이센스 상황 (해당사항 없음 √)

라이센스상황	

본 연구결과의 입증근거

보유산출물	시험/실험결과	시제품	논문	특허	실용신안	SW	기술이전	제약없음
	■	□	■	□	□	□	□	□

시험결과	제목	극지 저온 동결챔버 정밀온도제어 가동 시험 및 자료 해석	파일첨부	No	파일명
				1	극지 저온 동결챔버 정밀온도제어 가동 시험 및 자료 해석-자문보고서-141024.pdf ※1)
시제품	제목		파일첨부		

※ 첨부파일 다운로드 (파일명을 클릭하시면 다운로드 받으실 수 있습니다.)

1) 극지 저온 동결챔버 정밀온도제어 가동 시험 및 자료 해석-자문보고서-141024.pdf

1. 논문

No	Sci구분	성과년도	논문명	학술지명	게재년월
1	SCI	2013	Linking atmospheric dimethyl sulfide and the Arctic Ocean spring bloom	GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS	201302
2	SCI	2013	Mixing State of Size-Selected Submicrometer Particles During Photochemical and Combustion Events Measured with the Tandem System	AEROSOL SCIENCE AND TECHNOLOGY	201304
3	SCI	2014	Constraint of soil moisture on CO2 efflux from tundra lichen, moss, and tussock in Council, Alaska, using a hierarchical Bayesian model	BIOGEOSCIENCES	201410
4	SCI	2016	CO2 efflux from the biological soil crusts of the High Arctic in a later stage of primary succession after deglaciation, Ny -Alesund, Svalbard, Norway	APPLIED SOIL ECOLOGY	201602
5	SCI	2012	Exploiting Potentials from Interdisciplinary Perspectives with Reference to Global Atmosphere and Biomass Burning Management	AEROSOL AND AIR QUALITY RESEARCH	201202
6	SCI	2012	Combination of transmission electron and atomic force microscopy techniques to determine volume equivalent diameter of submicrometer particles	MICROSCOPY RESEARCH AND TECHNIQUE	201204
7	SCI	2013	Organic Layer Serves as a Hotspot of Microbial Activity and Abundance in Arctic Tundra Soils	MICROBIAL ECOLOGY	201302
8	SCI	2013	A new approach for determination of fouling potential by colloidal nanoparticles during reverse osmosis (RO) membrane filtration of seawater	JOURNAL OF NANOPARTICLE RESEARCH	201304
9	SCI	2016	Measurement of environmental parameters in polar regions based on a ubiquitous sensor network	COLD REGIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY	201603
10	SCI	2015	The relationship between cloud condensation nuclei (CCN) concentration and light extinction of dried particles: indications of underlying aerosol processes and implications for satellite-based CCN estimates	ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS	201507

2. 특허

No	성과년도	출원/등록	특허명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

3. 실용신안

No	성과년도	출원/등록	실용신안명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

4. SW(소프트웨어)

No	성과년도	출원/등록	프로그램명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

5. 기술이전 라이센싱

No	전용/통상	실시기술명
- 결과없음 -		

6. 기타

No	성과종류	성과명	파일
- 결과없음 -			

연구를 확인할 수 있는 홈페이지나 동영상 (YouTube 등) URL

No	URL	제목
- 결과없음 -		

동 연구분야 국내 전문가

No	이름	소속(기관명)
1	이찬길	한양대학교
2	홍성민	인하대학교
3	정창훈	경인여자대학교

[별지 제12호서식]

연구개발결과 활용계획서(세부과제-2)

1. 연구성과 및 활용 현황

※ **연구성과**는 최종보고서 작성 시 연구마루 **성과관리시스템(http://maru.nrf.re.kr)**에 입력했던 내용 중에서 과학기술/학술적 연구성과, 전문학술지 게재논문 성과 정보, 지식재산권 성과 정보, 산업지원 및 연구성과 활용 등 해당 항목을 내려 받아 그대로 붙이거나 글자 크기 등을 편집하여 첨부함

※ accepted/in press인 논문은 필요하다고 판단되면 추가로 작성가능

가. 과학기술/학술적 연구성과

(단위: 건)

전문학술지 논문게재				초청 강연 실적	학술대회 논문발표		지식재산권				수상 실적	출판실적	
국내논문		국외논문			국내	국제	출원		등록			저역서	보고서
SCI	비SCI	SCI	비SCI				국내	국외	국내	국외			
0	3	4	0	0	0	17	0	0	0	0	0	3	0

나. 전문학술지 논문게재 성과 정보

과제번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	sci 여부	impact Factor	국제공동 연구논문	기여도
2011-0021067	201306	Isolation of facultatively anaerobic soil bacteria from Ny-lesund, Svalbard	Kim, Hye Min; Chae, Namyi; Jung, Ji Young; Lee, Yoo Kyung;	SCI	POLAR BIOLOGY	36(6)	국외	SCI 등재	2.006	아니오	50
2011-0021067	201408	Bacterial community structure and soil properties of a subarctic tundra soil in Council, Alaska	Kim, Hye Min; Jung, Ji Young; Yergeau, Etienne; Hwang, Chung Yeon; Hinzman, Larry; Nam, Sungjin; Hong, Soon Gyu; Kim,	SCI	FEMS MICROBIOLOGY ECOLOGY	89(2)	국외	SCI 등재	3.875	예	100

KOPRI 극지연구소

			Ok-Sun; Chun, Jongsik; Lee, Yoo Kyung;								
2011-0021067	201510	Domibacillus tundrae sp nov., isolated from active layer soil of tussock tundra in Alaska, and emended description of the genus Domibacillus	Gyeong, Hye Ryeon; Baek, Kiwoon; Hwang, Chung Yeon; Park, Key Hun; Kim, Hye Min; Lee, Hong Kum; Lee, Yoo Kyung;	SCI	INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMATIC AND EVOLUTIONARY MICROBIOLOGY	65()	국외	SCI 등재	2.511	아니오	50
2011-0021067	201512	Warming and increased precipitation enhance phenol oxidase activity in soil while warming induces drought stress in vegetation of an Arctic ecosystem	Seo, Juyoung; Jang, Inyoung; Jung, Ji Young; Lee, Yoo Kyung; Kang, Hojeong;	SCI	GEODERMA	N	국외	SCI 등재	2.772	아니오	100
2011-0021067	201405	Soil organic carbon characteristic relating to geomorphology near Vestre Lovenbreen moraine in Svalbard	Jung, Ji Young; Lee, Kyoo; Lim, Hyoun Soo; Kim, Hyun-Cheol; Lee, Eun Ju; Lee, Yoo Kyung	직접 입력	Journal of Ecology and Environment	37(2)	국내	SCI 미등재		아니오	100
2011-0021067	201409	Microbial community structure of the active layer soil from resolute, Canadian High Arctic	Ok Sun Kim;Hye Min Kim;Hong Kum Lee;Yoo Kyung Lee	직접 입력	Journal of Climate Change Research	5(3)	국내	SCI 미등재		아니오	70

KOPRI 극지연구소

2011-0021067	201510	Soil development and bacterial community shifts along the chronosequence of the Midtre Lovenbreen glacier foreland in Svalbard	Hye Young Kwon, Ji Young Jung, Ok-Sun Kim, Dominique Laffly, Hyoun Soo Lim, Yoo Kyung Lee	직접입력	Journal of Ecology and Environment	38(4)	국내	SCI 미등재		아니오	35

다. 지식재산권 성과 정보

해당사항없음

라. 산업지원 및 연구성과 활용

(단위: 건)

기술확산				연구성과활용(사업화 및 후속연구과제 등)				
기술실시계약	기술이전	기술지도	기술평가	후속연구추진	사업화추진중	사업화완료	기타목적활용	기술마케팅
0	0	0	0	0	0	0	3	2

마. 국내외 기술료 징수 현황 (기업화 완료 또는 기술실시계약 체결 시 기재)

해당사항없음

바. 기업화 성과 (기업화 완료 또는 추진 중인 경우 반드시 기재)

해당사항없음

사. 경제적 파급 효과 (지난 1년간 실적)

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원수)	그 밖의 효과
				1	

아. 향후 경제적 기대 효과

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원수)	그 밖의 효과
				2	

2. 연구개발결과 활용 계획 (해당항목에 "○" 표시)

KOPRI 극지연구소

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

가. 당해연도 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

- 미국 Argonne National Laboratory (ANL)에서 환북극권 토양 유기물 양을 Near Infrared (NIR) spectroscopy 분석을 통해 추정하려는 시도를 하고 있고, 이를 위해 다양한 토양 시료 확보를 필요로 함. 따라서 본 연구과제에서 획득한 다양한 북극 지역 토양 시료를 ANL과 공유함으로서 NIR분석을 진행하고, 토양 유기물 특성 분석과 관련하여 공동연구를 추진하고자 함

- 장기간의 기후변화에 의한 토양 생태계 특성 변화를 이해하기 위해, 캐나다 캠브리지 베이에 기후변화 모사 실험구 지속적 운영

- 극지과학총서(북극편) 집필 시 본 과제에서 획득한 연구 내용과 데이터 및 사진을 사용할 예정

KOPRI 극지연구소

나. 활용방법

- 토양 시료 공유 및 유기물 특성 분석 방법에 따른 결과 비교, 공동 논문 작성

- 캐나다 캠브리지 베이에 설치된 기후변화 모사 실험구의 지속적 모니터링과 토양 시료 확보·분석을 통해 논문 작성

다. 차년도 이후 활용계획

- 캐나다 캠브리지 베이 기후변화 모사 실험구 운영 경험을 바탕으로 알래스카 카운실 관측거점에도 기후변화 모사 실험구 운영을 계획하고 있음

- 북극이사회 <북극 모니터링 및 평가프로그램, AMAP> 전문가 보고서에 데이터 제공 등 국제기구에 연구성과로 기여

- 본 과제에서 생산된 환경, 토양, 생물 데이터는 KPDC(Korea Polar Data

Center)에 기탁되어 데이터베이스화 되어 있으므로, 관심 있는 연구자들에게 극지역 정보, 생물 또는 토양에 관한 정보를 제공하고 향후 공동연구 추진 가능

3. 기대효과

- 기후변화 모사 실험구를 장기간 운영하고 데이터를 분석하면서 기후변화에 의한 극지역 생태계의 변화, 생물들의 적응 기작, 토양 유기탄소의 안정성 등에 대한 이해에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대함

- 북극 동토 미생물과 토양 특성에 대한 이해를 높여, 북극에서 일어나는 생지화학적 순환에 관련된 모델 개발 및 보완을 위한 기초 데이터로 제공될 수 있음

- 과제 종료 이후에도 <북극 생태 사진전>이나 강연과 같은 활동을 통해 북극의 중요성과 북극 연구 성과를 적극 홍보함으로써 국민들의 북극에 대한 이해를 높이고 북극권 진출국 국민으로서 자긍심을 고취할 것으로 기대됨

KOPRI 극지연구소

4. 문제점 및 건의사항

- 외국 기관 연구자 위탁연구 가능하도록 연구관리 시스템 개선 요망

주관연구기관의 자체평가 의견서(세부과제-2)

1. 과제현황

			과제코드		
부처사업명(대)	거대과학연구개발사업				
사업명(중)	해양 · 극지기초원천기술개발사업				
세부사업명(소)	해양 · 극지기초원천기술개발사업				
부처 기술분류	(대)	(중)	(소)	국가기술지도 (NTRM)	B060601
국가과학기술 표준분류체계	D	D11	D1102		
총 괄 과 제			총괄책임자(기관)		
과 제 명	북극권 동토층의 환경변화 특성 규명		연 구 단 계		기초연구
연 구 기 관	한국해양연구원부설극지연구소		연 구 책 임 자		이 유 경

연 구 기 간 연 구 비 (천원)	연차	기간	정부출연금	민간출연금	계
	1차연도	2011.6.23-2012.6.22	400,000		400,000
	2차연도	2012.6.23-2013.6.22	400,000		400,000
	3차연도	2013.6.23-2014.6.22	640,000		640,000
	4차연도	2014.6.23-2015.6.22	640,000		640,000
	5차연도	2015.6.23-2016.6.22	640,000		640,000
	계		2,720,000		2,720,000

참 여 기 업			
상 대 국		상대국 연구기관	

비 고 : 총괄과제란은 총괄과제에 해당하는 경우에만 기재합니다.

2. 평가일: 2016. 07. 01

3. 평가자

소 속	직 위	성 명
북극환경 · 자원연구센터	책임연구원	이 유 경

4. 평가자 확인

본인은 평가대상 과제의 연구결과를 객관적으로 기술하고, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 이 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

서 명	

210㎜×297㎜[백상지 80g/㎡(재활용품)]

Ⅰ. 연구개발실적

1. 연구개발성과의 우수성 및 창의성

○ 북극, 특히 육상 생태계는 주권 국가가 있어 접근에 어려움이 많은데, 알래스카 카운실과 캐나다 캠브리지 베이에서 장기 모니터링을 위한 연구 기반을 확고히 함

○ 우리나라 최초로 동토와 활동층을 동시에 볼 수 있는 1~2 m 길이의 동토 코어 시료를 확보하고, 캐나다 캠브리지 베이에 기후변화 모사 실험구를 설치하여 동토층 미래 환경 변화 연구의 토대를 놓음

○ 알래스카 토양 코어 분석 결과, 전체적으로 산성토양이며 [$NH4^{+}$]가 활동층과 동토층 경계로 매우 증가했고, 미생물 군집 조성이 토양 층위별로 확연히 구분되는 것을 확인함

○ 메타지놈 분석을 통해 여름에 일시적으로 녹는 활동층과 일년 내내 얼어 있는 영구동토층의 토양 박테리아와 균류 군집 구조가 뚜렷한 차이 보이는 것을 밝혔고, 기후변화에 의하여 활동층이 깊어지면 미생물 군집 변화가 동토층 생태계 변화에 영향을 준다는 중요한 정보를 확보함

○ Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry(pyrolysis-GC/MS)를 이용하여 토양 유기물을 정밀 분석하여 유기물의 기원이 어떤 식물인지 확인하는 기술을 확보했고, 표층 시료들이 지역별로 묶이는 특성이 있음을 밝힘

○ 캐나다 캠브리지 베이에서 기후변화 모사 기후변화모사 1년차에 강수량 증가에 의해 세균 군집구조 및 세균 생물량이 변화했던 패턴이 3년차에는 더 이상 나타나지 않았는데, 이는 기후변화 모사를 수행한 초기에 변화를 보였으나 시간이 흐르고 변화가 축적됨에 따라 생태계가 다시 제자리로 돌아오려는 생태학적 복원력(resilience)이 작용했을 것으로 예상함

○ 북극 동토 생태계를 설명하는 <극지과학자가 들려주는 툰드라 이야기>와 북극 식물 108종의 사진과 특징을 소개하는 <북극 툰드라에 피는 꽃> 발간하고, 3차례 북극생태사진전을 개최함으로써 일반인들의 북극에 대한 이해 고취

2. 연구개발성과의 파급효과

○ 북극이사회 <북극 모니터링 및 평가프로그램, AMAP> 전문가 보고서에 데이터 제공 등 국제기구에 연구성과로 기여

○ 본 과제에서 생산된 환경, 토양, 생물 데이터는 KPDC(Korea Polar Data Center)에 기탁되어 데이터베이스화 되어 있으므로, 관심 있는 연구자들에게 극지역 정보, 생물 또는 토양에 관한 정보를 제공하고 향후 공동연구 추진 가능

○ 북극 동토 미생물과 토양 특성에 대한 이해를 높여, 북극에서 일어나는 생지화학적 순환에 관련된 모델 개발 및 보완을 위한 기초 데이터로 제공될 수 있음

3. 연구개발성과에 대한 활용가능성

○ 미국 Argonne National Laboratory (ANL)에서 환북극권 토양 유기물 양을 Near Infrared (NIR) spectroscopy 분석을 통해 추정하려는 시도를 하고 있고, 이를 위해 다양한 토양 시료 확보를 필요로 함. 따라서 본 연구과제에서 획득한 다양한 북극 지역 토양 시료를 ANL과 공유함으로서 NIR분석을 진행하고, 토양 유기물 특성 분석과 관련하여 공동연구를 추진

하고자 함

○ 앞으로도 <북극 생태 사진전>이나 강연과 같은 활동을 통해 북극의 중요성과 북극 연구 성과를 적극 홍보함으로써 국민들의 북극에 대한 이해를 높이고 북극권 진출국 국민으로서 자긍심을 고취할 것으로 기대됨

○ 극지과학총서(북극편) 집필 시 본 과제에서 획득한 연구 내용과 데이터 및 사진을 사용할 예정

4. 연구개발 수행노력의 성실도

○ 2013년부터 매년 캐나다 캠브리지 베이에 2회씩 방문하여 온도상승챔버를 설치하고 철거하며 센서에 저장된 데이터를 확보했고, 2014년 알래스카 카운실에서 동토 코어링을 통해 2 m 깊이의 코어를 확보하는 등 매년 북극 현장 탐사 수행

○ 2013년과 2015년도 캐나다 캠브리지 베이, 2014년 알래스카 카운실에서 확보한 토양 시료의 특성 분석과 미생물 군집 분석 모두 완료

5. 공개발표된 연구개발성과(논문 · 지적재산권 · 발표회 개최 등)

○ 저서 3권, SCI 논문 4편 비SCI 논문 3편, 학술대회 17건 발표, 북극 생태사진전 개최 3회 등 다양한 연구 성과 달성

비 고 :각 평가항목에 따라 자체평가한 내용을 상세하게 기술(각 항목별 200자 이내)

Ⅱ. 연구목표 달성도

번호	세 부 연 구 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
1	북극권 관측 지점에 대한 온도 변화에 따른 동토의 물리적 특성 변화 해석	깊이별로 온도변화에 따른 동토의 물리적 특성 변화 해석	100%
2	온도 상승과 강수량 증가가 북극 동토층 토양과 생물 군집에 미치는 영향 종합적 이해	온도 상승과 강수량 증가가 북극 동토 생태계에 미치는 영향 종합적 이해	100%
3	북극권 관측망 설치 지역의 토양 유기탄소 및 미생물 특성에 대한 종합적 분석	캐나다 캠브리지 베이, 알래스카 카운실, 그린란드 자켄버그에서 토양을 확보하고, 토양과 미생물의 특성에 대한 종합적 이해	100%
4	알래스카 카운실과 다산기지 토양 샘플링 / 캐나다 캠브리지 베이 온도상승챔버와 온습도 센서 설치 및 운영	캐나다 캠브리지 베이, 알래스카 카운실 동토층에서 이산화탄소플럭스와 생물 특성간의 상관관계 분석	100%
5	온도상승에 따른 동토층 유기물 분해 기작 규명	토양 온도 상승과 강수량 변화가 생물 군집 구조와 토양 유기탄소에 미치는 영향 파악	100%

Ⅲ. 종합의견

1. 연구개발성과에 대한 종합의견

○ 본과제를 통해 구축한 기후변화 모사 실험구를 장기간 운영하고 데이터를 분석하면서 기후변화에 의한 극지역 생태계의 변화, 생물들의 적응 기작, 토양 유기탄소의 안정성 등에 대한 이해에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대함

○ 본 과제 결과는 북극에서 일어나는 생지화학적 순환에 관련된 모델 개발 및 보완을 위한 기초 데이터로 제공될 수 있음

○ 과제 종료 이후에도 <북극 생태 사진전>이나 강연과 같은 활동을 통해 북극의 중요성과 북극 연구 성과를 적극 홍보함으로써 국민들의 북극에 대한 이해를 높이고 북극권 진출국 국민으로서 자긍심을 고취할 것으로 기대됨

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

○ 북극 연구는 현장 출장비을 위한 비용(출장비, 장비와 시료 운송비, 현지 인력 인건비 등)가 많이 드는 과제인 것을 고려 요망

3. 연구개발성과의 활용방안 및 향후 조치에 대한 의견

○ 본 연구 성과를 기반으로 미국의 NGEE, 독일의 PAGE21, 캐나다의 ADAPT 등 주요 북극 동토 국제연구사업과 연구 협력을 추진하여 우리나라의 연구 역량을 국제사회에 알리고 북극권 데이터를 공유하며 선진국의 연구 경험과 기술을 익히고자 함

KOPRI 극지연구소

Ⅳ. 보안성 검토

1. 연구책임자의 의견

해당사항 없음

2. 연구기관 자체의 검토결과

해당사항 없음

210㎜×297㎜[백상지 80g/㎡(재활용품)]

성과소개서(세부과제-2)

과제 및 연구자 정보

과제번호	2011-0021067			
과제명	북극권 동토층의 환경변화 특성 규명			
사업분류	거대과학연구개발사업>해양극지기초원천기술개발사업>해양극지기초원천기술개발사업			
총 연구기간	2011/06/23 ~ 2016/06/22			
총 연구비	2,720,000,000 원			
과제 개요	○ 지구물리탐사 기법을 이용하여 북극권 기후환경변화 예측의 중요한 지표인 동토층 토양의 물리적 특성(전기적 및 전자기적 기변성, 함수율)과 이산화탄소 플럭스 사이의 상관관계 파악 ○ 동토층에 저장되어 있는 유기탄소의 특성 파악을 통해 기후변화에 민감한 탄소량 추정 ○ 동토층 유기탄소와 토양미생물의 공간적 분포 특성 이해 ○ 온실 기체 발생 요인인 토양미생물과 온실 기체의 흡수원인 식물을 중심으로 동토층의 생물학적 특성과 이산화탄소 플럭스의 상관관계 파악 ○ 북극권 현장 관측을 통해 온도 및 강수량 변화가 동토층 토양의 특성과 생물 군집 구조 및 물질대사에 미치는 영향 분석			
연구자	성명	이유경	소속	한국해양과학기술원 부설 극지연구소
	전화번호	032-260-6330	이메일	yklee@kopri.re.kr

성과기본정보

성과명	북극권 4 개 거점의 동토 생태계 특성 규명		
성과요약	본 연구에서는 기후변화에 의해 극지역 생태계가 어떻게 영향을 받는지 확인하기 위한 기초연구를 수행하였습니다. 국내 연구진에 의해 추진된 연구 중 북극권 생태계 연구가 거의 없는 상황에서, 본 연구는 구축된 관측 거점의 미생물과 토양 특성을 밝혔고, 미래 기후 변화를 모사하여 생태계 변화를 이해하기 위해 특성 인자를 변화시키는 현장 실험 장치를 설치하였습니다. 본 연구 성과는 국내 연구진들이 북극권으로 연구를 수행하고자 할 때 또는 기후변화에 의한 생태계 변화를 파악할 수 있는 중요한 자료로 활용될 수 있을 것입니다.		
국문 키워드	동토층	미생물 군집 구조	토양 유기탄소
	미생물 활성도	온도 상승 챔버	지중 구조
영문 키워드	Permafrost	Microbial community structure	Soil organic carbon
	Microbial activity	Open top chamber	Substructure
이미지			

성과분류

성과유형	이론	방법/기법	알고리즘/메커니즘	소재/물질	종자/종	
	■	□	□	□	□	
	기술/공정	SW	데이터(Data)	표준/규제	정책입안/신규프로젝트	기타(노하우 등)
	□	□	□	□	□	□

	대분류	중분류	소분류
과학기술표준분류	[ND]지구과학(지구/대기/해양/천문)	[ND11]극지과학	[ND1106]극지 생태계 모니터링
	[ND]지구과학(지구/대기/해양/천문)	[ND11]극지과학	[ND1102]동토학
	[ND]지구과학(지구/대기/해양/천문)	[ND11]극지과학	[ND1103]극지환경감시/극지 생지화학 순환

	분류1	분류2	분류3	분류4	분류5
한국표준산업분류	[M]전문, 과학 및 기술 서비스업	[M99]그외 미분류 전문, 과학 및 기술 서비스업	[M999]그외 미분류 전문, 과학 및 기술 서비스업	[M9999]그외 미분류 전문, 과학 및 기술 서비스업	[M99999]그외 미분류 전문, 과학 및 기술 서비스업
	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-

	대분류	중분류	소분류
활용분야	[A14]환경/지구과학	[A1406]생태계	-
	[A14]환경/지구과학	[A1405]토양/지하수	-
	[A14]환경/지구과학	[A1401]대기	-

완성도 및 혁신성

연구단계(공통)	기본원리파악
연구단계(신약)	
혁신성	기존의 방법으로 현안을 도출, 해결방안 제시(Routine design problems, 68.3%)

기존지식/기술 대비 차별성

내용	현재까지 국내에서는 토양을 대상으로 pyrolysis GC/MS 분석방법을 이용하여 유기물 특성 분석을 시도한 사례가 없었으나, 본 연구팀에 의해 새롭게 시도됨. 북극권 동토를 대상으로 최신의 NGS기법을 이용하여 토양 메타지놈 분석을 수행한 것은 국내 첫 시도임
유형	선진 연구와 경쟁(Advanced)

연구결과가 주는 혜택

내용	특징: 온도상승 챔버 및 강수량 증가 실험 셋업 혜택: 기후변화에 의한 생태계 반응을 장기적으로 추적할 수 있는 기반 마련
유형	기존과 다르다는 사실 자체에 의미를 둔 변화(SomeWhat)

추가지원 (추가개발 불필요)

추가연구지원 항목	실화기초연구	원천기술 개발	상용화연구	기타(사업명/부처)
	□	■	□	□
추가연구 필요성	- 국가의 선도적 기후변화대응 전략 수립에 필요한 과학적 데이터를 제공하기 위하여 북극권에서 기후환경변화가 동토 생태계에 미치는 영향과 생태계의 반응 파악이 필요함 - 최근 극지역 영구동토층에서 얼어붙어 있던 바이러스, 이끼 등의 과거 생물체 부활사례가 보고되면서 앞으로 기후변화에 의해 동토층이 녹게 되어 노출될 유해한 미생물 및 바이러스의 잠재적 위험성에 대한 우려가 커지고 있음 - 북극 동토층의 생태 기초연구를 통해 얻어진 저온성 미생물의 생리 특성을 이해하고 생명공학 기술을 접목하여 유용 생체촉매 물질의 산업화가 요구되어짐. 본 연구는 북극유래 미생물 자원의 다양성 확보 및 생물자원을 활용한 국가의 미래 산업기술 창출을 위하여 저온성 미생물 유래의 산업용 효소 단백질 및 유용물질 발굴을 위하여 동토유래 유용물질 발굴 및 활용기술 개발을 목표로 함			
추가연구 상세내용	후속과제명	환북극 동토층 생태계의 변화 분석 기술 개발		
	추진내용	- 건조, 습지 동토 간 비교 분석을 통한 기후변화에 따른 동토 생태계 반응 규명 - 토양 인큐베이션 실험을 통한 북극 동토층 대기-동토-생태계의 상호관계 규명 - 동토 융해로 노출되는 유해 미생물 및 바이러스의 동태 파악 및 환경 위해성 평가를 통해 생태계 및 인간에 미치는 위험요소 진단·예측 - 북극 동토층에 풍부하게 존재하는 부식질 유래의 바이오매스를 분해하여 이용하는 미생물을 중심으로 저온성 생촉매 효소 단백질을 탐색 및 활용을 위하여, 북극 동토층에서 분리된 저온성 미생물 및 환경 유전체 분석을 통한 유용한 저온 활성형 효소 단백질을 발굴하고 이를 단백질 공학 방법으로 개량하여 산업적 목적에 적합한 기능성 단백질을 개발 - 유용물질을 생산할 수 있는 활성 효소를 중심으로 기능성을 검정하고 생산성 향상을 위한 맞춤형 생산시스템 구축		
	추진기간 및 예산	56 개월 5250백만원		

연구결과 활용/ 확산을 위한 후속조치 (후속조치 불필요 √)

희망후속조치	기술마케팅	사업화 컨설팅 (가치평가 등)	지재권 확보지원	표준화 활동지원	기타
	□	□	□	□	□
후속조치 상세내용	추가연구 필요성				
	추진내용				
	예상 추진기간 및 예산	0 개월 0백만원			

라이센스 상황 (해당사항 없음 √)

라이센스상황	

본 연구결과의 입증근거

보유산출물	시험/실험결과	시제품	논문	특허	실용신안	SW	기술이전	제약없음
	□	□	■	□	□	□	□	□

시험결과	제목		파일첨부	
시제품	제목		파일첨부	

1. 논문

No	Sci구분	성과년도	논문명	학술지명	게재년월
1	SCI	2014	Bacterial community structure and soil properties of a subarctic tundra soil in Council, Alaska	FEMS MICROBIOLOGY ECOLOGY	201408
2	SCI	2013	Isolation of facultatively anaerobic soil bacteria from Ny-lesund, Svalbard	POLAR BIOLOGY	201306
3	비SCI	2014	Soil organic carbon characteristic relating to geomorphology near Vestre Lovenbreen moraine in Svalbard	Journal of Ecology and Environment	201405

4	비SCI	2014	Microbial community structure of the active layer soil from resolute, Canadian High Arctic	Journal of Climate Change Research	201409
5	SCI	2015	Domibacillus tundrae sp nov., isolated from active layer soil of tussock tundra in Alaska, and emended description of the genus Domibacillus	INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMATIC AND EVOLUTIONARY MICROBIOLOGY	201510
6	SCI	2015	Warming and increased precipitation enhance phenol oxidase activity in soil while warming induces drought stress in vegetation of an Arctic ecosystem	GEODERMA	201512
7	비SCI	2015	Soil development and bacterial community shifts along the chronosequence of the Midtre Lovenbreen glacier foreland in Svalbard	Journal of Ecology and Environment	201510

2. 특허

No	성과년도	출원/등록	특허명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

3. 실용신안

No	성과년도	출원/등록	실용신안명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

4. SW(소프트웨어)

No	성과년도	출원/등록	프로그램명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

5. 기술이전 라이센싱

No	전용/통상	실시기술명
- 결과없음 -		

6. 기타

No	성과종류	성과명	파일
- 결과없음 -			

연구를 확인할 수 있는 홈페이지나 동영상 (YouTube 등) URL

No	URL	제목
- 결과없음 -		

동 연구분야 국내 전문가

No	이름	소속(기관명)
1	노희명	서울대학교
2	홍순규	한국해양과학기술원 부설 극지연구소
3	김옥선	한국해양과학기술원 부설 극지연구소

[별지 제12호서식]

연구개발결과 활용계획서(세부과제-3)

1. 연구성과 및 활용 현황

※ **연구성과**는 최종보고서 작성 시 연구마루 **성과관리시스템(http://maru.nrf.re.kr)**에 입력했던 내용 중에서 과학기술/학술적 연구성과, 전문학술지 게재논문 성과 정보, 지식재산권 성과 정보, 산업지원 및 연구성과 활용 등 해당 항목을 내려 받아 그대로 붙이거나 글자 크기 등을 편집하여 첨부함

※ accepted/in press인 논문은 필요하다고 판단되면 추가로 작성가능

가. 과학기술/학술적 연구성과

(단위: 건)

전문학술지 논문게재				초청 강연 실적	학술대회 논문발표		지식재산권				수상 실적	출판실적	
국내논문		국외논문			국내	국제	출원		등록			저역서	보고서
SCI	비SCI	SCI	비SCI				국내	국외	국내	국외			
		4			5	4							

나. 전문학술지 논문게재 성과 정보

과제 번호	게재연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	SCI 여부	IF	국제공동연구 논문여부	기여도
2011-0021069	2014.07	A physical mechanism of the precipitation dipole in the western United States based on PDO-storm track relationship	성미경, 안순일, 김백민, 우성호	SCI	Geophysical Research Letter	41(13)	국외	SCI등재	4.456	아니오	80
2011-0021069	2014.09	Intensified Arctic warming under greenhouse warming by vegetation-atmosphere-sea ice interaction	정지훈, 국종성, 김백민, 전상윤	SCI	Environmental Research Letters	9(9)	국외	SCI등재	4.09	아니오	50
2011-0021069	2015.07	Temperature variation over East Asia during the lifecycle of weak stratospheric polar vortex	우성호,김백민, 국종성		Journal of Climate	28(14)	국외	SCI등재	4.435	아니오	50
2011-0021069	2015.08	Seasonal dependence of the Arctic greening on tropical precipitation	강사라, 김백민, Dargan Frierson		Journal of Climate	28(15)	국외	SCI등재	4.435	아니오	15

KOPRI 극지연구소

다. 지식재산권 성과 정보

과제 번호	출원등록 연월	재산권 구분	출원등록 구분	발명제목	출원 등록인	출원 등록국	발명자명	출원등록번호	활용형태	기여도

라. 산업지원 및 연구성과 활용

(단위: 건)

기술확산			연구성과활용(사업화 및 후속연구과제 등)		
기술이전	기술지도	기술평가	후속연구추진	사업화추진중	사업화완료

마. 국내외 기술료 징수 현황 (기업화 완료 또는 기술실시계약 체결 시 기재)

징 수 조 건	
징 수 현 황	백만 원(전년도말 현재)

바. 기업화 성과 (기업화 완료 또는 추진 중인 경우 반드시 기재)

업 체 명		기업화 완료[ ] 기업화 예정[ ]	년 월 일
제 품 명		제 품 용 도	
기업화이용유형 중 택일	신제품개발[ ], 기존제품 개선[ ], 신공정개발[ ], 기존공정개선[ ], 기타[ ]		

사. 경제적 파급 효과 (지난 1년간 실적)

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원수)	그 밖의 효과
					○

아. 향후 경제적 기대 효과

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원수)	그 밖의 효과
					○

2. 연구개발결과 활용 계획 (해당항목에 "○" 표시)

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

가. 당해연도 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

나. 활용방법

- 차년도 연구 계획 없음.

다. 차년도 이후 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

- 차년도 연구 계획 없음.

3. 기대효과

○ 북극 기후변화 원인 규명 및 모델 개발을 통한 미래 온난화 하에서 전구 기후 예측에 활용

○ 한반도 및 동아시아의 중장기 기후 예측에서 극지의 역할 자료 제시에 활용

○ 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의·예측할 수 있는 통합 모형 개발을 통해 북극권의 기후 변화 뿐 아니라 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용

4. 문제점 및 건의사항

- 해당사항 없음.

KOPRI 극지연구소

주관연구기관의 자체평가 의견서(세부과제-3)

1. 과제현황

과제코드	2011-0021069

부처사업명(대)	거대과학기술개발				
사업명(중)	해양극지 기초·원천기술개발사업				
세부사업명(소)	환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구				
부처 기술분류	(대)	(중)	(소)	국가기술지도 (NTRM)	B030308
국가과학기술 표준분류체계	(D)	(D06)	(D0603)		
총 괄 과 제	환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구	총괄책임자(기관)	이방용 (극지연구소)		
과 제 명	급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현	연 구 단 계	2단계		
연 구 기 관	극지연구소	연 구 책 임 자	김백민		

연 구 기 간 연 구 비 (천원)	연차	기간	정부출연금	민간출연금	계
	1차연도	2013.06.23-2014.06.22	270,000		270,000
	2차연도	2014.06.23-2015.06.22	270,000		270,000
	3차연도	2015.06.23-2016.06.22	270,000		270,000
	4차연도				
	5차연도				
	계				

참 여 기 업			
상 대 국		상대국 연구기관	

비 고 : 총괄과제란은 총괄과제에 해당하는 경우에만 기재합니다.

2. 평가일: 2016.07.01

3. 평가자

소 속	직 위	성 명
극지연구소	책임연구원	김백민

4. 평가자 확인

본인은 평가대상 과제의 연구결과를 객관적으로 기술하고, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 이 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

서 명	김 백 민

210mm×297mm[백상지 80g/㎡(재활용품)]

Ⅰ. 연구개발실적

1. 연구개발성과의 우수성 및 창의성

○ 북극 기후 변화 원인 규명을 통해 미래 극지기후변화 예측기술의 향상이 기대됨
○ 미래 고위도 동토층 툰드라 식생 증가가 북극 온난화를 가속화한다는 명제 도출 (2014년 10월 Nature지 하이라이트 선정)
○ 환북극 영구동토층 변화에 의한 영향이 고위도 지역에 머물지 않고, 열대지역의 강수에까지 역학적 메커니즘을 통해 영향을 줄 수 있음을 세계 최초로 규명
○ 알래스카 동토층 미래 탄소 배출량 추정에 있어 북태평양에서 기인하는 스톰의 이동경로를 고려해야 함을 세계 최초로 알려줌

2. 연구개발성과의 파급효과

○ 전구 기후 변화에서 극지의 역할 이해를 통한 장기 기후예보의 정확성을 높여 국가의 경제적 손실 절감에 기여
○ 보다 정확한 겨울철 기후 변화 및 극한 기후 현상의 변화 예측은 향후 국가적 에너지 수급 계획에 중요한 정보로 사용될 수 있음
○ 북극 기후 변화에 의해 나타는 해빙 감소량의 예측으로 북극해를 이용하는 선로 개발에 기여

3. 연구개발성과에 대한 활용가능성

○ 북극 기후변화 원인 규명 및 모델 개발을 통한 미래 온난화 하에서 전구 기후 예측에 활용
○ 한반도 및 동아시아의 중장기 기후 예측에서 극지의 역할 자료 제시에 활용
○ 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의·예측할 수 있는 통합 모형 개발을 통해 북극권의 기후 변화 뿐 아니라 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용

4. 연구개발 수행노력의 성실도

○ 본 과업을 완수하는데 있어, 전구 모델 및 지역 모델 시뮬레이션을 위한 방대한 양의 계산 인프라가 필요하였으며, 또한 이를 분석하는데 많은 노력이 필요로 하였음. 본 연구진은 이러한 어려움을 극복하기 위해 합리적인 실험 계획과 효율적인 계산인프라 활용을 최우선목표로 삼고, 성실히 연구에 임해 성공적인 시뮬레이션 결과를 생산하였으며, 이를 바탕으로 수준높은 연구 결과를 출판하였음.
○ 당초 계획했던 연구 목표 및 계획을 100% 달성함

5. 공개발표된 연구개발성과(논문 · 지적재산권 · 발표회 개최 등)

○ 논문

Sung, M. K., An, S. I., Kim, B. M., & Woo, S. H. (2014). A physical mechanism of the precipitation dipole in the western United States based on PDO-storm track relationship. Geophysical Research Letters, 41(13), 4719-4726.

Jeong, J. H., Kug, J. S., Linderholm, H. W., Chen, D., Kim, B. M., & Jun, S. Y. (2014). Intensified Arctic warming under greenhouse warming by vegetation-atmosphere-sea ice interaction. Environmental Research Letters, 9(9), 094007.

Kang, S. M., Kim, B. M., Frierson, D. M., Jeong, S. J., Seo, J., & Chae, Y. (2015). Seasonal dependence of the effect of Arctic greening on tropical precipitation. Journal of Climate, 28(15), 6086-6095.

Woo, S. H., Kim, B. M., & Kug, J. S. (2015). Temperature variation over East Asia during the lifecycle of weak stratospheric polar vortex. Journal of Climate, 28(14), 5857-5872.

○ 학술발표_구두

Baek-Min Kim, Ah-Ryeon Yang; Smallest Eurasian Snow-cover Extent in May 2012 and its Impact on Blocking And Drought over east Asia. Aug 2013, Joint conference of 11th AsiaFlux International Workshop, 3rd HESSS and 14th Annual Meeting of Korean Society of Agricultural and Forest Meteorology on "COMMUNICATING SCIENCE TO SOCIETY: COPING WITH CLIMATE EXTREMES FOR RESILIENT ECOLOGICAL-SOCIETAL SYSTEMS", Korea.

Ah-Ryeon Yang, Back-Min Kim, Su-Jong Jung, Sa-Ra Kang; Climate Impact of Cahnges in Eurasian Arctic Vegetation on the East Asian Summer Monsoon. Oct 2013, 2013년 극지과학국제심포지움, Korea.

Ah-ryeon Yang, Baek-min Kim, Sung-ho Woo, Jong-seong Kug, Eui-hyun Jung; Eurasian Cold Extreme in January 2012: Sudden intensification of Ural Blocking by Stratospheric Coupling. Feb 2014, 2014 AMS annual meeting, USA.

김백민, 옥정, 김대현, 김주홍, 김성중; AGCM simulations of atmospheric responses to Arctic esa ice and SST anomaly during Boreal winter: Impacts of cloud. May 2014, 2014년 봄 기상학회, Korea.

장혜영, 김주홍, 김백민; Non-stationary Relationship between Cloud Radiative Forcing and Sea Ice Concentration in the Arctic Ocean during summer. April 2015, 2015년 봄 기상학회, Korea.

성미경, 안순일, 김백민, 국종성; 북대서양 장주기 순환이 ENSO 비대칭 발달에 미치는 영향. April 2015, 2015년 봄 기상학회, Korea.

옥정, 김백민, 성미경; Association between North Atlantic SST variability and Eurasian winter circulation. April 2015, 2015년 봄 기상학회, Korea.

이수봉, 김백민, 김주홍, 김성중, 안중배; 기후시스템모형 CESM의 북극 해양·해빙모사특성분석. April 2015, 2015년 봄 기상학회, Korea.

○ 도서

김백민. 극지과학자가 들려주는 기후변화 이야기. 2014. 지식노마드. 국내.

비 고 :각 평가항목에 따라 자체평가한 내용을 상세하게 기술(각 항목별 200자 이내)

Ⅱ. 연구목표 달성도

번호	세 부 연 구 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
1	영구동토층 사이트 관측자료를 활용하여 국지 지면-생권 모델 구동 및 검증	관측자료를 수집 분석 및 국지모델 실험 구동 완료	100
2	기후 변화 시나리오에 따른 영구 동토층 내 식생 및 대기순환 변화 예측	대기-식생 상호작용 모의실험 수행 및 정확도 파악	100
3	유라시아 눈덮임 변화 및 식생변화가 동아시아 지역 기후에 미치는 영향	계절별 눈 덮임과 식생의 연관성 확인	100
4	탄소순환, 메탄 방출 모듈 검증 및 접합	탄소순환 모듈의 성공적인 접합 여부를 확인하는 모델 실험 완료.	100

		이를 활용하여 미래기후변화시나리오 도출	
5	영구 동토층 지면-식생-수문 통합모델 완성	탄소순환 접합된 지면-식생-수문 통합모델 구축완료	100
6	영구동토층 및 해빙 융해에 따른 급격한 기후 변화 수치적 재현	관련연구 수행 결과 논문게재 완료	100
7	유라시아 눈 덮임이 동토층 융해에 주는 영향	5개 이상의 위성자료 합성을 통해 유라시아 눈 덮임 자료 분석 완료 및 동토층 융해에 중요한 기후인자 관련성 분석 완료	100
8	빙권 기후변화 재현 및 미래기후 종합 모의	기후변화에 빙권이 미치는 영향 분석	100
9	대기/식생/해빙/지면/수문 종합 모델링 및 기후 변화 시나리오 제시	개발된 모델을 이용하여 기후 변화 시나리오 도출 완료	100
10	유라시아 눈 덮임 변화의 미래예측 및 평가	지면-생권 모델링 시스템 구축 완료	100
11	동토층 빙권 및 생권의 변화 통계 분석	극지 지면 변화의 특성 분석	100
12	동토층 환경 변화 예측 및 북극권 미래 환경 변화 시나리오 도출	동토층 환경 변화 및 미래기후 시나리오 도출	100

Ⅲ. 종합의견

1. 연구개발성과에 대한 종합의견

■ 매년 계획서에 명시된 연차별 연구목표를 100% 달성하였으며, 얻어진 과학적 결과는 상위 10% 저널을 비롯한 우수한 수준의 저널에 출판됨

■ 온난화된 지구에서 북극권 미래 환경변화 시나리오와 관련하여, 당초 목표였던 이산화탄소 방출 뿐만 아니라 메탄의 방출까지 전망하여 향후 “북극권 동토 관측 거점을 활용한 환경변화 감시와 예측”의 참고 자료로 활용될 예정

■ 본 과제에서 획득한 북극권 기후 변화의 영향은 한반도 및 동아시아의 중장기 기후 예측에서 극지의 역할을 제시하는 자료로 활용될 것임

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

■ 1단계 영구동토층 사업의 경우, 환북극 관측 사이트를 완성하는 인프라 구축이 가장 우선시되는 사업이었음. 이에 따라 생산된 자료의 활용/응용 성격이 큰 세부 3과제의 경우, 전체적인 연구비 투입이 상대적으로 적었음. 그러나, 지속적으로 효율적이고 성실한 연구활동 끝에 우수한 연구성과를 창출해 낸 바 있음을 평가에 있어 연구책임자로서 강조하는 바임.

3. 연구개발성과의 활용방안 및 향후 조치에 대한 의견

■ 본 연구에서 개발된 다양한 분석기법들과 구축된 시스템, 축적된 모델 운용 경험은 성공적인 2단계 사업을 수행하는데 다양한 형태로 활용될 예정임.

■ 특히, 1단계에서 개발된 지면 모델 및 지역규모 모델은 안정적으로 생산되기 시작한 환북극

KOPRI 극지연구소

관측사이트의 자료를 활용하는데 있어 가장 중요한 요소로 활용될 것임.

Ⅳ. 보안성 검토

1. 연구책임자의 의견

해당사항 없음

2. 연구기관 자체의 검토결과

해당사항 없음

210mm×297mm[백상지 80g/㎡(재활용품)]

KOPRI
극지연구소

성과소개서(세부과제-3)

과제 및 연구자 정보				
과제번호	2011-0021069			
과제명	급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현			
사업분류	거대과학연구개발사업>해양극지기초원천기술개발사업>해양극지기초원천기술개발사업			
총 연구기간	2011/06/23 ~ 2016/06/22			
총 연구비	1,290,000,000 원			
과제 개요	○ 지구온난화에 따른 동토층 표층변화 탐지 ○ 북극권 영구동토층 내 기후-식생 상호작용 파악 ○ 영구동토층 사이트 관측에 기반한 영구동토층 국지 지면-생태 모델링 시스템 구축 ○ 최근 수세기 동안의 유라시아 눈덮임의 장기 변화 및 유라시아 눈덮임과 관련되어 있는 고위도, 북극지방의 습윤속 및 대기순환 변동 통계 분석 ○ 기후모형을 이용하여 유라시아 눈덮임 변화에 따른 유라시아 지역 지표면 과정, 시베리아 고기압의 변화 및 동토층 융해에 미치는 영향 분석 ○ 영구동토층 환경변화 특성을 반영한 북극권 대기/해양-토양-식생 통합 기후모델 개발, 이를 활용한 빙권 기후변화 재현 및 미래기후 모의 ○ 국가 기후변화 대응 전략 수립에 필요한 북극권 미래 환경변화 시나리오 도출			
연구자	성명	김백민	소속	한국해양과학기술원 부설 극지연구소
	전화번호	032-760-5308	이메일	baekmin@gmail.com

성과기본정보			
성과명	급격한 동토층 환경변화의 수치적 재현		
성과요약	○ 탄소 순환 및 메탄 방출 모듈을 접합한 영구동토층 지면-식생-수문 통합모델을 완성하여 북극권 미래 환경 변화 시나리오 도출 ○ 미래 온난화된 지구에서 북극권 영구동토 활동층의 변화, 정량적인 이산화탄소 및 메탄의 방출 전망 ○ 북반구 영구동토층 고위도 식생 변화의 기후 피드백 효과가 얼마나 큰지 정량적으로 규명하고 미래 고위도 동토층 툰드라 식생 증가가 북극 온난화를 가속화한다는 결과 도출 ○ 한북극 식생의 녹화가 열대 강수를 변화시키며, 이 영향이 계절적 변동성을 가짐을 규명		
국문 키워드	영구동토층	북극권 미래환경변화	기후-식생 상호작용
	지면-식생-수문 통합모델	시나리오	
영문 키워드	permafrost	Arctic climate change	climate-ecosystem interaction
	land-vegetation-hydrology model	scenario	
이미지			

성과분류						
성과유형	이론	방법/기법	알고리즘/메커니즘	소재/물질	종자/종	
	■	□	□	□	□	
	기술/공정	SW	데이터(Data)	표준/규제	정책입안/신규프로젝트	기타(노하우 등)
	□	□	□	□	□	□

과학기술표준분류	대분류	중분류	소분류
	[ND]지구과학(지구/대기/해양/천문)	[ND06]기후학	[ND0603]기후모델링/예측기술
	-	-	-
	-	-	-

한국표준산업분류	분류1	분류2	분류3	분류4	분류5
	[M]전문, 과학 및 기술 서비스업	[M99]그외 미분류 전문, 과학 및 기술 서비스업	[M999]그외 미분류 전문, 과학 및 기술 서비스업	[M9999]그외 미분류 전문, 과학 및 기술 서비스업	[M99999]그외 미분류 전문, 과학 및 기술 서비스업
	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-

활용분야	대분류	중분류	소분류
	[A14]환경/지구과학	[A1412]기후변화과학	-
	-	-	-
	-	-	-

완성도 및 혁신성	
연구단계(공통)	기본개념정립
연구단계(신약)	가설 설정과 실험 설계
혁신성	기존 지식을 개선하는 발견/발명(Minor improvement 27.1%)

기존지식/기술 대비 차별성

내용	○ 북극 기후 변화 원인 규명을 통해 미래 극지기후변화 예측기술의 향상이 기대됨 ○ 미래 고위도 동토층 툰드라 식생 증가가 북극 온난화를 가속화한다는 명제 도출 (2014년 10월 Nature지 하이라이트 선정) ○ 환북극 영구동토층 변화에 의한 영향이 고위도 지역에 머물지 않고, 열대지역의 강수에까지 역학적 메커니즘을 통해 영향을 줄 수 있음을 세계 최초로 규명 ○ 알레스카 동토층 미래 탄소 배출량 추정에 있어 북태평양에서 기인하는 스톰의 이동경로를 고려해야 함을 세계 최초로 알려줌
유형	선진 연구와 경쟁(Advanced)

연구결과가 주는 혜택

내용	○ 전구 기후 변화에서 극지의 역할 이해를 통한 장기 기후예보의 정확성을 높여 국가의 경제적 손실 절감에 기여 ○ 보다 정확한 겨울철 기후 변화 및 극한 기후 현상의 변화 예측은 향후 국가적 에너지 수급 계획에 중요한 정보로 사용될 수 있음 ○ 북극 기후 변화에 의해 나타는 해빙 감소량의 예측으로 북극해를 이용하는 선로 개발에 기여 ○ 북극 기후변화 원인 규명 및 모델 개발을 통한 미래 온난화 하에서 전구 기후 예측에 활용 ○ 한반도 및 동아시아의 중장기 기후 예측에서 극지의 역할 자료 제시에 활용 ○ 북극권의 대기-해양-지면-식생을 모의·예측할 수 있는 통합 모형 개발을 통해 북극권의 기후 변화 뿐 아니라 이 변화가 한반도에 미치는 영향을 예측하여 정책 결정의 근거로 활용
유형	한 눈에 알아볼 수 있는 혜택의 향상(Meaningful)

추가지원 (추가개발 불필요)

추가연구지원 항목	심화기초연구	원천기술 개발	상용화연구	기타(사업명/부처)
	□	■	□	□

추가연구 필요성	○ 서울대 지구환경과학부는 기후-식생모델 접합을 통한 미래기후 변화 시나리오를 생산한 바 있지만, 영구동토의 생지화학 요소는 포함하지 않음 ○ 본 연구팀은 해양극지기초원천기술사업을 통해 고위도 환북극 지역에서의 탄소순환 모델링 기반기술을 확보한 바 있음. 그러나, 종합적인 탄소, 질소 순환을 고려한 생지화학 모델링 연구는 수행된 바 없으며, 국내 기술력 전무한 수준임 ○ 본 연구에서 개발된 다양한 분석기법들과 구축된 시스템, 축적된 모델 운용 경험은 향후 성공적인 2단계 사업을 수행하는데 다양한 형태로 활용될 예정임 ○ 특히, 1단계에서 개발된 지면 모델 및 지역규모 모델은 안정적으로 생산되기 시작한 환북극 관측사이트의 자료를 활용하는데 있어 가장 중요한 요소로 활용될 것임	
추가연구 상세내용	후속과제명	북극권 동토 관측 거점을 활용한 환경변화 감시와 예측
	추진내용	○ 환북극 지역에서의 10년 미래 환경변화 예측 모델 개발 - 북극 고해상도 지역기후 모델링 기반 기술 확보 - 환북극 동토 생지화학 변화 모델링 기반 기술 확보 - 지구시스템 모델의 자연/인위 강제력 확보 및 적용 연구 - 대기/생지화학 초기화 기술 적용, 기후변화 10년 상세 예측
	추진기간 및 예산	8 개월 1383백만원

연구결과 활용/ 확산을 위한 후속조치 (후속조치 불필요 √)

희망후속조치	기술마케팅	사업화 컨설팅 (가치평가 등)	지재권 확보지원	표준화 활동지원	기타
	□	□	□	□	□

후속조치 상세내용	추가연구 필요성	
	추진내용	
	예상 추진기간 및 예산	0 개월 0백만원

라이센스 상황 (해당사항 없음 √)

라이센스상황	

본 연구결과의 입증근거

보유산출물	시험/실험결과	시제품	논문	특허	실용신안	SW	기술이전	제약없음
	□	□	■	□	□	□	□	□

시험결과	제목		파일첨부	
시제품	제목		파일첨부	

1. 논문

No	Sci구분	성과년도	논문명	학술지명	게재년월

1	SCI	2014	A physical mechanism of the precipitation dipole in the western United States based on PDO-storm track relationship	GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS	201407
2	SCI	2014	Intensified Arctic warming under greenhouse warming by vegetation-atmosphere-sea ice interaction	ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS	201409
3	SCI	2015	Temperature Variation over East Asia during the Lifecycle of Weak Stratospheric Polar Vortex	JOURNAL OF CLIMATE	201507
4	SCI	2015	Seasonal Dependence of the Effect of Arctic Greening on Tropical Precipitation	JOURNAL OF CLIMATE	201508

2. 특허

No	성과년도	출원/등록	특허명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

3. 실용신안

No	성과년도	출원/등록	실용신안명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

4. SW(소프트웨어)

No	성과년도	출원/등록	프로그램명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

5. 기술이전 라이센싱

No	전용/통상	실시기술명
- 결과없음 -		

6. 기타

No	성과종류	성과명	파일
- 결과없음 -			

연구를 확인할 수 있는 홈페이지나 동영상 (YouTube 등) URL

No	URL	제목
- 결과없음 -		

동 연구분야 국내 전문가

No	이름	소속(기관명)
1	정지훈	전남대학교
2	서명석	공주대학교
3	김정희	연세대학교

[별지 제12호서식]

연구개발결과 활용계획서(세부과제-4)

1. 연구성과 및 활용 현황

가. 과학기술/학술적 연구성과

(단위: 건)

전문학술지 논문게재				초청 강연 실적	학술대회 논문발표		지식재산권				수상 실적	출판실적	
국내논문		국외논문			국내	국제	출원		등록			저역서	보고서
SCI	비SCI	SCI	비SCI				국내	국외	국내	국외			
0	1	3	0	0	0	7	0	0	0	0	0	1	0

나. 전문학술지 논문게재 성과 정보

과제 번호	게재 연월	논문제목	총저자명	출처	학술지명	권(호)	학술지 구분	SCI 여부	IF	국제공동연구 논문여부	기여도
2011-0021071	2014.03	Use of Length Heterogeneity Polymerase Chain Reaction (LH-PCR) as Non-Invasive Approach for Dietary Analysis of Svalbard Reindeer, Rangifer tarandus platyrhynchus	Joo, Sungbae; Han, Donguk; Lee, Eun Ju; Park, Sangkyu;	SCIE	PLOS ONE	9(3)	국외	SCI등재	3.234	아니오	100
2011-0021071	2014.04	Estimating soil water retention function from its particle-size distribution	Tae-Kyu Lee, Hee-Myong Ro	SCI	Geosciences Journal	18(2)	국외	SCI등재	0.922	아니오	100
2011-0021071	2014.06	Geostatistical analyses and spatial distribution patterns of tundra vegetation in Council, Alaska	박정수, 이은주		Journal of Ecology and Environment	37(2)	국내	SCI미등재		아니오	100
2011-0021071	2014.08	Interpreting the effect of soil texture on transport and removal of nitrate-N in saline coastal tidal flats under steady-state flow condition	Min-Jin Lee, Sang-Il Hwang, Hee-Myong Ro	SCI	Continental Shelf Research	14	국외	SCI등재	2.011	아니오	100

KOPRI 극지연구소

다. 지식재산권 성과 정보

과제 번호	출원등록 연월	재산권 구분	출원등록 구분	발명제목	출원 등록인	출원 등록국	발명자명	출원등록번호	활용형태	기여도

라. 산업지원 및 연구성과 활용

(단위: 건)

기술확산			연구성과활용(사업화 및 후속연구과제 등)		
기술이전	기술지도	기술평가	후속연구추진	사업화추진중	사업화완료

마. 국내외 기술료 징수 현황 (기업화 완료 또는 기술실시계약 체결 시 기재)

징 수 조 건	
징 수 현 황	백만 원(전년도말 현재)

바. 기업화 성과 (기업화 완료 또는 추진 중인 경우 반드시 기재)

업 체 명		기업화 완료[ ] 기업화 예정[ ]	년 월 일
제 품 명		제 품 용 도	
기업화이용유형 중 택일	신제품개발[ ], 기존제품 개선[ ], 신공정개발[ ], 기존공정개선[ ], 기타[ ]		

사. 경제적 파급 효과 (지난 1년간 실적)

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원 수)	그 밖의 효과
					○

아. 향후 경제적 기대 효과

수입대체 효과 (백만 원/년)	수출증대 효과 (백만 원/년)	매출증대 효과 (백만 원/년)	생산성향상 효과 (백만 원/년)	고용창출 효과 (인력양성 인원 수)	그 밖의 효과
					○

2. 연구개발결과 활용 계획 (해당항목에 "○" 표시)

KOPRI 극지연구소

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

가. 당해연도 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

추후 연구에서는 기본조사 및 현장조사를 수행한 실험 결과를 바탕으로 미래예측의 기초자료로 사용할 수 있는 실험을 설계하도록 하겠음.

나. 활용방법

- 차년도 연구 계획 없음.

다. 차년도 이후 활용계획 (6하 원칙에 따라 구체적으로 작성)

- 차년도 연구 계획 없음.

3. 기대효과

○ 북극 지역의 독특한 생태계 특성을 이해함으로써 지속가능한 극지 생태계 보전을 위한 기초 지식 제공

○ 극한 동토층에서 형성된 토양의 동결 융해 연구를 통해 탄소순환 기작을 이해하고 기후변화 모델에 기초자료 제공

○ 북극 식물다양성의 진화적 양상을 확인하기 위하여 스발바르 식물상의 계통과 생태적 특성에 대한 DB를 구축함. 기후변화와 서식지 파괴, 남벌 등 인간활동에 특히 취약한 자웅이주 식물의 보전에 기여할 수 있음.

○ 기후변화에 따른 극지 생태계 반응 및 기작을 선도적으로 규명함으로써 향후 우리나라가 국제적 협약과 협상을 이끌 수 있는 토대 마련

○ 국내 극지 연구가 육상생태계로 연구의 토대를 넓히는 기반이 구축될 것임

○ 극지 토양의 물질수송과 수리특성에 관한 연구를 통하여 극지의 육상생태계와 해양생태계를 연계할 수 있는 연구 기반 마련

○ 본 과제를 통해 새로운 학문영역의 석박사 인력을 배출함으로서 극지 관련 연구를 수행할 전문 인력 양성에 기여

○ 극지생태계의 인위적 교란 영향 평가 및 기후변화 영향의 정확한 평가, 생태계 모델에 이용될 수 있는 새로운 생태 인자 제시를 통한 모델의 예측력 향상에 기여

○ 향후의 북극권 자원탐사 등에 활용이 가능한 동토층 생태계 관련 기초 자료 제공

4. 문제점 및 건의사항

○ 본 연구에서 진행된 실험실 내 모사실험과 함께, 실제 환경변화에 따른 동토층의 변화를 살펴보기 위한 장기적 연구 필요성 있음.

○ 또한, 전지구적 환경변화에 미치는 극지의 생태계 변화 영향을 분석하기 위해서는

각기 다른 연구팀과의 연구장소 통일, 현장 조사 시기 일치, 원활한 정보보유가 요구됨.

○ 북극에서의 현장 조사가 짧은 시기 동안 진행되기 때문에 현장실험에 필요한 조건(실험장비, 소모품 조달, 사전협의 등)이 반드시 충복되어야 좋은 결과 도출 가능함.

○ 전체 실험 주제를 통일하는 것이 바람직하지는 않지만 각기 다른 실험 주제 중에는 같은 연구 주제 도출과 협동연구는 필요함. 예를 들면 탄소의 저장과 유출입이라는 주제로 각기 다른 실험 결과를 분석하는 것은 필요해 보임.

○ 각 실험에 대한 명문화된 방법론을 확립하여 차후 연구에 활용할 수 있는 제공하는 것이 필요하며 본 연구에서 얻어진 소중한 자료는 훼손에 민감한 북극 환경과 생태계 복원에 활용될 것으로 기대됨.

KOPRI
극지연구소

주관연구기관의 자체평가 의견서(세부과제 – 4)

1. 과제현황

과제코드	2011-0021071

부처사업명(대)	거대과학기술개발				
사업명(중)	해양극지 기초·원천기술개발사업				
세부사업명(소)	환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구				
부처 기술분류	(대)	(중)	(소)	국가기술지도 (NTRM)	B030308
국가과학기술 표준분류체계	(E)	(E05)	(E0503)		
총 괄 과 제	환북극 동토층 환경변화 관측시스템 원천기술 개발 및 변화 추이 연구	총괄책임자(기관)	이방용 (극지연구소)		
과 제 명	북극권 동토층 생태계 특성 규명	연 구 단 계	2단계		
연 구 기 관	서울대학교	연 구 책 임 자	이은주		

연 구 기 간 연 구 비 (천원)	연차	기간	정부출연금	민간출연금	계
	1차연도	2013.06.23-2014.06.22	200,000		200,000
	2차연도	2014.06.23-2015.06.22	200,000		200,000
	3차연도	2015.06.23-2016.06.22	200,000		200,000
	4차연도				
	5차연도				
	계		600,000		600,000

참 여 기 업			
상 대 국		상대국 연구기관	

비 고 : 총괄과제란은 총괄과제에 해당하는 경우에만 기재합니다.

2. 평가일: 2016.06.29

3. 평가자

소 속	직 위	성 명
서울대학교	교수	이은주

4. 평가자 확인

본인은 평가대상 과제의 연구결과를 객관적으로 기술하고, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 이 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

서 명	이 은 주

210㎜×297㎜[백상지 80g/㎡(재활용품)]

Ⅰ. 연구개발실적

1. 연구개발성과의 우수성 및 창의성

○ 북극권 영구동토 토양의 물질수송 특성 구명 및 동결-융해가 동토층 토양의 탄소 역학에 미치는 영향 규명함.

○ 북극 식생의 분포와 환경요인간의 관계를 밝히고, 극한 환경에서 적응한 식물들의 nurse effect를 밝힘.

○ 북극 동토층 주요 우점 식물종의 대사체 변화 분석 및 먹이관계 분석하고 북극 동토층 토양 생물 군집의 변화에 따른 주요 우점 식물종의 대사체 변화를 밝힘.

○ 극지에서의 낮은 수준의 생물다양성에도 불구하고 생물 간의 네트워크는 매우 다양하고 복잡할 수 있음. 생물 간 네트워크, 특히 식물과 수분매개자 네트워크에 대한 이해는 취약 생태계 보전과 생태계서비스 향상에 필수적임.

2. 연구개발성과의 파급효과

○ 극지에서의 매개곤충과 식물의 공생관계에 대한 이해는 차후 우리나라 곤충상 보전에도 기여할 것임.

○ 극지 동토층 토양의 분석법 등 극지 환경 연구의 구체적인 방법의 정립은 차후 진행될 타 연구의 가이드라인 역할을 수행하고, 더 양질의 데이터로 활용이 가능할 것으로 사료됨.

○ 토양생물과 극지 식물간의 화학적 상호작용을 밝힘으로써 기후변화에 의한 토양 군집의 변화를 매개로한 식물기반 극지 먹이그물의 변화를 예측할 수 있음.

3. 연구개발성과에 대한 활용가능성

○ 북극 지역의 독특한 생태계 특성을 이해함으로써 지속가능한 극지 생태계 보전을 위한 기초 지식 제공

○ 극한 동토층에서 형성된 토양의 동결 융해 연구를 통해 탄소순환 기작을 이해하고 기후변화 모델에 기초자료 제공

○ 북극 식물다양성의 진화적 양상을 확인하기 위하여 스발바르 식물상의 계통과 생태적 특성에 대한 DB를 구축함. 기후변화와 서식지 파괴, 남벌 등 인간활동에 특히 취약한 자웅이주 식물의 보전에 기여할 수 있음.

4. 연구개발 수행노력의 성실도

○ 제한된 실험수행기간 및 인력 등 많은 제약을 가진 연구지역이기 때문에 철저하게 문헌조사를 수행하고, 실험을 계획하였으며, 현장에서의 여건을 고려하여 가장 적합한 실험을 수행함.

○ 본 연구진은 현장조사시 관찰한 사실에 근거하여 연구 계획을 수정 보완하여 당초 계획했던 연구 계획을 100% 달성함.

5. 공개발표된 연구개발성과(논문 · 지적재산권 · 발표회 개최 등)

○ 논문

Lee TK, Ro HM. Estimating soil water retention function from its particle-size distribution. 2014. Geosciences Journal. 18:219-230.

Joo S, Han D, Lee EJ, Park S. Use of Length Heterogeneity Polymerase Chain Reaction (LH-PCR) as Non-Invasive Approach for Dietary Analysis of Svalbard Reindeer, *Rangifer tarandus platyrhynchus*. 2014. PLoS ONE 9(3): e91552.

KOPRI 극지연구소

Lee MJ, Hwang SI, Ro HM. 2014. Interpreting the effect of soil texture on transport and removal of nitrate-N in saline coastal tidal flats under steady-state flow condition. Continental Shelf Research. 84:35-42.

Park JS, Lee EJ. 2014. Geostatistical analysis and spatial distribution patterns of tundra vegetation in Council, Alaska. Journal of Ecology and Environment 37(2):1-8

○ 학술발표_구두

양동우, 정남일, 박상규. Application of Sterol Markers in Monitoring Fungal Community Changes in Soil and Litter. 2014. The 6th EAFES International Congress.

이민진, 노희명. Effects of nitrogen addition on soil carbon dynamics in the active layer of an Arctic tundra soil during repeated freeze-thaw cycles. 2014. 20th World Congress of Soil Science.

이은주. Analysis of environmental factors determining distribution of arctic vegetation in Svalbard. 2014. Proceeding of the 20th International Symposium on Polar Sciences.

강혜순. Reproductive ecology of flowering plants in Svalbard, Norway. 2016. The 7th EAFES International Congress.

황영심, 손덕주, 손요한, 이은주. Reproduction study of *Huperzia arctica* in Ny-Ålesund, Svalbard. 2016. The 7th EAFES International Congress.

양동우, 김지희, 우아영, 박상규. Interaction between a herbivore, Svalbard reindeer (*Rangifer tarandus platyrhynchus*), and forage plants in an arctic region, Svalbard, Norway. 2016. The 7th EAFES International Congress.

손덕주, 이은주. Nursing effects on arctic flora in Ny-Ålesund, Svalbard. 2016. The 7th EAFES International Congress.

○ 도서

이유경, 정지영, 황영심, 이규, 한동욱, 이은주. 북극 툰드라에 피는 꽃. 2014. 지오북. 서울.

○ 기타

- 북극사진전시전. 2014년 4월 15일~20일. 서울메트로미술관.
- Polar Ecology Session. 동아시아생태학회. 2016년 4월 19~22일. 대구.

비 고 :각 평가항목에 따라 자체평가한 내용을 상세하게 기술(각 항목별 200자 이내)

Ⅱ. 연구목표 달성도

번호	세 부 연 구 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
1	동토의 특성 파악 및 알래스카 장기모니터링	○ 알래스카 활동층 및 영구동토층에 이르는 토주를 확보하여 층위분석 및 화학성 분석 완료	100
2	환경요인과 식물의 공간적 분포 연관성 연구	○ 출현 식물종의 분포 특성을 geostatistic 기법 이용해 분석 ○ 격자 지점 환경요인 측정	100

3	북극이끼장구채 번식특성의 진화적 양상 분석	○ 북극이끼장구채 성체제 및 크기, 성비, 성적 자원분배 분석	100
4	북극 피자식물종의 계통과 생태특성 자료 추출과 분석	○ 식물지와 웹정보 확보 ○ 다양한 수준의 계통과 생태정보 추출	100
5	식물 대사물질 변화 분석 및 북극 먹이망 관계 파악	○ 기후변화 모사 챔버에서 민담자리 꽃나무 (*Dryas integrifolia*)와 토양을 채집하여 식물대사물질 및 토양 streol 분석을 실시함	100
6	동토층 토양 특성 분석 및 동결-융해 모사 실험	○ 동결-융해 교차순환의 영향에 의한 토양 내 탄소/질소 역학변화를 현장 토주실험을 통해 파악하고, 토양층위별 온실기체 동태를 평가함	100
7	식생 환경인자 연속 모니터링	○ DGPS를 이용한 대표 식생 군락의 식생 공간 분포 조사 ○ 데이터 마이닝 기법을 이용한 환경 요인들과의 연관성 분석	100
8	빙하퇴각시기에 따른 식물대사체 변화 모니터링	○ 우점식물 지하부 및 지상부 시료 채집 및 대사체 분석 ○ 토양 시료 채집 및 진균류 군집 분석	100
9	스발바드 순록의 섭식활동에 의한 식물 대사물질 변화 분석	○ 스발바드 니알레순 다산기지 주변 exclosure 안, 밖에서 북극콩버들 (*Salix polaris*) 잎 채집 분석 ○ 야외 인위섭식 실험을 통한 주기별 북극콩버들 (*S. polaris*) 잎 채집	100
10	알래스카 영구동토의 특성 및 작용 연구	○ 알래스카 영구동토 토양의 수리특성을 실내 및 현장실험 병행을 통해 분석하고, 혼성치환 실험으로 물질수송특성을 이해함	100
11	식생 환경인자 연속 모니터링 및 주요 식생의 nurse plant effect 연구	○ 식생 공간 분포 조사 및 환경 요인들과의 연관성 분석 ○ 북극종꽃나무외 외 2종의 nurse effect 특성 및 서식처 종다양도 파악	100
12	북극식물의 분류, 생태적 다양성과 진화 연구	○ 북극 툰드라 식물에 대한 최신 웹사이트 정보와 문헌 확보와 함께 피자식물종의 계통, 번식생태, 위기등급에 대한 자료 추출과 분석 ○ 현장에서 개화 중인 식물의 꽃 관찰, 동정, 채집	100
13	북극다람쥐꼬리의 서식 분포 특성 및 균근과의 공생 관계 규명	○ 북극다람쥐꼬리 서식환경 세부 특성 파악 ○ 북극다람쥐꼬리와 공생하는 균근 특성	70

		규명	
14	기후변화요인과 빙하퇴각시기에 따른 식물대사체 변화 분석	○ 인위 섭식 실험, exclosure 내·외 식물 채집 및 대사물질 분석 ○ 토양 미생물 (세균, 진균류) 군집 변화 다변량분석 ○ 식물 대사체 다변량분석 및 주요 변화 물질 탐색	100

Ⅲ. 종합의견

1. 연구개발성과에 대한 종합의견

■ 본 과제의 연구진은 매년 계획서에 명시된 현장 실험들을 100% 수행하였으며, 얻어진 관련 결과 역시 북극의 자연 환경과 육상생태계를 이해하는 매우 중요한 자료로 사용될 것으로 기대됨.

■ 북극 다신과학기지 주변의 40여 종류의 육상 식물 국명(Korean name) 부여는 국내 연구자에게 통일된 식물명을 제공하고, 차후 타 극지 식물 연구에서도 잘 활용될 것이며, 국내 연구자가 북극 생태계를 연구하고 논문이나 전문 도서를 저술할 때 통일된 식물 국명을 제공할 것으로 기대됨.

■ 본 연구에서 적용된 극지 토양의 동결-융해 모사 실험 방법, 식물 대사체 분석 방법, 식생 환경 인자 연속적 모니터링 방법 등은 차후 지구 환경변화에 따른 생태계 변화를 측정하는 기본 분석 방법으로 활용이 기대됨.

■ 북극 다산과학기지 주변 육상식물과 매개곤충의 공생관계 연구는 지구 환경변화에 따른 식물 개화기와 곤충 활동기의 연관성을 살펴보고 환경변화를 분석할 수 있는 좋은 지표가 될 것임.

■ 2014년도에 출간한 '북극 툰드라에 피는 꽃, Beautiful Arctic Tundra Plants'은 노르웨이, 영국, 일본, 중국 등 북극 연구자들에게 전달되었고 국문과 영문으로 북극 식물의 생태 사진이 잘 나와있어 북극 육상식물 연구에 유용하게 활용될 것이라고 호평을 받음.

■ 북극 육상생태계를 연구 주제로 진행된 북극 토양, 식생, 2차 대사체, 식물-매개곤충, 양치식물 연구 결과를 연계해서 북극 환경변화에 따른 육상 생태계 변화를 살펴볼 수 있는 중요한 연구임.

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

■ 본 연구는 북극 토양 특성, 토양 내 영양물질 및 미생물의 분포, 육상식물 식생, 식물체 2차 대사체, 식물-매개곤충, 양치식물 번식 생태 등 북극 생태계를 구성하는 다양한 환경요인과 생물군집에 대해 다각적으로 접근한 생태학적 연구임.

■ 본 연구의 경우 북극 육상생태계를 이해하는 기초 데이터를 생산해 내는 연구이며, 통일된 북극 생물의 국명, 북극 식물도감, 논문, 학술발표, 대국민 홍보 등이 중요한 결과물임.

■ 본 과제의 또 다른 목표는 북극 연구의 기본 인프라 구축으로, 기존의 인프라와의 연계 가능성과 편의성을 충족시키는지가 중요함.

■ 현재까지 포스터로 발표되었고 참여연구자가 준비하고 있는 다년간 북극에서 얻어진 연구결과가 논문으로 출간될 경우 학술적으로 기여할 수 있으며 극지 전문 인력 양성이 중요함.

3. 연구개발성과의 활용방안 및 향후 조치에 대한 의견

■ 본 연구에서 진행된 실험실 내 모사실험과 함께, 실제 환경변화에 따른 동토층의 변화를 살펴보기 위한 장기적 연구 필요성 있음.
■ 또한, 전지구적 환경변화에 미치는 극지의 생태계 변화 영향을 분석하기 위해서는 각기 다른 연구팀과의 연구장소 통일, 현장 조사 시기 일치, 원활한 정보보유가 요구됨.
■ 북극에서의 현장 조사가 짧은 시기 동안 진행되기 때문에 현장실험에 필요한 조건(실험장비, 소모품 조달, 사전협의 등)이 반드시 충복되어야 좋은 결과 도출 가능함.
■ 전체 실험 주제를 통일하는 것이 바람직하지는 않지만 각기 다른 실험 주제 중에는 같은 연구 주제 도출과 협동연구는 필요함. 예를 들면 탄소의 저장과 유출입이라는 주제로 각기 다른 실험 결과를 분석하는 것은 필요해 보임.
■ 각 실험에 대한 명문화된 방법론을 확립하여 차후 연구에 활용할 수 있는 제공하는 것이 필요하며 본 연구에서 얻어진 소중한 자료는 훼손에 민감한 북극 환경과 생태계 복원에 활용될 것으로 기대됨.

Ⅳ. 보안성 검토

1. 연구책임자의 의견

없음

2. 연구기관 자체의 검토결과

없음

210㎜×297㎜[백상지 80g/㎡(재활용품)]

KOPRI 극지연구소

성과소개서(세부과제-4)

과제 및 연구자 정보

과제명	북극권 동토층 생태계 특성 규명
사업분류	거대과학연구개발사업>해양극지기초원천기술개발사업>해양극지기초원천기술개발사업
총 연구기간	2011/06/23 ~ 2016/06/22
총 연구비	1,000,000,000 원
과제 개요	○ 일반 영구동토 및 영구동토 융해 지역 선정 후 수리특성 분석 ○ 질소처리가 영구동토 토양 탄소 역학에 미치는 영향에 대한 현장 실험 ○ 분광학적 분석을 통한 영구동토 토양탄소의 정성적 특성 연구 ○ 북극 다산기지 인근의 대표적인 툰드라 식생 분포의 특성 파악을 위해 약 20,000 m2 지역에 102개 방형구 조사 실시 ○ 102개 방형구에서 지형 및 토양 환경 요인을 분석 ○ 지구통계학과 데이터 마이닝 기법을 이용해 북극 동토층 주요 식물 종 구성과 환경 요인들과의 연관성을 분석 ○ 빙하퇴각 지역의 천이 단계에 따라 널리 분포하는 우점식물종의 뿌리와 잎의 대사물질 profile 변화를 토양 생물 군집의 변화와 함께 모니터링

성과기본정보

성과명	북극 생태계 특성 규명		
성과요약	- 알레스카 영구동토층 토양의 물질화학적 특성 분석 - 지구온난화에 따른 알레스카 토양 내 탄소/질소 동태 연구 - 스발바드의 식생 분포에 영향을 미치는 환경인자 분석 - 스발바드 식물의 nurse effect 연구 - 북극다람쥐꼬리의 생태 연구 - 스발바드 현화식물 번식 체제 연구 - 북극 동토층 주요 우점 식물종의 대사체 변화 분석 및 먹이관계 분석 - 북극 동토층 토양 생물 군집의 변화에 따른 주요 우점 식물종의 대사체 변화 이해		
국문 키워드	영구동토 융해	토양 탄소	식물종 다양도
	식물 보호 효과	식물 대사체	식물 성 체제
영문 키워드	Thawing permafrost	Soil carbon	Plant species diversity
	Nurse effect	Plant metabolomics	Plant sex study
이미지			

성과분류

성과유형	이론	방법/기법	알고리즘/메커니즘	소재/물질	종자/종	
	■	■	□	□	■	
	기술/공정	SW	데이터(Data)	표준/규제	정책입안/신규프로젝트	기타(노하우 등)
	□	□	■	□	□	□

과학기술표준분류	대분류	중분류	소분류
	[LA]생명과학	[LA05]분류/생태/환경생물학	[LA0503]생태학
	-	-	-
	-	-	-

한국표준산업분류	분류1	분류2	분류3	분류4	분류5
	[M]전문, 과학 및 기술 서비스업	[M70]연구개발업	[M701]자연과학 및 공학 연구개발업	[M7011]자연과학 연구개발업	[M70111]물리, 화학 및 생물학 연구개발업
	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-

활용분야	대분류	중분류	소분류
	[A14]환경/지구과학	[A1406]생태계	-
	-	-	-
	-	-	-

완성도 및 혁신성

연구단계(공통)	기본원리파악
연구단계(신약)	가설 설정과 실험 설계
혁신성	기존의 방법으로 현안을 도출, 해결방안 제시(Routine design problems, 68.3%)

기존지식/기술 대비 차별성

내용	○ 북극권 영구동토 토양의 물질수송 특성 구명 및 동결-융해가 동토층 토양의 탄소 역학에 미치는 영향 규명함. ○ 북극 식생의 분포와 환경요인간의 관계를 밝히고, 극한 환경에서 적응한 식물들의 nurse effect를 밝힘. ○ 북극 동토층 주요 우점 식물종의 대사체 변화 분석 및 먹이관계 분석하고 북극 동토층 토양 생물 군집의 변화에 따른 주요 우점 식물종의 대사체 변화를 밝힘. ○ 극지에서의 낮은 수준의 생물다양성에도 불구하고 생물 간의 네트워크는 매우 다양하고 복잡할 수 있음. 생물 간 네트워크, 특히 식물과 수분매개자 네트워크에 대한 이해는 취약 생태계 보전과 생태계서비스 향상에 필수적임.
유형	선진 연구와 경쟁(Advanced)

연구결과가 주는 혜택

내용	○ 극지에서의 매개곤충과 식물의 공생관계에 대한 이해는 차후 우리나라 곤충상 보전에도 기여할 것임. ○ 극지 동토층 토양의 분석법 등 극지 환경 연구의 구체적인 방법의 정립은 차후 진행될 타 연구의 가이드라인 역할을 수행하고, 더 양질의 데이터로 활용이 가능할 것으로 사료됨. ○ 토양생물과 극지 식물간의 화학적 상호작용을 밝힘으로써 기후변화에 의한 토양 군집의 변화를 매개로 한 식물기반 극지 먹이그물의 변화를 예측할 수 있음. ○ 북극 지역의 독특한 생태계 특성을 이해함으로써 지속가능한 극지 생태계 보전을 위한 기초 지식 제공 ○ 극한 동토층에서 형성된 토양의 동결 융해 연구를 통해 탄소순환 기작을 이해하고 기후변화 모델에 기초자료 제공 ○ 북극 식물다양성의 진화적 양상을 확인하기 위하여 스발바르 식물상의 계통과 생태적 특성에 대한 DB를 구축함. 기후변화와 서식지 파괴, 남벌 등 인간활동에 특히 취약한 자웅이주 식물의 보전에 기여할 수 있음.
유형	어느 정도의 혜택의 향상(Incremental)

추가지원 (추가개발 불필요)

추가연구지원 항목	심화기초연구	원천기술 개발	상용화연구	기타(사업명/부처)
	□	■	□	□
추가연구 필요성	* 실험실 내 모사실험과 함께, 실제 환경변화에 따른 동토층의 변화를 살펴보기 위한 장기적 연구 (최소 5~10년) 필요성 있음. * 각 실험에 대한 명문화된 방법론을 확립하여 차후 연구에 활용할 수 있는 제공하는 것이 필요하며 본 연구에서 얻어진 소중한 자료는 훼손에 민감한 북극 환경과 생태계 복원에 활용 적용 필요. * 향후 목표는 북극 연구의 기본 인프라 구축으로, 기존의 인프라와의 연계 가능성과 편의성을 충족시키는지 확인 연구가 필요함.			
추가연구 상세내용	후속과제명	북극 동토층 생태계 특성의 통합적 규명		
	추진내용	* 각 북극 지역별 동토층 특성에 따른 육상 생태계 특성 규명 * 기후변화에 따른 민감 생물종 및 생태계 집중 연구 * 북극 동토층과 비슷한 실험실 내 모사실험 수행		
	추진기간 및 예산	36 개월 600백만원		

연구결과 활용/ 확산을 위한 후속조치 (후속조치 불필요)

희망후속조치	기술마케팅	사업화 컨설팅 (가치평가 등)	지재권 확보지원	표준화 활동지원	기타
	□	□	□	□	■
후속조치 상세내용	추가연구 필요성	* 일반인들이 쉽게 북극 생태계를 이해할 수 있도록 오프라인 장좌가 필요함. * 북극 생물에 대한 통일된 국명 정립과 확산이 필요함.			
	추진내용	* 북극 생태환경 관련 사진전 및 강연 개최 * 국명이 표준화된 북극 식물도감 발간 , 논문 출간, 학술발표, 대국민 홍보 등이 필요함.			
	예상 추진기간 및 예산	24 개월 60백만원			

리이센스 상황 (해당사항 없음)

라이센스상황	공동출원인동의필요

본 연구결과의 입증근거

보유산출물	시험/실험결과	시제품	논문	특허	실용신안	SW	기술이전	제약없음
	□	□	■	□	□	□	□	□

시험결과	제목		파일첨부	
시제품	제목		파일첨부	

1. 논문

No	Sci구분	성과년도	논문명	학술지명	게재년월

1	SCI	2013	Organic Layer Serves as a Hotspot of Microbial Activity and Abundance in Arctic Tundra Soils	MICROBIAL ECOLOGY	201302
2	비SCI	2014	Geostatistical analyses and spatial distribution patterns of tundra vegetation in Council, Alaska	Journal of Ecology and Environment	201406
3	SCI	2014	Use of Length Heterogeneity Polymerase Chain Reaction (LH-PCR) as Non-Invasive Approach for Dietary Analysis of Svalbard Reindeer, Rangifer tarandus platyrhynchus	PLOS ONE	201403
4	SCI	2014	Estimating soil water retention function from its particle-size distribution	GEOSCIENCES JOURNAL	201406
5	SCI	2014	Interpreting the effect of soil texture on transport and removal of nitrate-N in saline coastal tidal flats under steady-state flow condition	CONTINENTAL SHELF RESEARCH	201404

2. 특허

No	성과년도	출원/등록	특허명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

3. 실용신안

No	성과년도	출원/등록	실용신안명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

4. SW(소프트웨어)

No	성과년도	출원/등록	프로그램명	출원(등록)번호	출원(등록)국
- 결과없음 -					

5. 기술이전 라이센싱

No	전용/통상	실시기술명
- 결과없음 -		

6. 기타

No	성과종류	성과명	파일
- 결과없음 -			

연구를 확인할 수 있는 홈페이지나 동영상 (YouTube 등) URL

No	URL	제목
- 결과없음 -		

동 연구분야 국내 전문가

No	이름	소속(기관명)
1	이규송	강릉원주대학교
2	허재선	순천대학교
3	윤호성	경북대학교

KOPRI
극지연구소

주 의

1. 이 보고서는 미래창조과학부(한국연구재단)에서 시행한 “해양극지기초·원천기술개발” 사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 미래창조과학부(한국연구재단)에서 시행한 “해양극지기초·원천기술개발” 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표하거나 공개하여서는 안됩니다.

KOPRI
극지연구소