BSPE25040-130-12

북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구

Study on remote sensing for
quantitative analysis of changes in the Arctic cryosphere

KOPRI
극지연구소

2025. 12. 31.

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

BSPE25040-130-12

북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구

한국해양과학기술원 부설 극지연구소

KOPRI 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2025. 12. 31

연 구 책 임 자 : 김현철

참 여 연 구 원 : 강성호, 김승희, 김시하, 김종민, 김지영, 민준홍, 박정원, 박진구, 변진영, 송예린, 윤주은, 이보미, 이성재, 이성희, 정용식, 하선용, Guha Supratim

위탁연구기관명 : 부경대학교, 세종대학교, 울산과학기술원

위탁연구책임자 : 임정호, 홍성욱, 한경수

KOPRI 극지연구소

보고서 초록

<table>
<tr><td>과제관리번호</td><td>PE25040</td><td>해당단계
연구기간</td><td colspan="2">2025.01.01.-
2025.12.31</td><td>단계 구분</td><td>2/2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="5">기본연구사업(고유사업)</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="5">주요과제</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>중 과 제 명</td><td colspan="5">북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구</td></tr>
<tr><td>세부(단위)과제명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>연구책임자</td><td>김현철</td><td>해당단계
참여연구원수</td><td>총 : 18 명
내부 : 9 명
외부 : 9 명</td><td>해당단계
연구비</td><td colspan="2">정부: 1,342,085 천원
기업: 천원
계: 1,342,085 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">한국해양과학기술원 부설
극지연구소 원격탐사빙권정보센터</td><td colspan="2">참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="6"></td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="6">연구기관명: 울산과기원 연구책임자: 임정호
연구기관명: 부경대학교 연구책임자: 한경수
연구기관명: 세종대학교 연구책임자: 홍성욱</td></tr>
<tr><td colspan="5">요 약</td><td>보고서
면수</td><td>505</td></tr>
<tr><td colspan="7">

ㅇ 연구목적 및 필요성

- 북극 빙권 변화 파악을 위한 위성 원격탐사 산출물 개발과 북극 빙권 변화 정량 분석을 통한 기후인자와의 상관관계 분석

ㅇ 주요연구내용 및 범위

▷ 원격탐사 기반 빙권 정량적 변화 광역 탐지 (산출물 개발) [1단계 (2020~2022)]

- 해빙 특성 관측 정량화 및 시공간적 변화 탐지 기술 개발
- 무인기와 위성 자료 활용 동토 변화 관측 기술 개발
- 현장관측을 통한 원격탐사자료 검보정

▷ 빙권 시공간 변화와 기후 요소별 상관관계 분석 (기후인자 영향 평가) [2단계 (2023~2025)]

- 해빙/해양의 기후환경 요소별 상호 관련성 이해
- 빙권 변동의 기후/환경변화에의 영향 분석

ㅇ 연구개발 결과

▷ 북극 빙권 구성요소 특성 변화 파악을 위한 원격탐사 산출물 개발

▷ 해빙 분석 대상 확대 및 분석 가능 스케일(해상도)의 개선 달성으로 다각적/종합적인 빙권 변화 양상 분석의 기반 마련

ㅇ 연구개발결과의 활용계획

▷ 융합연구:

- 다학제: 기후 예측 시스템 성능 향상에 기여할 해빙 물리 특성 입력자료 생산
- 다부처: 국가해양위성센터와 극지 온난화와 한반도 해양재난 재해 대응을 위한 원격탐사 연구 확대(저궤도 위성 공동 개발), 항공우주연구원과 극지 관측 탑재체 개발

▷ 실용화연구:

- 북극항로 예측에 활용할 북극해 해빙 변화 기초정보 생산
- 다부처 : 산자부(조선, 물류) 분야 극지 운항 선박 지원 프로그램 공동 개발

</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="5">북극, 해빙, 원격탐사, 자료처리, 위성정보시스템, 위성관측망</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="5">Arctic, Sea Ice, Remote Sensing (RS), Data Processing,
RS Information System, Satellite Observation Network</td></tr>
</table>

KOPRI 극지연구소

요 약 문

Ⅰ. 제 목

○ 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 북극 해빙의 글로벌 트렌드 영향 분석을 위한 위성 종합 관측망 구축 (2025년)
- 극지 환경변화 준실시간 모니터링 시스템 개발
- 극지 원격탐사 자료처리/분석기술 개발
- 국제 공동 위성관측 네트워크 구축

KOPRI 극지연구소

○ 필요성
- “북극 이사회 영구 옵서버 진출(‘13.5)”, “북극정책 기본계획(‘14.5)” 수립을 계기로 북극권 기후변화 연구, 북극항로 개척 등 과학·경제·사회적 분야에서의 북극해 빙권 정보 수요가 급증
- 우리나라는 쇄빙연구선 “아라온”을 활용한 현장관측 중심의 북극해 해빙변화 연구를 수행하고 있으나, 북극권 전역에 대한 빙권 정보를 관측하기에는 물리적인 한계(항해일수 등으로 인한 일부 지역만 관측 가능)가 존재
- 국제공동 위성정보 공유 체계 구축을 통한 북극권 전역의 빙권정보 확보 및 아리랑 위성을 활용한 분석/처리기술을 개발함으로써 북극권 빙권정보 수요에 대한 한계 극복 가능
- 한-러 정상회담(‘16.9)에서 북극해역 공동연구를 위한 협력약정, 극지역내 연구와 운영지원협력 MOU 체결을 통해 온난화 분석 등 다양한 연구를 기대

Ⅲ. 연구개발의 범위 및 수행방법

○ 위성 정보 수집 관리 시스템 기반 구축
: 북극항로 주변 위성자료 수집 및 관리 시스템 구축
1) 위성 원격탐사 자료 수신 시스템 설계
2) 아리랑 위성 극지 자료 수신 및 산출물 배포 시스템 기반 구축
3) 북극항로 주변 해빙변화 감시시스템 기반 구축

○해빙 원격탐사 자료처리 기술개발
: 해빙 감시를 위한 다중센서 원격탐사 자료처리 기술 개발
1) 해빙 특성을 고려한 원격탐사 자료 전처리 기술 개발
2) 아리랑 및 타 위성 자료 대응 해빙 원격탐사 자료처리 기술 개발
3) 다중 센서 융복합 자료처리 기술 개발

Ⅳ. 연구개발결과

○ 북극 빙권 변화 파악을 위한 위성 원격탐사 산출물 개발
○ 북극 빙권 변화 정량 분석을 통한 기후인자와의 상관관계 분석

KOPRI 극지연구소

Ⅴ. 연구개발결과의 기대성과

○ 북극항로 주변 해빙 감시시스템 원형 개발
○ 해빙 및 위성센서 특성에 최적화된 원격탐사 자료처리 기술 개발
○ 상호 연구협력양해각서 등을 통한 국제공동관측망 기반구축

Ⅵ. 연구개발결과의 활용방안

○ 북극 해빙 위성 종합 관측망 구축을 통한 북극항로 정보 제공
○ 체계화된 원격탐사 자료처리 및 서비스를 통한 해빙정보의 활용가치 증대
○ 위성기반 정보 기반 e-navigation 북극해 항로 첨단화 관련 산업발전에 기여
○ 빙권 위성정보의 국제공동 활용체계 구축을 통한 국가 위상 증대

S U M M A R Y

I. Title

○ Remote Sensing Research for Quantitative Analysis of Arctic Cryosphere Change

II. Purpose and Necessity of R&D

○ Establishment of an integrated satellite observation network to analyze the impacts of global trends on Arctic sea ice (2025)

- Development of a near‐real-time monitoring system for polar environmental change
- Development of processing and analysis technologies for polar remote sensing data
- Establishment of an international cooperative satellite observation network

○ Necessity

- Following Korea's advancement to Permanent Observer status in the Arctic Council (May 2013) and the establishment of the Basic Arctic Policy Plan (May 2014), demand for Arctic cryosphere information has rapidly increased across scientific, economic, and societal sectors, including climate change research and the development of Arctic shipping routes.
- Korea currently conducts Arctic sea ice studies mainly through in situ observations using the icebreaking research vessel Araon. However, such observations are physically limited in spatial coverage due to constraints such as navigation duration, allowing only partial regional monitoring.
- By establishing an international satellite data‐sharing framework and developing analysis and processing technologies utilizing Korea's KOMPSAT (Arirang) satellites, it is possible to overcome these limitations and secure comprehensive cryosphere information across the entire Arctic.
- In addition, agreements on cooperation for joint Arctic research and memoranda of understanding on research and operational support, concluded during the Korea‐Russia summit (September 2016), provide strong momentum for diverse studies, including climate warming analysis in the Arctic region.

III. Contents and Extent of R&D

○ Establishment of a Satellite Data Collection and Management System

: Development of a system for collecting and managing satellite data around Arctic shipping routes

1) Design of a satellite remote sensing data reception system
2) Establishment of a data reception and product distribution system for polar-region observations from KOMPSAT satellites
3) Development of a sea ice change monitoring system for areas surrounding Arctic shipping routes

○ Development of Sea Ice Remote Sensing Data Processing Technologies

: Development of multi-sensor remote sensing data processing technologies for sea ice monitoring

1) Development of preprocessing techniques considering sea ice characteristics
2) Development of sea ice data processing technologies applicable to KOMPSAT and other satellite data
3) Development of multi-sensor data fusion and convergence processing techniques

KOPRI 극지연구소

IV. R&D Results

○ Development of satellite remote sensing products for detecting and monitoring Arctic cryosphere changes

○ Quantitative analysis of Arctic cryosphere variability and assessment of its correlation with climate factors

V. Expected Outcomes of the Research and Development

○ Development of a prototype sea ice monitoring system for regions surrounding Arctic shipping routes

○ Development of remote sensing data processing technologies optimized for sea ice conditions and satellite sensor characteristics

○ Establishment of an international joint observation network through memoranda of understanding and cooperative research agreements

VI. Utilization Plan for the Research and Development Outcomes

○ Provision of Arctic shipping route information through the establishment of an integrated satellite-based sea ice observation network

○ Enhancement of the value and usability of sea ice information through standardized remote sensing data processing and services

○ Contribution to the advancement of industries related to satellite-based e-navigation and high-tech Arctic maritime routes

○ Enhancement of national prestige through the establishment of an international cooperative framework for the joint utilization of cryosphere satellite information

KOPRI
극지연구소

C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction ····· 10
Section 1. Purpose, Necessity and Extent of Research

Chapter 2. Current Research Status in Korea and Other Nations ····· 12
Section 1. Internal and Overseas Trends and Development Situations
Section 2. Domestic Trends and Development Policies

Chapter 3. Research Implementation Contents and Results ····· 18
Section 1. Research Objectives and Content
Section 2. Project Development Implementation System
Section 3. Research Contents and Results

Chapter 4. Degree of Research Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute ····· 236
Section 1. Achievement and Excellence of Research
Section 2. Significance of Research

Chapter 5. Application Plans of Research Results ····· 260

Chapter 6. Reference ····· 264

Appendix 1. Final Report of a Commissioned Research Project 1 ····· 271
Appendix 2. Final Report of a Commissioned Research Project 2 ····· 352
Appendix 3. Final Report of a Commissioned Research Project 3 ····· 380
Appendix 4. Evidence Material of Research Papers ····· 471

KOPRI 극지연구소

목 차

제 1 장 서론 ····· 10
제 1 절 연구 개발의 필요성

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 12
제 1 절 선진국 연구개발 현황 및 기술 수준
제 2 절 우리나라의 연구개발 현황 및 관련 정책 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 18
제 1 절 연구개발의 목표 및 내용
제 2 절 연구개발 추진체계
제 3 절 연구개발 내용 및 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 ····· 236
제 1 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성
제 2 절 연구개발 의의ㄴ

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 260

제 6 장 참고문헌 ····· 264

별첨 1. 위탁연구과제 최종보고서 1 ····· 271
별첨 2. 위탁연구과제 최종보고서 2 ····· 351
별첨 3. 위탁연구과제 최종보고서 3 ····· 380
별첨 4. 논문실적 증빙자료 ·····

KOPRI 극지연구소

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 개발의 필요성

○ 북극 이사회 영구 옵서버 진출('13.5), 북극정책 기본계획('14.5), 신(新) 북방정책 로드맵('17.9), 북극활동 진흥 기본계획('18.9), 2050 극지비전('18.12), 해양수산 기후변화 대응 R&D 강화 로드맵 (2021) 수립을 계기로 북극 빙권변화에 따른 환경변화 및 기후변화 연구, 북극항로 개척 등 과학·경제·사회적 분야의 중요성 강조. 온난화에 따른 환경변화 및 기후변화 연구, 북극항로 개척 등 과학·경제·사회적 분야의 중요성 강조.

○ 해양수산과학기술육성법('20,3) 제8조, 제28조의 2. 극지활동진흥법('21.10) 제8조 (연구개발 등의 지원) 2항의 극지관련 연구개발의 활성화 지원. 윤석열 정부 120대 국정과제('22.7) 국정목표 2의, 8번째 약속 해양영토 수호 및 지속가능한 해양관리, 2050 북극활동전략('21.11)의 4대 추진 전략 등과 관련하여 북극 해빙변화 정보는 지구온난화에 따른 기후변화 감시 및 북극항로 개척 활용을 위한 핵심 연구대상임.

○ 정부는 2050 북극 거버넌스 선도국가 도약 비전 제시와 함께 발표한('21.11) 4가지 전략 사항을 통해 성숙한 국내 정책 여건을 기반으로 중장기 북극 활동의 방향을 정립하기 위한 범부처 차원의 전략임을 강조하였으며, 기후 위기 대응 역량 강화를 위해 극지 데이터 댐 구축 및 기후/환경변화 예측 과학 연구 지원에 적극적으로 동참하여 북극 커뮤니티에 이바지하고자 하는 뜻을 표명

○ 21년 4월 극지활동진흥법 제정 및 제2차세대 쇄빙선의 건조 설립 계획의 확정은 북극 진출/개척 및 조밀한 과학검증자료획득의 여건을 제공할 목적을 가지므로, 이를 대비한 북극 빙권 정보 기반 광역 및 지역적 변화 관찰 연구 기술 개발력 구축이 필수적으로 요구됨

○ 제2차 위성정보 활용 종합계획(2019-2023) 발표('19,1)와 극지과학 미래발전전략 - 극지연구 선도국 도약을 위한 4대 추진전략 (2020)에 따른 국민생활 안전에

기여하는 위성정보 활용 서비스 확대와 위성개발 기술 고도화, 기후 환경변화 예측을 위한 환경인자 빅데이터 확보, 4차 산업혁명 시대의 위성정보서비스 산업 창출을 위한 국가적 전략 마련이 요구됨.

○ 인공지능 기반의 첨단 위성영상 분석 능력 확보 및 한국형 빅데이터 처리 기술개발 등 위성영상 분석 처리 능력 고도화 등은 정부의 전략적 기조임.

○ 지구온난화에 의한 미래 기후변화 예측을 위해 전 지구 에너지 평형 변화의 원인인 북극 빙권 변화에 관한 연구 필요성 증대.

○ 특히, 빈번하게 발생하고 있는 중위도권 이상기상 현상의 원인 분석 및 예측을 위해서는 북극 해양/해빙/빙권/동토의 시공간적 특성 변화에 관한 분석 연구가 중요 이슈화됨.

○ 북극권 해양 및 육상 얼음의 감소는 신 북극항로 개척과 미답지역 자원개발을 가능하게 하며, 이에 능동적인 대비를 위한 연구 활동 필요.

○ 쇄빙연구선 아라온/차세대쇄빙선 및 육상 활동을 통한 현장관측과 연계한 북극 규모 빙권변화 연구 필요

○ 북극권 인공위성 국제 공동관측망에 대한 능동적인 참여와 국내 아리랑위성의 활용을 통한 위성기반 북극 빙권변화 관측 기술력 확보 필요.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 선진국 연구개발 현황 및 기술 수준

○ International Arctic Science Committee (IASC)는 ICARP III의 Theme 1: Climate System and Transformations 내 모든 세부주제에서 북극 빙권변화 연구의 중요성을 강조, 특히 세부주제 Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAiC)에서는 인공위성-현장관측 융합 연구를 필수적으로 수행되어야 하는 연구로 선정

○ 북극 연안국들은 북극권 빙권 및 기후변화 연구에 중점적인 투자를 하고 있으며, 이를 통해 북극에 대한 기득권을 강화

○ 미국은 북극 국제협력을 주도하기 위해 전 지구 규모의 기후변화 연구에 투자를 확대하는 한편, 인공위성 관측을 통한 북극권 정밀지도 제작, 배포를 통해 국제사회에서의 영향력을 확대

○ 캐나다는 북극연구 네트워크(ArcticNet)를 구성하여 북극권 국가들과 국제공동연구 강화를 위한 협력을 주도하고 있으며, 특히 자국의 인공위성을 적극 활용하여 북극권 해빙-해양 환경변화 연구에 선도적 역할 수행

○ 독일은 주도적인 극지 연구 활동을 수행하기 위해 지속적으로 환경 및 지구과학 연구 투자를 확대하고, 극지 관측에 적합한 인공위성의 개발과 운용을 강화

○ 러시아는 북극해 연안 지역에 대한 영유권 강화를 위해 연구 투자 비중을 증대하고 있으며, 북극해 및 결빙 지역 탐사 연구를 확대함은 물론 북극해 정보를 총괄 수집, 보존할 수 있는 시스템을 개발하여 운영

○ 덴마크는 2016년 북극 지역의 연구와 교육 강화를 위해 새로운 북극 전략을 공표하였고, 특히 그린란드를 중심으로 지속 가능한 북극 개발 강화 전략을 통해 선도적 수준의 북극 연구 국가로 자리 잡음

○ 노르웨이는 극지연구소, 항공우주센터, 수자원 에너지부, 지질조사원이 협력하여 자국 전역의 동토 변화 및 융빙으로 인한 산사태를 인공위성 레이더 간섭기법을 이용하여 주기적으로 관측하는 InSAR Norway 시스템을 운영 중이며, 내륙 빙하량의 변동을 모니터링하고 있고, 북극권 동토 전체에 대한 분석 시스템으로 확장할 계획

제 2 절 우리나라의 연구개발 현황 및 관련 정책 현황

○ 북극정책 기본계획 수립

- 2013년 12월, 정부차원의 북극분야에 대한 정책기조를 담은 기본계획인 북극정책 기본계획 발표
- 북극이사회의 영구옵서버 진출을 계기로 2013년 7월 대외경제장관회의에서 의결한 북극 종합정책 추진계획의 후속조치로 마련함
- 해양수산부, 산업통상자원부, 국토교통부, 외교부 등 7개 부처/청과 한국해양과학기술원, 한국해양수산개발원 등 정부출연연구기관이 참여
- 북극정책 기본계획은 ① 국제협력 분야 8개 과제, ② 과학조사 및 연구 분야 11개 과제, ③ 북극권 비즈니스 분야 10개 과제 및 ④ 제도분야 2개 과제 총 31개 정책으로 2017년까지 시행하기로 하였음
- 북극정책 기본계획 수립을 실천함으로써 과학조사활동 및 원주민 공동체 지원 등과 같은 옵서버 국가로서의 책무 수행과 더불어 북극권 자원개발 시대에 대비할 필요성 제시

○ 해양수산 R&D 중장기계획 발표

- 2014년 4월, 국가과학기술심의위원회에서는 해양수산 R&D 중장기계획('14~'20)(안)을 발표
- 추진전략 1에서 해양영토주권 강화 및 해양/극지경제영토 확대를 강조하였으며 중점기술 1-1에서 해양과학조사 및 예보 역량 강화 필요성을 강조
- 현재 기술 수준은 극지해양, 해양관측 및 예보 분야 등의 기술 수준이 높지만, 해양수산 생명공학, 해양자원 분야 등은 기술경쟁력 미흡함을 언급하고 지속적인 극지해양 발전이 필요함을 강조

○ 신(新) 북방정책 발표 및 로드맵 수립

- 2017년 9월, 러시아 블라디보스토크에서 개최된 제3차 동방경제포럼 기조연설에서 러시아와 한국 사이에 9개의 다리(9-Bridges 전략), 즉 가스, 철도, 항만, 전력, 북극항로, 조선, 일자리, 농업, 수산 등 양국이 협력할 9개 분야를 제시하는 신(新)북방정책을 구체화
- 특히 남북 정상회담 이후 한반도 평화 분위기가 조성되면서 정부의 신북방정책 중 아시아에서 유럽까지 가는 데 걸리는 시간을 10일 단축할 수 있는 북극항로에 대한 관심 고조
- 해운업계에서는 유럽과의 교역 거리를 30% 이상 줄일 수 있어서 북극항로를 이용 가치가 높은 항로로 보고 있으며, 대통령도 러시아와의 경제협력을 언급하며 구체적인 협력 실행 방안을 논의함에 따라 북극 해빙 연구의 필요성 제시
- 북극항로의 개척과 북극권 자원개발 등 다양한 산업 분야에서 양국 간 협력 방안을 논의하는 계기 마련

○ 제3차 우주개발 진흥 기본계획 발표

- 2018년 2월, 우주개발의 체계적 진흥을 위한 제3차 우주개발 진흥 기본계획(2018~2022)이 관계부처 합동으로 발표
- 중점 추진전략 2에서 인공위성 활용 서비스 개발 및 고도화 강조, 특히 기후변화 대응 및 해양 환경 모니터링에 대한 위성 활용 필요성을 강조
- 또한, 위성정보의 활용 분야 확대 및 과학적 산업적 기회 창출 지원을 위해 다양한 위성정보 활용 사용자 그룹을 육성하고, 공공기관·대학 등의 위성정보 활용 학술·연구활동 지원 및 우주개발사업 참여 저변 확대 등을 통해 위성 활용·서비스 중심의 우주개발을 추진함

○ 북극활동 진흥 기본계획 수립

- 2018년 7월, 정부는 북극의 미래와 기회를 여는 극지 선도국가라는 비전을 설정하고, 해양수산부 및 관계부처 합동으로 향후 5년간 북극권에 대한 추진전략으로 북극활동 진흥 기본계획을 수립
- 북극권과 상생하는 경제협력 성과 창출, 책임 있는 옵서버로서 북극 파트너십 구축, 인류 공동과제 해결을 위한 연구활동 강화, 북극정책 추진을 위한 역량 강화의 4대

전략을 마련해 2022년까지 추진할 예정

- 인류 공동과제 해결을 위한 연구활동 강화의 실행을 위해 해상, 위성, 육상을 연계한 북극해 환경변화 통합관측 시스템을 구축하고, 국제협력사업 추진을 통해 북극 환경 관측 활동을 강화하기로 함
- 특히 인공위성-쇄빙연구선-관측기지를 연계한 북극권 환경 모니터링 강화가 북극활동 진흥 기본계획의 주요 실행 전략으로 채택

○ 2050 극지비전 선언

- 2018년 12월, 해양수산부는 향후 30년 우리나라 극지 정책방향을 담은 2050 극지비전을 세계최초로 선포
- 수립된 7대 추진전략은 5년 단위로 수립되는 남극연구활동진흥 기본계획과 북극활동진흥 기본계획 수립의 지침이자 정책 방향의 역할 수행
- 2018년 1월 세종과학기지 준공 30주년을 맞아 대통령이 밝힌 극지 개척 정신의 미래세대 계승 의지를 담아 향후 30년의 극지 정책방향을 도출함. 특히 향후 30년을 내다본 비전 및 청사진을 공식적으로 발표한 나라는 한국이 세계적으로 유일함

KOPRI 극지연구소

○ 2050 북극 활동 전략 수립

- 2021년 11월, 해양수산부에서 중장기 북극 활동 방향 정립 및 북극 활동 역량 강화를 위한 2050 북극 활동 전략을 수립하고 보고
- 북극 활동 전략은 ① 북극권 현안 해결 기여, ② 북극 외교 지평 확대, ③ 지속가능한 북극 발전 동참, 및 ④ 북극 활동 기반 마련의 4가지 추진전략을 수립
- 북극권 연구데이터 선도국가로의 도약을 강조함으로써 북극권 종합관측망, 데이터댐 구축 검토, 미답지 관측과 북극해 기후 연구 등 국제공동연구 주도
- 2033년까지 북극해 전체 기후변화에 대한 영향을 예측 및 분석하는 K-Arctic 2033 추진
- 북극발 기후·기상현상의 예측을 선진국 수준으로 제고하는 북극 해빙·기상·기후 통합예측 모델 개발 추진 검토

○ 제2차 위성정보 활용 종합계획 발표

- 2019년 1월, 위성정보의 보급 및 활용 촉진을 위한 제2차 위성정보 활용 종합계획

(2019~2023)이 관계부처 합동으로 발표

- 국민생활 안전에 기여하는 위성정보 활용 서비스 확대와 위성개발 기술 고도화, 4차 산업혁명 시대의 위성정보서비스 산업 창출을 위한 국가적 전략 마련을 목표로 함
- 국내외 협력체계를 마련해 위성을 공동으로 운영하고 국제기구에 적극적으로 참여해 전략적인 국제협력을 만들어 가기 위한 대책 마련 필요
- 인공지능 기반의 첨단 위성영상 분석 능ㄴ력 확보, 한국형 빅데이터 처리 기술개발 등 위성영상 분석 처리 능력 고도화 등이 추진 계획

○ 극지활동진흥법 제정 및 시행

- 2021년 4월 극지활동진흥법이 제정되어 동년 10월 시행됨
- 극지활동진흥법은 지구 온난화로 인한 극지 빙권의 감소에 따라 극지의 경제적 이용 및 개발 가능성에 대한 가능성과 극지 과학 연구, 보존과 지속 가능한 이용에 대한 전 세계적인 수요 증가 및 한반도 기후변화에 대응하고자 하는 극지 활동 육성/지원의 목적 설정
- 제정안은 5년 단위 극지활동 기본계획 전략 수립, 극지연구 및 지원 전문인력 양성 및 활용, 과학기지-쇄빙선 등 극지활동에 필요한 기반시설 설치 및 확보, 북극 경제활동 진흥을 위한 항로 개척, 극지활동 관련 정보 체계적 관리를 위한 통합정보시스템 구축 및 운용 등에 관한 사항을 포함
- 제정안의 관리 및 확대를 위해 남북극 기본계획과 극지과학 미래발전전략 등을 수립 및 추진

○ 차세대쇄빙선 예비 타당성 심사 통과

- 2021년 6월 차세대 쇄빙연구선 건조 사업에 대한 예비타당성 조사안이 심의 의결 발표
- 이에 따라 2027년부터 차세대 쇄빙연구선 본격 운항 목표로 개발 시작
- 기존 아라온호는 쇄빙선 한 대로 남북극 모두를 항해하였으며, 항해 경로에 따라 약 80일간의 극지 연구 활동만이 가능했으나, 차세대쇄빙선의 합류로 인해 남북극 항해에 대해 각각 업무 분담함으로써 약 3배 이상 기간의 극지 연구 활동 시간을 확보할 수 있을 것으로 예상
- 기조 아라온호의 2배 이상 큰 규모의 차세대쇄빙선 건조를 예상하며, 각종 연구 장

KOPRI 극지연구소

비를 탈부착하는 방식으로 설계하여 기후, 해양, 바이오, 지질, 자원, 대기, 우주 등 다양한 연구를 수행할 수 있도록 추진

○ 국내 원격탐사 관련 기관 기반 북극 빙권 연구 동향

- 극지연구소는 2008~2011년에 인공위성 관측을 통해 극지 기후 시스템 간 상호작용을 이해하고자 해양빙권-생물권-대기권 간의 기후 피드백을 분석 기초연구 수행
- 극지연구소는 2017~2019년, 북극 해빙 관측을 위한 인공위성 관측망을 구축하고 이와 함께 해빙에 관한 원격탐사 자료처리 기술개발을 수행하여 다가올 북극 시대에 선제적으로 대응하기 위한 발판을 마련
- 기상청 산하 국립기상연구소에서는 2011년 저해상도 마이크로파 위성기반 극지 해빙 감시 및 분석 시스템을 구축하여 북극의 해빙 변동을 관측한 바 있음
- 기존의 국내 선행연구에서는 북극권 구성 요소 (해양/해빙-육상/동토-대기) 중 해빙의 분포 및 표면특성에 대한 위성 관측/분석기술만이 일부 개발되었기 때문에 다양한 북극 빙권 요소의 변화량에 대한 원격탐사 분석기술 확보가 요구됨

KOPRI 극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구개발의 목표 및 내용

1. 최종 및 단계별 성과목표

가. 최종목표

○ 온난화에 의한 북극 빙권 변화 특성 이해 및 변화량 산정
- (1단계) 북극 빙권 변화 파악을 위한 위성 원격탐사 산출물 개발
- (2단계) 북극 빙권 변화 정량 분석을 통한 기후인자와의 상관관계 분석

나. 성과목표

(1) 1단계 성과목표(2020.01.01. ~ 2022.12.31)

○ 북극 빙권 구성요소 위성산출물 개발 (위성산출물 개발)
- 월별(monthly) 위성산출물 구축 4종 48건:
  해빙 이동 / 2 km 급 12건, 해빙 변형 / 2 km 급 12건
  해빙 강도 / 500 m 급 12건, 해빙 두께 / 25 km 급 12건
- 주별(weekly) 위성산출물 구축 2종:
  해빙 이동 / 2 km 급 52건, 해빙 유형 / 2 km 급 104건
- 연2회 위성 산출물 구축 1종 4건:
  해빙 강도 / 500 m 급 4건 (1, 2차년도 prototype)

○ 북극 빙권 현장조사 및 자료수집 달성도 (현장관측)
- 동토지역 고해상도 무인기 정밀영상 및 수치표면모델 / 1 m 급 1건, 10 cm 급 1건
- 해빙 특성 (두께, 굽힘강도, 이동벡터, 표면지형) 현장자료 2건

○ 표준화된 영향력 지수 (논문)
- mrnIF 90 이상 논문 1건
- mrnIF 80 이상 논문 4건
- mrnIF 40 이상 80 미만 논문 5건

KOPRI 극지연구소

(2) 2단계 성과목표(2023.01.01. ~ 2025.12.31)

○ 북극해 해빙 특성 시공간 변동성 분석
- 해빙 유형, 해빙 이동/변형, 해빙 두께, 해빙 강도 각각에 대한 다음 목록의 분석도
  계절성 변동 분석도, 4종, 총 4건, 장기 변동 추이 분석도, 4종, 총 4건
  변동 모드 분석도, 4종, 총 4건, 환경변수와의 상관성 분석도 4종, 총 4건
- 이종 산출물 간 상관성 분석도 1건

○ 북극해 해양 요소 시공간 변동성 분석
- 해양 요소 시공간 정보도, 2종 요소, 요소별 2건, 총 4건
- 해빙-수온 상호작용 모식도 1건
- 해빙-생태 영향 분석도 1건

○ 북극해 해빙-해양 변동과 기후변화와의 상관관계 분석
- 해빙-기후요소 상관관계 분석도 1건
- 해양-기후요소 상관관계 분석도 1건
- 해양-해빙 환경의 기후 연동성 모사 인공지능 모델 1건

○ 표준화된 영향력 지수 (논문)
- mrnIF 90 이상 논문 1건
- mrnIF 80 이상 논문 4건
- mrnIF 40 이상 80 미만 논문 5건

2. 상세 성과목표 및 내용

가. 정량적 성과목표 및 평가 기준

구분	년도	성과목표	지표	세계최고 수준주) (보유국/ 보유기관)	목표치	가중치 (%)	평가기준	설정근거
1단계 성과 목표	2020 ~ 2022	북극 빙권 구성요소 특성 변화 파악을 위한 원격탐사 산출물 개발	해빙 유형 지도	미국/ NIC	104	10%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 2km 공간해상도의 해빙 유형 분포도 위성산출물
			해빙 이동 지도	미국/ NSIDC	64 (월별12,주별52)	5%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 2km 공간해상도의 해빙 이동 벡터 위성산출물
			해빙 강도 지도	없음	16	5%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	북극해 전 지역에 대한 500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물
			해빙 두께 지도	미국/ NSIDC	12	5%	위성산출물 메타데이터기록 (KPDC 등록)	북극해 지역에 대한 25km 공간해상도의 해빙 두께지도 산출물
			해빙 변형 지도	미국/ NASA	12	5%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	북극해 지역에 대한 25km 공간해상도의 해빙 두께지도 산출물
		현장조사를 통한 북극 빙권 위성 관측 결과	해빙 코어	미국/ University of Alaska	6	10%	북극해 해빙 코어 개수 확인	해빙 코어 사진 및 얼음 특성 기록
			현장 관측을	없음	2	10%	북극 해빙에	영상 산출물 메타데이터

		검보정	위한 고해상 영상 산출물				대한 표면 특성 관측 목적 10 cm 공간해상도의 무인기 영상 산출물, 1 m 공간해상도의 위성 영상 산출물	기록
			무인기 영상 및 수치 표면 모델	없음	2	10%	동토 지역에 대한 10 cm 공간해상도의 영상 모자이크 및 수치 표면 모델 산출물	영상 산출물 메타데이터 기록
		관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	대학기관	5	게재 건수	설정근거조건을 충족하는 논문 게재	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
			mrnIF 80 이상 논문 수	대학기관	3	게재 건수		
			mrnIF 90 이상 논문 수	대학기관	1	게재 건수		
1차 년도	2020	북극 빙권 구성요소 위성 모니터링을 위한 기반기술 구축	해빙 유형 지도	미국/ NIC	52	20%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	다양한 유형의 해빙이 혼재하는 Fram Strait 지역에 대한 2km 공간해상도의 3종 (해수, 단년빙, 다년빙) 분포도 위성 산출물
			해빙 이동 지도	미국/ NSIDC	12	10%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	해빙의 이동이 빠르고 방향이 일정한 Fram Strait 지역에 대한 2km 공간해상도의 해빙 이동 벡터 위성산출물
			해빙 강도 지도	없음	2	10%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	북극해 현장조사 자료가 존재하는 지역에 대한 500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물
		과거 현장조사 및 고해상 위성자료 분석 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검정	현장 관측을 통한 공해상 영상 산출물	없음	1	10%	영상 산출물 메타데이터 기록	북극해 해빙에 대한 표면특성 관측 목적 10 cm 공간해상도의 영상 산출물
			위성 영상 및 수치표면모델	없음	1	10%	영상 산출물 메타데이터 기록	동토 지역에 대한 1m 공간해상도의 영상 및 수치표면모델 산출물
		관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	대학기관	3	40%	설정근거조건을 충족하는 논문 게재	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
2차 년도	2021	북극 빙권 구성요소 위성 모니터링 기술 고도화	해빙 유형 지도	미국/ NIC	52	8%	위성산출물 메타데이터기록 (KPDC 등록)	다양한 유형의 해빙이 혼재하는 Fram Strait 지역에 대한 2km 공간해상도의 5종 (해수, 단년빙, 다년빙) 분포도 위성 산출물
			해빙 이동 지도	미국/ NSIDC	52	8%	위성산출물 메타데이터기록 (KPDC 등록)	해빙의 이동이 빠르고 방향이 일정한 Fram Strait 지역에 대한 2km 공간해상도의 해빙 이동벡터 위성산출물
			해빙 강도	없음	2	7%	위성산출물	북극해 현장조사 자료가

KOPRI 극지연구소

			지도				메타데이터기록 (KPDC 등록)	존재하는 지역에 대한 500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물
			해빙 두께 지도	미국/ NSIDC	12	7%	위성산출물 메타데이터기록 (KPDC 등록)	북극해 지역에 대한 25km 공간해상도의 해빙 두께지도 산출물
		현장조사 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검정	해빙 코어	미국/ University of Alaska	3	10%	해빙 코어 사진 및 얼음 특성 (두께, 염도, 온도) 기록	북극해 해빙 코어
			현장 관측을 통한 공해상 영상 산출물	없음	1	10%	영상 산출물 메타데이터 기록	북극해 또는 연안 해빙에 대한 표면특성 관측 목적 10cm 공간해상도의 영상 산출물
			무인기 영상 및 수치표면모델	없음	1	10%	영상 산출물 메타데이터 기록	동토 지역에 대한 10cm 공간해상도의 영상 및 수치표면모델 산출물
		관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	대학기관	2	20%	설정근거조건을 충족하는 논문 게재	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
			mrnIF 80 이상 논문 수	대학기관	1	20%		
3차 년도	2022	북극 빙권 구성요소 특성변화 분석	해빙 변형 지도	미국/ NASA	12	20%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 2km 공간해상도의 변형률 위성산출물
			해빙 강도 지도	없음	12	10%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	북극해 전 지역에 대한 500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물
		현장조사 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검정	해빙 코어	미국/ University of Alaska	3	20%	해빙 코어 사진 및 얼음 특성 (두께, 염도, 온도) 기록	북극해 해빙 코어
		관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	대학기관	3년 누적 5	10%	설정근거조건을 충족하는 논문 게재	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
			mrnIF 80 이상 논문 수	대학기관	3년 누적 4	30%		
			mrnIF 90 이상 논문 수	대학기관	3년 누적 1	10%		
2단계 성과 목표	2023 ~2025	북극해 해빙 특성 산출물의 시공간 변동성 정량 분석	해빙 요소 시공간 변동성 분석도	미국/ NSIDC	12	6	KPDC 등록 메타데이터 건수	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 해빙 유형, 이동/변형, 두께, 강도의 계절성 변동 분석도, 장기 변동 추이 분석도, 변동 모드 분석도 각 1건씩을 생산
			이종 산출물간 상관성 분석도	없음	1	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙 유형-이동/변형-두께-강도 산출물간 변동 상관성 분석도 1건 생산
			환경변수와의 상관성 분석도	없음	4	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙 산출물의 해역별 변동 상관성 분석도 각 1건씩을 생산
		북극해 해양 특성 산출물의 시공간 변동성 정량 분석	해양 요소 시공간 변동성 분석도	미국/ NOAA	4	6	KPDC 등록 메타데이터 건수	북극해 결빙해역에 대한 20년 이상의 해양 수온, 클로로필의 장기적 변동의 시계열 분석 결과, 공간분포도 각 1건씩을 생산

KOPRI 극지연구소

			해빙-수온 상호 작용 모식도	미국/ NOAA	1	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙-수온 피드백 이해를 위한 상호작용 모식도
			해빙 변화의 해양생태계 영향 분석도	미국/ NASA	1	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	식물플랑크톤 생물량 및 대번성 시기 변화에 대한 분석도 1건 생산
		북극해 해빙-해양 변동과 기후변화와의 상관관계 분석	해빙-기후요소 상관관계 분석도	없음	1	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙 산출물과 기온, 강수/적설, 바람 등 기후요소 간의 상호영향력 분석도 1건 생산
			해양-기후요소 상관관계 분석도	없음	1	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	북극해 해양 수온 변동 메커니즘 분석 및 온난화에 의한 북극해 해양환경 변화 상관 분포도 1건 생산
			해양-해빙 환경의 기후연동성 모사 인공지능 모델	없음	1	6	KPDC 등록 메타데이터 건수	인공지능을 활용해 상기 연관성들을 모사하는 모델을 생성하고 그 모사결과를 기 분석될 수치적 상관성과 비교 분석하여 최적화 및 검증된 최종 모델 1건 생산
		산출물 검증	현장 시료 분석 보고서	없음	3	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다종센서 저고도(무인기 등) 원격탐사 영상 촬영, 해빙 표면 지형 스캔, 해빙 코어 취득, 트래커 설치를 수행하여 시료 분석 후 해빙/해수 특성 산출물의 검증 및 실측 정보를 각 항차마다 1건씩 제공
		관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	대학기관	3년 누적 5	15	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
			mrnIF 80 이상 90 미만 논문 수	대학기관	3년 누적 4	15	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
			mrnIF 90 이상 논문 수	대학기관	3년 누적 1	10	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
1차 년도	2023	북극해 결빙해역의 해빙 요소 시공간 장기 변화 연구	해빙 유형의 시공간 변동성 분석도	미국/ NIC	3	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 해빙 유형 계절성 변동 분석도, 장기 변동 추이 분석도, 변동 모드 분석도 각 1건씩을 생산
			해빙 이동/변형의 시공간 변동성 분석도	미국/ NSIDC	3	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 해빙 이동/변형 계절성 변동 분석도, 장기 변동 추이 분석도, 변동 모드 분석도 각 1건씩을 생산
			해빙 두께의	미국/	3	8	KPDC 등록	위도 60도 이상 북극해

KOPRI 극지연구소

			시공간 변동성 분석도	NSIDC			메타데이터 건수	전역에 대한 해빙 두께 계절성 변동 분석도, 장기 변동 추이 분석도, 변동 모드 분석도 각 1건씩을 생산
			해빙 강도의 시공간 변동성 분석도	없음	3	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 겨울철 평균 해빙 강도 변동 분석도, 10년 이상의 장기 변동 추이 분석도, 변동 모드 분석도 각 1건씩을 생산
		북극해 결빙해역의 해양 요소 시공간 장기 변화 연구	해양 수온의 시공간 변동성 분석도	미국/ NOAA	2	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	북극해 결빙해역에 대한 30년 이상의 장기적 변동의 시계열 분석 결과 및 공간분포도 각 1건씩을 생산
			해양 클로로필의 시공간 변동성 분석도	미국/ NASA	2	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	북극해 결빙해역에 대한 20년 이상의 장기적 변동의 시계열 분석 결과 및 공간분포도 각 1건씩을 생산
		산출물 검증	현장 시료 분석 보고서	없음	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다종센서 저고도(무인기 등) 원격탐사 영상 촬영, 해빙 표면 지형 스캔, 해빙 코어 취득, 트래커 설치를 수행하여 시료 분석 후 해빙/해수 특성 산출물의 검증 및 실측 정보 제공
		관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	대학기관	2	20	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
			mrnIF 80 이상 90 미만 논문 수	대학기관	1	20	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
2차 년도	2024	북극해 해빙 시공간 변동성의 해역/산출물 간 관계 분석	이종 산출물간 상관성 분석도	없음	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙 유형-이동/변형-두께-강도 산출물간 변동 상관성 분석도 1건 생산
			환경변수와의 상관성 분석도	없음	4	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙 산출물의 해역별 변동 상관성 분석도 각 1건씩을 생산
		북극해 해빙-해양 상호관계 규명	해빙-수온 상호작용 모식도	미국/ NOAA	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙-수온 피드백 이해를 위한 상호작용 모식도 1건 생산
			해빙 변화의 해양생태계 영향 분석도	미국/ NASA	1건	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	식물플랑크톤 생물량 및 대번성 시기 변화에 대한 분석도 1건 생산
		산출물 검증	현장 시료 분석 보고서	없음	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다종센서 저고도(무인기 등) 원격탐사 영상 촬영, 해빙 표면 지형 스캔, 해빙 코어 취득, 트래커 설치를

KOPRI 극지연구소

								수행하여 시료 분석 후 해빙/해수 특성 산출물의 검증 및 실측 정보 제공
		관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	대학기관	2	20	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
			mrnIF 80 이상 90 미만 논문 수	대학기관	2	20	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
3차 년도	2025	북극해 해빙-해양 변동과 기후변화와의 상관관계 분석	해빙-기후요소 상관관계 분석도	없음	1	16	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙 산출물과 기온, 강수/적설, 바람 등 기후요소 간의 상호 영향력 분석도 1건 생산
			해양-기후요소 상관관계 분석도	없음	1	16	KPDC 등록 메타데이터 건수	북극해 해양 수온 변동 메커니즘 분석 및 온난화에 의한 북극해 해양환경 변화 상관 분포도 1건 생산
			해양-해빙 환경의 기후 연동성 모사 인공지능 모델	없음	1	16	KPDC 등록 메타데이터 건수	인공지능을 활용해 상기 연관성들을 모사하는 모델을 생성하고 그 모사결과를 기 분석된 수치적 상관성과 비교 분석하여 최적화 및 검증된 최종 모델 1건 생성
		산출물 검증	현장 시료 분석 보고서	없음	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다종센서 저고도(무인기 등) 원격탐사 영상 촬영, 해빙 표면 지형 스캔, 해빙 코어 취득, 트래커 설치를 수행하여 시료 분석 후 해빙/해수 특성 산출물의 검증 및 실측 정보 제공
		관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	대학기관	3년 누적 5	15	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
			mrnIF 80 이상 90 미만 논문 수	대학기관	3년 누적 4	15	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
			mrnIF 90 이상 논문 수	대학기관	3년 누적 1	10	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출

KOPRI 극지연구소

나. 연차별 연구목표 및 내용

(단위 : 천원)

구분	년도	성과목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비)
1단계 1차년도	2020	북극 빙권 구성요소 위성 모니터링을 위한 기반기술 구축	빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성 자료 분석 기반기술 개발	✓ 능동/수동형 마이크로파 위성 관측 자료를 이용한 북극권 해빙 특성 인자 산출 기술 개발 및 원형 알고리즘 개발 ✓ 광학 원격탐사 기술 기반 해빙 표면 융빙호 특성화 ✓ 무인기기반 초분광/라이다 데이터 전처리 기술 개발	550,000
		과거 현장조사 및 고해상 위성자료 분석 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검정	인공위성 관측 결과 검보정을 위한 과거 북극 현장조사 및 고해상 위성영상 분석	✓ 북극 해수 광 특성 자료수집 ✓ 과거 북극 해빙 코어 자료 확보 ✓ 과거 북극 해빙 이동 위치추적 실측자료 확보 ✓ 동토지역 초분광/라이다 자료 구축	220,000
1단계 2차년도	2021	북극 빙권 구성요소 위성 모니터링 기술 고도화	빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성 자료 분석 기반기술 고도화 및 산출물 개발	✓ 능동/수동형 마이크로파 위성 관측 자료를 이용한 북극권 해빙 특성 인자 산출 알고리즘 고도화 및 산출물 개발 ✓ 다중 광학 원격탐사 센서 기반 해빙 표면 융빙호 분포 분석 ✓ 무인기기반 초분광/라이다 데이터 융합분석 기술 개발	550,000
		현장조사 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검정	인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 현장조사	✓ 북극 해수 광 특성 자료수집 ✓ 코로나19로 인한 북극해 해빙캠프 및 동토 출장 취소로 이하는 대체연구 수행 ✓ 북극 해빙 강도 기술 검증은 대체물 생산 및 분석으로 대체 ✓ 북극 해빙 이동 위치추적 검증은 기확보 MOSAiC 부이 자료 및 동시기 SAR 영상 분석으로 대체 ✓ 동토지역 초분광/라이다 자료 구축은 국내에서 통신 제약 조건으로 자료 획득 시험 및 자료획득~처리에 이르는 일련의 과정 정의로 대체	181,000
1단계 3차년도	2022	북극 빙권 구성요소 변화 특성 분석	북극 빙권 구성요소 특성의 시공간 변화 분석	✓ 기 개발물인 해빙 이동 산출물을 기반으로 신규 해빙 변형율 산출물 개발 ✓ 대표적 북극해 융빙호 분포 산출물 5종 수집 및 특성 비교분석 ✓ 무인기에 장착된 다중센서 시스템으로부터 동토지역 LiDAR, 초분광, RGB 영상 획득 및 지형변화 분석 ✓ 개선된 알고리즘 사용하여 고해상도 북극 해빙 굽힘강도 산출물 제작 및 시계열 분석	500,000
		현장조사 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검정	인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 현장조사	✓ 아라온호 하계 북극해 현장탐사를 통해 북극 해수 광 특성 계측, 해빙 코어 확보, 해빙 이동 위치추적 실측자료 확보 후 분석 ✓ 알래스카 카운실 동토지역 현장탐사를 통해 초분광/라이다 매핑 자료 구축 후 분석	176,000
2단계 1차년도	2023	북극해 결빙해역의 해빙 요소 시공간 장기 변화 연구	1단계 수행으로 기 개발된 해빙 특성 산출기술을 적용하여 장기 산출물을 생산하고 시공간적 변동 특성 분석을 수행	✓ 해빙 유형, 해빙 이동/변형, 해빙 두께, 해빙 강도에 대한 계절성 변동 분석, 장기 변동 추이, 변동 모드를 분석 수행	300,000
		북극해 결빙해역의 해양 요소 시공간 장기 변화 연구	해양 요소의 장기적 변동 추세 산출 및 비선형적 변동 파악	✓ 북극해 해양 요소에 대한 위성 기반 산출물 확보 ✓ 해양 요소 시계열 자료 구축 및 장기 변화 추세 정량화	200,000

KOPRI 극지연구소

				✓ 해양 요소 변화율에 대한 공간적 분포 특성 산정	
		산출물 검증	현장 시료 취득 및 분석과 위성자료와의 대조를 통해 산출물의 품질을 유지하고 해빙/해양 특성 추출 결과를 검증	✓ 아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다종센서 저고도(무인기 등) 원격탐사 영상 촬영, 해빙 표면 지형 스캔, 해빙 코어 취득, 트래커 설치를 수행 ✓ 시료 분석 후 해빙/해수 특성 산출물의 검증	129,500
2단계 2차년도	2024	북극해 해빙 시공간 변동성의 해역/산출물간 관계 분석	1차년도에서 분석된 각 해빙 특성의 시공간적 변동 특성 간의 이종 상관성 분석과 환경변수장과의 해역별 변동 연관성 분석	✓ 해빙 유형-이동/변형-두께-강도 산출물간 변동 상관성 분석 수행 ✓ 해빙 산출물의 해역별 변동 상관성 분석 수행	200,000
		북극해 해빙-해양 상호관계 규명	북극해 해양 요소와 해빙의 상호작용 이해에 근거한 북극해 환경변화 전망	✓ 해빙 요소와 해양 요소 간의 상관성 분석 및 역학관계 규명 ✓ 해빙 요소 변화와 연관된 해양 요소 시공간 변동 특성 분석	100,000
		산출물 검증	현장 시료 취득 및 분석과 위성자료와의 대조를 통해 산출물의 품질을 유지하고 해빙/해양 특성 추출 결과를 검증	✓ 아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다종센서 저고도(무인기 등) 원격탐사 영상 촬영, 해빙 표면 지형 스캔, 해빙 코어 취득, 트래커 설치를 수행 ✓ 시료 분석 후 해빙/해수 특성 산출물의 검증	126,000
2단계 3차년도	2025	북극해 해빙-해양 변동과 기후변화의 상관관계 분석	2차년도에서 분석된 상관성/연동성을 바탕으로 통합된 관계 모델을 생성하고 기후요소와의 상관관계를 정량화하여 분석	✓ 북극해 기후 변동을 대표할 수 있는 지수 확보 ✓ 기후 인자 지수와 북극해 해빙-해양 환경 변화와의 관련성을 정량적으로 분석 ✓ 북극해 해빙-해양 환경 변화에 대한 시간 규모별 원격 상관 역학 과정 규명 ✓ 인공지능을 활용해 상기 연관성을 모사하는 모델을 생성하고 그 모사결과를 기 분석된 수치적 상관성과 비교 분석하여 최적화 및 검증된 최종 모델 생성 수행	300,000
		산출물 검증	현장 시료 취득 및 분석과 위성자료와의 대조를 통해 산출물의 품질을 유지하고 해빙/해양 특성 추출 결과를 검증	✓ 아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다종센서 저고도(무인기 등) 원격탐사 영상 촬영, 해빙 표면 지형 스캔, 해빙 코어 취득, 트래커 설치를 수행 ✓ 시료 분석 후 해빙/해수 특성 산출물의 검증	126,000

다. 연차별 연구 상세내용

1단계 1차년도(2020년) 연구개발 내용 상세기술
[연구개발 내용] ○ 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 개발 — 북극권 해빙 • 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류를 위한 자료 구축 및 자료 산출을 위한 원형 알고리즘 개발 • 수동형 마이크로파 원격탐사/딥러닝 기반 북극 해빙 두께 산출을 위한 자료 구축 및 자료 산출을 위

한 원형 알고리즘 개발

- 다중편파 영상레이더 후방산란 및 편파 분석 자료와 북극 현장자료 사이의 상관 분석을 통한 북극 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개발
- 해빙 표면 융빙호 분포 광학 원격탐사 자료 구축 및 해빙 표면 융빙호 면적과 형태 특성화 기술개발

— 동토

- 동토의 지형 및 식생변화 모니터링을 위한 무인기기반 초분광/라이다 데이터 전처리 기술 개발

○ 인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 과거 현장조사 자료 분석

— 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보

— 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집

— 북극해 해빙 굽힘강도 산출 결과 검증을 위한 과거 해빙 코어 자료 분석과 해빙 두께 정보를 이용하여 간접적으로 해빙 강도 결과를 검증

— 위성 초분광/광학 자료와 기 구축된 무인기 자료를 이용한 처리 기법 개발 및 현장조사 지역 사전 조사

[연구개발 상세]

○ 영상레이더 관측 기반 북극해 해빙 이동 벡터 산출 기술 개발

— 기존 알고리즘을 개선하여 이동 벡터 추출, 모자이킹, 수동형 마이크로파 관측 결과와의 검교정, 현장관측 GPS 트래커를 이용한 결과 검증을 수행하고, 주기적인 산출물을 생성하는 기반기술을 개발

(기존 한계 : 해외 유수의 해빙 연구 기관에서 제공하는 이동 벡터는 25 km 급 저해상도로 이는 부빙 간 상대적 운동(발산, 수렴, 보존)에 의한 해빙의 변형상(리지, 리드)을 관측할 수 없고, 고해상 영상레이더 기반으로 북극해 전체의 해빙 이동 벡터를 제공하는 정기 산출물은 존재하지 않음)

○ 영상레이더 관측 기반 북극해 해빙 유형 분류 기술 개발

— 영상레이더 자료의 텍스쳐 분석을 기반으로 NIC 해빙 지도를 활용한 기계학습 알고리즘을 개발하고, 자동화된 처리과정을 통해 주기적인 산출물을 생성하는 기반기술을 개발

(기존 한계: 해빙의 유형은 생성 환경 및 나이에 따라 여러 가지로 분류되며 해외 유수의 해빙 연구 기관에서 제공하는 지도는 주 1회 갱신되어 해빙 가장자리 MIZ 영역에 대한 세부 정보가 부족하고 선박의 안전 운항 지원을 위해 해빙 경계 위치가 실제 위치보다 보수적으로 표기되어 있음)

○ 수동형 원격탐사 기반 북극해 유년빙 두께 산출 기술 개발

— 넓은 공간 관측 범위를 통해 짧은 재관측 주기를 가지는 수동마이크로파 위성 관측 자료를 이용하여 해빙의 물리적 특성의 변화에 따른 해빙의 방출률을 포함한 광학적 특성에 관한 이론 연구를 통해 해빙 두께 산출 기술을 개발하고 이와 관련한 다양한 물리 변수의 이해를 증진.

(기존 한계: 해빙의 두께 추정에 가장 많이 이용되는 인공위성 고도계는 프리보드 측정에 있어 얇은 유년빙에서는 상대적인 오차가 크고 환북극 매핑에 1달의 시간이 소요)

○ 딥러닝을 이용한 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발

— 인공지능 기법인 딥러닝을 이용하여 해빙두께와 수동마이크로파 데이터의 상관관계를 분석하여 초년생뿐 아니라 다년생 해빙두께를 산출할 수 있는 모델을 개발하는 기반기술을 개발

(기존 한계: 해빙의 시공간적 변화가 심한 북극에서 두꺼운 해빙에 대한 인공위성 고도계 기반 관측 주기인 1개월과 얇은 해빙에 대한 수동마이크로파 기반 관측 주기인 1일의 간극이 커서 종합적인 분석이 어려움)

○ SAR 위성을 활용한 북극 해빙 굽힘강도 산출 연구 (독자적 신기술)

— 북극 현장에서 다양한 시기와 넓은 영역에 대해 해빙 강도 추정을 위한 시료 확보가 어려우므로 인공위성 자료 중 해빙 표면 거칠기 및 염도에 민감하게 반응하는 C-밴드 SAR를 이용하여 다중편파 영상레이더의 다중편파비는 해빙 내 염분이나 공기방울에서 발생되는 다중산란의 세기를 추정하고 이를 해빙 내 산란체 비율을 대표할 수 있는 염수부피비 산출 알고리즘에 적용하여 해빙의 굽힘강도를 추정하는 기반기술을 개발

○ 광학 원격탐사 기술 기반 해빙 표면 융빙호 특성화 연구
— 융빙호의 분포 면적과 단년빙/다년빙 별 공간분포 정량화 및 영상 기반 깊이 추정을 위해 북극해 해빙 표면 융빙호 분포 지역에 대한 고해상도 원격탐사 자료 구축과 객체 기반 형태 특성화 기반기술을 개발
(기존 한계: 해빙 표면에 분포하는 융빙호 분포는 해빙 용융을 가속함으로써 해빙의 진화에 큰 영향을 미치나 주로 중-저해상도 광역 인공위성 데이터 기반의 분포 면적 연구가 일반적임).
○ 동토지역 분석자료 구축을 위한 관측 센서별 기하보정 기술 개발
— 초분광 및 LiDAR 센서들의 활용으로 확장하기 위해 센서모델을 정확하게 수립하고 이를 기반으로 한 기하보정 기반기술을 개발
(기존 한계 : 무인기 관측 대상지역의 특성을 정성적 및 정량적으로 분석하기 위해서는 관측 센서에서 얻은 자료의 정밀한 기하보정이 선제 되어야 함)
○ 동토 모니터링을 위한 다중센서자료 융합 기술 개발
— data-to-data와 data-to-reference 방식의 정렬 기술을 개발.
(기존 한계 : 동일지역을 촬영한 이종의 다중센서 자료들을 통합하여 사용하기 위해 공간적 불일치를 잘 정렬해야 함)
○ 동토층의 지형 및 식생 변화 모니터링
— 초분광센서는 연속된 파장대역에서 분광 이미지를 획득할 수 있어 식생의 풍부도를 나타내는 NDVI를 비롯하여 다양한 원격탐사 지수 개발이 가능하므로, 이를 이용하여 동토층의 환경변화에 대한 정량적 관측 및 비교를 수행.
○ 북극 빙권요소 위성 관측 검보정을 위한 현장조사 및 자료 수집, 분석
— 해색위성자료의 신뢰성 확보를 위해 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역 약 30개의 정점에서 해수 시료를 채취하고 HSAS를 이용한 해수 광 특성을 측정하여 생물-광 특성 자료수집 및 분석 수행.
(기존 한계: 해양의 생산성 평가를 위해 해색위성에서 제공하는 엽록소 농도 값의 정확도 개선이 필요하나, 현재 북극에 대한 해색 인공위성자료 검보정 연구는 열악할 정도로 제한 적임)
— 쇄빙연구선 아라온호를 활용한 과거 북극 해빙캠프에서 2019년도에 획득했던 얼음 코어 재분석.
○ 국제공동연구를 통한 연구 역량 강화 (역사상 최대 국제공동북국관측연구에 한국 유일 참여)
— 독일의 알프레드 베게너 연구소(AWI)를 위시한 총 20개국 수백 명의 국제공동연구원이 참가하는 사상 최대 규모의 북극해 관측 프로그램인 MOSAiC에 한국 대표로 참여하여 북극해 겨울철 현장관측 및 위성원격탐사 자료 획득을 바탕으로 북극해 대기-얼음-해양 프로세스에 대한 다학제 국제공동 연구 수
(기존 한계: 겨울과 봄철의 북극 중앙의 관측이 절대적으로 부족하며, 이 계절의 해빙 조건이 매우 위험하여 최고 사양의 쇄빙연구선조차 진입이 곤란하기 때문에 북극 기후의 프로세스에 대한 이해가 부족함).
— MOSAiC 참여를 통해 원격탐사 분과에서 수행한 현장관측 자료 우선적 확보.
(기존 한계: 주요 빙권 요소 중 하나인 해빙의 결빙-성장-융빙-소멸의 연속적인 프로세스에 대한 현장관측 없이는 원격탐사 기반의 분석 결과를 검증할 수 없음)

1단계 2차년도(2021년) 연구개발 내용 상세기술

[연구개발 내용]

○ 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 고도화 및 산출물 개발
— 북극권 해빙
- 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류 알고리즘의 고도화
- 수동형 마이크로파 원격탐사/딥러닝을 이용한 해빙 두께 산출 기술 고도화
- 다중편파 영상레이더 후방산란 및 편파 분석 자료와 북극 현장자료 사이의 상관 분석을 통한 북극 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 고도화
- 다중 광학 원격탐사 센서 자료 기반 해빙 표면 융빙호 분포 탐지 및 매핑

— 동토

• 동토의 지형 및 식생변화 모니터링을 위한 무인기기반 초분광/라이다 데이터 융합분석 기술 개발

○ 인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 현장조사

— 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보

— 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집

— 북극해 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개선 및 산출물 검증을 위한 해빙 코어 자료 확보 및 얼음 특성 자료수집

— 현장조사를 통한 동토지역 초분광/라이다 자료 구축

[연구개발 상세]

○ 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류 기술 개발

— 영상레이더 기반 극지연 고유 해빙 이동 관측 기술 개선, MOSAiC 미션의 고해상 영상레이더로의 확장 적용 및 평가.
(1차년도 대비 생산 기술의 고도화로 적용 가능 센서 확장 및 개선된 정밀도 검증),

— 영상레이더 기반 극지연 고유 해빙 유형 분류 자동화 기술 개선, 분류 유형의 확장 적용 및 평가 수행
(1차년도 대비: 생산 기술의 고도화로 기존 3종 분류에서 5종 분류로 확대하고 결과 검증)

○ 수동형 마이크로파 원격탐사 기반 북극해 유년빙 두께 산출 기술 개발

— 수동형 마이크로파 자료의 밝기 온도 특성 분석 및 두께 추정 알고리즘 개발
(1차년도 대비: 얇은 해빙에 제한적으로 산출되던 수동마이크로파 관측 자료를 북극해 전 지역으로 확장할 수 있는 가능성 제시)

○ 딥러닝을 이용한 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발

— 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발
(1차년도 대비: 고도계/수동마이크로파 융합 해빙두께 산출의 한계점 발견을 통한 향후 개선 방향 수립)

○ 영상레이더를 활용한 북극 해빙 굽힘강도 산출 연구 (독자적 신기술)

— 기확보된 해빙 코어 및 해빙 두께와 대기 온도 자료를 활용하여 제작된 대안 산출물을 이용하여 고해상도 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 고도화
(1차년도 대비: 알고리즘 고도화로 인해 굽힘강도 평균오차 감소)

○ 광학 원격탐사 기술 기반 해빙 표면 융빙호 특성화 연구

— 위성 비교 자료 구축 및 탐지 기술 개발
(1차년도 대비: 고도계 측선 관측값과 기계학습을 이용한 새로운 융빙호 탐지 기술 개발)

○ 동토 모니터링을 위한 다중센서자료 융합 기술 개발

— data-to-data와 data-to-reference 방식의 정렬 개발 기술을 개선
(1차년도 대비: 이종센서 자료 처리 기술 안정화)

○ 동토층의 지형 및 식생 변화 모니터링

— 코로나19로 인해 현장조사가 불가했던 상황을 타개하고자 극지환경을 재현할 수 있는 제약적 조건에서의 영상 촬영기술 시험 및 검증

○ 북극 빙권요소 위성 관측 검보정을 위한 현장조사 및 자료 수집, 분석

— 해색위성자료의 신뢰성 확보를 위해 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역 약 30개의 정점에서 해수 시료를 채취하고 HSAS를 이용한 해수 광 특성을 측정하여 생물-광 특성 자료수집 및 분석 수행.
(1차년도 대비: 128 정점의 증가된 해수샘플 생물-광 특성 분석)

— 산업체가 수행했던 북극해빙 코어 자료를 추가로 확보하여 재분석

○ 국제공동연구를 통한 연구 역량 강화

KOPRI 극지연구소

— MOSAiC 참여를 통해 확보한 자료의 국제 공동 분석 수행
(1차년도 대비: 해빙 이동의 추출 및 검증을 통한 국제공동논문 1편 출판)

1단계 3차년도(2022년) 연구개발 내용 상세기술

[연구개발 내용]

○ 북극 빙권 구성요소 변화 특성 분석
— 북극권 해빙
• 마이크로파 위성 기반 해빙 두께 및 부피의 시공간 변동성과 분포 특성 분석
• 해빙 이동 벡터로부터 해빙 변형률 추정 및 시공간 변동 분석
• 다중 광학 원격탐사 센서 기반 해빙 표면 융빙호 시공간 변동 분석
— 동토
• 시계열 초분광 및 수치표면모델 자료 융합을 통한 동토 특성 변화 연구
○ 인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 현장조사
— 북극 해수 광 특성 자료수집
— 북극 해빙 코어 자료 확보
— 북극 해빙 이동 위치추적 실측자료 확보
— 동토지역 초분광/라이다 자료 구축

[연구개발 상세]

○ 해빙 변형 산출물 개발 및 시공간 변동 분석
— 1~2차년도 기 개발물인 능동형 마이크로파 영상레이더 자료 기반의 해빙 이동 산출물을 기반으로 신규 변형 산출물 개발 완료. 현존 유일 타 기관 배포물인 CMEMS 자료와 비교하여 변형 탐지의 공간해상도 향상 확인. 해빙 유형 산출물을 결합하여 라그랑지안 입자 추적을 통한 해빙 이동/변형에 따른 유형 변화 분석 결과, 타 기관이 배포하는 기존 해빙 유형 산출물에서의 비현실적인 불연속적 유형 변화 파악.
(1,2차년도 연구와의 연속성: 기 개발 기술을 바탕으로 신규 활용 산출물의 개발 및 특성 분석)
○ 융빙호 시공간 변동 분석
— 전북극해 융빙호 매핑 자료 5종 분석. 산출물간 적용 기법, 시공간 분포 양상, 정확도에 대한 비교평가 완료. 부정확한 구름 필터링이 융빙호 비율에 있어 융빙기와 그 전후 시기에서 각각 과소추정과 과대추정을 야기. 자료 정확도와 장기 산출 연속성을 고려하여 변동성 파악을 위한 최적의 산출물 선정.
(1,2차년도 연구와의 연속성; 기 개발 기술의 시공간 적용 범위 확장 테스트)
○ 동토 변화 분석
— 무인기에 장착된 초분광-LiDAR-RGB 다중센서 시스템을 이용하여 알래스카 카운실 동토 지역의 지형, 분광자료 동시 획득. 눈 적설에 따른 동토의 지형변화 모의를 위해 설치된 스노우펜스 주변 지형을 2019년에 획득한 자료와 비교 수행
(1,2차년도 연구와의 연속성: 기 개발 기술의 실제 현장조사 적용 및 평가)
○ 북극 빙권요소 위성 관측 검보정을 위한 현장조사 및 자료 수집, 분석
— 해색위성자료의 신뢰성 확보를 위해 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역 약 61개의 정점 및 항해 경로상에서 해수 시료를 채취하고 TriOS를 이용한 해수 광 특성을 측정하여 생물-광 특성 자료수집 및 분석
— 쇄빙연구선 아라온호를 활용한 북극 해빙캠프에서 3개의 얼음 코어를 획득 및 분석
— 쇄빙연구선 아라온호를 활용한 북극 해빙캠프에 1개, 항해 경로상 MIZ 인근의 상대적으로 해빙 농도가 높은 부빙의 리지에 2개의 해빙 트래커를 설치 및 자유표류 경로 추적. 동시기 영상 자료 수집 완료 후 영상기반 해빙 이동 벡터와 비교/검증

— 알래스카 카운실 지역 무인기 LiDAR, 초분광, RGB 영상 및 식생 레이블을 위한 현장 사진 획득
(1,2차년도 코로나19로 인한 현장활동 제약에서 벗어나 당초 목표한 현장실험 수행)

○ 국제공동연구를 통한 연구 역량 강화

— MOSAiC 참여를 통해 확보한 자료의 국제 공동 분석 수행

— 극지연의 해빙 변형 산출물 개발을 바탕으로 MOSAiC 기간 동안의 표류 해빙 주변 변형의 프랙탈 특성 분석에 대한 국제공동연구
(1,2차년도 국제협력관계의 지속 및 연구적 확장)

2단계 1차년도(2023년) 연구개발 내용 상세기술

[연구개발 내용]

○ 북극해 결빙해역의 해빙 요소 시공간 장기 변화 연구

— 1단계 수행으로 기 개발된 해빙 특성 산출기술을 적용하여 장기 산출물 생산

• 해빙유형, 해빙이동/변형, 해빙두께, 해빙강도: 해상도 25km급, 기간 10년 이상 산출물 생산 (이종 산출물간의 고유 해상도 및 관측 기간 차이를 감안하여 공통 분석이 가능한 범위로 제한)

— 해빙 산출물의 북극해 전역 시공간적 변동 벌크 특성 분석

• 위도 60도 이상 북극해 해빙 산출물의 계절성 변동 분석
• 장기 산출물의 회귀 분석
• 시공간 변동 모드 추정

○ 북극해 결빙해역의 해양 요소 시공간 장기 변화 연구

— 북극해 해수 온도 및 표층 클로로필에 대한 위성 기반 산출물 확보

— 북극 현장 관측 자료 확보 및 위성 기반 광역적 산출물 검보정

— 해양 요소 장기 시계열 자료 구축과 계절별 변화 패턴 파악, 장기 변화 추세 정량화

— 해양 요소 변화율을 계산하여 공간적 분포 특성을 산정하고 전 지구적 변화율과 비교분석 수행

○ 인공위성 산출물 검증 및 정보제공을 위한 북극 현장조사 수행

— 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보

— 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집

— 북극해 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개선 및 산출물 검증을 위한 해빙 코어 자료 확보 및 얼음 특성 자료수집

— 북극해 해빙 표면 세부 공간정보자료구축 및 분석을 위한 다종센서 기반 저고도 및 지상 스캔 자료 획득

[연구개발 상세]

○ 1단계 수행으로 기 개발된 해빙 특성 산출기술을 적용하여 장기 산출물 생산

— (해빙 유형) 1단계에서 개발한 해빙 유형 산출 알고리즘을 Sentinel-1에 적용하여 산출물 생산함, NIC 및 OSI-SAF의 산출물과 비교분석 수행

— (해빙이동/변형) 1단계에서 개발한 해빙 이동 벡터 산출 알고리즘을 Sentinel-1에 적용하여 산출물 생산함, 이중편파(HH, HV) 및 교차편파(HV/HH)를 사용하여 벡터 수를 증가시킴

— (해빙두께) AMSR 위성의 10.7V와 6.9V 채널 간, 36.5V와 18.7V 채널 간의 정규화된 밝기온도 차이를 활용하여 다중선형회귀식에 적용하여 freeboard 두께 예측, Freeboard 값을 정역학평형 방정식에 대입하여 전체 해빙두께로 변환, 2012~2022년 기간동안 겨울철 (11~3월) 해빙 25km 공간해상도 장기 두께 산출물 생산

— (해빙강도) 해빙강도 산출을 위해 2022~2023년 기간 겨울철 해빙 두께와 2m 대기온도 추가 확보, 1단계에서 개발한 해빙강도 알고리즘에 적용하여 2022~2023년 추가 제작하여 25 km 공간해상도 장기 강

도 산출물 생산

○ 해빙 산출물의 북극해 전역 시공간적 변동 벌크 특성 분석

— (해빙 유형) 위도 60도 이상 북극해 해빙 산출물 대상으로 선형 계절성 변동 분석, 장기 산출물의 회귀 분석, 시공간 변동 모드 추정

— (해빙이동/변형) 위도 60도 이상 북극해 해빙 산출물 대상으로 선형 계절성 변동 분석, 장기 산출물의 회귀 분석, 시공간 변동 모드 추정

— (해빙두께) 2012~2022년 기간의 장기 산출물 자료 대상으로 선형 회귀법을 사용하여 월별 변동성 분포 분석, 10년간 월간 겨울철 북극 해빙 장기 변동 추이 분석, EOF 분석을 통한 모드 별 해빙 두께 변동 분석

— (해빙강도) 위도 60도 이상 북극해 해빙 산출물 대상으로 선형 계절성 변동 분석, 장기 산출물의 회귀 분석, 시공간 변동 모드 추정

○ 북극해 결빙해역의 해양 요소 시공간 장기 변화 연구

— (해양 요소의 장기적 변동 추세 산출 및 비선형적 변동 파악) 북극해 해수 온도 및 표층 클로로필에 대한 위성 기반 산출물 확보, 위성 기반 광역적 산출물 검보정을 위해 다음과 같은 Gaussian fitting을 통한 bloom phenological 특성 추출, 북극해 해수 온도 및 클로로필 시계열 자료 고유 주기 분석을 위해 앙상블 경험적 모드 분해법 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) 사용

○ 북극해 해빙-해양 상호관계 규명

— 북극해 해양 요소와 해빙의 상호작용 이해에 근거한 북극해 환경변화 전망, 해빙 요소와 해양 요소 간의 상관성 분석 및 역학관계를 규명, 해빙 요소 변화와 연관된 해양 요소의 시공간 변동 특성을 파악하고 향후 변화 전망

○ 인공위성 산출물 검증 및 정보제공을 위한 북극 현장조사

— (해빙 조사) 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집, 북극해 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개선 및 검증을 위한 해빙 코어 자료 확보 및 얼음 특성 자료수집, 북극해 해빙 표면 세부 공간정보자료구축 및 분석을 위한 다종센서 기반 저고도 및 지상 스캔 자료 획득

— (해수 조사) 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보, 광 특성 분석 항목: 클로로필-a, 부유 퇴적물, 고유 광특성, 유색 용존 유기물

○ 현장조사자료 기반 북극 빙권 위성자료 검정 및 표면 특성 정보 추출 분석

— (해수 정보 분석) 북극 해수 광 특성 자료수집 및 인공위성 관측 결과 검정

— (해빙 정보 분석) 북극 해빙 코어 자료 확보 및 인공위성 관측 결과 검정, 북극 해빙 이동 위치추적 실측자료 확보 및 인공위성 관측 결과 검정, 북극 해빙 표면 공간/분광 특성 현장실측자료 위성 연계 활용 가능성 평가

2단계 2차년도(2024년) 연구개발 내용 상세기술

[연구개발 내용]

○ 북극해 해빙 시공간 변동성의 해역/산출물간 관계 분석

— 해빙 특성 산출물간 관계 분석

- 해빙 유형, 이동, 변형, 두께, 강도 등 산출물간 시공간 변동성 분석
- 이종-다종 상관성 분석을 통한 산출물간 상호 피드백 관계 분석

— 해빙 특성 해역 간 관계 분석

- 각 해역 환경에 맞는 해빙 생성 기작 분석
- 해빙 산출물들의 해역 간 관계 분석을 통해 해역 환경에 따른 해빙 특성 영향성 분석

○ 북극해 해빙-해양 상호관계 분석

— 해빙 요소와 해양 요소 간의 상관성 분석 및 역학관계를 규명

— 해빙 요소 변화와 연관된 해양 요소의 시공간 변동 특성을 파악하고 향후 변화 전망

○ 인공위성 산출물 검증 및 정보제공을 위한 북극 현장조사 수행

— 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보

— 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집

— 북극해 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개선 및 산출물 검증을 위한 해빙 코어 자료 확보 및 얼음 특성 자료수집

— 북극해 해빙 표면 세부 공간정보자료구축 및 분석을 위한 다종센서 기반 저고도 및 지상 스캔 자료 획득

[연구개발 상세]

○ 해빙 특성의 시공간적 변동 특성들간의 이종 상관성 분석 및 환경변수장과의 해역별 변동 연관성 분석

— (해빙 특성 산출물간 관계 분석) 정확한 시계열 분석을 위해 계절성 제거 후 anomaly 또는 정규화를 통한 데이터 전처리, 산출물간 시공간 시계열 변동성 분석을 위해 correlation heatmap 제작, 이종-다종 상관성 분석을 통한 산출물간 상호 피드백 관계 분석을 위해 correlation heatmap 제작

— (해빙 산출물의 해역별 변동 상관성 분석) 북위 60도 이상 해역별 산출물 시계열 데이터 제작 후 계절성 제거 및 정규화를 통한 데이터 전처리, 각 해역 환경에 맞는 해빙 생성 기작 분석, 각 해역 별 해빙 산출물과 환경변수 간 correlation heatmap 제작 및 환경에 따른 해빙 특성 분석

— 북극해 세부 영역 별 해빙 특성 산출물간 관계 분석 결과 확보, 해빙 산출물의 해역별 변동 상관성 분석 결과 확보, 2차 산출물인 해빙 굽힘강도와 해빙-해양 1차 산출물간 관계 분석 결과 확보

○ 북극해 해양 요소와 해빙의 상호작용 이해에 근거한 북극해 환경변화 전망

— (해양과 해빙 간의 상호 작용 분석) 북극해 세부 영역 별 해빙 및 해양 요소의 월별 시계열 간의 상관계수 산출, 일차 상관성이 유효한 변수를 선택하여 다중 회귀 분석으로 아노말리 변화를 모사, 거시적 관점에서 클로로필의 변화를 살펴보고 특정 시기 및 지역에 대한 집중적인 분석을 수행

— 북극해 세부 영역 별 해빙-해양 요소 상관성 분석 결과 확보, 해빙 면적비를 통한 클로로필 연변화 과거 변화 모사 모델 결과 확보, 클로로필 변화와 연관한 해빙 면적비 변화의 기원 추정을 위한 일차적 근거 자료 확보

○ 현장 시료 취득 및 분석과 위성자료와의 대조를 통해 해빙/해양 특성 추출 결과를 검증

— (아라온호 북극해 하계 현장 조사) 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집, 북극해 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개선 및 검증을 위한 해빙 코어 자료 확보 및 얼음 특성 자료수집, 북극해 해빙 표면 세부 공간정보자료구축 및 분석을 위한 저고도 카메라 영상 자료 획득, 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보, 클로로필-a, 부유 퇴적물, 고유 광특성, 유색 용존 유기물 등 광 특성 분석

— 총 59개 연구정점 및 항해 경로상 위치에서 해수 샘플링 수행하여 검보정 자료 획득 및 분석, OpenMetBuoy 2기 설치하여 해빙 이동 및 해파 강도 자료 획득 및 분석, 해빙캠프에서 해빙코어 2개 자료 획득 및 분석, 고해상 항공영상 및 해빙 표면 레이저 스캐닝 자료 획득 및 분석

2단계 3차년도(2025년) 연구개발 내용 상세기술

[연구개발 내용]

○ 북극해 해빙-해양 변동의 기후변화에의 상관관계 분석

— 북극해 해빙/해양 환경 변화에 대한 온난화 상관관계 산정 및 상호 피드백에 대한 연구

- 북극해 환경변화를 대표할 수 있는 기후 인자 지수 확보 및 개발
- 기후 인자 지수와 북극해 해빙/해양 환경 변화와의 관련성 및 인과 관계를 다각도로 정량적으로 분석

• 북극해 해빙/해양 환경 변화에 대한 시간 규모별 원격 상관 역학 과정 규명

— 인공지능 모델 분석

• 해빙-해양 산출물과 다양한 기후변수의 시계열 특성 분석을 통한 입력자료 선정
• 해빙-해양 산출물 북극 온난화를 모사하는 다양한 종류의 인공지능 모델 생성 및 비교
• 인공지능 모델을 활용한 해양-해빙 변수별 북극 온난화에 미치는 영향력 분석
• 온난화에 미치는 기후변수의 상호영향력과 인공지능 모델을 결합한 온난화 예측 최종 모델 생성

○ 현장조사자료 기반 북극 빙권 위성자료 검정 및 표면 특성 정보 추출 분석 수행

— 북극 해수 광 특성 자료수집 및 인공위성 관측 결과 검정
— 북극 해빙 코어 자료 확보 및 인공위성 관측 결과 검정
— 북극 해빙 이동 위치추적 실측자료 확보 및 인공위성 관측 결과 검정
— 북극 해빙 표면 공간/분광 특성 현장실측자료 위성 연계 활용 가능성 평가

[연구개발 상세]

○ 북극해 해빙/해양 환경 변화에 대한 온난화 상관관계 산정 및 상호 피드백 분석

— 북극해 해빙-해양 환경 변화에 대한 온난화 상관성 산정 및 상호 피드백 분석을 위해 대표적인 온난화 지수로 북극권과 중위도권의 기온 차이를 이용한 북극 증폭 지수(AAI)를 선정, 시계열 분석을 통해 변화 양상의 대비가 뚜렷한 세 시기인 안정기(R1: 1984–1996), 증폭기(R2: 1996–2012), 둔화기(R3: 2012–2023)로 구분, 최근 북극 증폭의 약화는 대서양과 연계된 아지역, 특히 바렌츠-카라해(BKS) 중심으로 진행되고 있음을 확인

— 비선형적인 AAI 변화의 원인을 밝히기 위해 BKS 지역 R3 기간 대상으로 AAI 둔화 양상에 영향을 미치는 해양–해빙–기후변수들의 상호작용과 중요도를 집중 분석, 상관성 분석 결과를 바탕으로 변수 간 중복성 및 AAI와의 비상관성을 고려하여, 총 9개의 핵심 입력 인자 선택: 혼합층 깊이, 해양 열 함유량, 해빙 농도, 동서 바람, 남북 바람, 해면기압, 300 hPa 지오포텐셜 고도, 대서양 다년변동(AMO), 북대서양 진동(NAO)

— 회귀를 기반으로 하는 머신러닝 모델 개발, 훈련을 통해 AAI를 모사함. R3에서 상층 기압과 남북 바람의 기여도가 상대적으로 증가해, 대기 역학의 중요성이 강화됨. R2와 R3 기간의 해빙 변화는 동일한 원인이 아닌, 서로 다른 기작 또는 환경 조건에 의해 발생했을 가능성을 시사. SHAP 분석을 통해 R2-R3 기간의 변수 간 상호작용에 대한 분석과 해석적 가정 수립

— 당해연도 4월까지의 초기 분석 결과를 종합하여, 기존 문헌들의 주장대로 북극 증폭은 주로 해빙 손실과 해양 열저장 강화에 의해 촉진됨. 다만, 2012년 이후로 해빙 손실이 지속되었음에도 불구하고 증폭은 둔화되며, 단순 선형 메커니즘 외의 요인(예: 대기 역학적 조절, 내부 변동성 등)이 개입했음을 시사. 이는 비선형적 전환점의 가능성, 또는 북극 시스템이 새로운 기후 조절 체계로 전이 중일 수도 있음을 암시

— 남은 연구기간 동안 다양한 인공지능 모델을 적용하여 변수 중요도 분석의 일관성과 신뢰성을 검증하고, 인과 기반 가설의 검증에 초점을 맞춘 연구를 지속할 계획

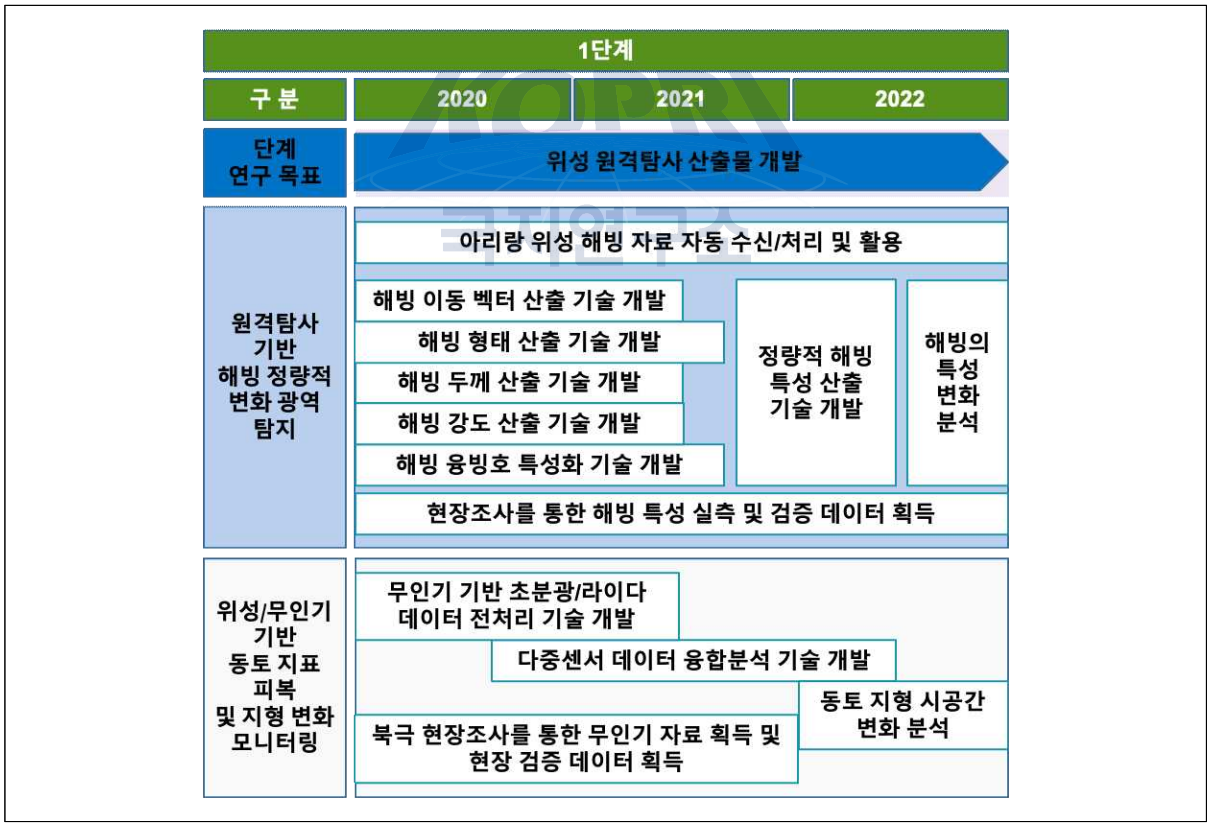
KOPRI 극지연구소

3. 연차별 연구개발 로드맵

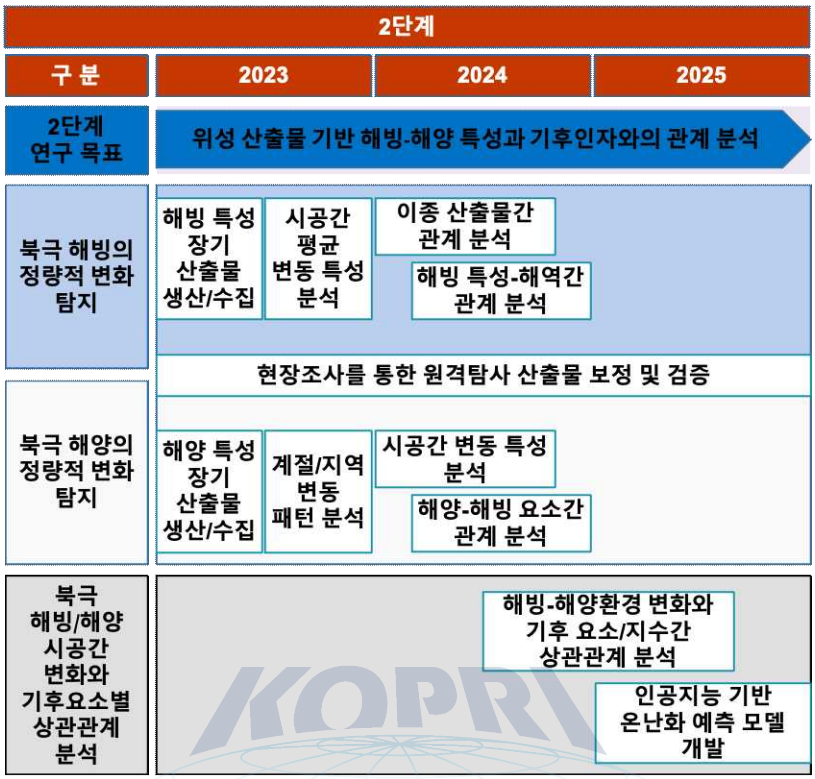
가. 총 연구기간 로드맵



나. 1단계 로드맵



다. 2단계 로드맵



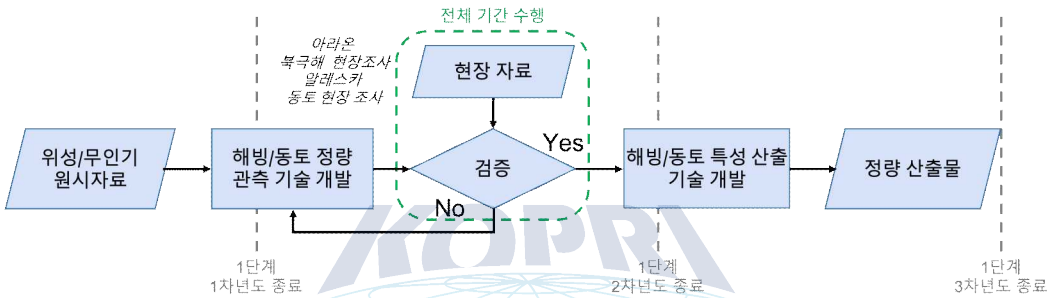
KOPRI
극지연구소

제 2 절 연구개발 추진체계

1. 1단계 (2020~2022) 연구개발 추진 체계



2. 1단계 (2020~2022) 연구개발 수행 흐름

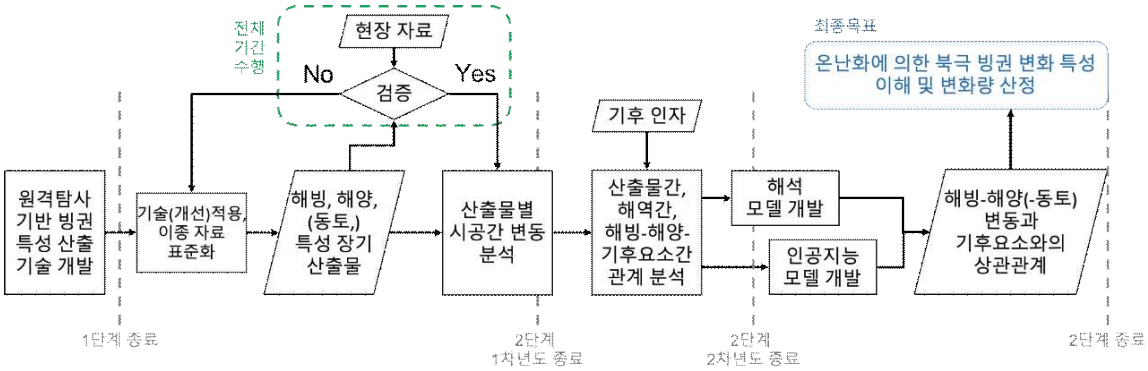


KOPRI 극지연구소

3. 2단계 (2023~2025) 연구개발 추진 체계



4. 2단계 (2023~2025) 연구개발 수행 흐름



KOPRI
극지연구소

제 3 절 연구개발 내용 및 결과

1. 연구내용

가. 2020년 1차년도 연구 요약

(1) 세부연구목표 1-1. 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 개발

□ 연구내용 1-1-1. 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류를 위한 자료 구축 및 자료 산출을 위한 원형 알고리즘 개발

○ 영상레이더 관측 기반 북극해 해빙 이동 벡터 산출 기술 개발

- 현재 영상레이더 기반으로 북극해 전체의 해빙 이동 벡터를 제공하는 정기 산출물은 존재하지 않으며, 이 연구에서는 이동 벡터 추출 기술 개발, 현장관측 GPS 트래커를 이용한 결과 검증 수행.
- Korosov and Rampal (2017)의 알고리즘을 다음과 같이 개조 활용: i) 마이크로파 입사각에 대한 해빙 후방 산란 강도의 의존성을 보정, ii) GPS 좌표 기반 데이터셋 선필터링, iii) 이동 벡터 추출 실패 격자 공간에 대한 kriging 보간.
- 2019년 Sentinel-1 영상 총 32개 페어를 분석한 결과에서 상대적 오차는 RMSE를 기준으로 X 방향으로는 132,9 m, Y 방향으로는 190.2 m, 속도 성분 U, V로는 0.051 cm/s, 0.073 cm/s 였음. 이는 북극해 해빙의 평균 이동 속도인 4~10 cm/s에 비해 훨씬 낮은 값으로, 영상레이더를 이용한 해빙 이동 정보 추출은 매우 높은 정확도를 가지는 것으로 판단.

○ 영상레이더 관측 기반 북극해 해빙 유형 분류 기술 개발

- 영상레이더는 수십 미터급 해상도로 북극해 전역을 수 일 주기로 관측할 수 있으나, 영상레이더 기반의 해빙 유형 구분은 기초 연구 단계에 머무르고 있어 산출물이 존재하지 않으며, 이 연구에서는 영상레이더 자료의 텍스쳐 분석을 기반으로 NIC 해빙 지도를 활용한 기계학습 알고리즘을 개발 및 검증 수행.
- 미국 빙 정보 센터 (National Ice Center, NIC)의 주간 해빙 유형 지도를 이용한 자동훈련 알고리즘 개발. i)영상 잡음 제거, ii) 후방산란강도의 입사각 의존성 제거, iii)기존 해빙지도의 세분류를 중분류로 통합의 세 전처리 과정 수행, 이후 Sentinel-1A/1B의 후방산란강도 영상과 가공한 NIC 해빙 유형 지도를 중첩하여 해수/해빙 경계선의 일치도가 높은 영상만을 선별하여 기계학습 방법

으로 훈련.

- 겨울철 분류에의 3종 분류 결과는 open water, mixed first-year ice, old ice에 대해 각각 91.4%, 75.0%, 93.3%. 여름철 분류에서의 3종 분류 결과는 open water, mixed first-year ice, old ice에 대해 각각 90.6%, 55.6%, 87.5%. 오분류는 주로 단년빙과 다년빙 사이에서 발생하므로, 여름철 분류는 현실적으로 해빙 유형 분류보다는 해수/해빙 분류에 가까운 성능을 보이는 것으로 판단.

□ 연구내용 1-1-2. 수동형 마이크로파 원격탐사 기반 북극 해빙 두께 산출을 위한 자료 구축 및 자료 산출을 위한 원형 알고리즘 개발

○ 수동형 마이크로파 위성 저주파 밴드에서의 해빙 방출율 특성 연구

- 수동형 마이크로파 위성 밝기온도는 지표 방출율에 강하게 영향받고, 지표 방출율의 지표를 구성하는 매질의 물리 특성의 함수임. 이 연구에서는 해빙의 물리 특성을 표현하는 인자 파라미터로 활용한 방출율 모형을 수립하고, 관측된 방출율과 비교함으로써 해빙 두께를 비롯한 다양한 물리 인자의 산출 가능성을 실험.
- 관측 자료에서 추정된 6.9GHz 밴드 해수의 방출율은 일 년 동안 큰 변동 없이 일정하게 유지. 정규화된 선형 편파 방출율비를 의미하는 PR (Polarization Ratio)과 선형 편파 반사도비를 의미하는 RR (Reflectance Ratio)을 도입. 관측 자료에서 추정한 방출율은 시간에 따라 변화하는데 특히 용융 시기와 결빙 시기에 방출율 특성의 변화가 두드러짐.
- 이론 기반 방출율은 입력 자료로 사용된 물리 변수에 따라 민감하게 변하며 물리 변수에 따른 방출율 변화를 관측 자료에서 추정한 방출율과 비교한 결과, 여름출 북극 해빙의 방출율 모형은 높은 수분 함량 (6~12 %)과 높은 표면 온도 (-2~-0.9 ℃)를 가진 눈의 방출율 모형과 잘 어울리는 반면, 겨울출 해빙의 방출율 모형은 낮은 수분 함량 (약 3%) 의 눈 및 새롭게 만들어진 (얇고 고염분 함량) 해빙에 의한 방출율 모형과 잘 어울림.

□ 연구내용 1-1-3. 딥러닝을 이용한 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발

○ 해빙두께 산출을 위한 앙상블 합성곱 신경망 (CNN) 개발 및 수동마이크로파 자료에의 적용 시험

- 이 연구에서는 수동마이크로파자료의 밝기온도값과 CryoSat-2에서 산출된 해

빙두께와의 물리적으로 설명이 힘든 알려지지 않은 숨겨진 상관 관계를 딥러닝 기법을 이용해 모델화하여, 수동마이크로파 기반의 북극전체에 대한 일간 해빙두께 맵핑 수행.

- 6가지의 “곱” 연산을 통해 feature augmentation을 시도하여, 14개의 AMSR2 채널을 357개로 확장하고, feature 길이가 길어짐으로 인한 1D-CNN의 성능저하방지와 효율적 계산을 위해 각 augmentation 그룹들별로 모델 학습을 시작하여 그 결과들을 합치는 앙상블 방식을 제안.
- 모델간 입력 feature들의 개수간 검증자료의 평균 절대 오차값을 학습률에 따라 비교 한 결과 이 연구에서 제안된 앙상블 기반 모델과 357개의 확장 feature를 사용했을 경우 가장 낮은 오차를 보임
- 테스트 자료에 대해 CryoSat-2에서 산출된 해빙두께와 이 연구에서 제안한 AMSR2에서 산출된 해빙두께 자료를 비교한 산포도는 매우 높은 상관 관계를 보임.
- AMSR2에서 산출된 일간 해빙두께 지도와 같은 기간 CS2SMOS 주간 해빙두께 지도로 일간, 주간 자료의 차이를 고려했을 경우 매우 높은 시각적 유사성을 보임.

□ 연구내용 1-1-4. 다중편파 영상레이더 후방산란 및 편파분석 자료와 북극 현장자료 사이의 상관 분석을 통한 북극 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개발

○ 영상레이더 후방산란계수와 북극 현장조사에서 확보된 자료 간 상관분석을 통한 굽힘강도 산출식 개발

- 이 연구에서는 brine volume과 해빙 굽힘강도간의 알려진 경험식 관계를 이용하여 영상레이더의 다중편파비로부터 간접적으로 이를 추정하는 방법을 개발.
- 입사각효과를 보정한 Sentinel-1 후방산란계수와 2017년부터 2018년까지 북극 현장조사에서 확보된 해빙 코어 자료 간 상관 분석 진행. 해빙 코어는 10cm 깊이에 따라 염분(salinity)과 온도 자료이며 이를 활용하여 brine volume을 계산 가능.
- Sentinel-1 C-밴드 SAR 신호는 해빙 내 염분(brine)이나 공기방울(air bubble)에서 발생되는 다중산란(volume scattering)에 민감하며 다중편파비(depolarization ratio, HV/HH)로 다중산란의 세기를 분석.

- 현장조사 위치에 해당하는 다중편파비를 위성 영상에서 추출하였으며 앞서 계산한 brine volume의 root 값과 로그회기모델분석을 수행하였으며 그 결과 굽힘강도 산출식(경험모델)을 개발.

□ 연구내용 1-1-5. 해빙 표면 융빙호 분포 광학 원격탐사 자료 구축 및 해빙 표면 융빙호 면적과 형태 특성화 기술개발

○ 고해상도 북극해 해빙영상 현장 획득, 모자이크 영상 제작 및 융빙호 분류

- 이 연구에서는 북극해 해빙 표면의 융빙호 현장 관측 영상을 획득, 처리하여 융빙호의 특성을 분류하는 일련의 과정 및 기술을 개발.
- 총 1,194장의 헬리콥터 및 무인기 영상을 영상 모자이크 제작에 활용. 아라온호 GNSS 기반 이동 기록으로부터 해빙의 흐름 정보를 확보하고, Hyun et al. (2019)에서 제안된 방법에 따라 모자이크 제작에 사용된 첫 영상의 획득 시점을 기준으로 각각의 영상에서 해빙 흐름에 의한 위치 이동 정도를 보정. Structure-from-Motion (SfM) 기법을 이용하여 위치 보정된 영상 모자이크 제작 결과, 약 4%의 위치오차 감소 확인.
- 객체 형태 특성과 관련된 면적과 compactness등의 특성을 산출 후, 기계학습을 적용하여 해양(open sea), 눈/얼음으로 구성된 해빙(snow/ice), 해빙 음영지역(shadow), 물에 잠긴 해빙(submerged ice)의 4개 클래스로 분류 수행. 또한 분류 결과에 대해 인접분석(neighbor analysis)을 통하여 해빙 가장자리에서 해양에 잠긴 해빙을 융빙호가 아닌 해양 클래스로 재할당. 클래스별로 생산된 검증자료를 이용하여 4개 클래스에 대해 분류 정확도를 평가한 결과 전체 분류 정확도(overall accuracy)는 약 93%로 평가.

□ 연구내용 1-1-6. 동토의 지형 및 식생변화 모니터링을 위한 무인기기반 초분광/라이다 데이터 전처리 기술 개발

○ 초분광/라이다 통합센서자료의 정밀 정사기하보정 기술 연구

- 무인기 탑재 초분광센서의 활용을 위해 정밀 정사기하보정 방법 개발이 필요하며, 이 연구에서는 탐색높이범위 결정단계와 3단계의 ray tracing으로 구성된 새로운 방법 개발.
- 제안방법의 성능검증에 촬영고도를 달리하여 취득한 8개의 초분광 스트립 자료들과 LiDAR 포인트 클라우드로 제작한 DSM 사용. 현장에서 정밀 GPS 측정을 통해 취득한 지상기준점 10점에 대해 기하보정의 위치 정확도를 측정한

결과, RMSE 오차는 X, Y축 방향으로 각각 3.4cm, 9.4cm.

- 제약조건 및 ray tracing 방법별 처리 결과로부터 제안방법은 정확도와 더불어 처리속도 측면 모두에서 높은 성능 확보 가능.

(2) 세부연구목표 1-2. 과거 현장조사 및 고해상 위성자료 분석 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검정

□ 연구내용 1-2-1. 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보

○ 해색위성자료 신뢰성 확보를 위한 해수 시표 생물-광 특성 자료수집 및 분석

- 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역에서 현장관측 수행
- Underway 70정점의 해수샘플 생물-광 특성 분석
- 분석항목 : Chlorophyll-a, Suspended Sediments, Inherent Optical Properties (Ap, Ad, Colored Dissolved Organic Matter)

□ 연구내용 1-2-2. 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집

○ 과거 해빙 트래커(sea ice tracker) 자료 분석

- 새로운 알고리즘의 결과 검증을 위해서 해빙 트래커 자료의 확보는 필수적이나 2020년도에 계획되어 있던 현장 조사가 모두 취소되어 부득이하게 2019년에 수행한 과거 해빙 트래커 자료에 대한 확보 및 분석으로 변경.
- 북극해 해빙 이동 벡터와의 비교를 목적으로 해빙 이동 경로를 추적할 수 있도록 2019년 8월 북극해 현장조사 기간 동안 이리듐(Iridium) 위성 통신망을 이용한 위치정보 전송 기능을 탑재한 2기(Rover01과 Rover02)의 해빙 트래커를 설치,
- 해빙 트래커로부터 지속적으로 수신되는 이동 정보를 도시함으로써 이동 궤적을 파악할 수 있고, 시간 인터폴레이션 처리를 통해 해빙 이동 벡터 산출 결과에 대한 검증 가능.

□ 연구내용 1-2-3. 북극해 해빙 굽힘강도 산출 결과 검증을 위한 과거 해빙 코어 자료 분석과 해빙 두께 정보를 이용하여 간접적으로 해빙 강도 결과를 검증

KOPRI 극지연구소

○ 과거 해빙 코어 자료 분석

- 새로운 알고리즘의 결과 검증을 위해서 해빙 코어 자료의 확보는 필수적이나 2020년도에 계획되어 있던 현장 조사가 모두 취소되어 부득이하게 2019년에 확보되었던 과거 해빙 코어 자료 5개를 분석하고 해빙 두께를 이용하여 간접적 결과 검증으로 기존 계획에서 변경.
- 확보된 자료들의 평균 두께는 81.5~144.5cm, 평균 염도 (bulk salinity)는 0.538~1.1440ppt, 온도는 1.06~-1.64°C, 눈 두께는 6.0~8.3cm. 모든 코어에서 해빙 깊이에 따라 직선으로 감소하는 경향성이 있으며 가장 두꺼운 해빙 코어 1개를 뺀 나머지 해빙 코어는 아랫면 온도가 녹는점 -1.8°C 보다 높음 (코어 하단 평균 온도 = -1.68±0.20°C).
- 표면 염분은 약 0 ppt에서 깊이에 따라 증가하는 경향성 보임. Brine drainage와 높은 기온 (표면온도) 때문에 표면에서 염분이 가라앉은 것으로 보임. 여름철에 확보된 해빙 코어들의 표면 특성만을 활용하여 해빙의 일반적인 경향성을 유추하기에는 어려운 상황.

○ 해빙 두께 정보를 이용한 간접적 결과 검증

- Frankenstein and Garner (1967) 연구 결과를 활용하여 해빙 두께와 해빙 온도를 이용하여 brine volume을 추정 후 Timco and O'Brien (1994)의 경험식에 대입하여 해빙 강도 추정.
- 8월과 10월의 시간 차이로 인하여 보퍼트해 지역의 해빙 면적의 차이가 크며 해상도 차이 (100~500m vs. 25 km)로 인하여 직접적인 비교가 불가능하나 전반적인 경향성은 유사한 것을 확인.

□ 연구내용 1-2-4. 위성 초분광/광학 자료와 기 구축된 무인기 자료를 이용한 처리 기법 개발 및 현장조사 지역 사전 조사

○ 동토층 지형 및 식생 변화 모니터링을 위한 원격탐사 자료 수집

- 다년간 동토층 변화 탐지를 위한 연구 사이트 결정 결과, 알라스카 카운실 지역의 경우 극지연구소의 대표적 동토 모니터링 사이트로 상시 관측 자료등이 공동 활용 가능.
- 구름이 없는 기 구축된 여름철 위성 및 무인기 영상을 수집, 방사보정, 기하보정 등 기본 전처리 작업 수행, 알라스카 카운실 지역의 50cm급 Pleiades 스트레오 위성영상, 7cm급 무인기 초분광영상, 30m급 위성 초분광영상 확보.

○ 열카르스트 분포 지역 고해상도 광학 원격탐사 시계열 데이터셋 구축

KOPRI 극지연구소

- 열카르스트 지형의 정밀 탐지와 진화 과정 모니터링을 위해 알래스카 배로우(Barrow) 인근 열카르스트 분포 지역의 1 m 해상도의 고해상도 자료를 확보, 이 중 구름이나 노이즈에 의해 품질이 저하된 영상을 제외한 후 총 10년 기간 동안 51건의 시계열 데이터셋을 구축함.
- 구축된 시계열 데이터셋을 기반으로 열카르스트 지형 중 열카르스트 호수(thermokarst lake)를 분석 대상으로 택하여 오브젝트 기반 분류와 시계열 팽창, 축소, 생성 및 소멸에 대한 변화 탐지 수행이 가능하며, 열카르스트 지형 종류와 지역 확장을 위한 기반을 마련함.

나. 2021년 2차년도 연구 요약

(3) 세부연구목표 2-1. 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 고도화

□ 연구내용 2-1-1. 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류 알고리즘의 고도화

○ 해빙 이동 벡터 추출

- 해빙 이동 벡터는 수동형 마이크로파 위성 자료를 통해 25km 해상도로 생산되고 있으나, 이는 부빙간 상대적 운동(발산, 수렴, 보존)에 의한 해빙의 변형상(pressure ridge, lead)을 관측할 수 없음. 이 연구에서는 기존 C-밴드 영상레이더 외에 고해상 X-밴드 영상레이더로부터 이동 벡터 추출, 모자이킹, MOSAiC 미션에 사용된 현장관측 GPS 트래커를 이용한 결과 검증 수행.
- K5 1기 단독 활용, CSK 4기 단독 활용, K5와 CSK의 혼합 활용의 각각의 경우에 대해 해빙 이동 벡터를 추출하고 부이 자료와 비교하여 그 정확도를 평가함. MCC 0.3 이상에서 이동 속도와 방향의 편차는 K5 1기 단독 활용 실험에서 각각 -0.043 cm/s, 0.275 degree, CSK 4기 단독 활용 실험에서 각각 -0.012 cm/s, 0.335 degree, K5와 CSK 혼합 활용 실험에서 각각 -0.077 cm/s, 0.297 degree로 나타남. 전반적인 정확도는 단일 센서의 경우와 크게 다르지 않으며, 오차 증가의 주요 원인은 센서 스펙보다는 편파 차이에 의한 영상 매칭의 불확실성에 있다고 사료됨 (K5는 HH 편파, CSK는 VV 편파로 촬영).
- 고해상 X-밴드 센서의 단독 및 혼합 활용으로부터 기대할 수 있는 해빙 이동 벡터 및 방향 추출의 정확도를 평가하였으며, 그 결과 기존 C-밴드 대비 향상된 성능 뿐만 아니라 이종 센서 활용의 유용함을 확인.

○ 해빙 유형 분류

KOPRI 극지연구소

- 기존 3종 분류에 사용한 알고리즘의 원형을 유지하면서 훈련자료를 NIC 해빙 유형 분류도를 수정하여 5종으로 만든 후 이를 훈련시켜 5종 분류에 대한 결과를 평가.
- 겨울철 분류에의 5종 분류 결과는 open water, new ice, young ice, first-year ice, old ice에 대해 각각 89.1%, 31.9%, 47.6%, 36.4%, 92.8%.
- 여름철 분류에서의 5종 분류는 해빙 표면의 융빙에 의해 단년빙의 세분류가 어렵기 때문에 3종으로 제한하였으며, 오분류는 주로 단년빙과 다년빙 사이에서 발생하므로, 여름철 분류는 현실적으로 해빙 유형 분류보다는 해수/해빙 분류에 가까운 성능을 보이는 것으로 판단.
- 분류 정확도를 고려할 때, 영상레이더를 기반으로 겨울철 5종 분류, 여름철 3종 분류가 가능한 기술을 개발함.

□ 연구내용 2-1-2. 수동형 마이크로파 원격탐사/딥러닝을 이용한 해빙 두께 산출 기술 고도화

○ 수동형 마이크로파 원격탐사 기반 해빙 두께 산출

- 해수의 밝기 온도는 해빙 농도 및 두께 산출에 필요한 하나의 기준값이나, 온도와 해상풍에 영향을 받으며, 해빙보다 방출율이 낮아 북극해에서 최소 밝기 온도를 보임. 이 연구에서는 수동형 마이크로파 위성 AMSR2의 6.925 GHz 밴드에서 관측된 해수의 최저 밝기 온도를 추정하고 그 변화 원인을 파악함으로써 북극 증폭의 증거를 제시함.
- 산출된 해수의 최소 밝기 온도의 연간 변동성을 남극과 북극에서 모두 유사한 값을 유지했지만, 월별 분포에서 변동성이 확인됨. 복사전달모델을 이용한 이론적 해수의 밝기 온도를 비교한 결과, 해수의 최소 밝기 온도는 온도의 영향을 많이 받으며, 특히 북극해 여름철의 해수 온도의 상승을 확인. 이는 북극해 해빙 농도 산출물 및 해빙 관련 변수 추정의 정확도 개선을 위해서 강화된 북극해 해수면 온도를 고려해되어야 함을 시사.
- 수면 위 건현 높이와 눈 두께 정보를 반영할 수 있는 지표로 GR(36.5,18.7)와 GR(10.7,6.9)의 조합을 활용하여 ICESat-2 관측이 산출하는 건현 높이를 수동 마이크로파 자료로 효과적으로 산출하는 다중선형회귀식을 개발. 건현 높이(FB)는 AMSR2에서 얻은 GR(10.7, 6.9) 및 GR(36.5, 18.7)와 다중선형 관계가 있다고 가정하고, 월별로 결정된 계수를 이용해 얻은 AMSR2 건현 높이 산출 결과와 ICESat-2의 건현 높이를 비교. 그 결과, OIB에서 얻은 건현 높이와 비

교했을 때 상관성 (R=0.764)을 확인했으며, RMSE는 10.9 cm임.

- 얇은 해빙에 제한적으로 산출되던 수동형 마이크로파 관측 자료를 북극해 전 지역으로 확장할 수 있는 가능성을 보여주었으며, 장기간의 자료 분석을 통해 해빙의 부피 변화 등을 추정하는데 활용 가능.

○ 딥러닝 기반 해빙 두께 산출

- 수동마이크로파 14개의 채널들간의 곱 연산을 통해 기존 채널들을 이용해서 파악할 수 없는 비선형적 피쳐들의 특성을 이용하여 입력 피쳐를 확장. 또한 정확하고 효율적인 해빙두께 산출을 위한 입력 피쳐 특성별 학습결과를 융합하는 앙상블 기반의 1차원 합성곱 신경망 모델을 제안.
- 이 연구에서 제안된 수동마이크로기반 해빙두께 산출 결과는 모델 훈련에 사용되지 않은 연도의 자료에 대해서도 비교적 일관된 통계적 정확도를 보이며, 월별 정확도 비교에서도 크지 않은 오차를 보임. 단, 해빙이 얼기 시작하는 10월과 녹기 시작하는 4월에 대해서는 다른 월보다 약간 큰 오차를 보임.
- 수동마이크로파에서 산출된 해빙두께(좌)와 고도계센서에서 산출된 해빙두께(중) 정보를 IceBridge 현장관측 자료와 비교한 결과, 위성산출 해빙두께와의 오차는 비교적 크지만, 수동마이크로파와 고도계 두 센서에서 산출된 에러 패턴이 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있고, 두 센서에서 산출된 대응되는 값을 직접 비교시(우) 앞에서 보여준 수동마이크로파 기반 해빙두께 산출 정확도가 유지되는 것을 확인.
- 수동마이크로파에서 산출된 매월 15일 전 북극 해빙두께 지도를 비교한 결과, 딥러닝 모델 산출치는 고도계 산출 해빙두께 자료와 매우 높은 상관성을 지니는 해빙두께 자료 생산이 가능함을 보임. 하지만 고도계에서 산출되는 얇은 해빙에 대한 두께 산출 정확도 자체가 매우 낮음. 1미터 이하 얇은 해빙두께에서는 20cm 이상의 평균 절대 오차를 보이며, 상관성도 크게 떨어짐. 또한 오차의 공간적 분포는 단년생 해빙 구역에서 상대적으로 크게 나타남.

□ 연구내용 2-1-3. 북극 해빙 굽힘강도 산출 기술 고도화

○ 해빙 굽힘강도 대안산출물 개발

- 얼음의 굽힘강도는 부러지기 전까지 가해진 최대 힘과 같으며 극지방을 항해하는 선박이나 구조물의 성능과 안전성을 평가할 때 주로 사용됨. 이 연구에서는 해빙 거칠기 및 염도에 민감하게 반응하는 C-밴드 SAR 다중편파자료와 과거 북극 해빙캠프에서 획득한 해빙코어 자료간 상관도를 분석하여 염수부피

비를 추정하는 알고리즘을 개발.

- 북극 해빙캠프 취소로 SAR위성이 아닌 ERA5 대기모델에서 추출한 2m temperature를 활용하여 독립적으로 제작된 대체산출물과 비교함. 대체산출물의 정확도 검증 결과 대체산출물의 수치가 현장조사 평균치에서 크게 벗어나지 않는다고 판단됨.
- 기존 알고리즘 기반으로 산출된 굽힘강도는 대안산출물보다 높은 경향성을 보이며 해빙과 바다의 경계가 불분명함. 축치해 남쪽, 그린란드 서쪽 및 오호츠크해 북쪽은 Sentinel-1 EW모드 자료가 미제공되어 대안산출물의 해빙경계와 상이함.
- 기존 알고리즘을 개선하기 위해 대안산출물과 일대일 비교하였으며, 대안산출물은 주로 0.5~0.8MPa 구간에 가장 많은 값이 분포한 반면 기존 알고리즘은 0.5MPa부터 1.6MPa까지 비교적 고르게 분포하는 것을 확인함. 두 자료 내 동일한 위치에서 굽힘강도 비율을 계산하였으며 기존 알고리즘 산출물은 대안산출물 대비 평균 1.45배 과대평가 된 것을 확인하여 이를 기반으로 알고리즘을 개선함.

KOPRI 극지연구소

□ 연구내용 2-1-4. 다중 광학 원격탐사 기반 해빙 표면 융빙호 분포 탐지 및 매핑

○ 북극 해빙 융빙호 reference 구축 및 탐지 기술 개발

- 기존 공개되어 있는 북극지역 melt pond 관련 reference자료의 경우, ICESat-2와 매칭에 한계가 있거나 위·경도, 시간정보 등의 자료 부족으로 인하여 활용에 한계가 있는 실정. 이 연구에서는 한계 극복을 위해 ICESat-2 signal을 활용할 수 있는 융빙호 reference를 구축 시도.
- ICESat-2 자료의 활용 및 분석에 활용한 고해상도 위성 관측기반 융빙호 reference를 활용. Tilling et al. (2020)의 ICESat-2를 활용한 여름철 북극의 melt pond 탐지에 관한 선행연구를 참고하였으며, 여기서 제시한 Sentinel-2 고해상도 광학 위성 (10 m 공간 해상도)을 기준으로 한 reference를 참고하여 분석에 활용. 구축한 고해상도 위성 활용 melt pond reference와 ICESat-2 photon height data 매칭을 통한 기계학습 기반 융빙호 탐지 알고리즘 개발. Sentinel-2의 값을 8비트의 0-255 범위로 조정한 뒤, RGB 모두 75 이하일 때 melt pond로 분류함.
- 이종자료의 시공간 차이를 상쇄하는 최적의 match up을 찾기 위해 ICESat-2 자료의 위치를 세부 조정하며 분포를 분석함. ICESat-2 ATL03에서 제공하는

photon height 자체와 더불어 segment별 평균 및 표준 편차 등은 해빙과 융빙호 표면의 특성을 잘 반영하는 것으로 판단됨.

□ 연구내용 2-1-5. 무인기 기반 초분광/라이다 데이터 융합분석 기술 개발

○ 센서 기하 정렬 기술 개발

- 동토지역의 지형 및 식생 변화를 효과적으로 분석하기 위해서는 동종 및 이종 센서자료 간 기하학적 정렬을 통한 융합이 필수적이나, 관측 센서 자료 간 정렬은 서로 다른 촬영 기하, georeferencing 방식GNSS/INS 정확도, boresight parameters, 시야각 등의 차이로 인해 공간적으로 정확히 일치되기 어려움. 이에 본 연구에서는 센서자료들의 고유 특성을 고려하여 두 단계의 전처리를 통해 정밀한 기하학적 정렬을 수행하고자 센서별 boresight calibration을 수행함.
- Checkerboard 타겟과 hut 타겟을 지상에 설치한 뒤, 촬영고도를 달리하여 자료를 취득, 타겟들에 대한 지상좌표와 영상좌표 정보를 이용하여 boresight parameters을 추정함. 그 결과, 라이다 DSM (digital surface model)과 RGB 영상 모자이크 사이에는 그 이상의 추가적인 처리 없이도 기하학적으로 잘 정렬된 것을 확인.
- 잔존하는 불일치를 보정하기 위해, 두번째 단계로 data-to-data registration을 수행. 이를 위해 기준자료로 설정한 RGB 모자이크와의 대응점 추출을 수행하였으며, 호모그래피 변환모델을 추정하여 초분광 영상의 registration을 실시함. 그 결과, 초분광 영상과 RGB 영상 모자이크 사이에 남아있던 불일치가 정밀하게 보정된 것을 확인.

(4) 세부연구목표 2-2. 인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 현장 조사

□ 연구내용 2-2-1. 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집

- 88개 Underway 관측점과 40개 정점을 포함한 총 128 포인트에서 해수 광 특성 자료 및 현 자료를 취득함.
- 정규 관측 정점에서는 1% light depth 까지 깊이별 3번의 샘플링이 수행됨.

□ 연구내용 2-2-2. 북극해 해빙 코어 자료 수집 및 분석

- 코로나19로 인하여 2021년도 북극항해에 해빙캠프가 포함되지 않았음. 새로운 해빙 코어를 해빙캠프를 통해 확보하지 못함.

- 대안으로 타기관에서 2021년 5월에 진행된 북극해 현장조사 정보를 전달 받아 15개 지점에서 해빙 코어 두께, 염도, 온도 등 실측 데이터 확보함.
- 현장조사 기간에 맞춰 다목적실용위성5호 촬영을 요청 및 자료 확보하였으며, Sentinel-1A/B 위성 자료와 함께 비교 분석함.

□ 연구내용 2-2-3. 북극해 해빙 위치추적 자료 수집 및 분석

- 계획되었던 아라온호 북극 여름항차 해빙캠프 취소에 따른 신규 자료 획득 불가. 따라서 국제공동연구를 통해 확보한 MOSAiC Distributed Network (DN) 부이 자료를 이용한 대체연구 수행. 부이 자료들은 1차적으로 영상 기반 해빙 이동 벡터 추출 결과의 검증에 사용하였으며, 이에 대한 결과는 상기 (세부연구목표1)-(연구내용1-1)에 있음.
- 각 부이들의 위치를 추적하고 시간에 따른 변화를 분석하면 부이가 위치한 해빙의 발산, 수렴, 전단 등의 변형 추출함.
- 부이의 오작동, 유실, 및 신규 부이의 설치 등으로 인하여 위 두 시기에 나타낸 모든 부이가 동일한 것은 아니나, 삼각망 형태의 전반적인 형태를 보면 두 시기 사이에 해빙의 상대적인 움직임이 상당했음을 지시함.
- 위성영상으로부터의 해빙 위치 추적을 격자화하고 이를 시계열적으로 분석하면 해빙의 변형을 추적할 수 있는 것이나, 측점간의 간격이 불규칙한 부이망과의 비교, 검증에 대한 연구가 향후 수행되어야 할 것으로 사료됨.

□ 연구내용 2-2-4. 동토 지역 초분광/라이다 자료 구축

- 계획되었던 알라스카 무인기 탐사 현장계획 취소에 따른 국내 대체 사이트 확보를 시도 했으나, 지형의 특수성으로 인해 대체 사이트 찾기 어려움. 따라서 무인기를 이용한 자료 획득 및 기본 처리 방법 정의에 초점을 둠.
- 특히 인터넷 통신이 어려운 극지역의 특수성을 고려하여 국내 데이터 획득시 인터넷 통신을 제한하고, 획득 영상 정사보정을 위해 상시관측소가 아닌 별도의 base station 설치를 통해 현지에서 데이터 취득 환경과 유사하게 모의하여 획득함.
- 이에 국립농업과학원에서 무인기를 이용해 동시 획득한 RGB, 초분광, 라이다 영상으로 위의 통신 제약조건하에서 획득, 처리함.
- 또한 알라스카 카운실 지역에 대해 PRISMA 초분광위성영상을 7월부터 9월까지 3개월간 촬영요청을 하였으나, 긴 재방문 주기 및 날씨 문제로 영상 촬영

에 실패함.

다. 2022년 3차년도 연구 요약

(5) 세부연구목표 3-1. 빙권 구성요소 변화 특성 분석

□ 연구내용 3-1-1. 마이크로파 기반 해빙 특성 정량화 및 시공간 변동성 분석

○ 해빙 변형 산출과 유형과의 연동성 분석

- 해빙은 열역학적 기작에 의해 생성과 소멸이라는 반복된 유형 변화가 발생하지만 동시에 동역학적 기작에 의해 이동하고 서로 다른 부빙조각들의 상호작용으로 변형 또한 발생함.
- 따라서 해빙의 종합적인 특성을 이해하기 위해서는 해빙의 유형과 변형을 동시에 관측할 필요가 있으나, 현재 이 둘에 대한 원격탐사 기반 산출물은 시간적으로는 1주일, 공간적으로는 25 km의 낮은 해상도로 제공되고 있음. 특히 해빙의 대표적인 변형상인 리드와 리지는 그 폭이 수~수백 m로 작기 때문에 상기 산출물에서 검출할 수 없는 한계점이 존재함.
- 이 연구는 상대적으로 고해상인 영상레이더를 이용하여 해빙 변형을 추적하여 그 특성의 차이를 분석함. 특히 이 연구의 개발물인 능동형 마이크로파 영상레이다 자료 기반의 해빙 이동 산출물을 기반으로 신규 변형 산출물을 개발함.
- 변형율은 발산(divergence), 전단(shear), 와도(vorticity)로 구성되며 각각에 대한 정의는 다음과 같음.

$$divergence = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

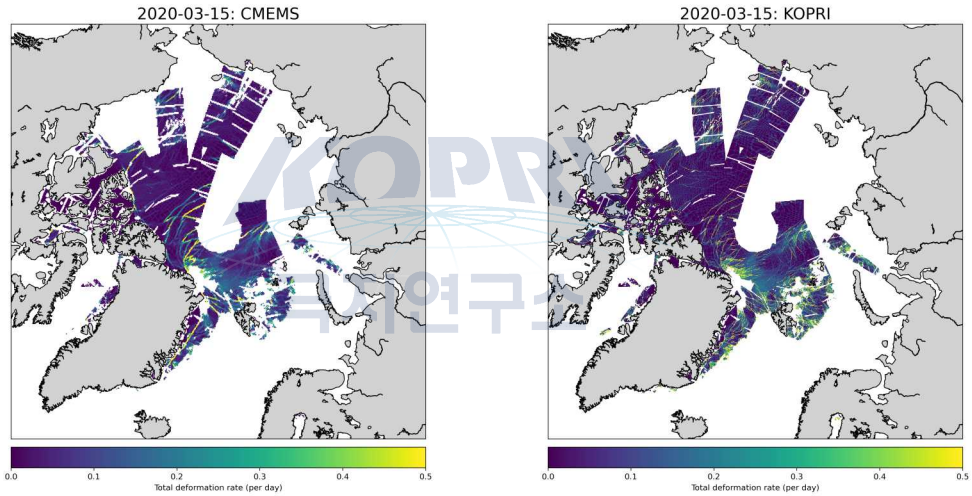
$$shear = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$vorticity = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

- 또한 총 변형율(total deformation rate)은 다음과 같이 발산과 전단을 통해 계산됨.

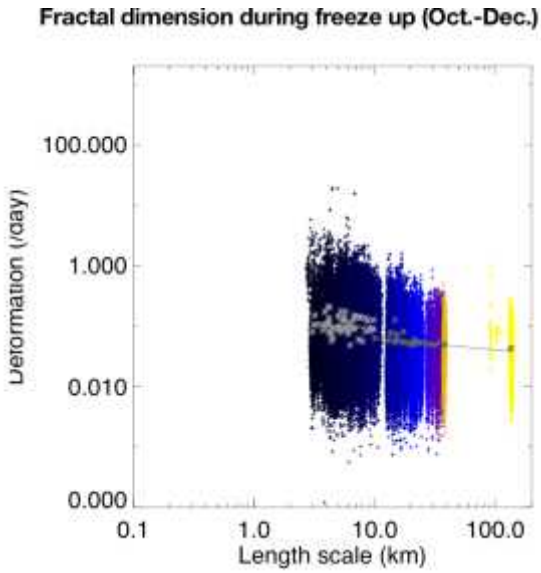
$$total\ deformation = [divergence^2 + shear^2]^{1/2}$$

- 또한 총 변형율은 다음과 같이 발산과 전단을 통해 계산됨.
- 현존하는 타 기관 발행 해빙 이동 산출물 중 이 연구와 동일하게 고해상 영상레이더를 사용하는 것은 유럽연합의 Copernicus Marine Environment Monitoring Service (이하 CMEMS)로, 10 km의 공간해상도를 가짐.
- 이 연구의 개발물인 2 km 공간해상도의 이동 벡터장을 활용하여 CMEMS 자료와 비교함으로써 변형장에 대한 분석 기반에 있어 상대적 우위를 확보하였으며, 다음은 동일 날짜에 대한 두 자료의 비교 예시임.



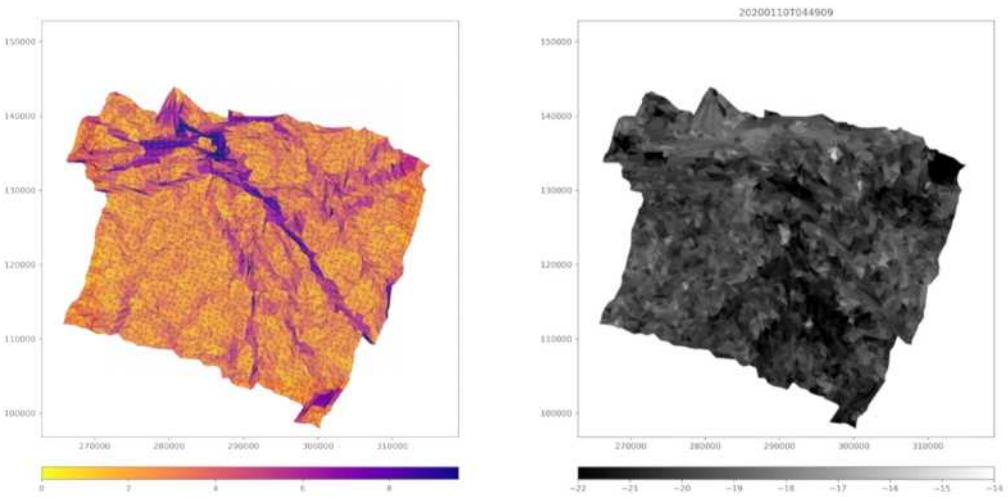
총 변형율 계산 결과 예시. (좌) CMEMS 기반, (우) 이 연구의 산출물 (KOPRI) 기반

- 위 예시에서 나타나듯, 변형은 시공간에서 매우 불균질하게 나타나며, 리드(lead)나 리지(ridge)로 대표되는 선형 구조 변형은 그 규모가 수백~수천 km에 이르기도 함.
- 위 예시에 있어 공간해상도의 차이로 인해 이 연구의 결과물에서 더 세세한 변형 양상이 관측되는 것과는 별개로, 총 변형율은 분석 격자의 스케일에 대한 프랙탈(fractal)적 특성을 반영하며, 이는 다음과 같은 실험적 결과에서 확인 가능함.



해빙 총 변형량의 프랙탈적 특성

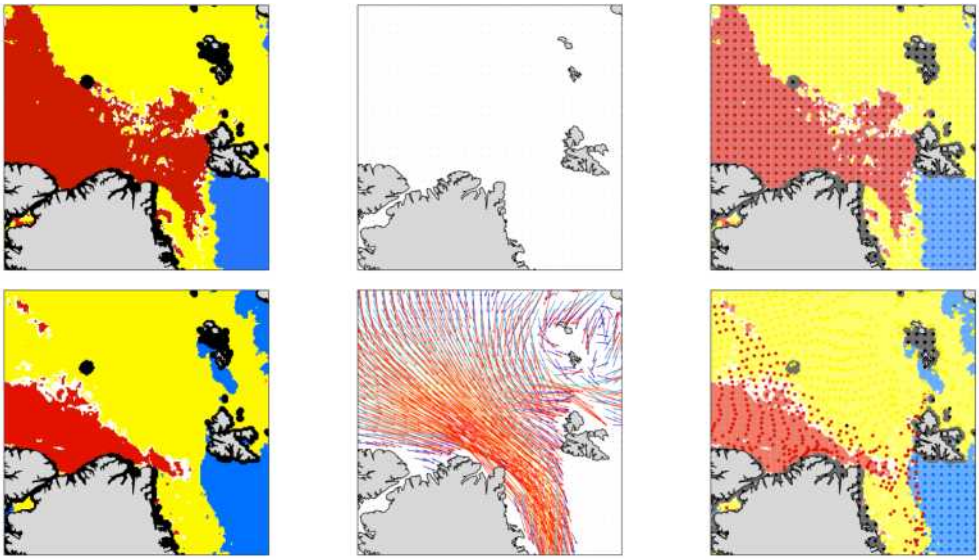
- 해빙은 상시 이동하기 때문에, 동일 해빙에 대한 변형율을 추적하기 위해서는 유클리디안 고정 격자에서가 아닌, 입자 추적을 통한 라그랑지안 격자상에서의 분석이 필요함.
- MOSAiC 미션 기간의 영상자료로부터 이동 벡터를 추출하고, 결빙 초기 3개월간의 입자 추적을 통해 구성한 라그랑지안 격자상의 누적 총 변형율을 계산하여 레이더 후방산란과 비교함.



라그랑지안 격자상에서의 누적 총 변형율(좌)과 변형을 거친 해빙의 레이더 후방산란계수(우)

- 누적 변형율이 높았던 지점은 레이더 영상에서 또한 특징적인 선형의 구조를 나타냄. 다만, 일반적으로 발산에 의해 발생하는 리드는 그 표면의 재결빙 여부에 따라 주변부보다 밝거나 어두울 가능성이 동시에 있으며, 전단이나 수렴에 의해 발생하는 리지는 주변부보다 밝을 가능성이 높기 때문에 총 변형율이 레이더 후방산란과 일대일 관계로 부합되지는 않는 것으로 판단됨.
- 이는 또한 후방산란의 공간적 배치 특성을 기술하는 텍스쳐(texture)와의 연동성이 직관적이지 않음을 시사하며, 이에 해빙 변형과 해빙 유형은 발생 선형 구조의 시공간적 발생 분포 정도의 차이에 대해서는 상관성이 있으나 변형율을 분류를 위한 단일 지시자로 활용하기는 어려울 것으로 판단됨.
- 변형으로 대표되는 해빙의 동역학적 기작과 해빙 유형이 일대일의 관계는 아님을 보였으나, 해빙의 열역학적 원인에 의한 유형 변화와는 별개로 해빙 유형 분류시의 모호성이 존재함.
- 다음은 OSI-SAF에서 배포하는 해빙 이동을 입자추적 했을 때, OSI-SAF에서 배포하는 해빙 유형 분류 결과에서 나타나는 분류 모호성의 예시를 보임. 해빙 유형은 해빙 농도가 100%에 가까운 지역에서는 항상 단년빙에서 다년빙으로의 일방적인 진화만이 가능하며, 그 역은 성립할 수 없음. 즉, 리드 발생 및 재결빙으로 나타나는 좁은 선형 구조의 발생을 제외하면 다년빙 입자를 추적하면 그 이동 위치에서는 다년빙으로 분류된 해빙 유형도가 나와야 함. 그러나 아래 예시에서는 다년빙 입자가 이동했을 다수의 위치에서 단년빙으로 분류된 결과가 관측되며, 이는 OSI-SAF의 해빙 유형 분류가 시기에 따라 일관적이지 않음을 시사함.

KOPRI 극지연구소



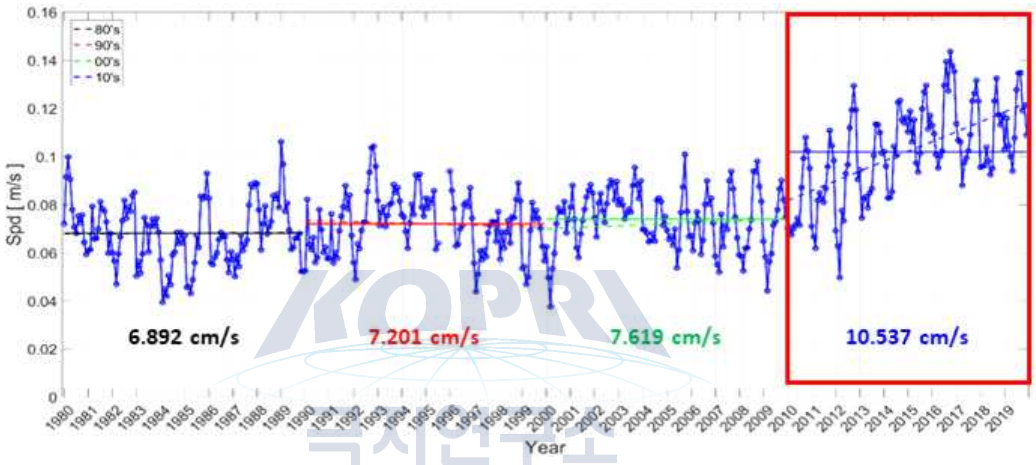
해빙 이동과 유형의 입자추적 결과에서 나타나는 해빙 유형 분류 결과의 불합리성 예시. (상단) 초기장, (하단) 8주간의 입자 추적 후, (좌) 해빙 유형 분류도, (중) 주적 해빙 이동 벡터장, (우) 입자 추적을 통한 해빙 유형의 분포도. 붉은색은 다년빙, 노란색은 단년빙, 파란색은 개빙수역을 나타냄.

○ 해빙 이동 속도 변화

- 북극해에서 해빙의 장기적인 유동을 이해하기 위해서 위성, 현장 그리고 해빙 밀도의 자료를 이용하여 장기 변화를 분석함. 위성자료는 공간자료를 이용하였지만 현장관측 자료는 라인자료를 이용하여 분석함.
- 위성과 현장관측 자료에서 계산된 북극해 해빙 이동속는 지속적으로 증가하는 경향을 나타내고 있고, 위성관측자료보다는 상대적으로 부이 현장관측자료에서 증가하는 경향을 나타냄. 북극해 해빙의 이동속도 변화를 분석한 결과에서 연구기간의 전반부보다는 연구기간의 후반부에서 특히 이동속도가 급격히 증가함. 이런 결과는 위성과 현장관측 자료 모두에서 최근 10년과 과거 10년을 비교한 결과에서 최근 10년 동안 급격히 증가한 것으로 나타남.
- 북극해 해빙 이동속도의 계절적 변화를 분석한 결과에서 위성과 현장관측 값에서 가장 큰 차이를 보이는 계절은 하계로 해빙이 녹으면서 차이를 발생시키는 것으로 사료됨. 위성의 경우 공간해상도 문제로 부이에서 관측되는 결과보다 상대적으로 낮게 나타남. 해빙의 이동속도는 10월에서 12월에 상대적으로 해빙의 이동속도가 증가되어 나타남.
- 북극해에서 장기 IABP 부이 관측를 이용하여 시기별 해빙의 이동속도 변화

를 분석한 결과에서 북극해 해빙의 이동속도는 지속적으로 증가했고, 특히 2010년에 와서 급격하게 증가한 것으로 나타남. 선행연구에서 해빙의 농도 및 면적 등이 감소하면서 장기적으로 해빙의 이동속도가 증가하는 경향을 나타내는 것으로 조사됨.

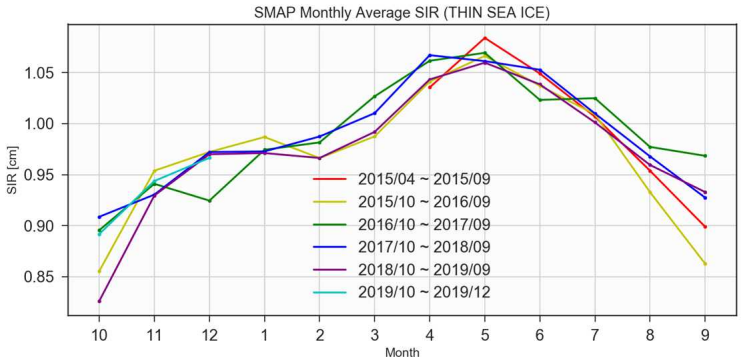
- 해빙의 속도 변화와 관계있는 해빙밀도와의 관계에서 북극해의 해빙밀도는 전체적으로 감소하는 경향을 나타내지만 일부 지역에서는 증가하는 경향을 보임. 특히 태평양에서 북극해로 해류가 유입되는 척치해와 북극해에서 그린란드 동쪽 프람 해협을 통해 대서양으로 흐르는 Transpolar Drift가 이동하는 해역에서 해빙밀도는 가장 크게 감소함.



부이관측자료를 이용한 북극해 해빙 이동속도 변화 분석

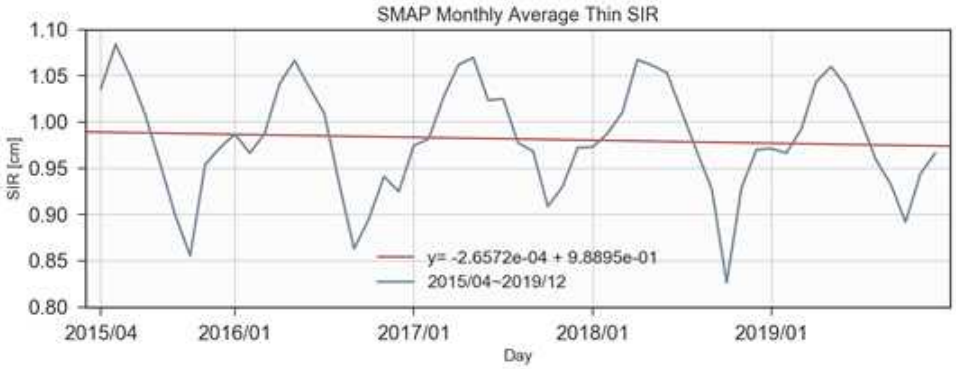
○ 해빙 거칠기 변화

- 10월에 최소인 해빙 거칠기는 겨울철이 됨에 따라 점차 증가하다가 5월에 최대로 거칠어지고 이후 여름철을 지나면서 감소하는 형태를 보임.



연도별 얇은 해빙 거칠기의 월평균 변화 그래프 (2015~2019)

- 해빙 거칠기는 매년 비슷한 양상을 보이며 반복되는데 얇은 해빙의 거칠기는 점차 감소하고 있음.



얇은 해빙 거칠기의 월평균 변화 그래프 및 추세선 (2015/4~2019/12)

- 시계열 자료 작성을 통해 해빙 거칠기 값의 지역별 변화를 확인할 수 있음.

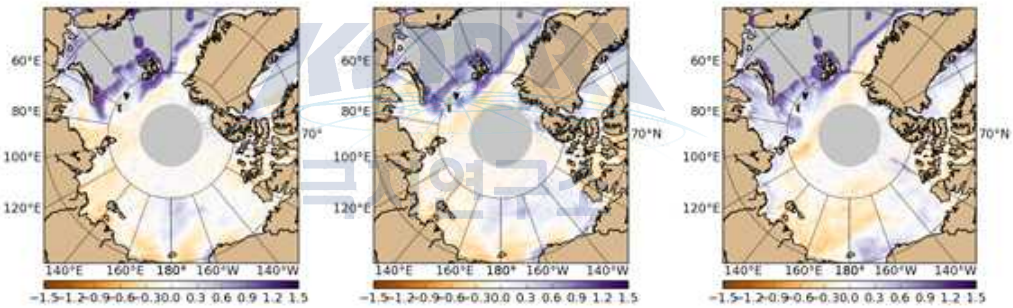


그림 20 얇은 해빙 거칠기의 2016년 월평균 공간분포 변화 (좌측부터 1, 2, 12월 순)

□ 연구내용 3-1-2. 다중 광학 원격탐사 센서 기반 해빙 표면 융빙호 시공간 변동 분석

○ 융빙호 시공간 분포 자료 수집 및 분석

- 북극해 해빙 표면의 기복을 따라 발생하는 융빙호(melt pond)는 해빙을 구성하는 눈이나 얼음보다 상대적으로 높은 태양에너지 흡수 특성으로 인해 융빙을 가속하기 때문에 해빙 변화에 대한 정확한 현황 파악과 예측을 위해서는 융빙호 탐지 및 분포를 위한 자료 확보와 분석이 필요함.

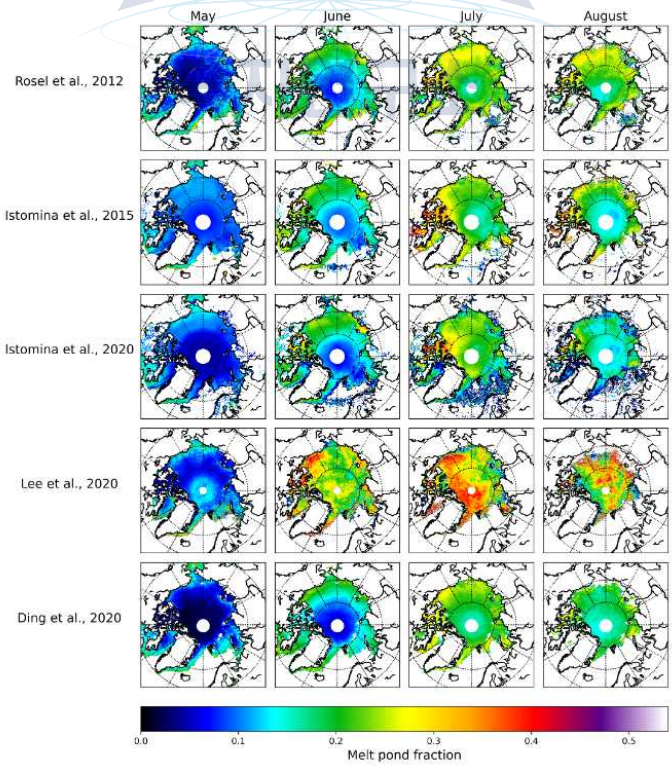
- 이 연구의 1, 2차년도에서는 고해상 원격탐사를 통해 융빙호의 특성을 상세화하는 연구를 수행했으나, 연구담당자의 중도 퇴사 및 2단계 연구에서의 북극해 전역 시공간 변화 특성 연구 진행을 위해 3차년도에서는 북극해 전역에 대한 융빙호 분포에 대해 산출물을 만든 대표적 사례들에 대해 자료를 수집하고 그 특성을 비교분석함.
- 북극해 전역에 대한 융빙호 산출물의 시초는 Rosel 등의 2012년에 발표한 EOS-MODIS 영상과 융빙호 분광 특성을 이용해 분광학적 분류(Spectral unmixing)를 수행한 자료이며, 이는 MODIS 운용 시작인 2000년부터 해당 논문의 발표 직전까지인 2011년까지 자료를 제공하고 있음.
- Istomina 등은 2015년에 ENVISAT-MERIS 영상과 융빙호의 광학 물리 특성을 이용해 해석적 분류를 수행했으며, 이는 MERIS 운용기간 전체인 2002년부터 2011년까지의 자료를 제공하고 있음. 또한 Istomina 등의 2020년 연구에서는 동일 기체인 ENVISAT에 실린 다른 센서인 AATSR을 이용해 구름 탐지를 강화하고 그 특성을 MERIS 관측영역 전체를 확장하여 탐지 정확도를 높인 자료를 발표함. 또한 Istomina 등은 자료의 연속성을 확보하기 위해 동일 알고리즘을 Sentinel-3 OCLI에 적용하여 2017년부터 현재까지의 자료를 제공하고 있음.
- Lee 등은 2020년에 EOS-MODIS 영상에 기계학습을 적용하여 2000년부터 2019년까지의 20년 장기 자료를 생산함.
- Ding 등은 마찬가지로 2020년에 EOS-MODIS 영상에 보다 진화한 학습방식인 딥러닝을 적용하여 2000년부터 2019년까지의 20년 장기 자료를 생산함.
- 위 자료들 중, 시공간 해상도 관점에서 활용이 유리한 Istomina 등, Lee 등, Ding 등의 세 가지 자료에 대한 비교분석을 수행하였으며, 다음 표는 세 산출물의 특성을 요약함.

KOPRI 극지연구소

대표적 전북극 융빙호 분포 산출물의 특성

	MERIS MPF (Istomina 등, 2020)	MODIS20 (Lee 등, 2020)	MODIS DNN (Ding 등, 2020)
공간해상도 (영상픽셀수)	12.5km x 12.5km (896 x 608)	5km x 5km (1000 x 1000)	12.5km x 12.5km (533 x 533)
시간해상도	1일	1일, 8일, 1개월	8일
영상자료	MERIS L1B	MOD02HKM MOD021KM MOD29	MOD09A1
알고리즘	해석모델 MPD 기반 (Zege 등, 2015) 구름 제거: MECOSI (Istomina 등, 2020)	기계학습모델 MNN-MLR 기반 WorldView 고해상 영상을 훈련검증자료로 사용	인공지능 앙상블 DNN 기반 현장자료 및 고해상 영상을 훈련검증자료로 사용

- 다음은 자료간 공통 관측 기간인 2002~2011년의 5~8월 월별 평균을 도시함. Lee 등의 결과를 제외한 나머지는 상대적으로 유의한 값을 나타냄.



대표적 전북극 융빙호 분포 산출물의 2002~2011년 5~8월 월평균

- Madhavan 등의 2012년 연구에 의하면, MODIS 센서의 가시광 밴드 영역 일부에서 포화현상이 발생하기 때문에 MERIS 관측이 MODIS 관측보다 유리할 소지가 있음.
- 2020년의 MERIS MPF는 MECOSI 구름 탐지 도입으로 2015년 산출물보다 훨씬 엄격한 구름 오염 픽셀 제거를 하며, MECOSI 필터링을 통과한 유효픽셀들에 대해서 동기간의 MODIS 구름 비율을 봤을 때 그 값이 50% 이하로 두 자료간의 구름 필터링 성능이 유사함.
- 2020년 MECOSI 도입으로 인해 기존 2015년 자료에 비해 6월, 7월의 융빙호 비율이 상승했으며, 5월, 8월은 감소함. 즉, 기존보다 여름철 융빙은 커졌으며, 이를 전후로 한 기간에서의 알려진 양의 편차가 잘 제거됨.
- MERIS MPF에서 융빙기 말기에 융빙호 비율이 현장 관측치에 비해 과소 추정되는 것으로 보이나, 이는 재결빙된 융빙호를 융빙호로 분류할 것인가 얼음으로 분류할 것인가 또는 아예 제외할 것인가의 결정에 따라 다르게 판단할 수 있음.
- MODIS20의 경우, 재결빙된 융빙호는 계절평균(Climatology) 자료를 통해 제외되었기 때문에 8월 융빙호 비율이 타 자료보다 높게 관측됨.
- MODIS20에서 사용된 구름 탐지 결과를 고해상 광학영상과 비교했을 때, 약 70%의 구름만 제대로 탐지된 것으로 나타나기 때문에, MODIS20이 타 자료에 비해 전반적으로 확연한 편차를 가지는 것으로 판단됨. 이는 특히 MIZ 영역에서 구름에 가린 해수를 융빙호로 오판하는 역할을 함.
- MODIS20과 2015년 MERIS MPF에서 각각 검증한 정확도는 유의한 수준이었으므로, 개선된 2020년 MERIS MPF가 MODIS20보다 더 높은 정확도를 가질 것으로 판단됨.
- MODIS DNN의 경우, 현장자료와의 비교에서 MODIS20과는 달리 과대추정 경향이 보이지 않음. 또한 동일한 현장자료였던 MEDEA와의 검증결과에서 MODIS DNN이 더 나은 정확도를 보였음.
- MODIS DNN 또한 불완전한 MODIS 구름 탐지 결과를 사용했기 때문에, 융빙기와 그 전후에서 각각 과소추정, 과대추정했을 가능성이 존재함.
- 결론적으로, 산출물 품질 관점에서 MERIS MPF가 가장 좋으나, 끊김 없는 장기 데이터셋 분석을 위해서는 MODIS에 기반한 산출물을 활용해야 할 것이며, 이 경우 MODIS DNN이 최적이라 판단됨.

KOPRI 극지연구소

○ 융빙호 시공간 변동과 환경 요소간의 상관관계

- 2019년 여름철(5~9월) 월평균 북극해 융빙호 비율과 해빙 및 기후 관련 인자와의 상관관계를 분석함.
- 기후인자의 경우, Guemas et al. (2016)을 참고하여 선정하였으며, 주로 해빙 표면 특성에 영향을 미친다고 알려져있는 열환경과 관련된 인자를 선정함. 각 인자에 대한 값으로는 ECMWF ERA5 월평균 재분석장 자료를 활용하였으며, 분석 단위의 경우, 정규화 없이 실제 추정값과의 상관관계를 분석함.
- 선정한 변수는 다음과 같이 6개 변수로, sea ice concentration (SIC), mean sea level pressure (msl), surface thermal radiation downwards (strd), 2-meter temperature (t2m), total cloud cover (tcc), total column vertically-integrated water vapour (tcwv)로 구성함.
- 2019년 월별 melt pond fraction과 관련 인자의 상관관계 분석 결과, 변수별로, 월별로 편차가 큰 것으로 나타남
- SIC의 경우, 융빙이 진행되면서 상관계수가 음에서 양으로, 그리고 다시 음의 값으로 변화하는 것으로 나타났음. 상관계수의 경우, 동일 픽셀에 대한 상관도를 나타내므로, 5, 9월은 각각 해빙농도가 낮을수록 융빙호 비율이 높은 것으로 볼 수 있으며, 반대로 6, 7, 8월의 경우는 해빙농도가 높은 지역에 융빙호 비율 또한 높은 것으로 나타남
- MSL의 경우 또한 융빙이 진행되면서 상관계수가 음에서 양으로, 그리고 다시 음으로 변하는 패턴을 보임
- STRD의 경우는 꾸준히 음의 상관관계를 보이고 있으며, 하방 복사량의 양이 많을수록 융빙호 비율이 많은 것으로 나타남
- T2M의 경우 앞의 경우와 반대로 융빙이 진행되면서 양의 상관계수가 음으로 변했다가 다시 양으로 바뀌는 패턴을 보임
- TCC의 경우, 5월달에 높은 음의 상관계수를 보였으며, 7월을 제외하면 대체로 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타남. 이는 구름이 많이 덮인 지역일수록 융빙호 비율이 낮다는 것으로, 일조량이 상대적으로 적은 지역일수록 낮은 비율을 보이는 것으로 나타남
- TCWVS 변수의 경우는 수증기를 대표하는 변수로써 융빙이 진행되면서 양의상관관계에서 음의 상관관계로 변하는 모습을 보임

- 여름철 전체 기간에 대한 상관관계 분석 결과, SIC, STRD, T2M, TCWVS가 높을수록, 반면 MSL, TCC가 낮을수록 융빙호 비율이 높은 것으로 나타났음



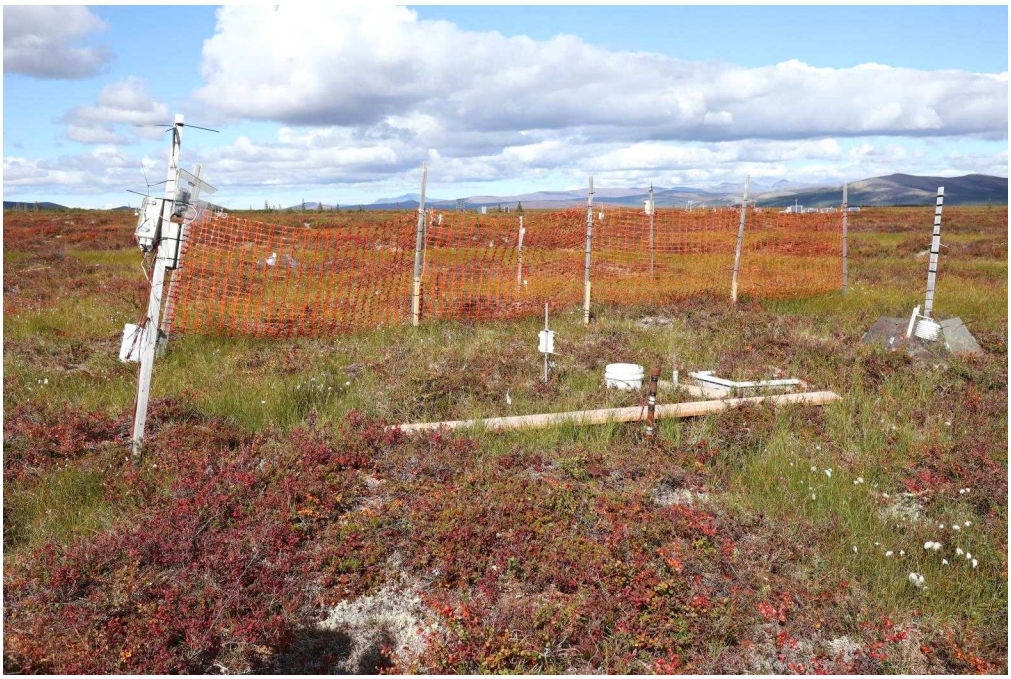
월별 상관계수 (Pearson's r) 2019년 5-9월 전체 상관계수 (Pearson's r)

2019년 월별(좌) 5-9월(우) 전체 melt pond fraction과 관련 변수 간 상관계수

□ 연구내용 3-1-3. 시계열 초분광 및 수치표면모델 자료 융합을 통한 동토 특성 변화 분석

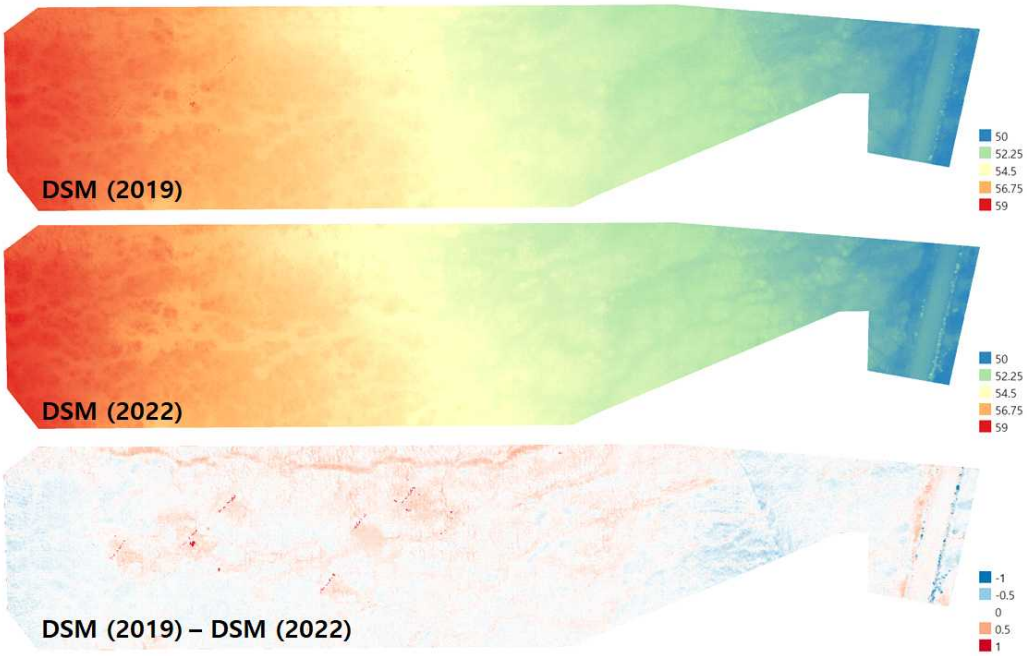
○ 알래스카 카운실 동토지형 변화 시계열 변화 분석

- 코로나19로 인한 1, 2차년도 출장취소로 인해 초분광영상의 시계열 분석은 불가능했으나, 2019년에 타 연구사업에서 획득한 라이다 포인트 클라우드 자료와 2022년에 3차년도 연구에서 획득한 라이다 포인트 클라우드로 수치표면모델(Digital Surface Model: DSM)을 제작하여 3년간 동토 지형 변화를 분석함
- 해당 연구사이트에는 겨울철 눈의 양이 동토의 녹는 속도와 관계를 살펴보기 위해 수년전부터 스노우펜스를 설치하여 동토지형 변화를 모니터링 하고자 함. 그물로 만들어진 스노우펜스 주변에 다른 지역보다 눈이 더 쌓이는 형태를 가짐.



연구지역에 설치된 스노우펜스

- 본 연구에서 얻은 라이다 포인트 클라우드 자료는 수직 오차 2 cm 내외의 정확도로 지형을 정밀 맵핑할 수 있는 성능을 가짐.
- 인접한 도로의 경우 지형의 높이 변화가 거의 없다는 가정하에 2019년과 2022년 DSM의 차이를 분석하여 높이 차이를 확인한 결과, 도로의 경우 높이 변화가 거의 없는데 반해 스노우펜스 주변의 경우 타 지역보다 동토가 더 녹아 지형의 높이가 낮아진 결과를 확인 함.



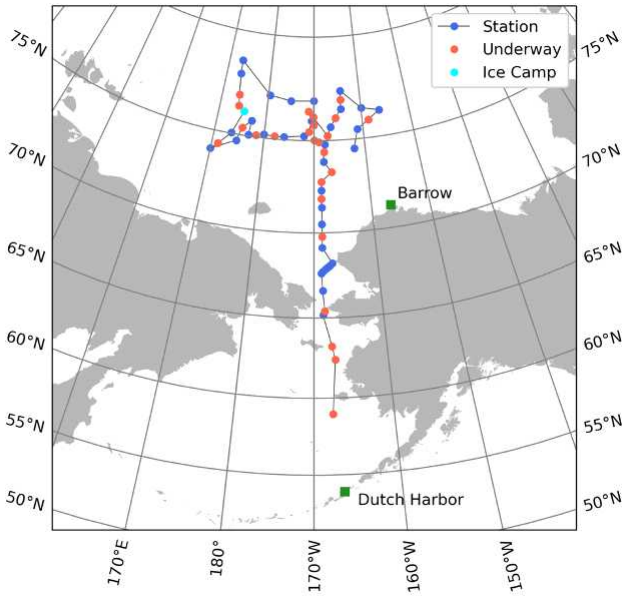
라이다 포인트 클라우드로부터 구축된 2019년과 2022년에 구축된 DSM (각각 상, 중). 3년간 지형의 높이 차이 (하). 붉은색일수록 2019년에 비해 지형의 높이가 낮아진 경우를 뜻함

- 이러한 무인기 라이다 포인트 클라우드를 이용한 지형변화 탐지 접근 방법은 과거 지형 변화를 정량적으로 관측할 수 없었던 한계를 극복할 수 있는 계기가 될 것으로 기대.

(6) 세부연구목표 3-2. 현장조사 기반 빙권 위성 관측 결과 검정

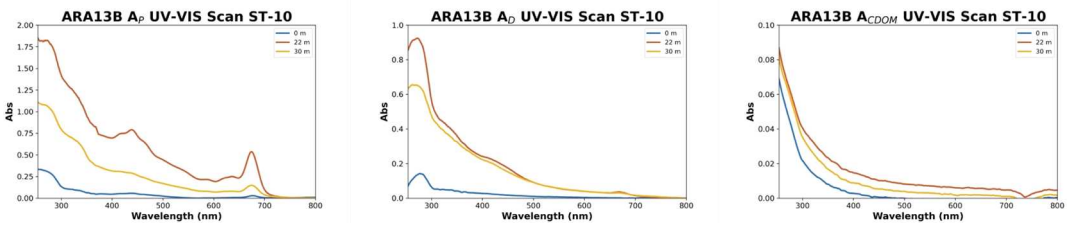
□ 연구내용 3-2-1. 북극 해수 광 특성 자료수집

- 2022년 7월 20일부터 8월 22일까지 진행된 아라온 북극해 탐사 2항차 기간 동안, 다음과 같이 61개 연구정점 또는 항해 경로상에서 해수 샘플을 취득함.



아라온 북극 2항차 경로와 해수 샘플 취득 위치

- CTD 채수는 표층, 아표층 엽록소 최대층 (SCM), 유광층 경계의 세 깊이에서 이루어졌으며, 항해 경로상 표층에서 채수한 underway를 합쳐 총 131개의 해수 샘플을 취득함.
- 각 샘플은 1,000ml씩 세 개로 나누어 각각 클로로필-a, 부유 퇴적물 (SS), 유색용존유기물 (CDOM)에 의한 흡광량을 측정하기 위해 필터링과 화학처리를 거침.
- 흡광 특성은 250~800nm의 분광범위에서 측정되었으며, 다음은 연구정점 10번에서 취득한 샘플의 흡광 특성 분석 결과를 나타냄.

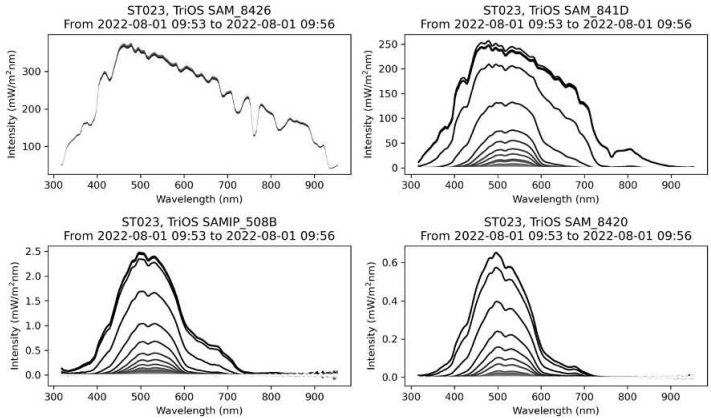


연구정점 10번에서 취득한 해수 샘플의 흡광 특성. (좌) 입자 (중) 쇄설물 (우) 유색용존유기물

- 또한 연구정점에서 일사량이 5W/m^2 이상인 경우에 분광복사계 TriOS를 이용하여 320~950nm 분광범위에서의 수중 복사 조도와 상하방 복사 휘도를 측

정함. 해수 표층부터 유광층 경계 깊이까지 분당 30m의 속도로 내려가며 수직적 변화를 연속적으로 측정함.

- 다음은 연구정점 23번에서 취득한 TriOS의 깊이별 계측치를 나타냄.



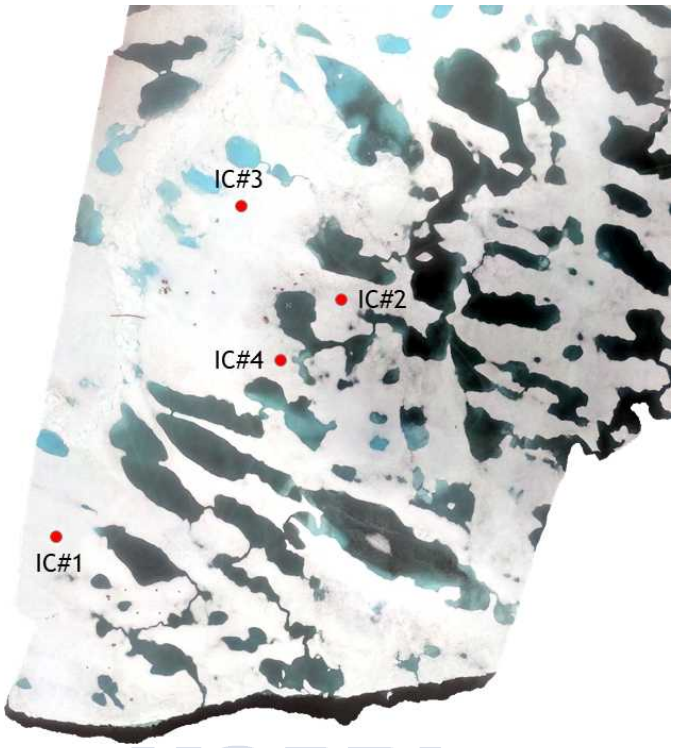
연구정점 23번에서의 TriOS 관측 결과

- 상기 시료들은 실험실에서의 후처리를 위해 대기중이며, 아라온호가 시료와 함께 국내에 입항하는 10월 이후에 분석 및 위성관측결과 검정에 활용할 계획임.

KOPRI 극지연구소

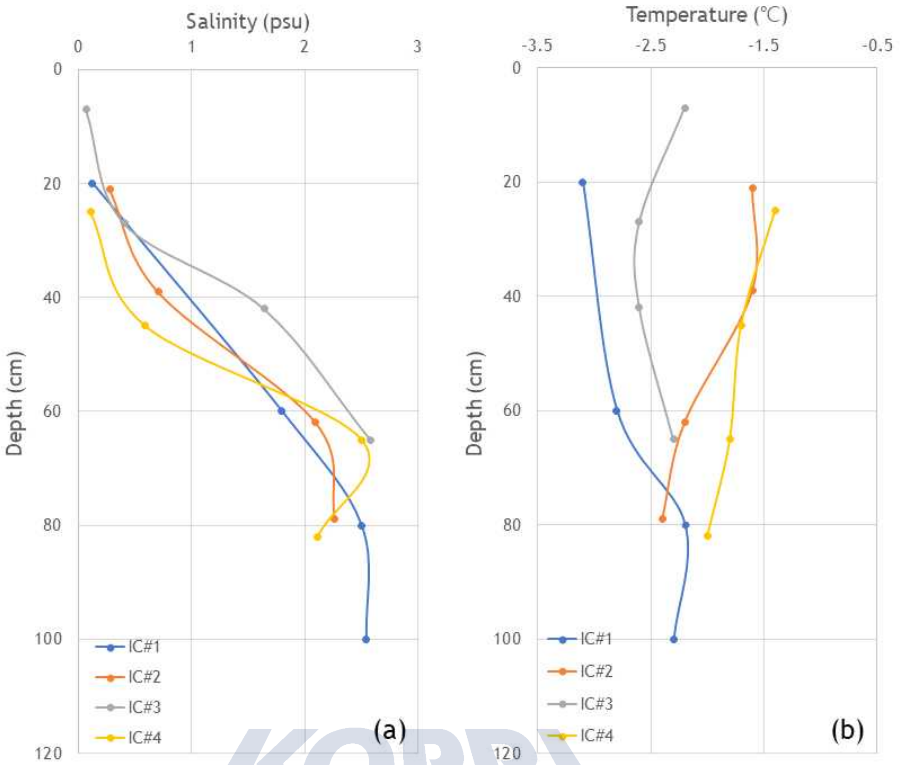
□ 연구내용 3-2-2. 북극 해빙 코어 자료 확보

- 본 연구에서는 2022년 아라온호 하계 북극해 탐사 2항차의 해빙 캠프기간(2022년 8월 3일~5일) 동안 총 4개의 해빙 코어 자료를 획득함.
- 해빙 캠프는 얼음의 두께는 1 m 이상의 지역으로 표면은 비교적 매끄럽고 평평하며 융빙호가 많은 조건을 가지고 있었기 때문에 융빙호와의 거리와 해빙 위 적설을 고려하여 해빙 코어의 위치를 선정하였으며 시추 위치는 아래의 그림과 같음.



해빙 캠프 중 해빙 코어 수집 위치

- 본 연구에서 사용된 ice corer는 직경 10 cm의 장비로 전동 드릴을 활용하여 해빙을 시추하였으며 톱을 이용하여 20cm 간격으로 얼음을 절단하여 해빙 코어의 연직 구조를 관측함.
- 절단된 해빙 코어는 5 cm 깊이로 드릴링 하여 코어 중심 온도를 측정 후 연직 깊이별로 코어를 분류하여 수집하였으며 완전히 해동된 후 절단된 코어의 염분을 psu 단위로 측정함.
- 다음은 각 해빙 코어별 온도와 염분의 연직 분포를 나타냄.
- 염분 연직 분포의 경우 해빙 아래로 갈수록 염분이 증가하였으며 해당 연직 구조는 다년빙의 전형적인 특징을 나타냄.
- 온도의 경우 연직 분포에 따른 차이가 염분에 비해 뚜렷하게 관측되지 않았으며 이는 현장에서 온도를 측정할 때 외부 대기 온도의 노출로 인한 결과로 판단됨.
- IC#2와 IC#4의 경우 해빙 하부로 갈수록 온도가 감소하는 패턴이 관측되지만 나머지 코어의 경우 특정 깊이 이후 코어의 온도가 상승하는 특징이 관측됨.



수집한 해빙 코어의 온도(a)와 염분(b)의 연직 분포

KOPRI 극지연구소

- 수집된 해빙 코어 자료는 본 연구에서 개발한 해빙 굽힘강도(연구내용 2-1-3) 알고리즘 개선에 활용될 계획임.

□ 연구내용 3-2-3. 북극 해빙 이동 위치추적 실측자료 확보

- 해빙 이동은 해빙의 진화에 영향을 미치는 주요 요소 중 하나로, 해빙이 어떤 주변 환경의 영향을 받아서 생장/변형/소멸되는지를 밝히기 위해 그 궤적에 대한 모니터링이 필요하며, 궁극적으로는 이를 영상 기반으로 추적할 수 있어야 함.
- 이 연구에서는 2022년 아라온호 하계 북극해 탐사 2항차 중에 3기의 트래커를 해빙에 설치하였으며, 그 내역은 다음의 표와 같음.

2022년 설치 해빙 트래커 목록

Sea ice tracker deployed site		Deployment date and time (UTC)	Data transmission
Ice camp	KP-001	Aug 3, 2022 21:54	Iridium satellites
Marginal ice zone	KP-002	Aug 12, 2022 22:24	Iridium satellites
	KP-003	Aug 12, 2022 22:45	Iridium satellites

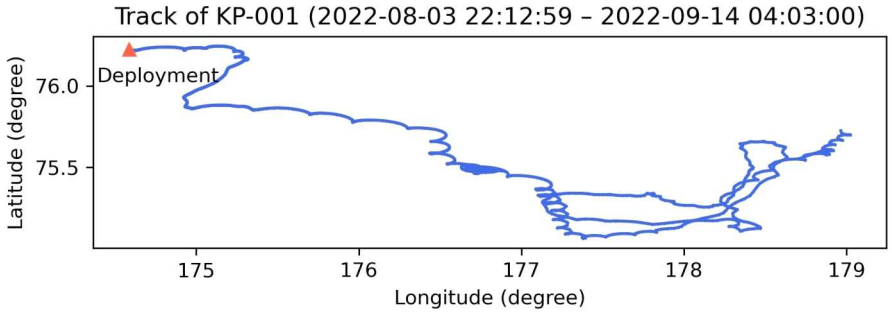
- 해빙 트래커는 GPS 수신/처리 시스템과 이리듐 데이터 전송 장치로 구성되며, 1기는 해빙캠프 기간중에 정박한 해빙의 두꺼운 리지 부분에, 2기는 항해 기간 중 43번과 44번 연구정점 사이의 Marginal Ice Zone 근처의 비교적 해빙 농도가 높은 지역의 두꺼운 리지 부분에 설치함.
- 위치 전송 간격은 매 10분이며, 이는 해빙의 자연스러운 표류를 세세하게 기록하기에 충분하고, 해빙의 평균 이동 속도인 수~수십 cm/s를 고려할 때, 위성 영상의 취득 시간과 매칭시키기에 적당함.
- 해빙 트래커는 나무 구조물의 최상단에 부착시키고, 해빙에 구멍을 뚫어 구조물을 안착시킴으로써 강풍에 의해 소실되지 않도록 하였으며, 구조물의 하단에는 쇠사슬로 무게추를 달아 해빙이 녹거나 파괴되어 해수면에 노출되었을 때는 더 이상 표류하지 않고 가라앉도록 설계함.




해빙 캠프 지역에 설치한 KP-001 트래커(좌)와 MIZ 인근 해빙에 설치한 KP-002 트래커(우)

- 다음은 해빙 캠프 지역에 설치한 KP-001 트래커의 움직임을 나타냄. 아라온이 해빙에 정박해있던 기간동안의 아라온과 트래커가 동일한 트랙으로 움직였기 때문에 트래커의 설치 및 작동은 양호한 상태로 판단됨. 해빙은 초반부 3일 정도는 천천히 표류하며 자유표류의 특징인 나선형 궤적을 그렸으나, 이후 2일

간은 상당히 빠른 속도로 남하한 것으로 보임. 이후 다시 느린 속도로 표류하며 나선형 궤적을 유지하면서 점차 동남진하였고, 위도 75.2, 경도 177.7을 중심으로 큰 원을 그리며 표류하다가 북동진함.

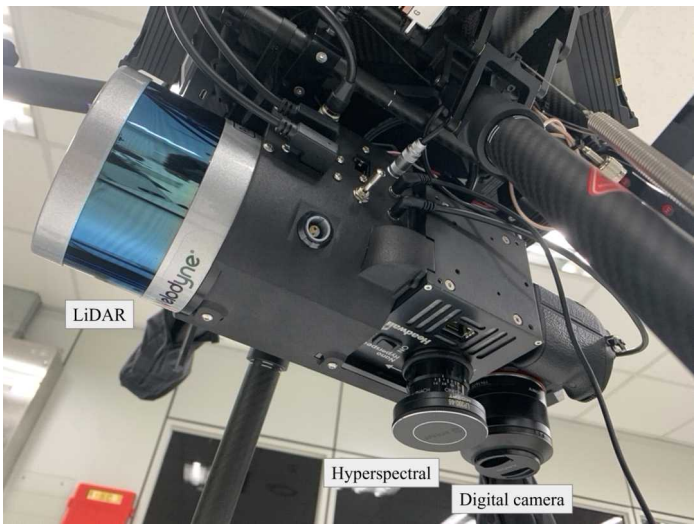


해빙캠프를 수행한 부빙에 설치한 KP-001 트래커의 표류 경로

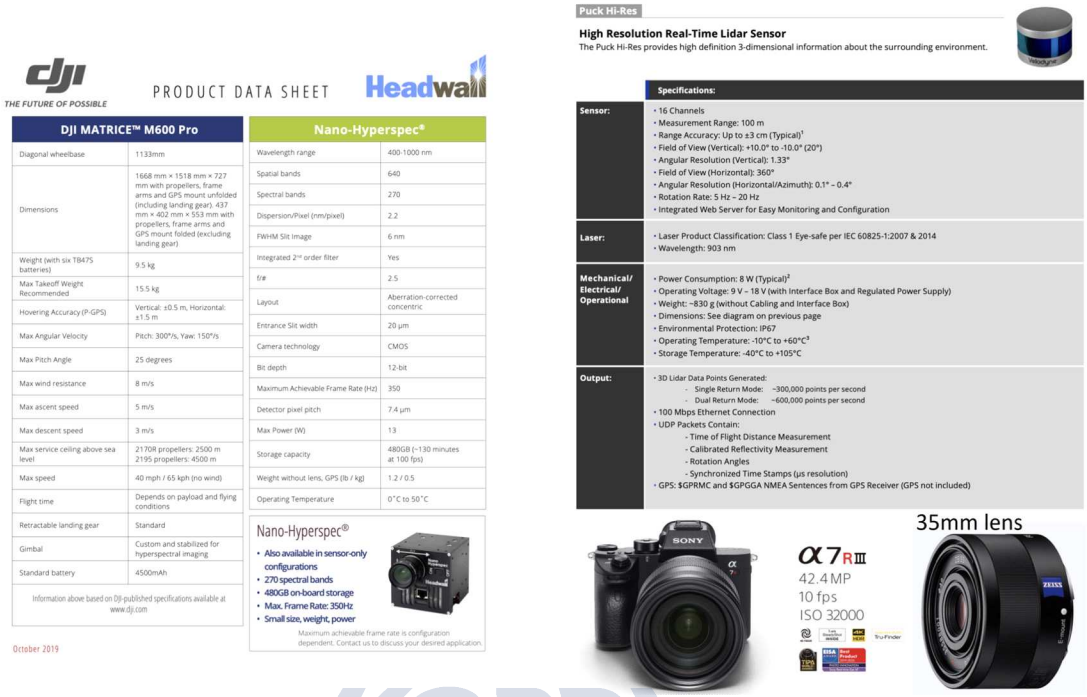
- 수집된 이동 궤적은 이 연구에서 개발한 해빙 이동 벡터 추출 기술(연구내용 2-1-1)의 검증에 활용할 계획이며, 현재 동일 기간에 촬영한 Sentinel-1 및 KOMPSAT-5 영상을 수집중에 있음.

□ 연구내용 3-2-4. 동토지역 초분광/라이다 자료 구축

- 초분광, 라이다, 고해상도광학 영상 동시 획득



본 연구에서 사용된 다중센서 시스템



DJI THE FUTURE OF POSSIBLE

PRODUCT DATA SHEET

Headwall

DJI MATRICE™ M600 Pro	
Diagonal wheelbase	1133mm
Dimensions	1668 mm × 1518 mm × 727 mm with propellers, frame arms and GPS mount unfolded (including landing gear). 437 mm × 402 mm × 553 mm with propellers, frame arms and GPS mount folded (excluding landing gear)
Weight (with six TB47S batteries)	9.5 kg
Max Takeoff Weight Recommended	15.5 kg
Hovering Accuracy (P-GPS)	Vertical: ±0.5 m, Horizontal: ±1.5 m
Max Angular Velocity	Pitch: 300°/s, Yaw: 150°/s
Max Pitch Angle	25 degrees
Max wind resistance	8 m/s
Max ascent speed	5 m/s
Max descent speed	3 m/s
Max service ceiling above sea level	2170R propellers: 2500 m 2195 propellers: 4500 m
Max speed	40 mph / 65 kph (no wind)
Flight time	Depends on payload and flying conditions
Retractable landing gear	Standard
Gimbal	Custom and stabilized for hyperspectral imaging
Standard battery	4500mAh

Information above based on DJI-published specifications available at www.dji.com

Nano-Hyperspec®	
Wavelength range	400-1000 nm
Spatial bands	640
Spectral bands	270
Dispersion/Pixel (nm/pixel)	2.2
FWHM Slit Image	6 nm
Integrated 2nd order filter	Yes
f/#	2.5
Layout	Aberration-corrected concentric
Entrance Slit width	20 µm
Camera technology	CMOS
Bit depth	12-bit
Maximum Achievable Frame Rate (Hz)	350
Detector pixel pitch	7.4 µm
Max Power (W)	13
Storage capacity	480GB (~130 minutes at 100 fps)
Weight without lens, GPS (lb / kg)	1.2 / 0.5
Operating Temperature	0°C to 50°C

Nano-Hyperspec®

- Also available in sensor-only configurations
- 270 spectral bands
- 480GB on-board storage
- Max. Frame Rate: 350Hz
- Small size, weight, power

Maximum achievable frame rate is configuration dependent. Contact us to discuss your desired application.

October 2019

Puck Hi-Res

High Resolution Real-Time Lidar Sensor

The Puck Hi-Res provides high definition 3-dimensional information about the surrounding environment.

Specifications:	
Sensor:	• 16 Channels • Measurement Range: 100 m • Range Accuracy: Up to ±3 cm (Typical)[1] • Field of View (Vertical): +10.0° to -10.0° (20°) • Angular Resolution (Vertical): 1.33° • Field of View (Horizontal): 360° • Angular Resolution (Horizontal/Azimuth): 0.1° – 0.4° • Rotation Rate: 5 Hz – 20 Hz • Integrated Web Server for Easy Monitoring and Configuration
Laser:	• Laser Product Classification: Class 1 Eye-safe per IEC 60825-1:2007 & 2014 • Wavelength: 903 nm
Mechanical/ Electrical/ Operational	• Power Consumption: 8 W (Typical)[2] • Operating Voltage: 9 V – 18 V (with Interface Box and Regulated Power Supply) • Weight: ~830 g (without Cabling and Interface Box) • Dimensions: See diagram on previous page • Environmental Protection: IP67 • Operating Temperature: -10°C to +60°C[3] • Storage Temperature: -40°C to +105°C
Output:	• 3D Lidar Data Points Generated: - Single Return Mode: ~300,000 points per second - Dual Return Mode: ~600,000 points per second • 100 Mbps Ethernet Connection • UDP Packets Contain: - Time of Flight Distance Measurement - Calibrated Reflectivity Measurement - Rotation Angles - Synchronized Time Stamps (µs resolution) • GPS: $GPRMC and $GPGGA NMEA Sentences from GPS Receiver (GPS not included)

SONY

α7RIII

42.4 MP

10 fps

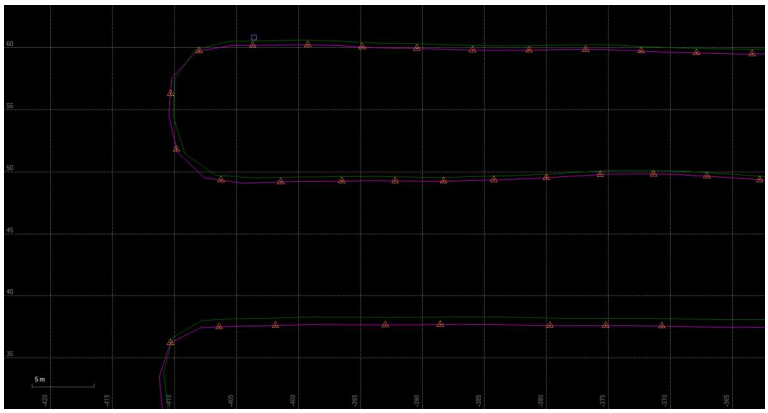
ISO 32000

35mm lens

ZEISS

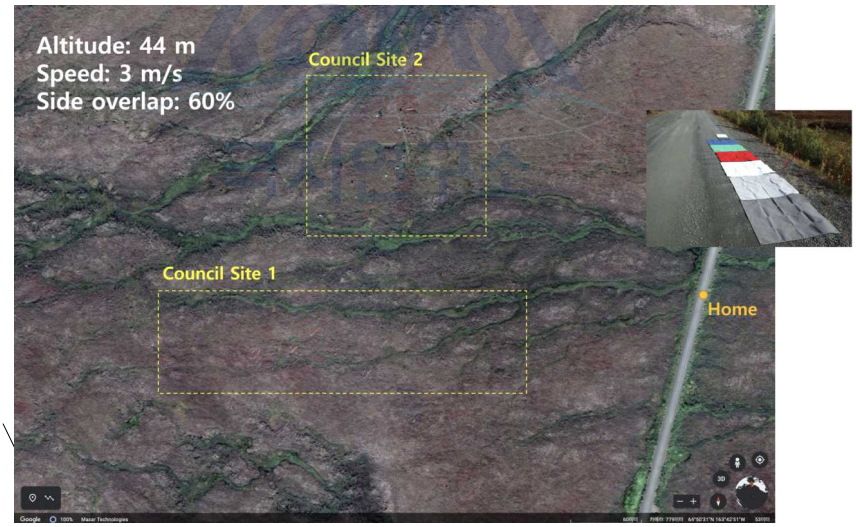
본 연구에서 사용된 무인기와 다중센서들의 스팩

- 후처리(Post-processed kinematic: PPK)를 통한 비행경로, 자세 정보 등 GNSS/IMU 자료 정확도를 향상을 시도함. 보정 전 위치오차는 약 1.5 - 3.0 m, X, Y, Z축 회전오차 각각 0.04, 0.04, 0.30。에서 보정 후 위치오차 0.02 - 0.05 m, X, Y, Z축 회전오차는 0.025, 0.025, 0.080。 수준으로 크게 향상. 이는 pushbroom scan 방식의 초분광센서의 기하보정에 큰 영향을 미치며, 향후 시계열 영상 구축시 별도의 지상 기준점 측량 없이 기하학적 정확도를 보장할 수 있는 수치임.

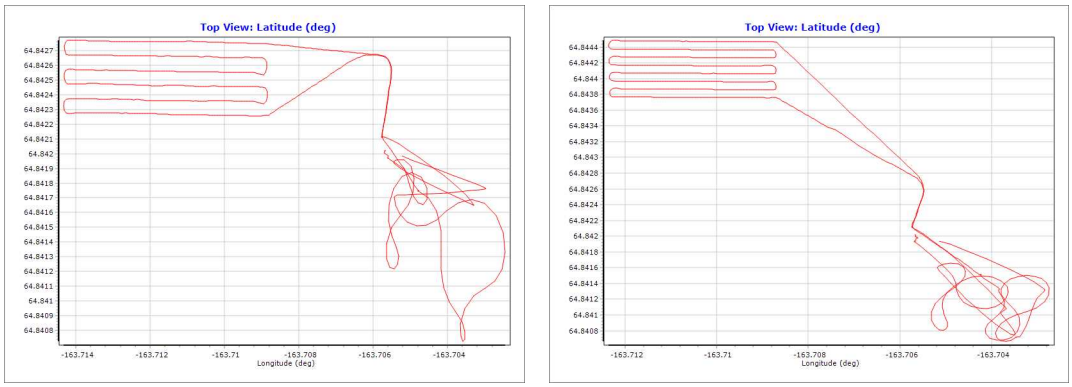


PPK정보를 이용하지 않았을 경우 (핑크색), PPK정보를 이용하여 후보정한 경로 (초록색) 예시

- 연구지역인 미국 알래스카주 카운실 지역은 극지연구소 대표 동토 모니터링 사이트로 스노우펜스, NDVI 및 CO2 측정 장치 등이 설치되어 수년간 모니터링 연구를 수행중인 지역임.

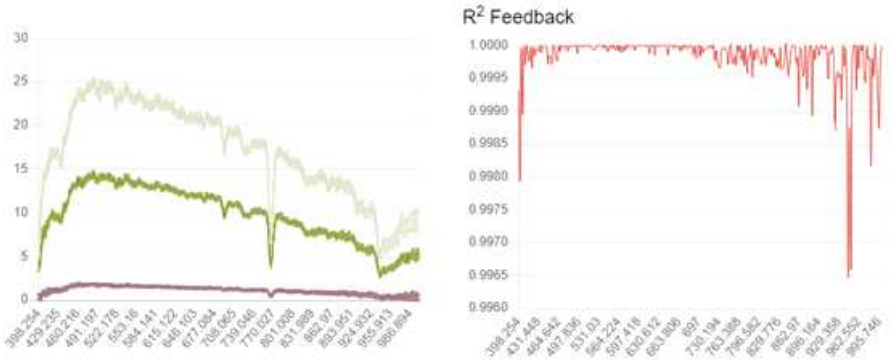


연구지역 개요 및 다중센서자료 획득 지역



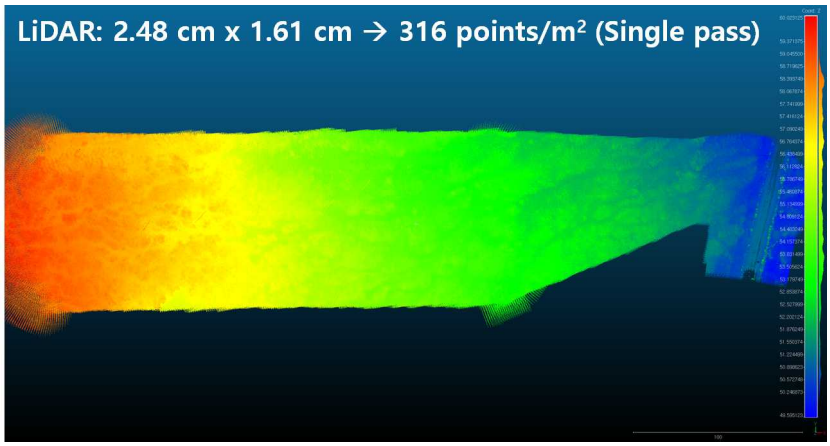
Council Site 1과 2의 데이터 획득을 위한 비행 경로 (우측 하단은 GNSS/IMU 보정을 위한 비행)

- 무인기 이착륙 지점 근처에 초분광영상의 방사보정을 위한 타겟 9종을 설치하여 초분광영상을 분광반사율값으로 보정하는데 사용함. 초분광영상의 방사보정은 두가지 단계로 이루어지는데, 첫째로 렌즈커버를 이용하여 센서에 의해 기록된 화소값을 Radiance값으로 변환하는 작업과 디텍터별 민감도 차이에의 의해 발생하는 줄무늬현상을 동시에 보정한 후, 분광반사 타겟의 분광반사율 정보를 이용한 밴드별 선형회귀모델을 통해 계산된 초분광영상의 분광반사율 변환 과정임.



파장별 분광타겟의 Radiance값(좌)과 선형회귀모델의 결정계수(우)

- 지표 기준 고도 약 44 m 높이에서 획득된 라이다 포인트 클라우드는 1 m^2당 약 316개의 포인트 (단일패스 기준), 고해상도 RGB 광학영상의 경우 0.6 cm의 공간해상도, 초분광영상은 4 cm의 공간해상도와 총 273개의 분광밴드 자료를 획득함. 또한 각 센서의 자료는 기하학적으로 매우 잘 정합됨.



Council Site 1의 라이다 포인트 클라우드

RGB mosaic: 0.6 cm GSD



Council Site 1의 고해상도 RGB 모자익 영상

VNIR mosaic: 4 cm GSD,
273 spectral bands from 400 – 1000 nm

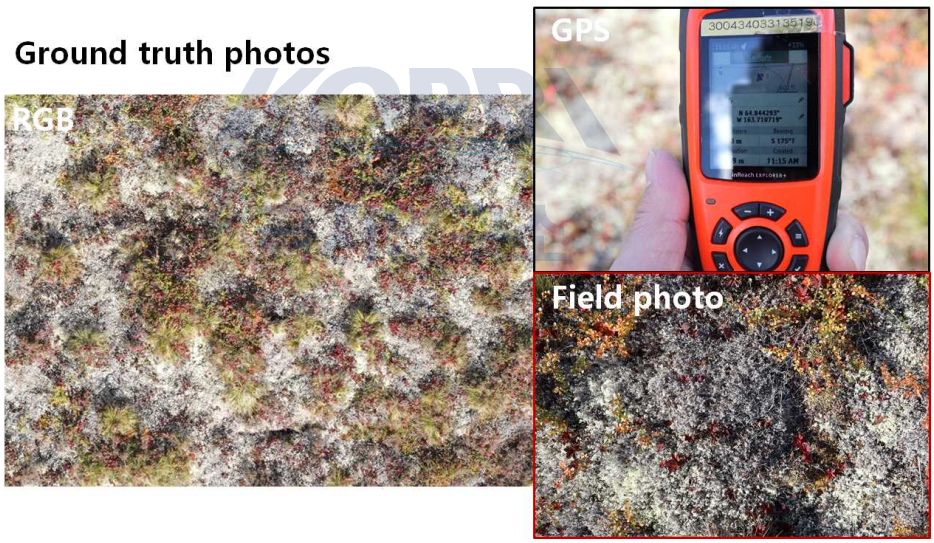


Council Site 1의 초분광 모자익 영상



RGB영상과 초분광영상의 기하학적 정합 확인

- 이 외에도 영상 분류 시 필요한 레이블 작업을 위한 지상 좌표와 현장 사진을 획득함.



지상에서 획득한 좌표, 근접 사진(우)과 무인기에서 얻은 영상의 비교(좌)

라. 2023년 4차년도 연구 요약

(1) 세부연구목표1. 북극해 결빙해역 해빙 요소 시공간 장기 변화 도출

□ 연구내용 1-1. 개발된 해빙 특성 산출기술을 적용하여 장기 해빙 특성 산출물 생산

○ 해빙유형

- 해빙의 유형은 생성환경 및 나이에 따라 여러 가지로 분류되며, 미국 NIC, 러시아 AARI, 캐나다 CIS, 유럽 EUMETSAT 산하 OSI-SAF 등 해외 유명 극지 연구 기관에서는 주기적으로 해빙 유형 지도를 발간함.
- 이 연구에서는 1단계에서 개발한 해빙 유형 산출 알고리즘을 Sentinel-1에 적용하여 KOPRI 고유 산출물을 생산하고, NIC 및 OSI-SAF의 산출물과 비교 평가를 수행함.
- 다음 도표는 KOPRI 알고리즘 흐름도를 나타내며, 1단계에서 개발한 기술에 더하여 SVM 분류를 통한 해수-해빙 이진화를 전처리 단계로 도입하여 전체 처리 과정을 반자동에서 자동으로 전환함.

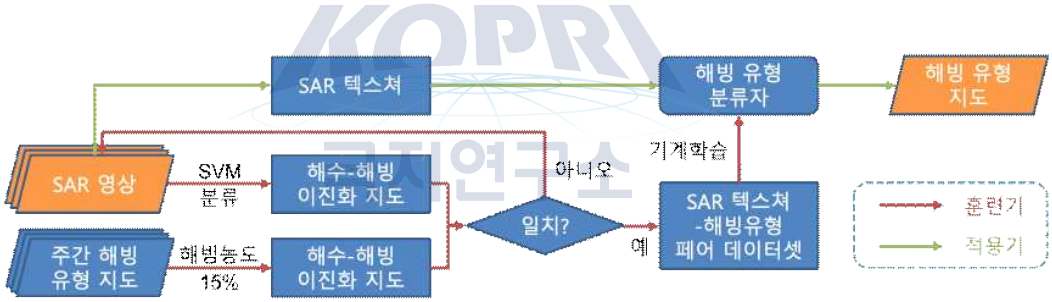


Figure 1-1-1. Flowchart of KOPRI algorithm for sea ice classification

- 텍스쳐는 영상 소공간에서의 픽셀값의 분포 특성으로, 다음 그림과 같이 단일 소공간에 대해 GLCM (Grey-Level Co-occurence Matrix) 계산을 통해 45도 단위의 방향으로 4개 측정 후 그 평균값을 취함. Haralick(1973)은 하나의 GLCM으로부터 13종의 텍스쳐를 구하는 Haralick 텍스쳐를 제안했으며, 이 연구에서는 이중편파(HH, HV)를 사용하므로 총 26종의 텍스쳐를 해빙 유형 분석에 사용함.

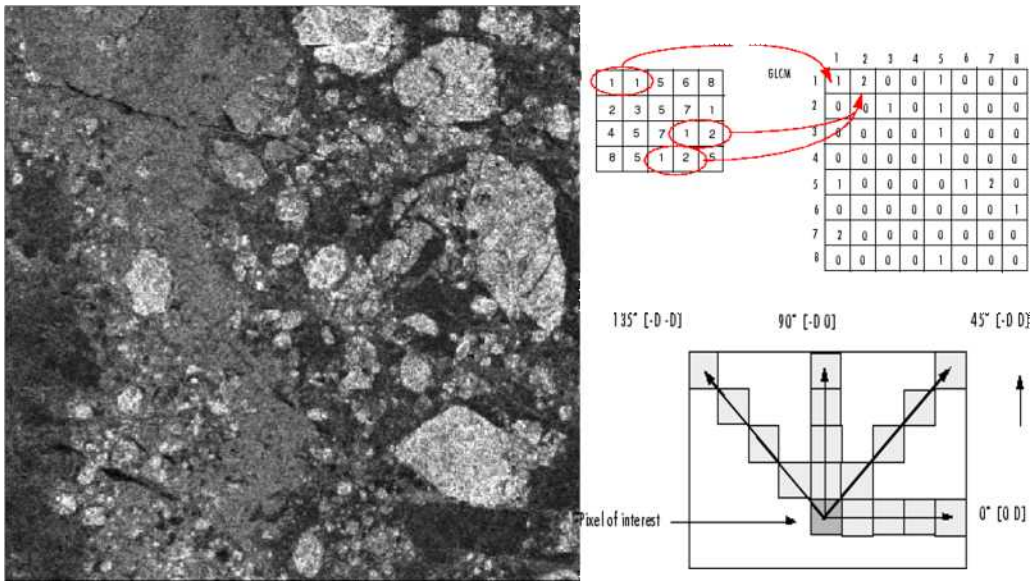


Figure 1-1-2. GLCM calculation for texture extraction

- 이중편파 영상은 각각 동일한 해빙 유형에 대해서 다른 텍스쳐 특성을 보이기 때문에 상호보완적임. 다음 그림은 동일 해빙에 대한 HH 편파와 HV 편파 영상 위에 NIC 해빙 유형 지도를 오버레이한 것임.

KOPRI 극지연구소

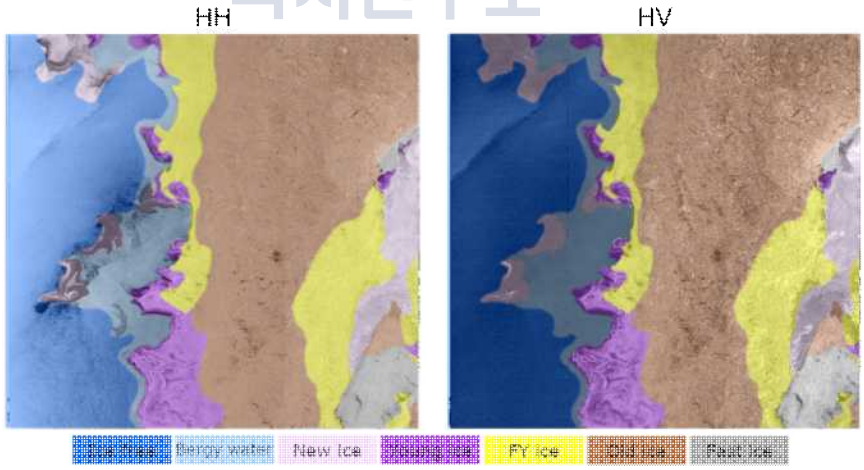


Figure 1-1-3. Difference in textures for sea ice classes in a dual polarization SAR image.

- 26종의 텍스쳐와 NIC 해빙 유형 지도의 5종 (open water, new-ice, young ice, first-year ice, old ice) 또는 3종 (open water, mixed first-year ice, old

ice) 분류 결과를 기계학습 시킴으로써 유형 분류자를 생성하고, 정확도를 평가함.

- 다음 히스토그램은 영상 내에 해수-해빙 경계선을 포함하는 146장의 SSIM과 수동선별한 46장의 SSIM을 비교함. 수동선별 영상의 SSIM 범위는 0.46~0.93 이었으며, 전체 데이터셋은 그보다 넓은 범위를 보임. 수동선별군 히스토그램은 약한 이중모드형을 보이며, 그 경계는 0.6 언저리였음. 이를 바탕으로 0.6~0.95 범위의 SSIM을 가지는 영상을 선별한 결과, 그 수는 95장이었음.

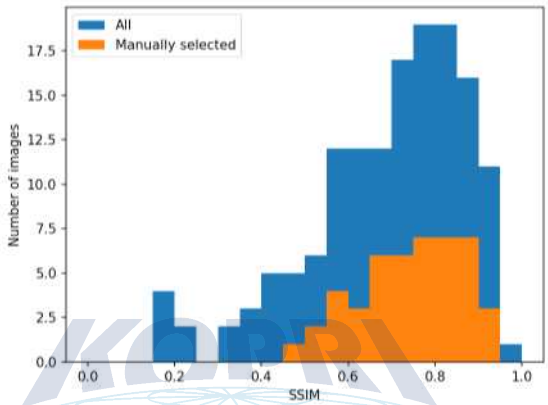


Figure 1-1-4. Ocean-Sea ice boundary matching results

- 전반적으로 두 방법이 거의 유사한 성능을 보이나, 자동선별을 통해서 1) 훨씬 많은 수의 훈련자료를 확보할 수 있으며, 2) 분류자의 주기적인 업데이트를 매우 간단하게 할 수 있는 장점이 있음.
- 해빙 표면이 완전히 얼었거나 덜 녹은, 또는 재결빙한 시기인 9월~5월은 평균 정확도 87%로 3종 분류, 60%로 5종 분류가 가능하였음. 해빙 표면이 녹아 해수와의 구분이 모호해지는 6월~8월은 평균 정확도 78%로 3종 분류가 가능하였음. 다만 해수-해빙 구분의 2종으로 단순화하면 평균 정확도는 99%까지 상승함.

Table 1-1-1. Accuracy result of classification of 5 winter ice types (independent verification

독립검증		예측				
		Open water	New ice	Young ice	First-year ice	Old ice
실제	Open water	**89.1**	1.3	3.3	6.4	0.0
	New ice	45.1	**31.9**	6.0	15.1	2.0
	Young ice	7.1	6.3	**47.6**	28.7	10.4
	First-year ice	5.6	3.8	32.8	**38.4**	19.3
	Old ice	0.3	0.5	1.9	4.6	**92.8**

Table 1-1-2. Acuracy result of classification of 3 summer ice types (independent verification)

독립검증		예측		
		Open water	Mixed first-year ice	Old ice
실제	Open water	**90.6**	8.1	1.3
	Mixed first-year ice	3.4	**55.6**	41.0
	Old ice	1.4	11.2	**87.5**

Figure 1-1-3. Accuracy result of classification of 3 winter ice types (independent verification)

독립검증		예측		
		Open water	Mixed first-year ice	Old ice
실제	Open water	**91.4**	8.6	0.0
	Mixed first-year ice	9.4	**75.0**	15.6
	Old ice	0.3	6.3	**93.3**

KOPRI 극지연구소

- 다음 그림은 각 월에 대한 해빙 분류 결과를 나타냄. 월별 변동의 연속성으로 판단할 때 분류 결과의 일관성은 우수함.

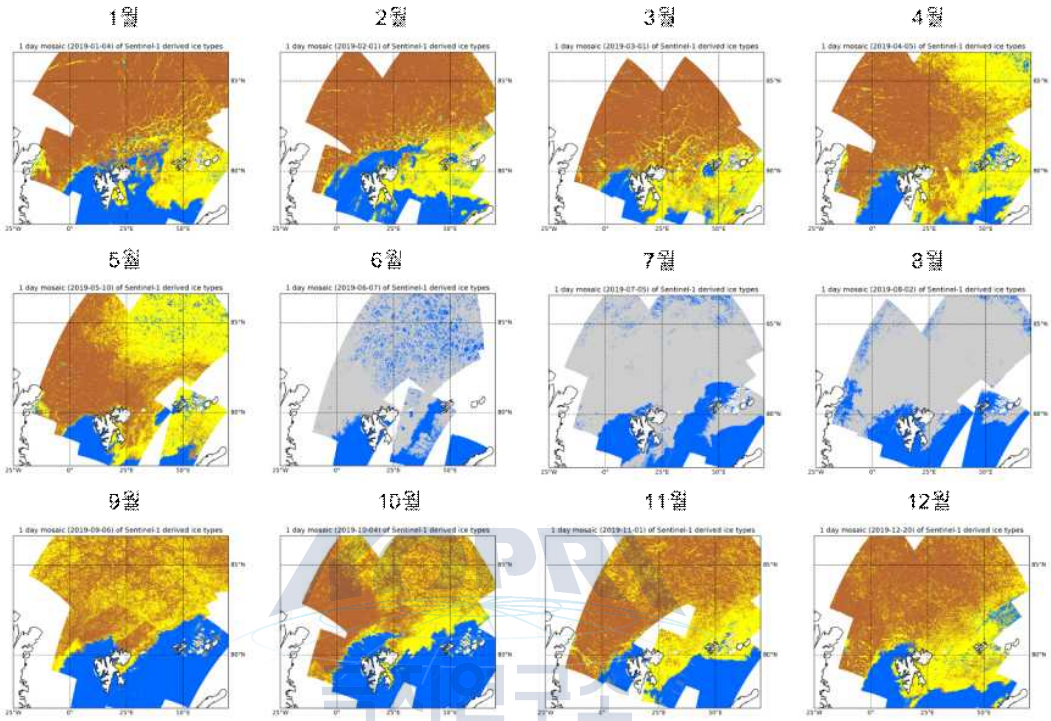


Figure 1-1-5. Monthly sea ice classification results

- 관측 소스인 Sentinel-1은 원래 Sentinel-1A와 Sentinel-1B 두 기로 구성된 위성이었으나, 현재 Sentinel-1B의 갑작스런 기기 오작동으로 인한 운영 중단으로 전북극 데이터가 확보되지 않고 있음. 대체 위성인 Sentinel-1C 또한 기존 예정보다 늦게 2024년도 후반에 발사될 계획이므로, 2단계 연구에서 해빙 유형 분류는 부득이하게 다른 관측 소스의 산출물을 사용해야 할 것으로 판단됨.

○ 해빙이동/변형

- 해빙 이동 벡터는 수동형 마이크로파 위성 자료를 통해 25km 해상도로 생산되고 있으나, 이는 부빙간 상대적 운동(발산, 수렴, 보존)에 의한 해빙의 변형상(pressure ridge, lead)을 관측할 수 없음.
- C-밴드 영상레이더의 광역 관측 모드는 수십 미터급 해상도로 북극해 전역을

수 일 주기로 관측할 수 있으며, 영상 페어를 이용하여 해빙의 상대적 움직임을 수 km 해상도로 계산 가능함 (R. Kwok, 1990). 그러나, 현재 영상레이더 기반으로 북극해 전체의 해빙 이동 벡터를 제공하는 정기 산출물은 유럽 Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)에서 C-밴드인 Sentinel-1만을 이용해서 시험적으로 제공되는 것이 유일함.

- 이 연구에서는 1단계에서 개발한 해빙 이동 벡터 산출 알고리즘을 동일하게 Sentinel-1에 적용하여 KOPRI 고유 산출물을 생산하고 CMEMS 자료와 1:1로 비교 평가를 수행함.
- 다음 도표는 KOPRI 알고리즘 흐름도를 나타내며, 검은색은 CMEMS 알고리즘과의 공통점을, 파란색은 KOPRI 알고리즘의 차별점을 의미함.

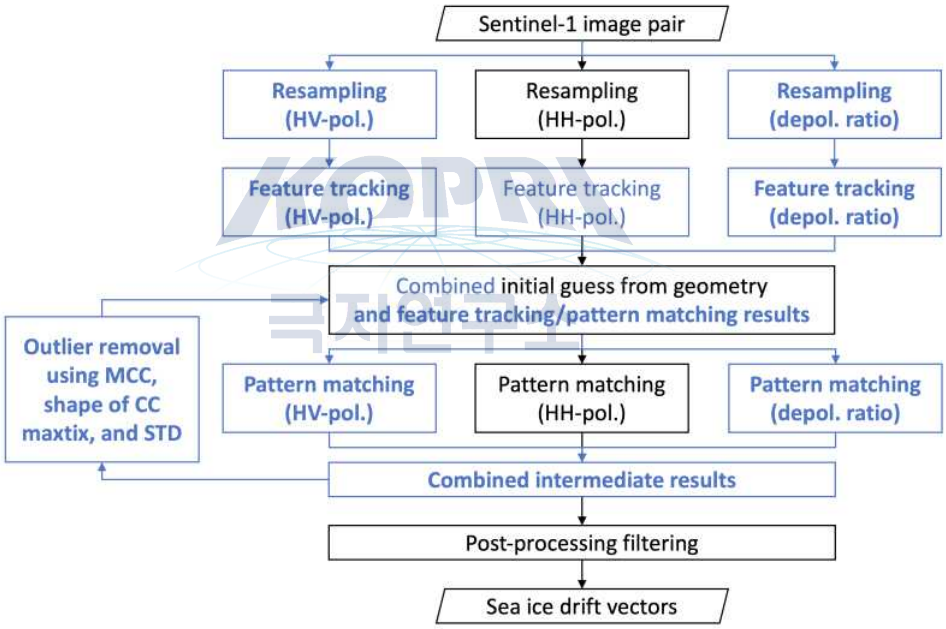


Figure 1-1-6. Flow chart for sea ice drift vector calculation

- 기본적으로 KOPRI 알고리즘이 CMEMS 알고리즘 대비 가지는 장점은, 1) 단일편파(HH) 대신 이중편파(HH, HV) 및 편파비(HV/HH)를 사용하여 총 벡터 수 증가, 2) 촬영기하만으로는 예측할 수 없는 리드, 리지 등 변형에 의한 영상 내 해빙의 상대적 이동을 피쳐트래킹을 통해 선탐지하여 패턴매칭 적용을 위한 초기장 구성에 있음.
- 다음 그림은 공간 합성 전 단일 영상에서의 CMEMS 산출물과 KOPRI 산출

물(단일채널 및 멀티채널)에서의 해빙 이동 벡터를 나타냄. CMEMS 산출물 대비 KOPRI 단일밴드 산출물에서는 초기장 개선에 의해 영상 내 해빙의 상대적 이동에 의한 관측 실패영역을 줄일 수 있음을 볼 수 있으며, KOPRI 다중채널 산출물에서는 단일밴드 대비 현저히 증가한 유효 벡터 수를 확인할 수 있음.

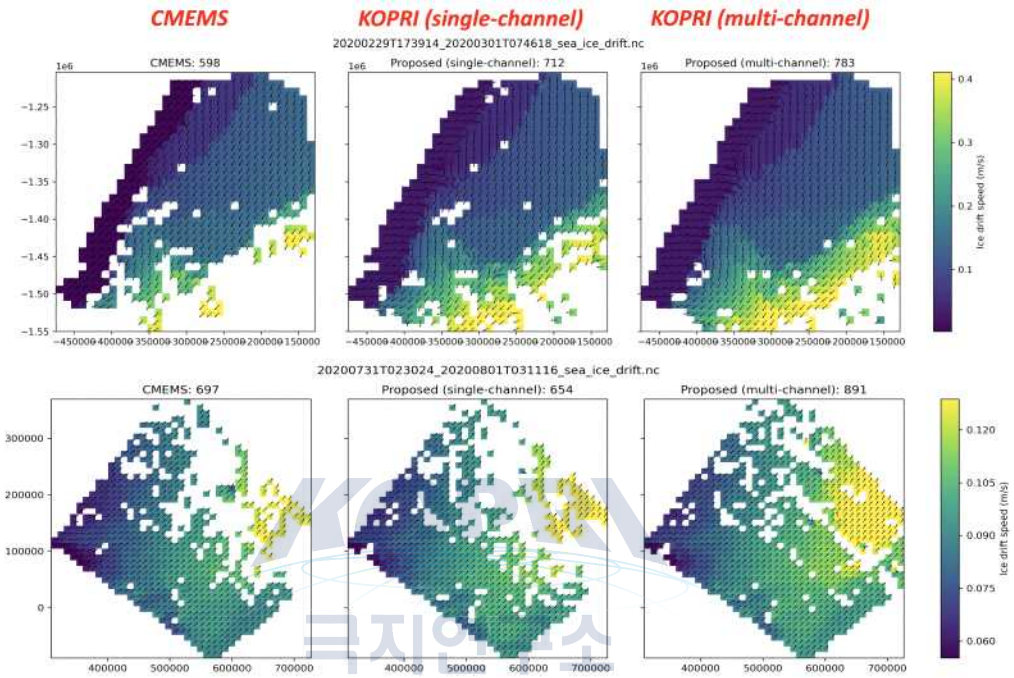


Figure 1-1-7. Performance comparison of CMEMS outputs and KOPRI results.

- 다음 도표는 CMEMS 산출물 대비 KOPRI 산출물의 우수성을 월별로 나타냄. KOPRI 멀티채널 산출물은 전 시기에 걸쳐 CMEMS 산출물보다 우수하며, 해빙의 표면 특성이 해수와 가장 많이 유사해지는 융빙말/결빙초인 9월에 특히 20% 이상 많은 유효 벡터 추출이 가능함.

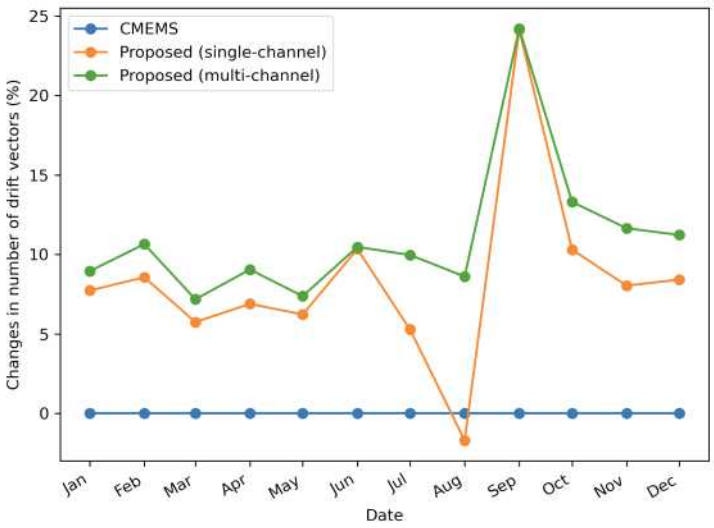


Figure 1-1-8. Comparison of the performance of CMEMS and KOPRI results by observation period (monthly)

- 다음 도표는 CMEMS 산출물에서는 관측 실패했으나 KOPRI 산출물에서는 관측 가능했던, 증가된 해빙 이동 벡터에 대해서 관측 기원이 어느 채널에 있었는가를 나타냄. 전 시기에 걸쳐 CMEMS에서는 사용하지 않았던 교차편파(HV)에 의한 기여가 평균 50% 이상으로 가장 많았으며, 편파비(HV/HH) 또한 평균 10%를 상회하는 기여를 했음을 확인할 수 있음.

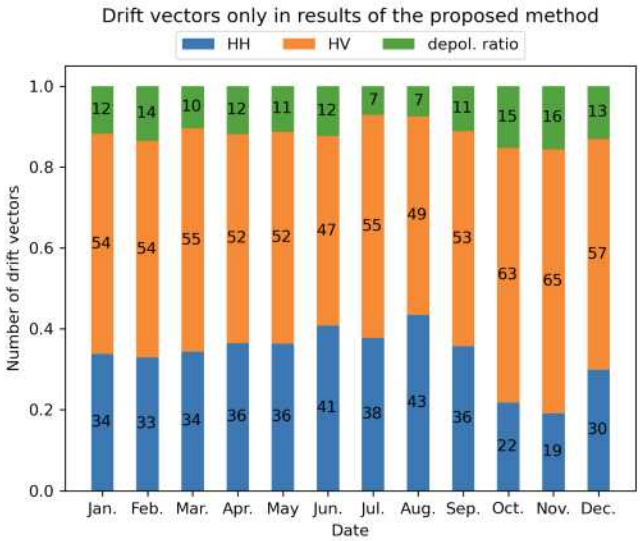


Figure 1-1-9. Contribution of additional sea ice drift vectors from KOPRI outputs in terms of polarization channels.

- KOPRI 산출물 개발을 통해 해빙 변형의 관측 상세화 또한 가능함. 다음 그림은 CMEMS 산출물 기반 해빙 변형과 KOPRI 산출물 기반 해빙 변형을 나타냄.

KOPRI 극지연구소

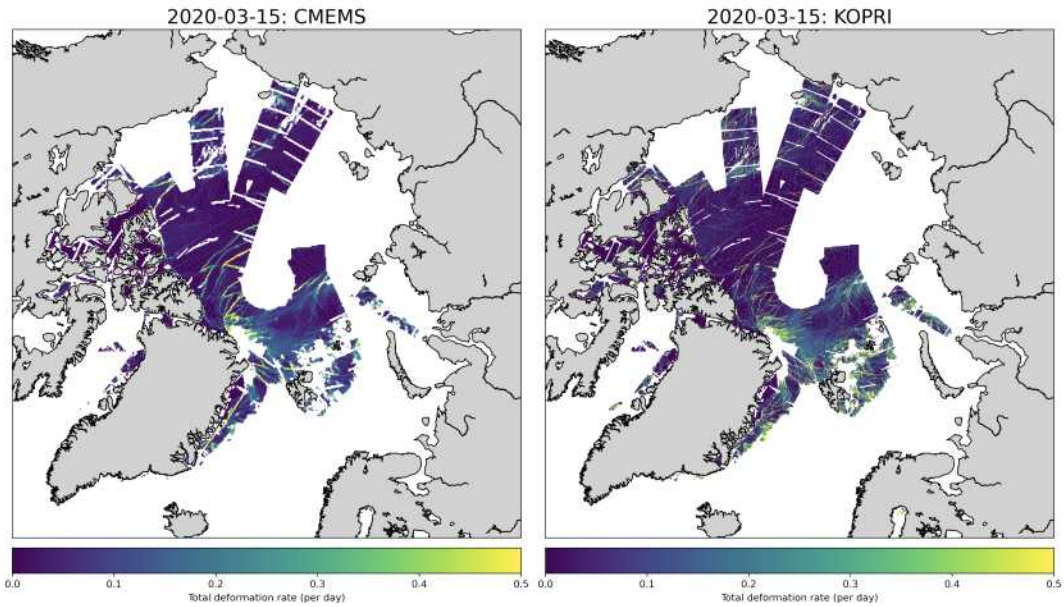


Figure 1-1-10. Comparison of sea ice deformation rate between CMEMS and KOPRI results.

- 관측 소스인 Sentinel-1은 원래 Sentinel-1A와 Sentinel-1B 두 기로 구성된 위성이었으나, 현재 Sentinel-1B의 갑작스런 기기 오작동으로 인한 운영 중단으로 전북극 데이터가 확보되지 않고 있음. 대체 위성인 Sentinel-1C 또한 기존 예정보다 늦게 2024년도 후반에 발사될 계획이므로, 2단계 연구에서 해빙 이동/변형은 부득이하게 다른 관측 소스의 산출물을 사용해야 할 것으로 판단됨.

○ 해빙두께

- 북극 해빙두께는 AMSR 수동 마이크로파 위성자료의 밝기온도차이를 활용하여 산출함.

- 먼저 해빙의 수면 위 해빙의 높이 freeboard는 1단계에서 개발된 다중선형회귀식을 사용하여 계산함.

$$h_f = a_1 GR(10.7,6.9) + a_2 GR(36.5,18.7) + b_1$$

- 여기서, h_f는 수면 위 해빙의 높이, a_1, a_2, b_1는 월별 회귀계수, $GR(10.7,6.9), GR(36.5,18.7)$은 각각 AMSR 위성의 10.7V와 6.9V채널간, 36.5V와 18.7V 채널간의 정규화된 밝기온도차이를 뜻함.

- 계산된 h_f는 정역학평형 방정식에 대입하여 전체 해빙두께로 변환함.

$$h_i = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_i} h_f - \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_w - \rho_i} h_{fs}$$

- 여기서, h_i는 전체 해빙두께, ρ_w, ρ_i, ρ_s는 물, 해빙, 눈의 밀도값, h_{fs}는 눈 두께(기후값 사용)를 뜻함.

- 상기 방법을 활용하여 2012년 11월부터 2022년 3월까지, 매년 11월부터 3월 기간의 10년 월간 장기산출물 25 km 공간해상도 생산함.

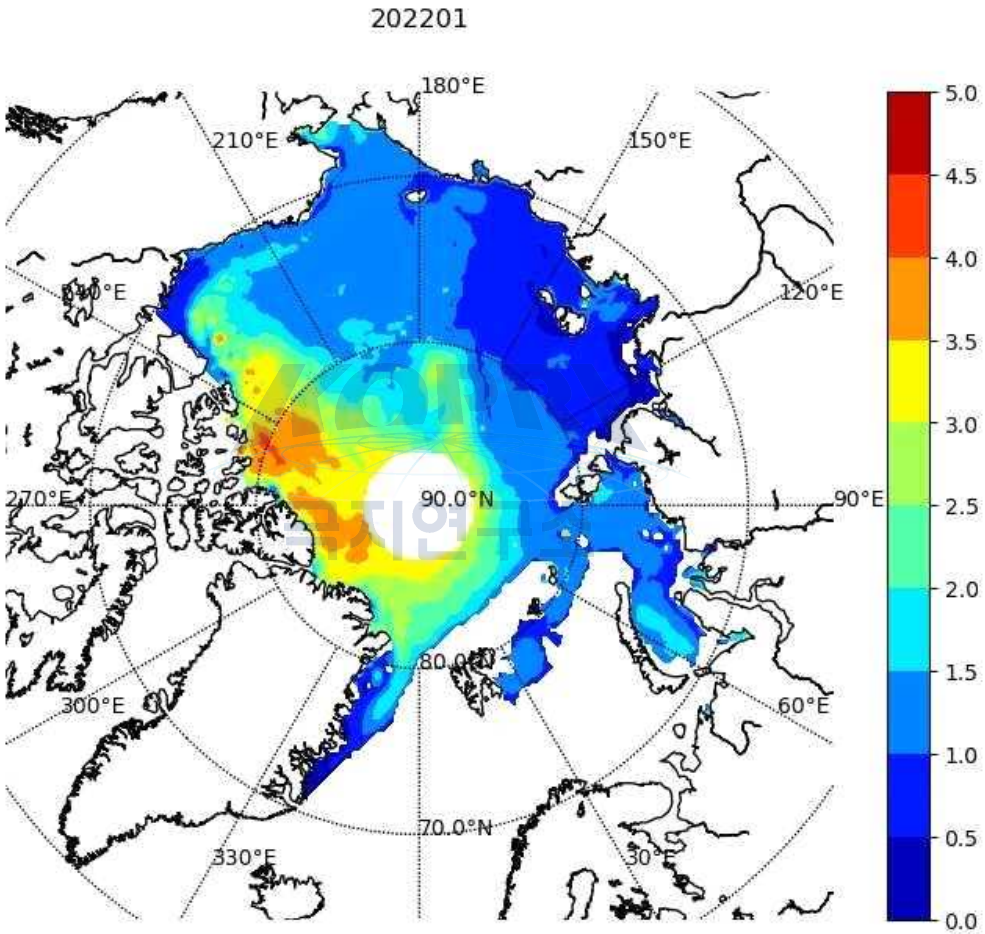


Figure 1-1-11. Montnly average sea ice thickness for January, 2022

○ 해빙강도

- 해빙의 굽힘강도는 부러지기 전까지 가해진 최대 힘과 같으며 극지방을 항해하는 선박이나 구조물의 성능과 안전성을 평가할 때 주로 사용됨. 1단계에서 Sentinel-1 C-Band SAR 영상을 활용한 고해상도 굽힘강도와 해빙두께와 얼음

평균온도를 활용하여 독립적으로 제작된 대체산출물 중 장기 분석을 위해 두께+온도 대체산출물을 본 연구에서 생산함.

- 해빙의 굽힘강도 얼음의 평균 온도와 bulk salinity에 비례한 brine volume과 밀접한 관계가 있음. 굽힘강도를 산출하기 위해 해빙 두께를 기반으로 bulk salinity를 계산하고 얼음의 평균 온도와 결합하여 brine volume을 산출함. 그 후 Timco & O'Brien에서 제공하는 경험식에 대입하여 굽힘강도 산출물을 제작하였음.

- 해빙두께는 AWI에서 제공하는 SMOS-CryoSat L4 Sea Ice Thickness를 사용함. SMOS는 비교적 얇은 얼음에서 높은 정확도를 보이고 CryoSat-2는 두꺼운 얼음에서 높은 정확도를 보이기 때문에 각 산출물의 장점을 활용하고자 병합됨. 병합된 산출물은 매일 주별 평균이며 25km 공간해상도 EASE2 그리드에 투영되어 제공됨. 2010년 10월부터 제공되며 여름철을 제외한 10~4월(겨울) 기간동안 제작됨.

- 얼음의 평균 온도는 ERA5 재분석자료의 2m temperature Single levels 자료를 활용하여 계산함. ECMWF의 ERA5는 1940년부터 현재까지 기간을 포괄하는 재분석자료로써 코페르니쿠스 기후변화 서비스(C3S)에서 제작됨. ERA5 산출물은 시간별 추정치를 제공하며 30km 그리드로 투영되어 제공됨. 자료별 공간을 통일하기 위해서 EASE2 그리드에 투영시켜 강도를 계산함. 얼음의 평균온도는 주로 해수면 아래 잠겨있는 해빙의 하단부는 해수의 얼음점인 섭씨 -1.8도로 가정하고 표면부터 하단까지 선형으로 보간 후 계산함.

- 본 연구에서는 겨울철 자료에 한정된 SMOS-CryoSat 해빙 두께 자료의 기간인 2010년 10월 15일부터 2023년 4월 19일까지 13년 동안 10월~4월 일별 북극 전역 해빙강도 산출물 25 km x 25 km 공간해상도로 제작함.

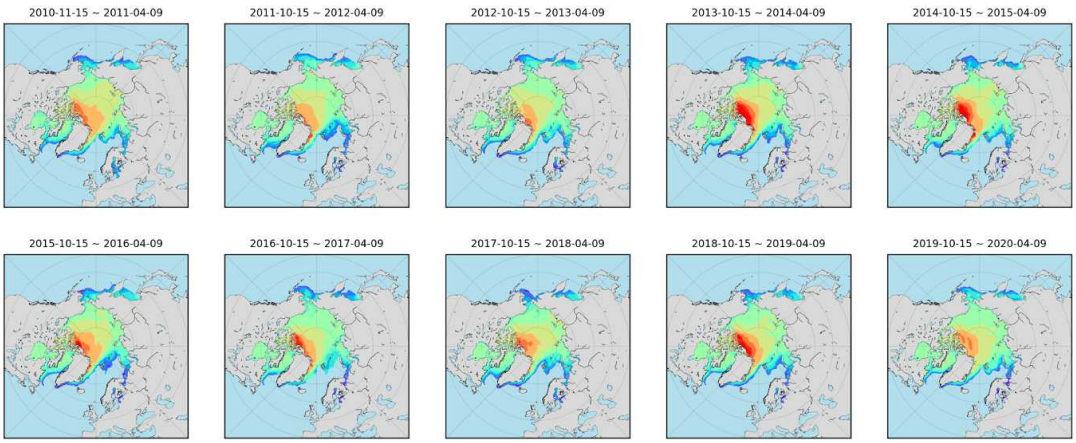


Figure 1-1-12. Annual averages of the flexural strength of Arctic sea ice.

□ 연구내용 1-2. 해빙 산출물 북극해 전역 시공간 변동 특성 분석

○ 해빙 유형

- 해빙 유형에 대한 장기 산출물은 대표적으로 유럽기상위성기구(EUMETSAT)의 해양/해빙위성활용센터(OSI-SAF)의 OSI-403-d가 있음. 이는 2005년부터 현재까지 18년간의 해빙 유형을 1일 단위로 제공함. 본 연구에서는 북극해 결빙해역 해빙 유형의 시공간 변동 분석을 위해 이 자료를 활용함.

KOPRI 극지연구소

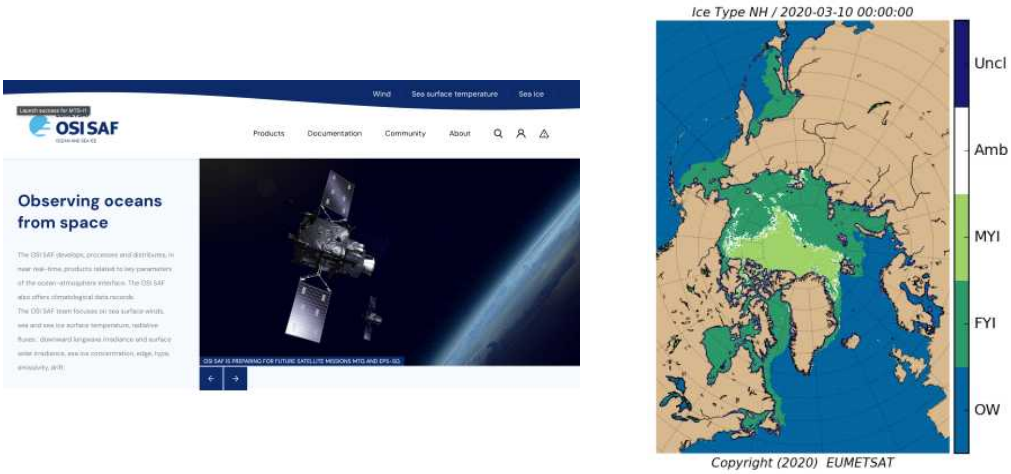


Figure 1-2-1. Homepage of OSI-SAF(left) and an example of OSI-403-d product (right).

- OSI-403-d 산출물은 다음 표와 같은 특성을 가짐.

Table 1-2-1. Product characteristics of OSI-403-d

관측 소스	산출물 레벨	시간 범위	시간 해상도	공간 범위	공간 해상도
SSMIS, AMSR-2 ASCAT	Level-3	2005-현재	1일 (24시간)	전북극	10 km

- 이 연구에서는 국제수로기구 IHO가 발간한 23번째 특별 간행물 “Limits of Ocdeans & Seas”에서 제안된 해양과 바다의 경계 중 북위 60도 이상을 포함하는 해역에 대하여 소영역으로 세분화하여 분석을 수행함. 다음 그림은 해당 소영역을 나타냄.

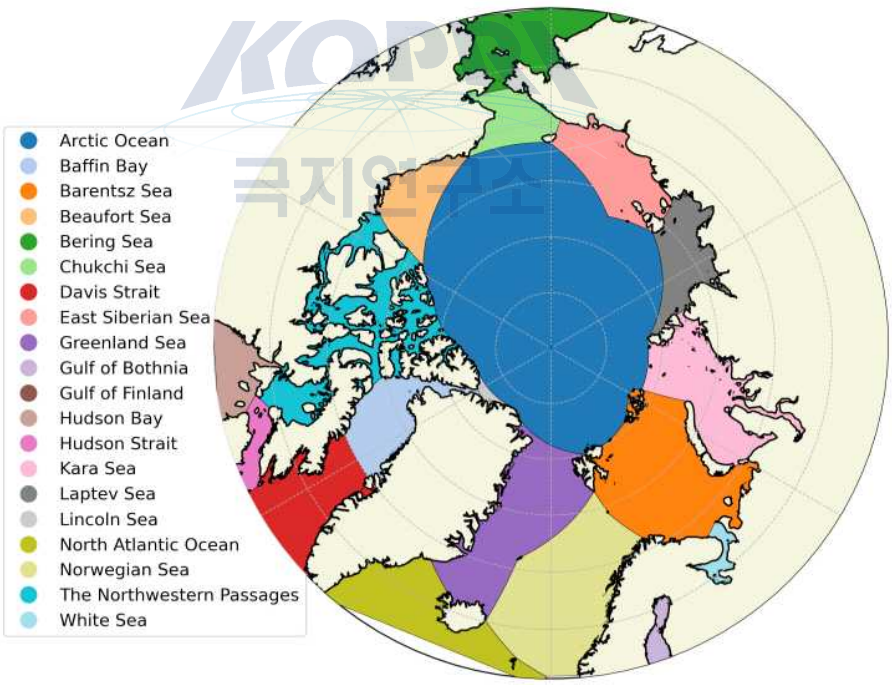


Figure 1-2-2. Sea boundaries from IHO

- 유형은 이동이나 두께, 강도와 같은 다른 해빙 변수들과는 달리 정량적 수치가 아니기 때문에 변동 특성을 정량화하기 위해서 유형 자체 대신 단년빙과

다년빙의 상대비, 즉 단년빙면적을 다년빙면적으로 나눈 값인 다년빙비율을 사용하여 분석을 진행함.

- 북극해 해빙은 1년 주기로 결빙과 결빙과 융빙을 반복하며, 평균적으로 3월에 최대 면적, 9월에 최소 면적을 보임. 그러나 OSI-403-d 산출물의 해빙 유형 분류 결과는 결빙기에 한하여 높은 신뢰도를 가지며, 융빙기에는 신뢰하기 어려움. 이는 NIC나 AARI등 해빙 지도를 발간하는 다른 유수 기관의 산출물에서도 마찬가지임. 이에 이 연구에서는 결빙 초기인 10월부터 결빙 말기인 4월을 시계열의 시작과 끝으로 가정함. 따라서 OSI-403-d 산출물에 대한 분석은 2005년 10월 ~ 2006년 4월이 초년도, 2021년 10월 ~ 2022년 4월이 말년도이며, 총 16개 연주기에 대한 분석을 수행함.

[계절성 변동 특성]

- 다음 그림은 16개 연주기에 대해 해역 전체의 평균적인 월별 다년빙비율을 표현한 히트맵임. 색이 진할수록 속도가 높으며, 전반적으로 10월에 가장 높은 다년빙비율, 4월에 가장 낮은 다년빙비율을 보임. 연간 변화는 월간 변화에 비해 적음.

KOPRI 극지연구소

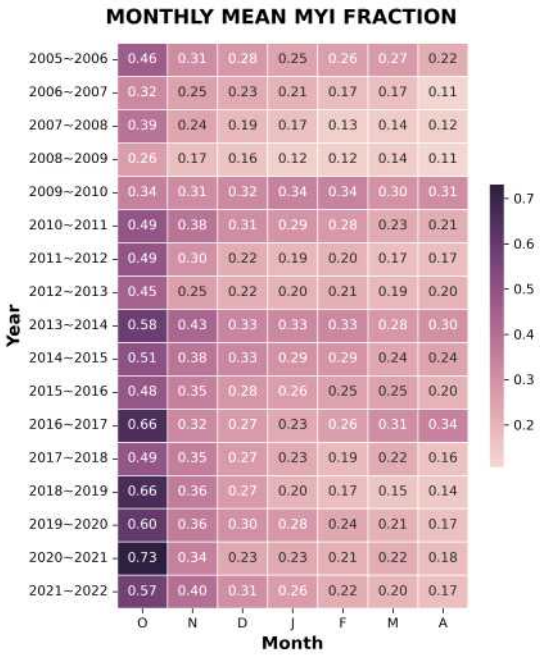


Figure 1-2-3. Heatmap of the monthly average of mutliyear ice fraction

KOPRI 극지연구소

- 다음 그림은 위 히트맵을 보다 간결하게 그래프로 표현한 것임. 연주기 전체 기간에 대한 평균에 대비하여 도시한 특정 연주기들은 해빙량 감소로 인한 다년빙비율이 낮은 시기를 선별한 것인데 그 결과가 모두 최근년도들임. 즉, 시계열 자료에서 최근에 가까울수록 꾸준히 평균 다년빙비율이 낮아지고 있음. 그러나 결빙 극초기인 10월에 높은 다년빙비율을 보이는데, 이는 단년빙의 결빙면적이 상대적으로 적어지거나 지연되어감을 지시함. 전반적으로 결빙 초기에 다년빙비율이 빠르게 줄어들며, 12월 이후 서서히 안정화됨.

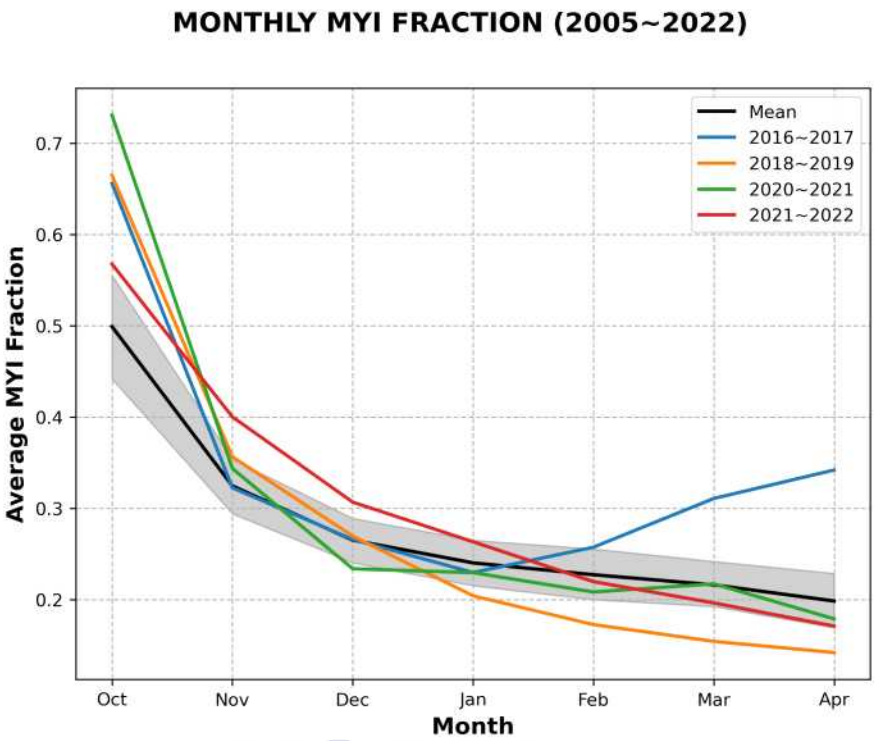


Figure 1-2-4. Monthly average of mutliyear ice fraction for the entire Arctic Ocean

KOPRI
극지연구소

- 북극해에서 연중 상시 해빙이 분포하는 대표 지역은 중앙북극해(Arctic Ocean)이며, 이 지역에서의 다년빙비율을 별도로 분리하면 다음 그림과 같음. 해당 지역은 타 지역에 비해 해빙 농도의 변화가 적고, 열역학적으로 가장 에너지가 낮아 중앙북극해는 다른 소영역보다 다년빙이 많이 분포하기에 상대적으로 전반적으로 다년빙비율이 높음. 그러나 위의 북극해 전체 평균과는 달리 12월 이후에도 다년빙비율의 감소율이 높은데, 이는 중앙북극해로부터 다른 소영역으로의 해빙 유출을 간접적으로 지시함. 특히 이 감소율은 최근년도일수록 심화되는 경향이 보임.

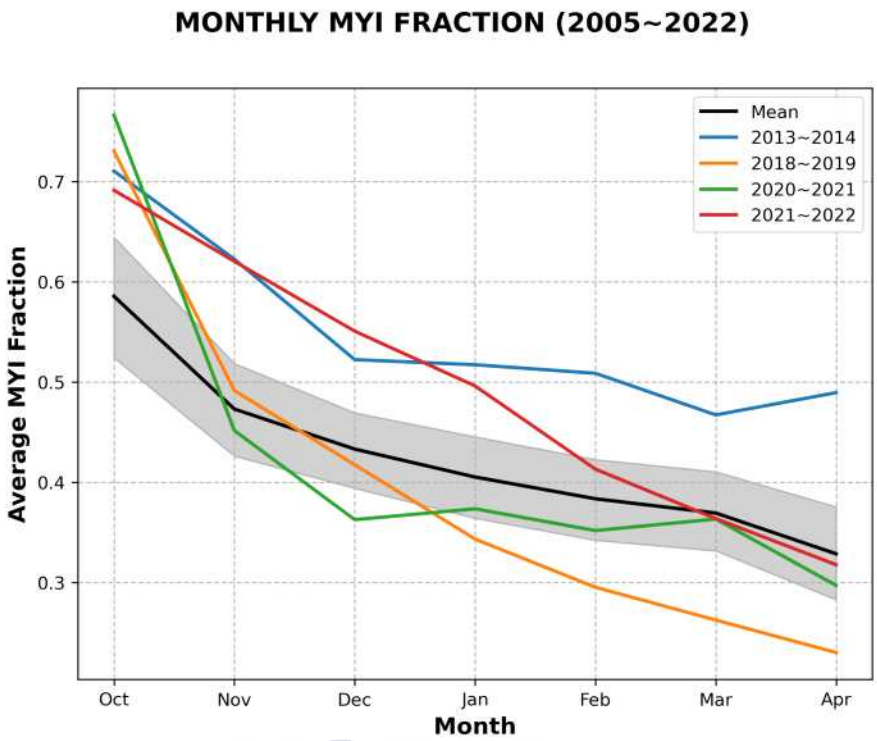


Figure 1-2-5. Monthly average of mutliyear ice fraction for the central Arctic Ocean only

KOPRI 극지연구소

[장기 변동 특성]

- 다음 그림은 16개 연주기에 대해 해역 전체 평균 일별 및 연별 평균 다년빙 비율을 나타냄. 일별 다년빙비율 그래프에 기재한 숫자는 해당 연주기에서 최대 다년빙비율이 관측된 날짜이며, 대체로 계절성 변동 분석에서 전술한 10월 초에 해당함.

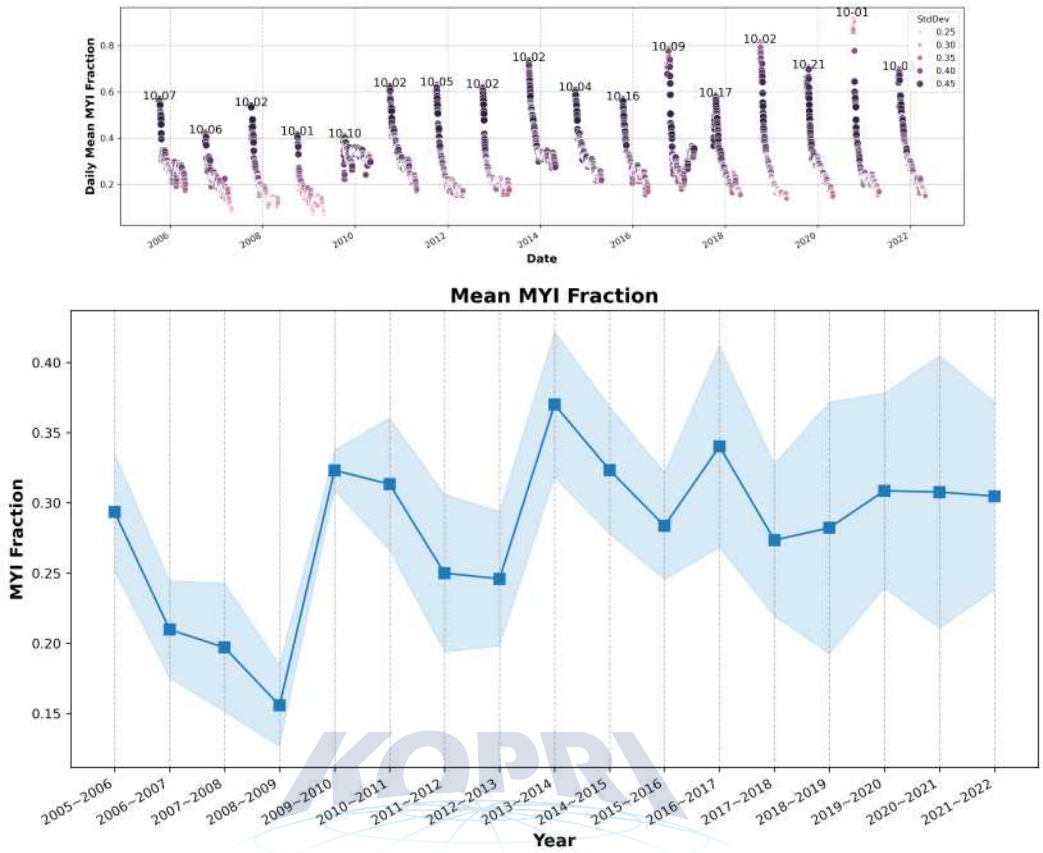


Figure 1-2-6. Daily and annual average of mutliyear ice fraction for the entire Arctic Ocean

- 다년빙비율은 계산상 0.5%/decade로 미세하게 증가하는 것처럼도 보이나 R^2=0.14로 신뢰할 수 없음. 그보다는 연간 변화가 크게 나타나는데, 시계열의 후반부에는 그렇지 않은 것으로 보다 관측자료의 소스 및 산출물 생성 알고리즘의 품질 향상에 의한 영향이 크다고 판단됨.
- 마찬가지로 전체 해역 중에서 특수성을 가지는 중앙북극해에 대한 결과를 도시하면 다음 그림과 같음.

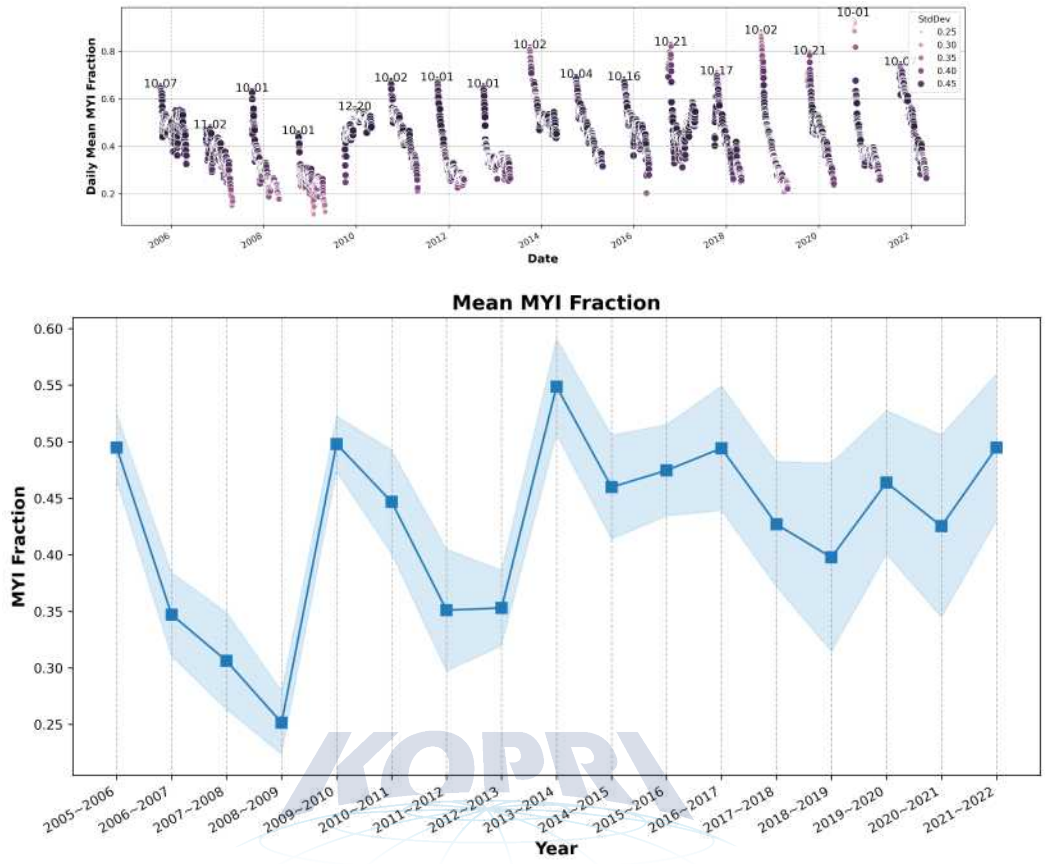


Figure 1-2-7. Daily and annual average of mutliyear ice fraction for the central Arctic Ocean only

- 다년빙비율은 동일하게 계산상 0.5%/decade로 미세하게 증가하는 것처럼도 보이나 R^2=0.22로 여전히 신뢰할 수 없음. 시계열의 후반부에서는 전반부보다는 안정적인 패턴으로 증가 양상이 보이는데, 이에 대해서는 다른 해빙 및 기상 변수들과 대조하여 추가 해석이 필요함.
- 다음 그림은 16개 연주기에 대한 소영역 각각에 대한 연평균 다년빙비율을 나타냄.

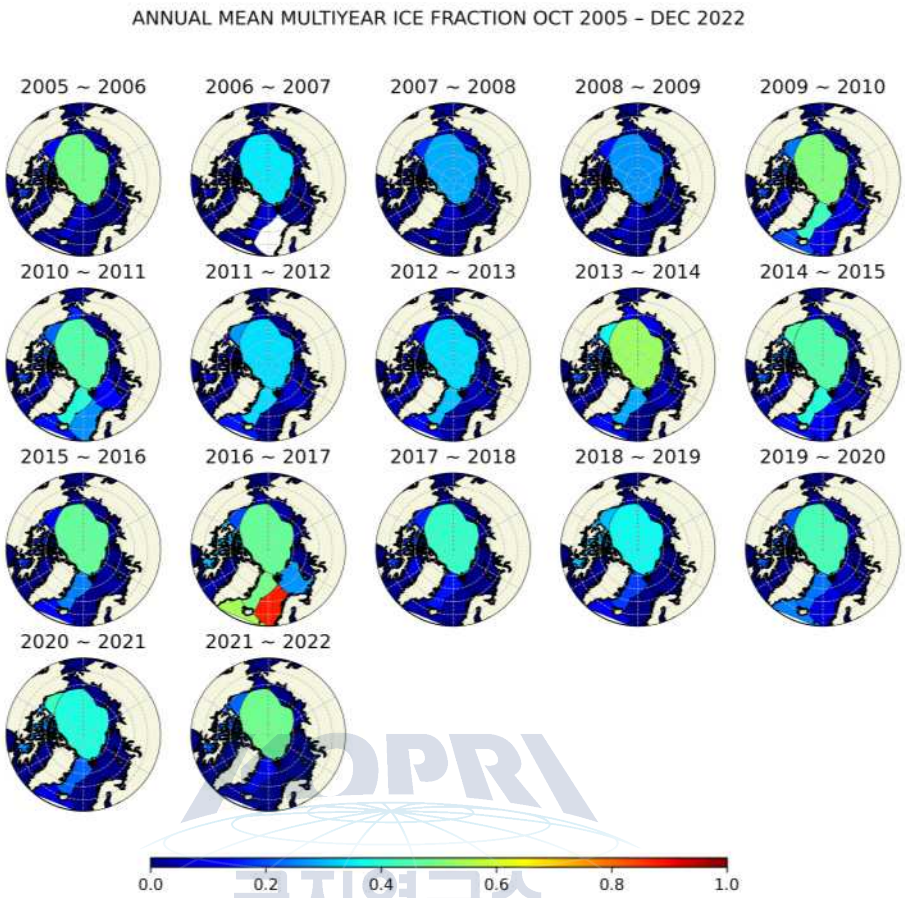


Figure 1-2-8. Average multiyear ice fraction for each of the subregions

- 전반적으로 다년빙비율은 고위도의 폐쇄 해역이 저위도의 개방 해역보다 높으며, 저위도중에서는 해빙의 주요 유출 경로가 되는 그린란드해와 베링해에서 상대적으로 높은 다년빙비율을 보임. 반면 연안정착빙의 비율이 높은 동시베리아해, 랍테브해, 카라해는 특히 낮은 다년빙비율을 보이는데, 이는 해당 지역은 융빙기에 해빙이 사라지는 단년빙 위주의 지역임을 지시함.
- 바렌츠해는 연간 변화가 가장 심한데, 이는 해당 지역의 해빙 농도의 연간 변화가 타 지역보다 심한 것과 관계가 있음. 즉, 해빙의 농도가 낮은 시기의 유동성과 농도가 높은 시기의 안정성에 의해 크게 좌우됨. 바렌츠해는 온난화에 의한 해빙 감소가 가장 두드러지는 지역 중 하나로 알려져 있음.

[변동 모드 특성]

- 다년빙비율의 PC(주성분)를 추출하고 EOF 분석을 통해 PC와 시계열자료의 상관성을 공간적으로 분석함.
- 다음 도표는 PCA(주성분분석)을 통해 계산한 상위 PC들이 가지는 분산설명력을 나타냄. 시간적 주기성이 뚜렷한 경우에 분산설명력은 상위 PC 수 개에서 0.9 (또는 90%) 이상을 상회하나, 다년빙비율의 경우는 시간적 주기성은 비교적 뚜렷하나 장기변동특성에서 분석한 바와 같이 각 소영역에 대해서는 차이가 크기 때문에 상대적으로 상위 PC의 분산설명력이 높지 않음.

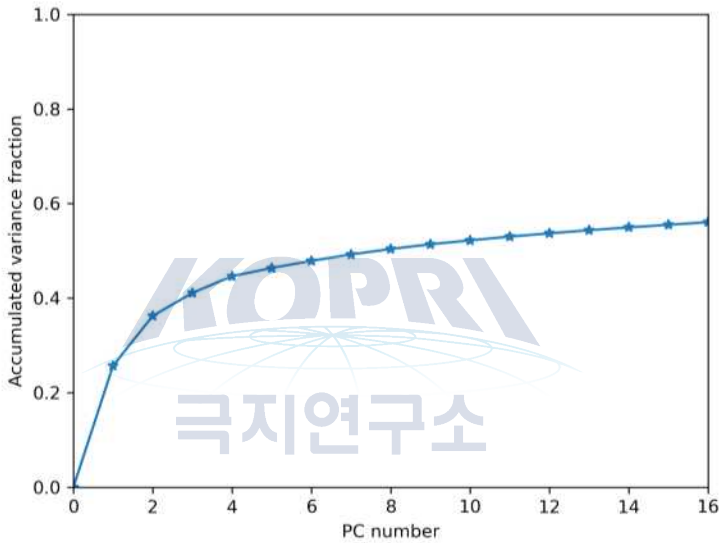


Figure 1-2-9. Cummulative variance fraction of the PCs of the multiyear ice fraction

- 다음 그림은 가장 높은 분산설명력을 가지는 PC1과 이에 대한 공간적 상관성인 EOF1을 나타냄. PC1은 시작지점인 10월부터 값이 빠르게 증가하다가 이후 안정화되는 모양이, 다년빙비율의 기본 모드의 역위상 성분, 즉 단년빙비율로 판단됨.

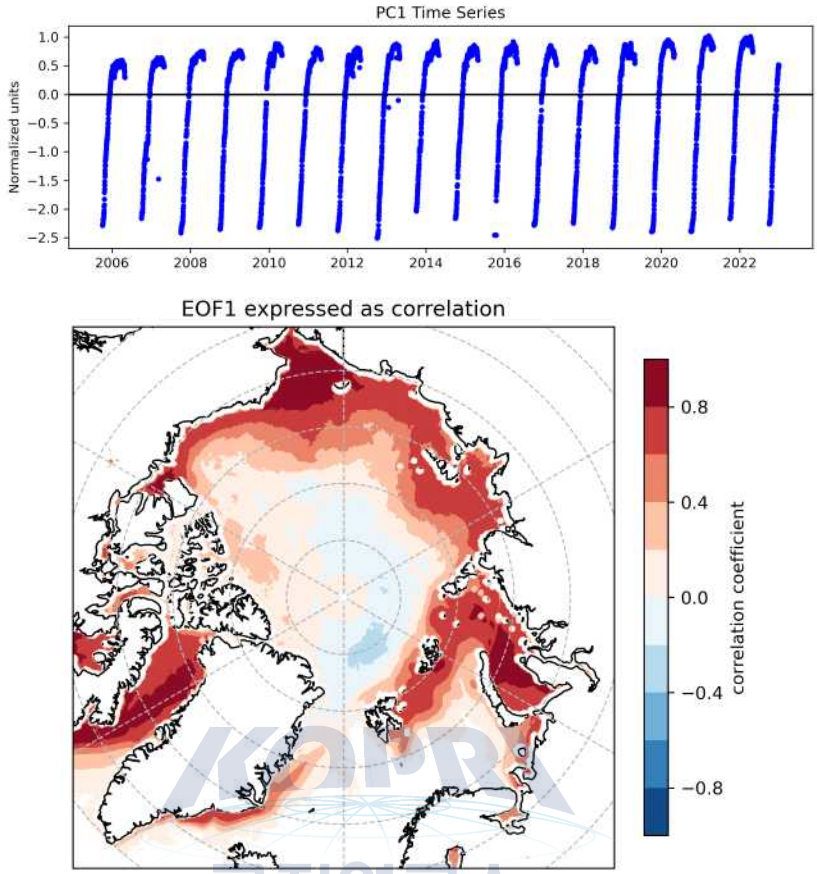


Figure 1-2-10. PC1 time series of multiyear ice fraction and its corresponding EOF1 as correlation

- 또한 EOF1의 중앙북극해를 제외한 나머지 지역에서 강한 양의 상관관계를 보임. PC1을 단년빙비율로 보았을 때 캐나다군도 및 그린란드 북부를 포함하는 중앙북극해 외의 연안에서 강한 양의 상관관계는 단년빙의 변화 모드와 일치한다고 판단됨.
- 중앙북극해에서는 그림의 중심선을 기준으로 왼쪽이 양의 상관관계, 오른쪽이 음의 상관관계인데, 보퍼트환류에 의한 연안 다년빙의 유출으로 인한 PC1과의 양의 상관관계, 그리고 transpolar drift에 의한 보퍼트지역 다년빙의 공급으로 인한 PC1과의 음의 상관관계로 해석할 수 있음.
- 다음 그림은 두번째로 높은 분산설명력을 가지는 PC2와 이에 대한 공간적 상관성인 EOF2를 나타냄. PC2는 PC1과 기본적으로 역위상을 보이지만, 2015~2016년에 크게 값이 변화는 변화점(change point)을 가짐. 해당 시기에

다년빙비율에 어떤 큰 주기성 변화가 있었는지는 추가 연구가 필요하나, 기본적으로는 장기변동특성에서 전술한 연간변화폭의 안정과 밀접한 관련이 있을 것으로 사료됨.

- 또한 PC2의 초기는 다년빙비율의 주기성과 유사하게 일관된 감소형이나 후기에는 점점 증가 후 감소의 형태로 변해가는 것을 볼 수 있음. 이는 상기 관측자료의 안정성에 대한 것이기 보다는, 북극해의 해빙 유형 분포 자체가 변하가는 것임을 지시할 가능성을 염두하여 추가 연구가 필요함.

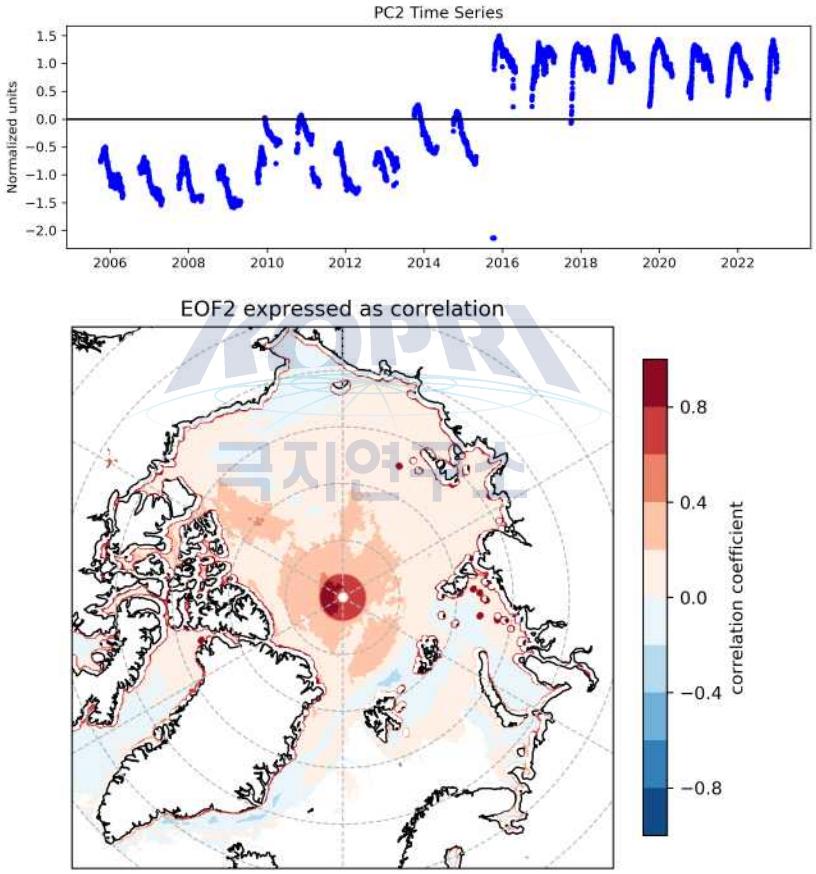


Figure 1-2-11. PC2 time series of multiyear ice fraction and its corresponding EOF2 as correlation

- EOF2 또한 EOF1의 역위상에 가까우나, 상관관계값은 상대적으로 낮은 수준이기에 공간적 분포의 차이를 유의미하게 해석하기에는 부적합함.

○ 해빙이동/변형

- 해빙 이동/변형에 대한 장기 산출물은 대표적으로 유럽기상위성기구(EUMETSAT)의 해양/해빙위성활용센터(OSI-SAF)의 OSI-455가 있음. 이는 1991년부터 2020년까지 30년간의 해빙 이동을 1일 단위로 제공함. 이 연구에서는 북극해 결빙해역 해빙 이동의 시공간 변동 분석을 위해 이 자료를 활용함.

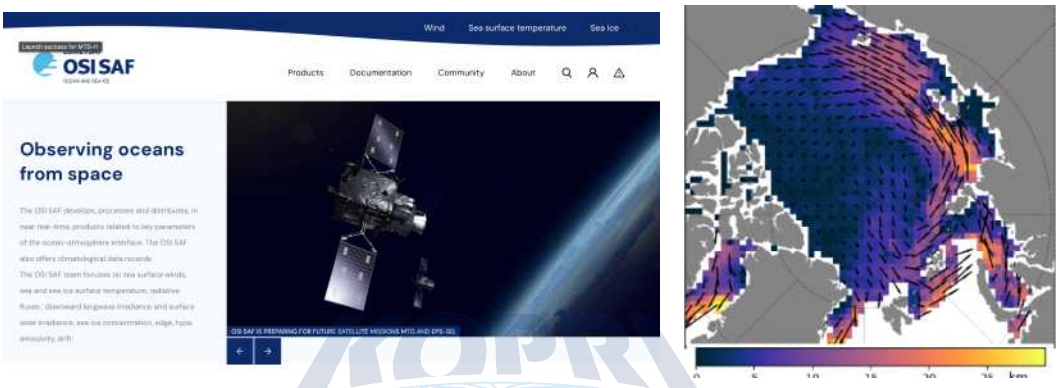


Figure 1-2-12. Homepage of OSI-SAF(left) and an example of OSI-455 product (right).

KOPRI 극지연구소

- OSI-455 산출물은 다음 표와 같은 특성을 가짐.

Table 1-2-2. Product characteristics of OSI-455

관측 소스	산출물 레벨	시간 범위	시간 해상도	공간 범위	공간 해상도
SSM/I, SSMIS, AMSR-E, AMSR2	Level-3/4	1991-2020	1일 (24시간)	전북극	75 km

- 이 연구에서는 해빙 유형의 경우와 마찬가지로 IHO의 해역 구분을 따라 소영역을 설정함.
- 해빙 유형의 경우와 마찬가지로 결빙 초기인 10월부터 융빙 말기인 9월을 시

계열의 시작과 끝으로 가정함. 따라서 OSI-455 산출물에 대한 분석은 1991년 10월 ~ 1992년 9월이 초년도, 2019년 10월 ~ 2020년 9월이 말년도이며, 총 29개 연주기에 대한 분석을 수행함.

[계절성 변동 특성]

- 다음 그림은 29개 연주기에 대해 해역 전체의 평균적인 월별 이동 속도를 표현한 히트맵임. 색이 진할수록 속도가 높으며, 전반적으로 10월~12월에 가장 높은 속도, 5~7월에 가장 낮은 속도를 보임. 연간 변화는 월간 변화에 비해 적음.

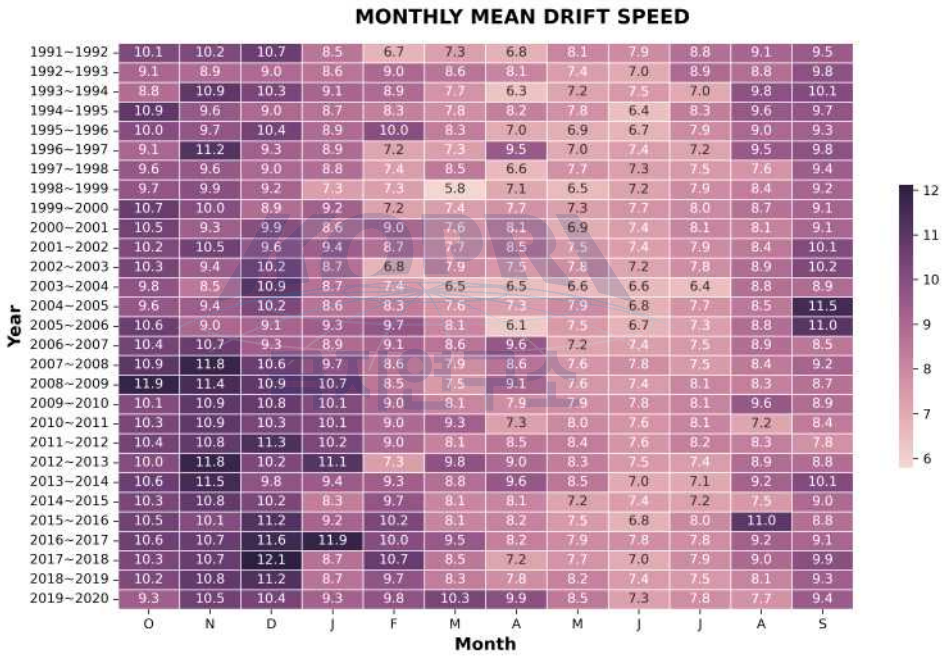


Figure 1-2-13. Heatmap of the monthly average of sea ice drift speed

- 다음 그림은 위 히트맵을 보다 간결하게 그래프로 표현한 것임. 연주기 전체 기간에 대한 평균에 대비하여 도시한 특정 연주기 중, 2007~2008년과 2012~2013년은 각각 역대 최소 해빙면적을 기록한 3위와 1위 연도임. 해빙량 감소로 인한 상대적 유동성 증가가 결빙 초기인 10~12월의 해빙 이동 속도에 영향을 미침을 알 수 있음.

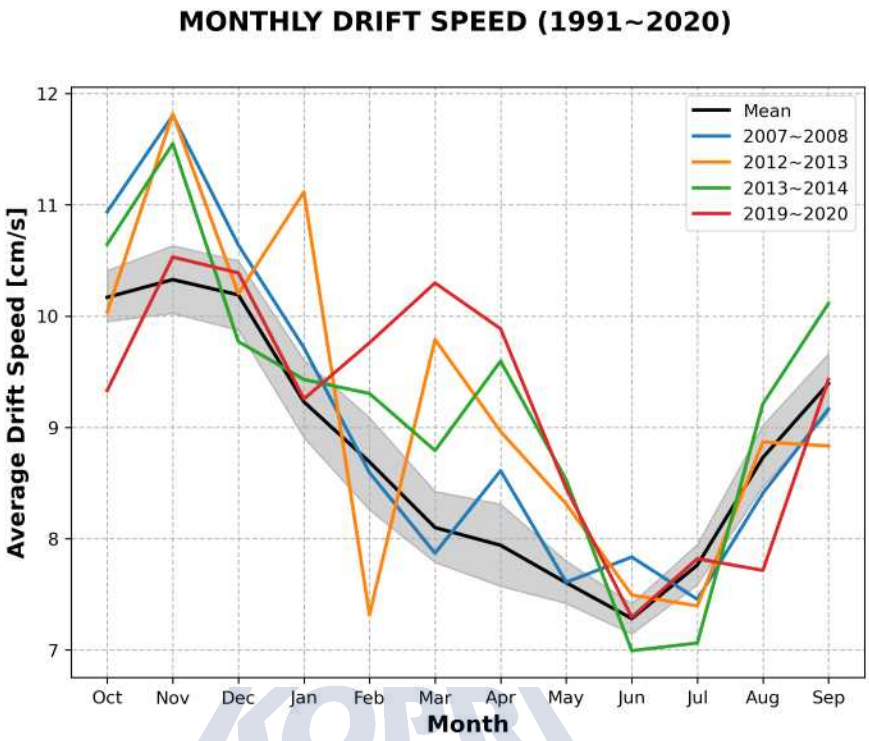


Figure 1-2-14. Monthly average of sea ice drift speed for the entire Arctic Ocean

KOPRI 극지연구소

- 북극해에서 연중 상시 해빙이 분포하는 대표 지역은 중앙북극해(Arctic Ocean)이며, 이 지역에서의 속도를 별도로 분리하면 다음 그림과 같음. 해당 지역은 타 지역에 비해 해빙 농도의 변화가 적으며 육지 분포에 의한 영향을 덜 받기 때문에 보다 직접적인 계절 변동성을 볼 수 있음. 최대/최소 속도는 각각 10월과 3월로, 이는 결빙기 극초반과 해빙 면적 최대기에 해당함.

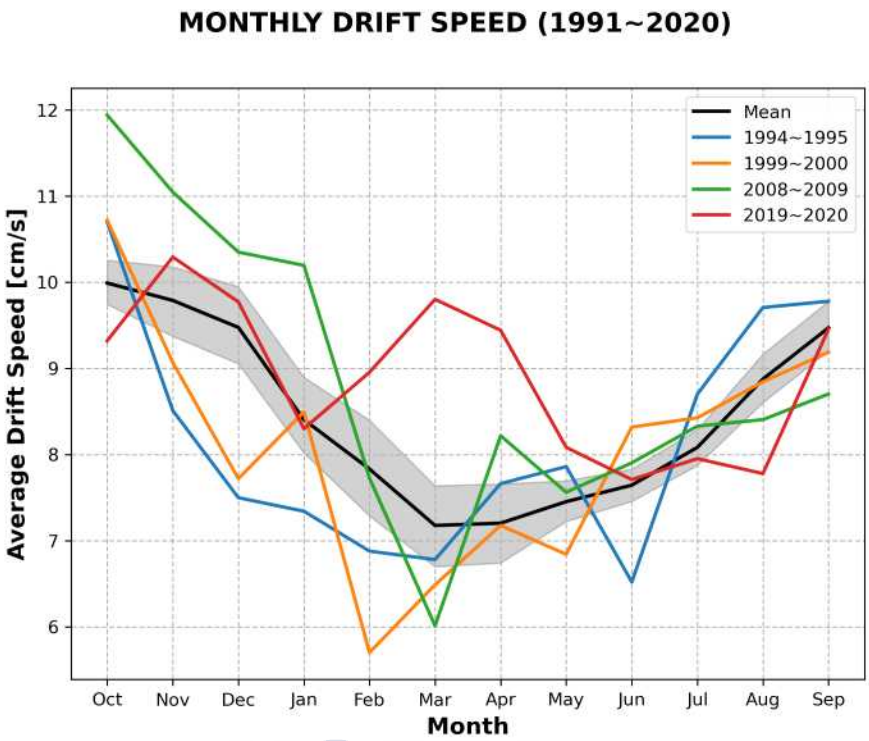


Figure 1-2-15. Monthly average of sea ice drift speed for the central Arctic Ocean only

KOPRI 극지연구소

[장기 변동 특성]

- 다음 그림은 29개 연주기에 대해 해역 전체 평균 일별 및 연별 평균 해빙 이동 속도를 나타냄. 일별 속도 그래프에 기재한 숫자는 해당 연주기에서 최대 이동 속도가 관측된 날짜이며, 대체로 계절성 변동 분석에서 전술한 10~12월에 해당함.

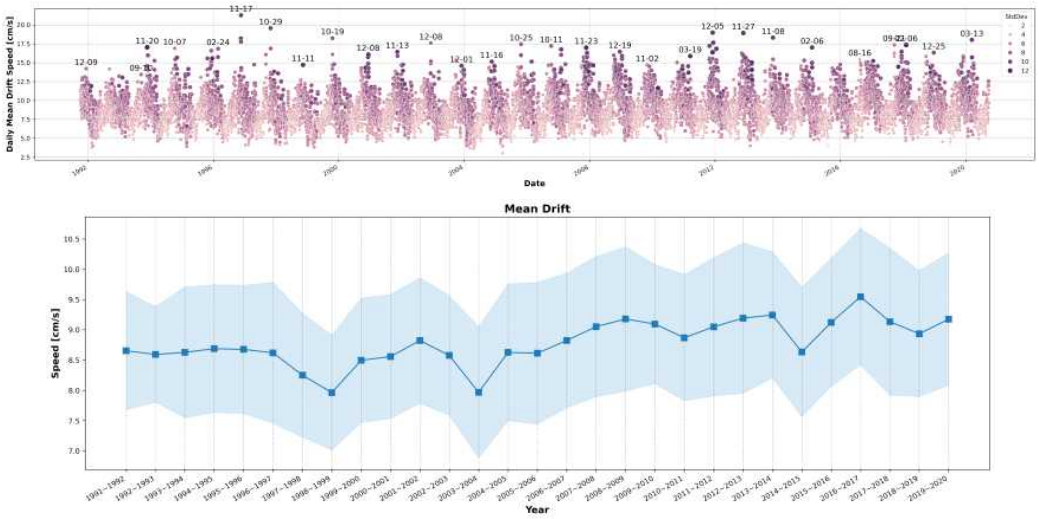


Figure 1-2-16. Daily and annual average of sea ice drift speed for the entire Arctic Ocean

- 해빙 이동 속도는 대체로 선형적(R^2=0.44)으로 증가하였으며, 그 증가 속도는 0.29 cm/s/decade임. 1997~1999년, 2003~2004년, 2014~2015년에 추세에 어긋나는 저속 이상점이 존재함.
- 마찬가지로 보다 직접적인 분석을 위해 중앙북극해에 대한 결과를 도시하면 다음 그림과 같음.

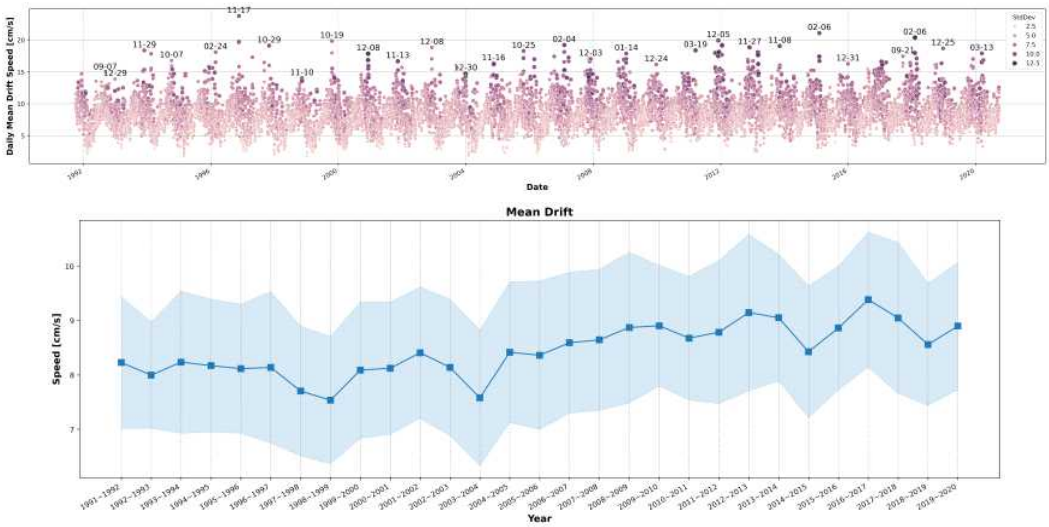


Figure 1-2-17. Daily and annual average of sea ice drift speed for the central Arctic Ocean only

- 해빙 이동 속도는 동일하게 선형적(R^2=0.58)으로 증가하였으며, 그 증가 속도는 더 큰 0.42 cm/s/decade임. 마찬가지로 저속 이상점이 존재하며, 다른 해빙 및 기상 변수들과 대조하여 이에 대한 추가 해석이 필요함.
- 다음 그림은 29개 연주기에 대한 소영역 각각에 대한 연평균 해빙 이동 속도를 나타냄.



Figure 1-2-18. Average sea ice drift speed for each of the subregions

- 전반적으로 해빙 이동 속도는 저위도의 개방 해역이 고위도의 폐쇄 해역보다 빠르며, 특히 해빙의 주요 유출 경로가 되는 그린란드해와 베링해에서 특히 높은 연평균 속도를 보임. 반면 연안정착빙의 비율이 높은 동시베리아해, 랍테브해, 카라해, 캐나다군도는 특히 낮은 연평균 속도를 보임.
- 바렌츠해는 연간 변화가 가장 심한데, 이는 해당 지역의 해빙 농도의 연간 변화가 타 지역보다 심한 것과 관계가 있음. 즉, 해빙의 농도가 낮은 시기의 유동성과 농도가 높은 시기의 안정성에 의해 크게 좌우됨. 바렌츠해는 온난화에 의한 해빙 감소가 가장 두드러지는 지역 중 하나로 알려져 있음.
- 노르웨이해는 전반적으로 감소하는 해빙 면적 추세와 같이 시계열 자료의 초기에는 관측값이 존재했으나 후기로 갈수록 결측되는 경향이 뚜렷함. 이 또한 바렌츠해에서 감소한 해빙량으로 인해 해빙 공급이 제한되기 때문으로 판단됨.

[변동 모드 특성]

- 해빙 이동 속도의 PC(주성분)를 추출하고 EOF 분석을 통해 PC와 시계열자료의 상관성을 공간적으로 분석함.
- 다음 도표는 PCA(주성분분석)을 통해 계산한 상위 PC들이 가지는 분산설명력을 나타냄. 시간적 주기성이 뚜렷한 경우에 분산설명력은 상위 PC 수 개에서 0.9 (또는 90%) 이상을 상회하나, 해빙 이동 속도의 경우는 시간적 주기성은 비교적 뚜렷하나 장기변동특성에서 분석한 바와 같이 각 소영역에 대해서는 차이가 크기 때문에 상대적으로 상위 PC의 분산설명력이 높지 않음.

KOPRI 극지연구소

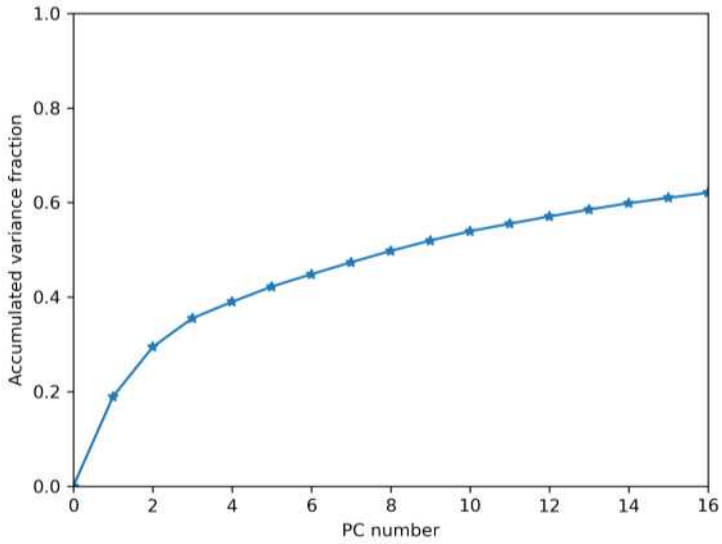


Figure 1-2-19. Cummulative variance fraction of the PCs of the sea ice drift speed

- 다음 그림은 가장 높은 분산설명력을 가지는 PC1과 이에 대한 공간적 상관성인 EOF1을 나타냄. PC1은 시작지점인 10월부터 값이 낮아지다가 다시 상승하여 회복하는게 1년 주기로, 평균 이동 속도의 기본 모드를 나타내는 성분으로 판단됨.

KOPRI 극지연구소

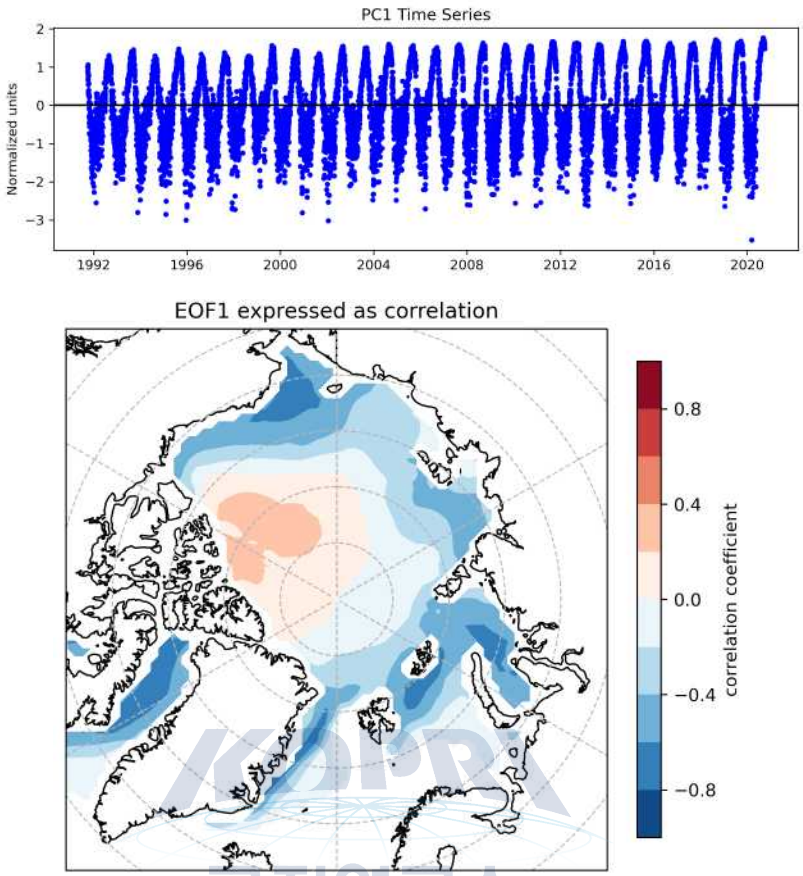


Figure 1-2-20. PC1 time series of sea ice drift speed and its corresponding EOF1 as correlation

- 또한 EOF1의 중앙북극해에서 양의 상관관계를 보임. 중앙북극해는 연중 해빙이 분포하며, 특히 그린란드 북쪽과 캐나다 군도 북쪽은 상시 다년빙이 분포함. 해빙 농도가 높기에 상대적으로 안정하며 하계 해빙 유출이 적음.
- 그러나 나머지 지역, 특히 해빙의 유출이 많은 그린란드해나 척치해에서 강한 음의 상관관계를 보이는데, 이는 해빙의 유출에 따른 이동이 여름철에 더 활발하기 때문임. 즉, 해당 지역들은 하계 해빙 유출에 의해 해빙 이동 속도가 역으로 빨라짐.
- 다음 그림은 두번째로 높은 분산설명력을 가지는 PC2와 이에 대한 공간적 상관성인 EOF2를 나타냄. PC2는 PC1과 역위상을 가지며, 이는 하계 해빙 유출에 의해 가속되는 모드를 나타내는 성분으로 판단됨.

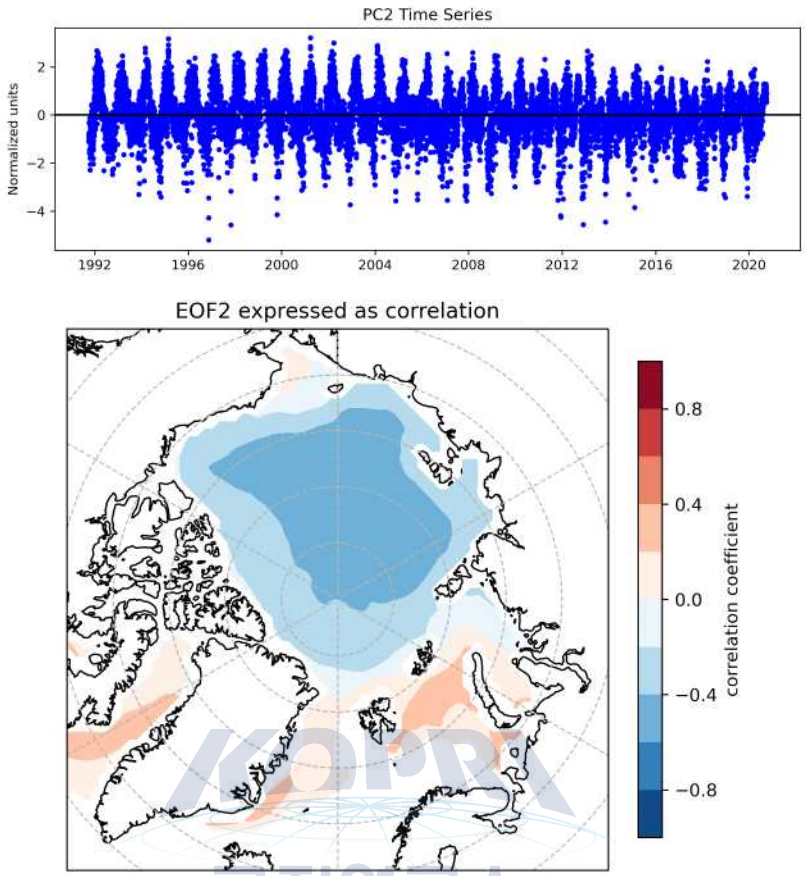


Figure 1-2-21. PC2 time series of sea ice drift speed and its corresponding EOF2 as correlation

- EOF2 또한 EOF1의 역위상에 가까우나, 상관관계 분포에서 매우 높은 값을 가지는 위치가 좀 더 낮은 위도에 자리함. 저위도일수록 해빙 농도가 낮아 유동성이 높기 때문에 이 또한 PC2가 하계 유출에 의한 이동 속도 가속 성분이라는 것을 추정을 지지함.

○ 해빙두께

- 개발된 해빙 두께 산출기술을 적용하여 2012년 11월부터 2022년 3월까지 겨울철 5달에 대하여 10년동안의 장기 해빙 두께 산출물 생산함.

[계절성 변동 특성]

- 산출된 2012년 11월부터 2022년 3월까지의 해빙두께 분포를 대상으로 월별 평

균을 제작하여 변동성 분석 수행함.

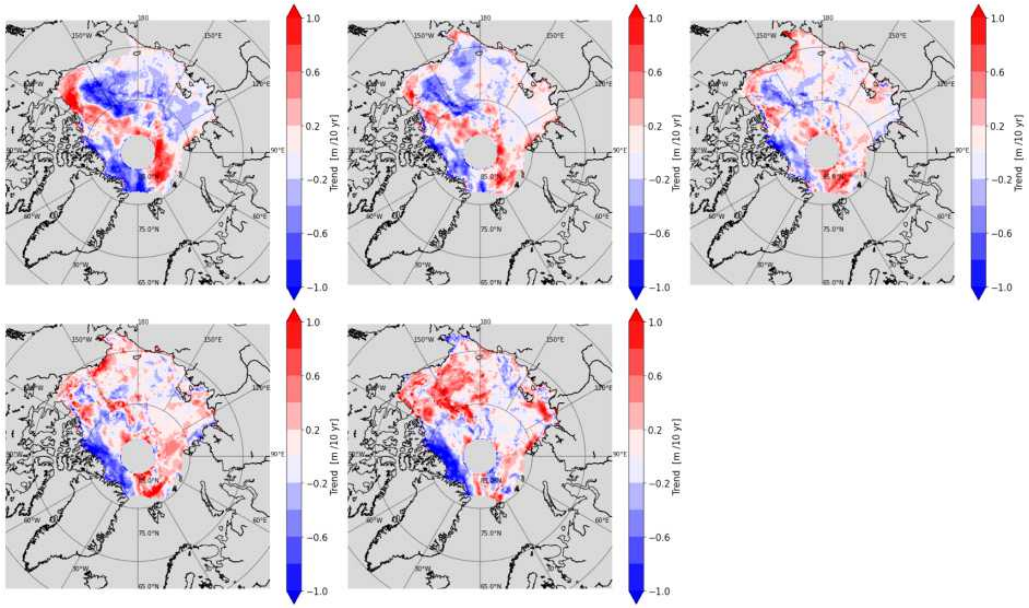


Figure 1-2-22. Sea ice thickness change trend in m/decade in November, December, January, February and March.

- 월간 해빙 두께 변동 분포는 월간 차이가 매우 심하게 나타났으며, 이는 해빙의 바람과 해류에 따른 표류흐름이 매년 다르기 때문으로 추정됨.
- 모든 월에 걸쳐 그린란드 북쪽 해안의 두꺼운 다년빙 지역이 뚜렷하게 감소하는 것으로 나타나, 다년빙이 소멸되어가고 있다는 많은 선행연구 보고와 일치하는 결과를 보임.

[장기 변동 특성]

- 산출된 겨울철 해빙두께를 바탕으로 북극 평균 해빙두께의 최근 10년간의 장기 변동 추이 확인을 통해 온난화 영향에 따른 해빙감소경향 여부 분석 수행

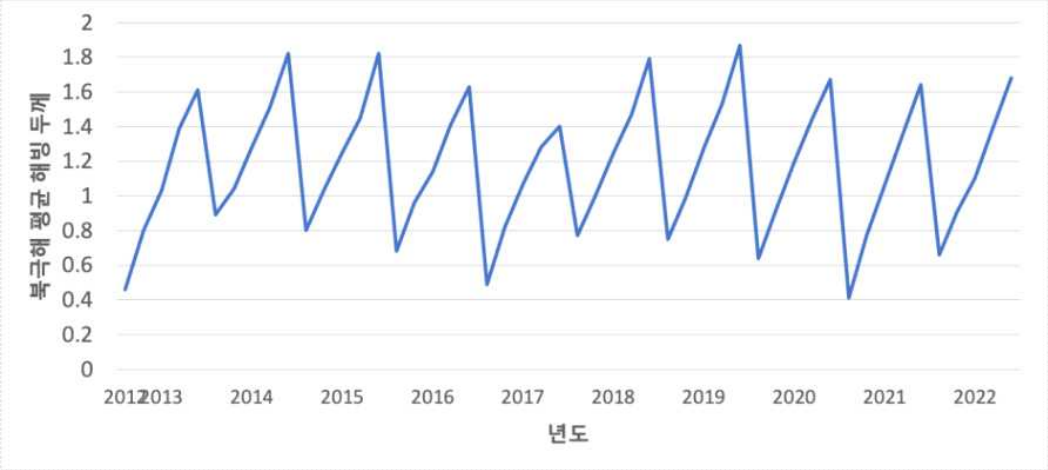


Figure 1-2-23. Monthly averages of sea ice thickness in the last decade

- 최근 10년간 북극의 해빙 평균 두께 추세는 뚜렷한 경향을 찾기 어려움.
- 해빙이 최소를 기록했다고 알려진 2012년 이후에는 2020~2021년 겨울이 두 번째 최소 해빙 두께를 기록함.

[변동 모드 특성]

- 최근 10년간의 해빙두께 산출물에 EOF 기법을 적용한 분석을 수행하여 주요 변동 모드를 파악함.

KOPRI 극지연구소

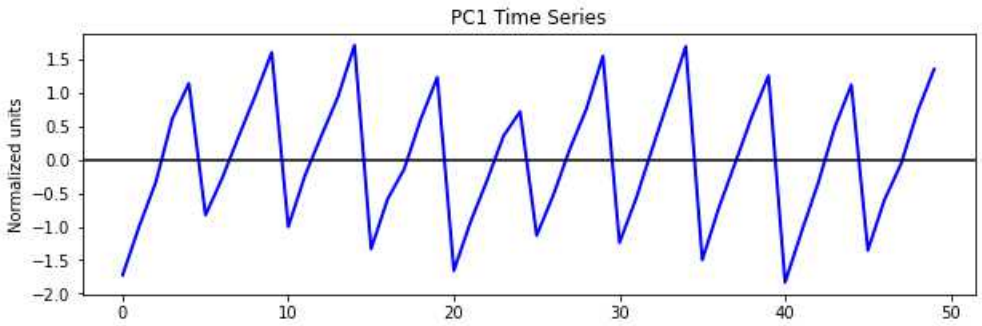


Figure 1-2-24. PC1 times series

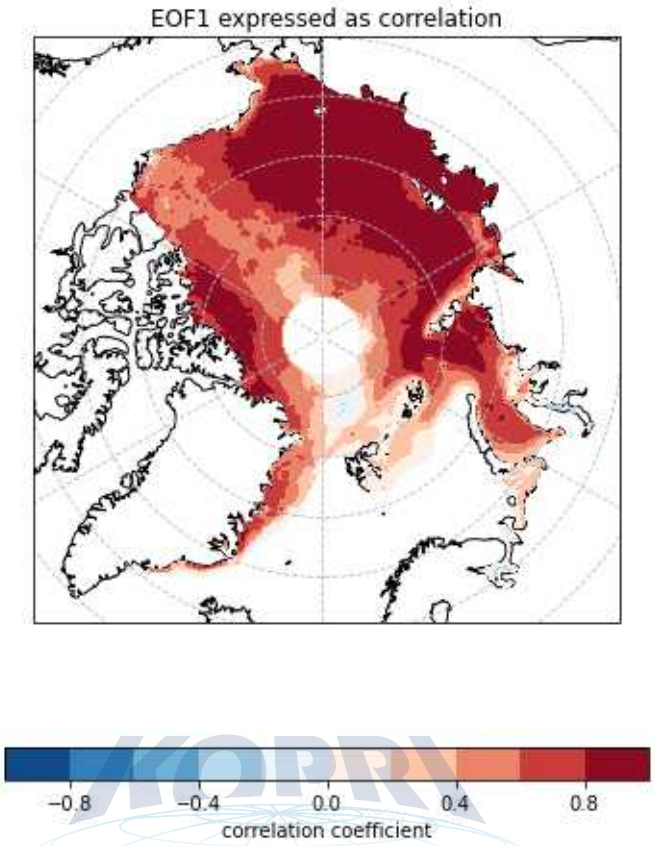


Figure 1-2-25. Correlation coefficient map of EOF mode 1

- 모드1은 해빙 성장의 계절적 추세를 잘 드러내며, PC 시계열 또한 북극해 해빙 추세 시계열과 거의 흡사함을 확인함.
- 상관도 분포가 진한 곳은 해빙 두께 변동성이 작은 지역이며, 상관도 분포가 약한 곳은 해빙 표류흐름에 따라 해빙 두께의 연간 변동성이 큰 지역으로, 두께에 따른 공간분포가 상이함을 확인함.

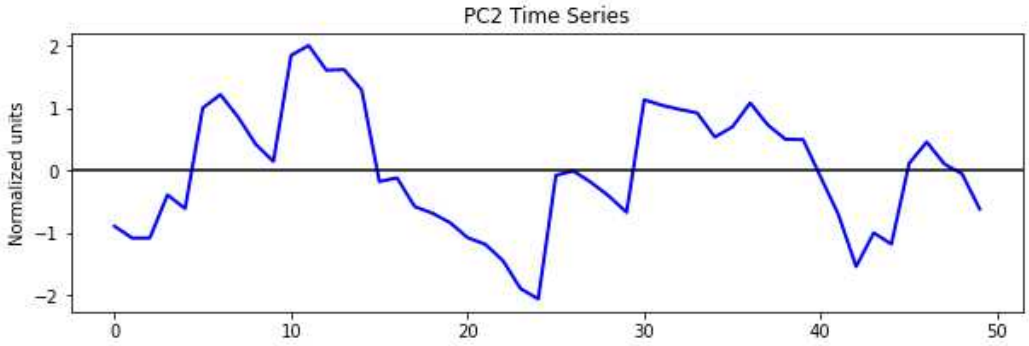


Figure 1-2-26. PC2 times series.

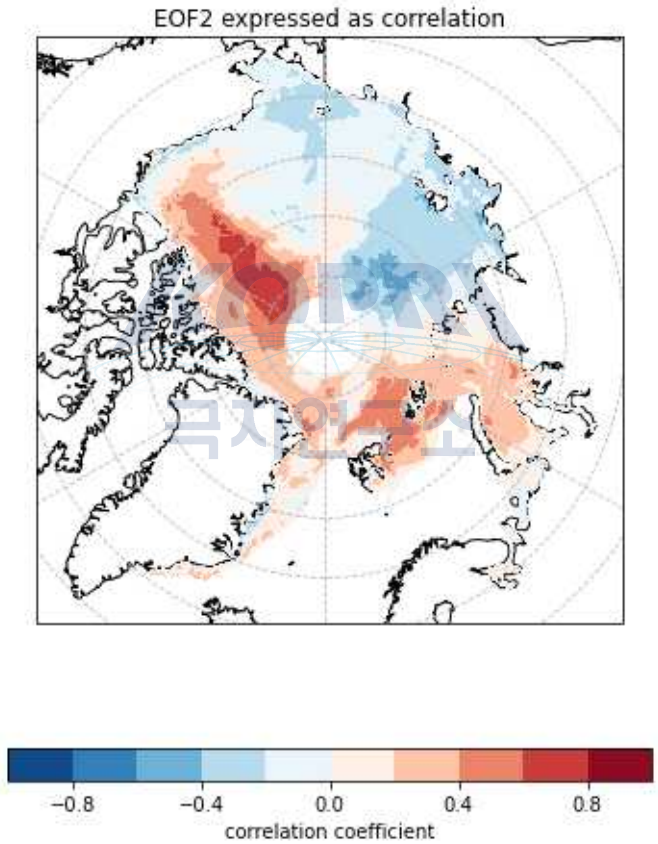


Figure 1-2-27. Correlation coefficient map of EOF mode 2.

- 모드2은 해빙 두께의 연간 변동 추세를 나타냄
- PC 시계열이 양수인 곳에서는 버포트, 서중앙 북극, 카라해에서 평년에 비해 상대적으로 두꺼운 해빙이 분포

- PC 시계열이 음수인 곳에서는 랍테브, 동시베리아, 척치해에서 평년에 비해 상대적으로 두꺼운 해빙이 분포

○ 해빙강도

- 북극해빙은 1979년부터 약 12.2% 씩 줄어드는 것으로 보고되고 있으며 여름철인 9월에 최소 면적을 보이고 겨울이 끝나고 봄이 시작되는 3월에 최대 면적을 보임.
- 산출된 해빙 강도의 장기적 시공간 변화를 분석하기 위해 일 평균, 월 평균, 연 평균으로 구분하여 1) 겨울철 평균 해빙 강도 변동, 2) 10년 이상의 장기 변동 추이, 그리고 3) 변동 모드 분석을 위한 기초 자료로 활용함.
- 해빙 강도의 산출물 시공간 변동 특성 분석을 위해 International Hydrographic Organizaton (IHO)에서 제공하는 해역별 shapefile을 확보하여 북위 60도 이상 북극해 각 해역별 지역을 설정함.

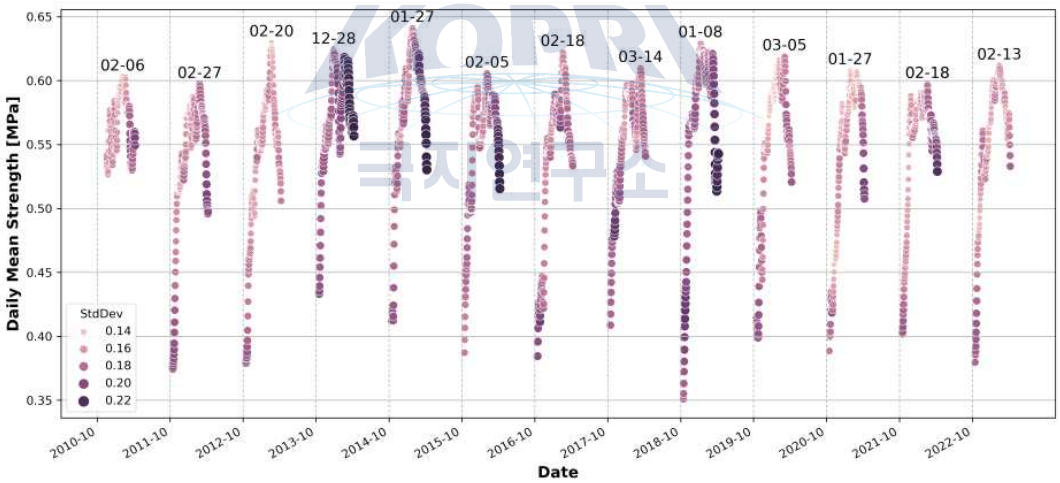


Figure 1-2-28. Daily average and standard deviation of the flexural strength of Arctic sea ice, derived from 2010/10 to 2023/04.

- 1) 겨울철 평균 해빙 강도 계절성 변동 분석을 위해 북극해 전체 월평균을 계산함.
- 10월부터 증가하여 주로 1월과 2월에 최대 강도를 보인 후 감소하는 것으로 확인됨.
- 면적은 3월까지 증가하지만 평균 강도는 줄어들고 있는 것으로 보임.

- 주로 굽힘강도 산출에 활용되는 기온이 2월에 최저를 찍고 증가하며 이러한 특성으로 인해 면적보다 굽힘 강도 값이 일찍 감소하는 경향을 보이는 것으로 분석됨.

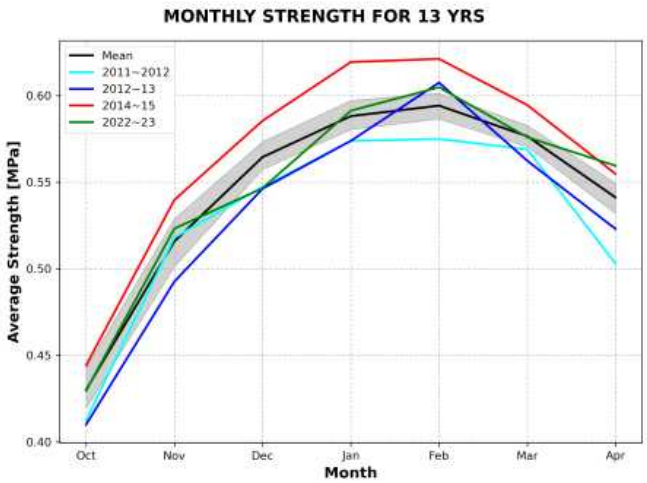


Figure 1-2-29. Monthly averages for the period of 13 years with the standard deviation for each month is depicted in the gray area.

KOPRI 극지연구소

- 2) 13년동안의 북극해 전체 연평균을 계산하여 장기 추이를 분석함.
- 최저 연평균은 2011/10~2012/04 기간의 평균이었으며, 최고 연평균은 2014/10~2015/04 기간으로 확인됨.
- 주로 해빙 면적(Sea ice extent)과 유사한 증감 패턴을 보이며, 2011-12 시즌에 기록된 최저 연평균은 위성관측 역사상 가장 낮은 여름철 해빙 면적과 관련된 것으로 예상됨.
- 더불어, 2012-13, 2016-17, 그리고 2020-21 시즌에도 평균 해빙 강도가 특히 낮았으나 2020년 9월에만 역사상 두 번째로 낮은 여름철 해빙 면적을 보이며, 그 외 다른 시기에는 면적과 관련성을 찾을 수 없음.
- 13년간의 평균을 선형 회귀분석을 통해 산출한 장기 추이 패턴은 약 0.31KPa/year 속도로 매우 천천히 감소하는 것으로 나타남.

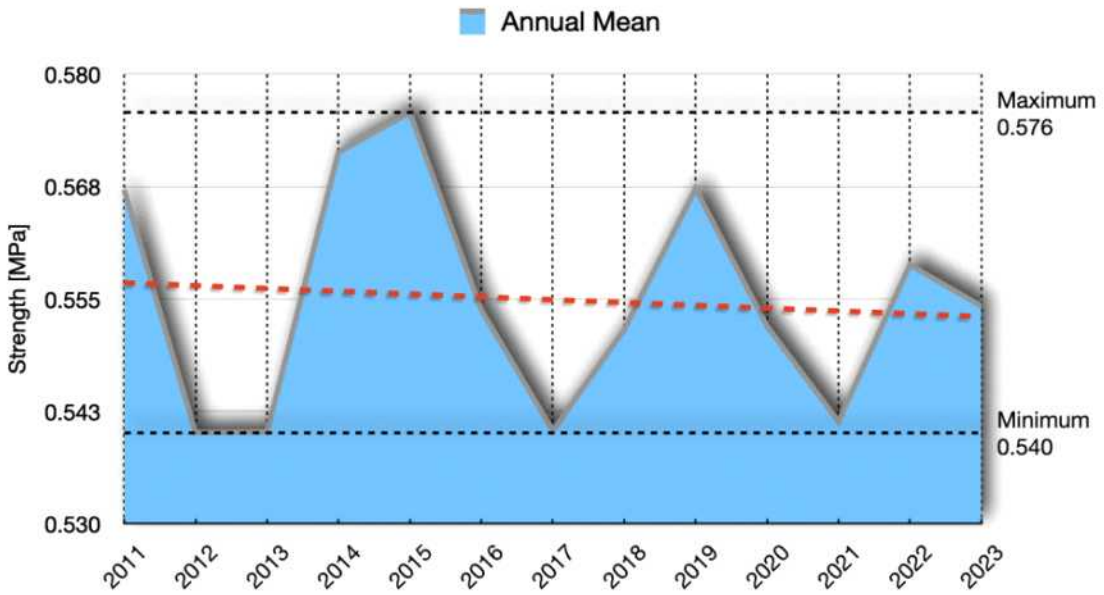


Figure 1-2-30. Temporal change of the annual means of the entire Arctic.

- 산출된 일일 해빙 강도를 60도 이상 해역별로 나누어 각각에 대한 연평균 추이를 분석한 결과 Gulf of Finland에서 가장 큰 감소를 보였으며 (-52.72%) Hudson Strait에서 가장 큰 증가를 보임 (359.15%).
- 가장 큰 변화를 보인 두 지역은 평균적으로 해빙 농도가 높지 않으나 변동성이 매우 큰 지역으로 해빙 강도의 변화가 해빙 농도의 감소로 인하여 발생한 것인지에 대한 추가적인 분석이 필요함.
- Barents Sea는 최근 급격한 해빙 감소를 보이는 지역으로 2023년 9월에는 관측사상 가장 낮은 해빙 면적을 보였다. 이러한 해빙 면적 감소와 함께 해빙 강도 역시 감소한 것으로 분석됨.

KOPRI 극지연구소

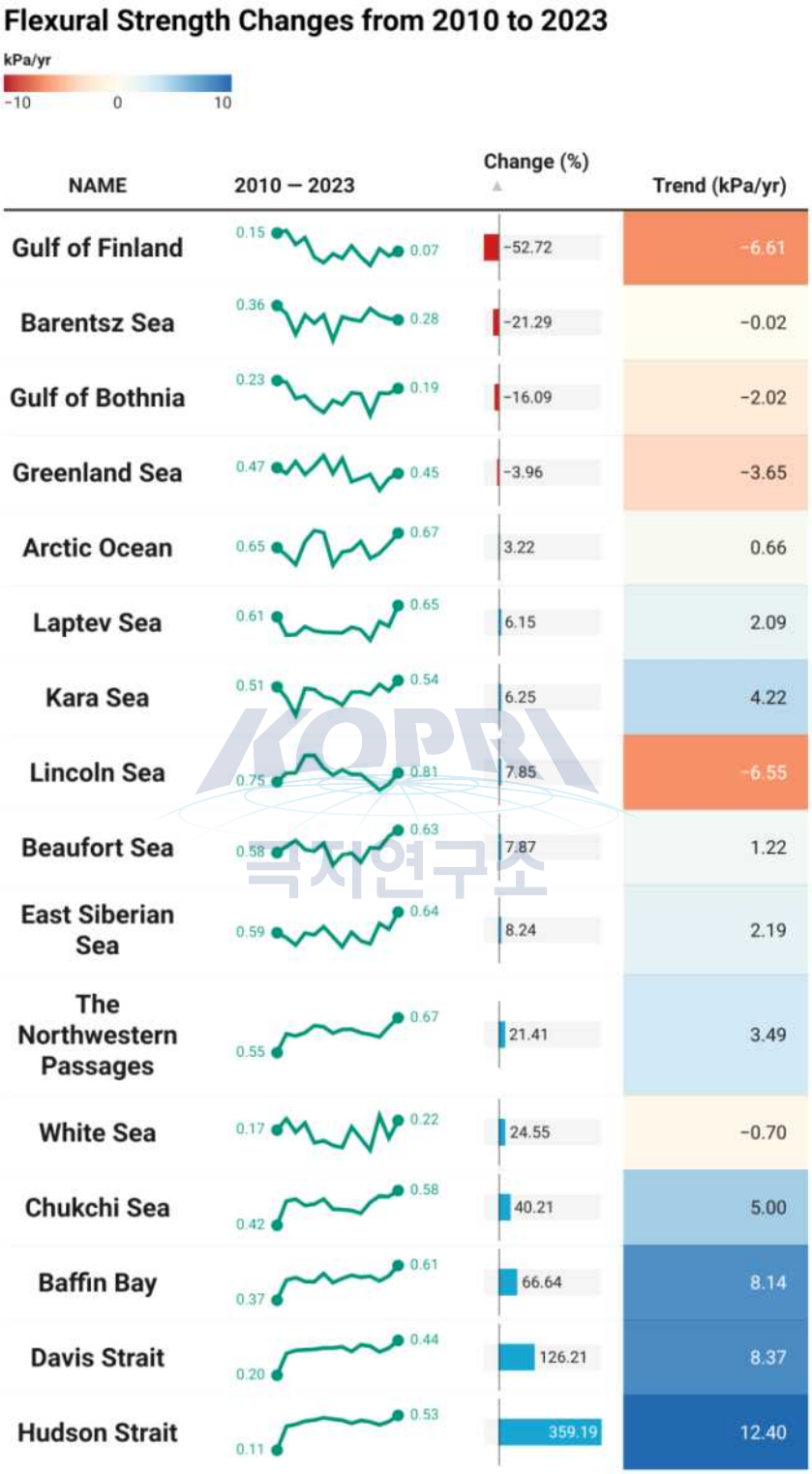


Figure 1-2-31. Annual variations of the flexural strength in each sector of the Arctic ocean, located above 60 degrees in latitude.

- 3) 북극 해빙 굽힘강도의 시공간 변화 분석을 위해 경험적 직교 함수 (Empirial Orthogonal Function(EOF) 분석을 진행함.
- EOF 분석은 공간 및 시간 데이터에서 변동성의 패턴을 식별하는데 사용되는 기법으로 공분산 행렬 (Covariance Matrix), 고유값, 고유 벡터가 기본 구성 요소임.
- EOF 결과는 주성분(Principal Component)와 공간패턴 (EOF Modes)로 구성 됨.
- 주성분은 데이터의 공간적인 패턴을 나타내는 고유 벡터이며 가장 큰 공간패턴 변동성들을 설명하는 방향을 나타냄.
- 본 연구에서는 가장 큰 분산 2개에 대한 주성분의 공간적 상관관계를 도출함.

KOPRI
극지연구소

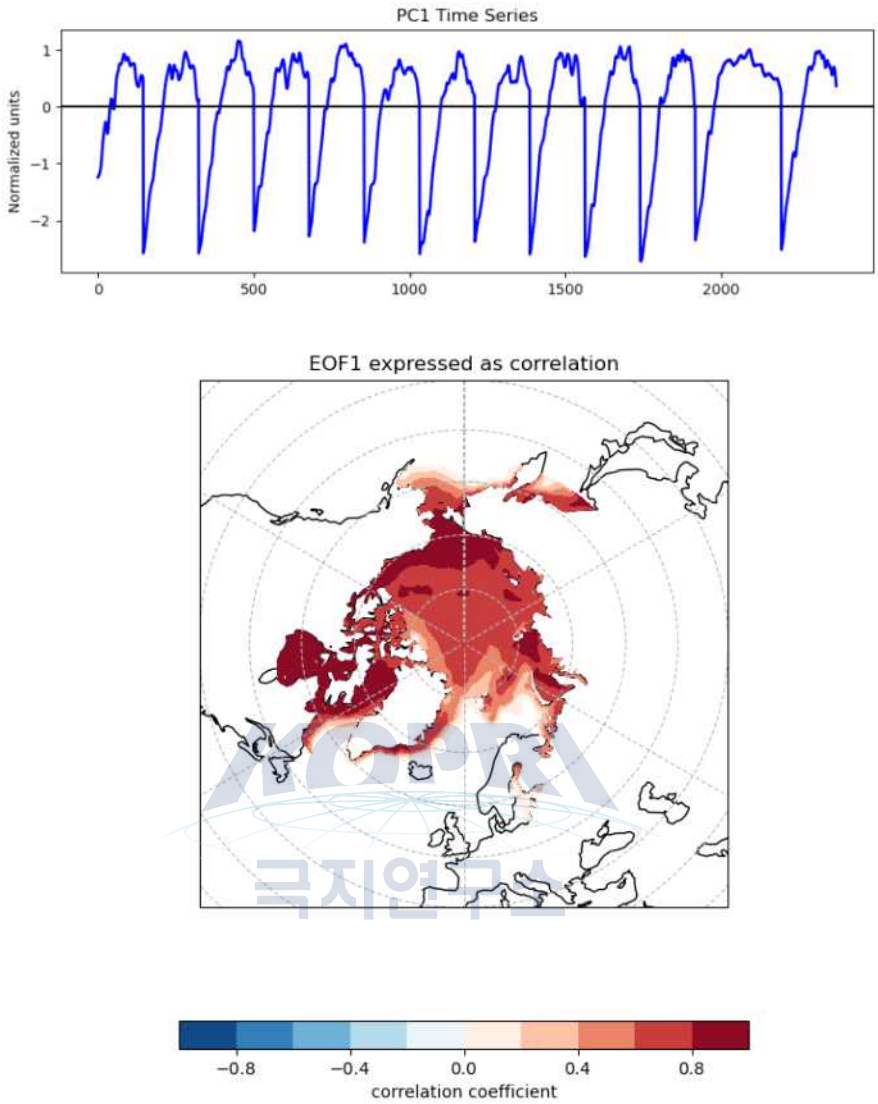


Figure 1-2-32. Time series of the PC1 (above) and its correlation coefficient map (below)

- 첫 번째 주성분은 북극 전체에 걸쳐 뚜렷한 계절 패턴을 나타내며 북극 전역의 해빙 변동과 강한 상관성을 갖음.

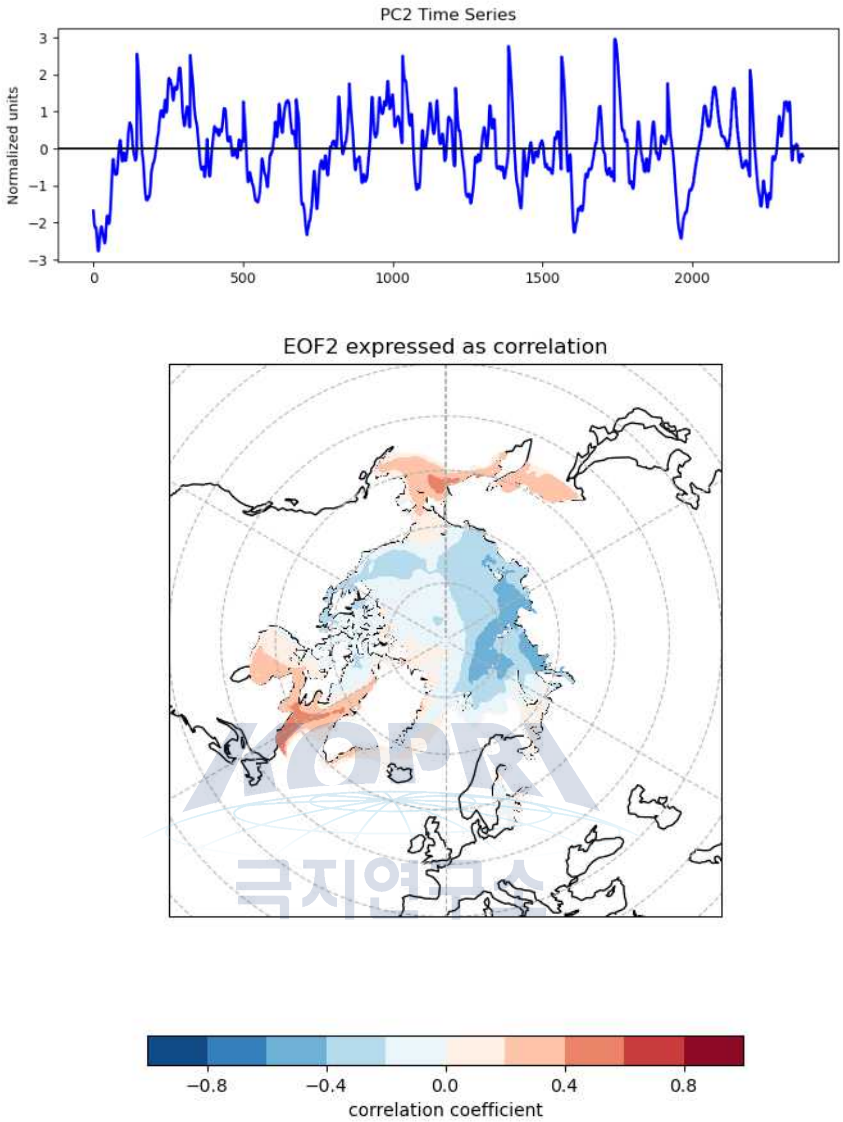


Figure 1-2-33. Time series of the PC2 (above) and its correlation coefficient map (below)

- 두 번째 주성분은 Marzinal Ice Zone(MIZ)와 북극해 안쪽에서 상반되는 패턴을 나타냄.
- 이는 MIZ와 북극해 안쪽의 환경적 차이를 강조하는 것으로 볼 수 있으며 지형적, 또는 기상적 차이로 인한 해빙 굽힘강도의 특이성을 나타내는 것으로 볼 수 있음.
- 추후 두 번째 주성분과 기후인자와의 상관관계를 도출하여 환경적 분석을 진

행할 예정임.

(2) 세부연구목표2. 북극해 결빙해역 해양 요소 시공간 장기 변화 도출

□ 연구내용 2-1. 북극해 해수 온도 및 표층 클로로필에 대한 위성 기반 산출물 확보

○ 달성실적 상세내용

- 본 과제에서 수행된 북극해 결빙해역 해양 요소 시공간 장기 변화 도출은 북극해에서 주요한 해역을 대상으로 해양 표층 온도 및 클로로필에 대하여 수행되었음. 북극해 전체 지역 중 주요한 해역을 구분하였으며, 이는 1953년 IHO가 발간한 23번째 특별 간행물 “Limits of Ocdeans & Seas”에서 제안된 해양과 바다의 경계 중 북극해에 포함된(북위 60도 이상) 총 15개의 영역에 대하여 분석을 수행하였음 (Figure 2-1-1).

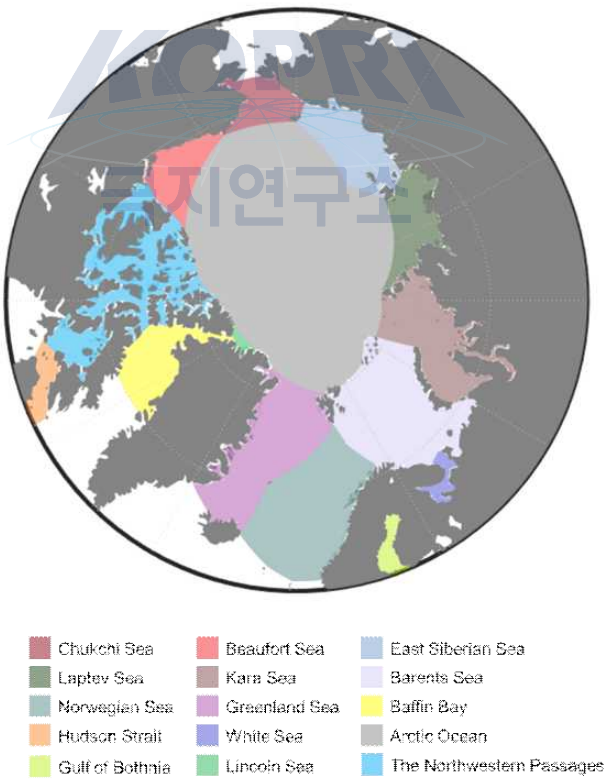


Figure 2-1-1. Subregions in the Arctic Ocean, classified based on IHO suggestion. In the text, regions will be mostly abbreviated. (Chukchi Sea:CS, Beaufort Sea: BeS, East Siberian Sea: ESS, Laptev Sea: LaS, Kara Sea: KS, Barents Sea: BaS, Norwegian Sea: NS, Greenland Sea: GS, Baffin Bay: BB, Hudson Strait: HS, White Sea: WS, Arctic Ocean: AO, Gulf of Bothnia: GB, Lincoln Sea: LiS, The Northwestern Passages: NP)

<해양 표층 온도>

- 북극해 해양 표층 온도에 대한 위성 기반 산출물 확보를 위하여 몇 가지 고려 조건을 설정하였음. 본 과제는 장기 변화를 분석하는 것으로 다양한 해수면 온도(sea surface tempearture, SST) 산출물 중에서 최소 30년 이상의 자료가 확보되는 것을 선택함. Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA), Multi-scale Ultra-high Resolution SST (MURSST) 등과 같이 널리 사용되는 자료는 본 과제에서 배제함.
- 결과적으로, NOAA에서 제공하는 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature version 2 (OISST; 1981년~현재), Extended Reconstructed SST (ERSST; 1854년~현재), Hadley Centre Sea Ice and SST (HadISST; 1870년~현재)가 분석에서 사용됨(Table 2-1-1 참조)
- 최종적으로 세 자료 모두 포함할 수 있도록 연구 기간을 1981년부터 2022년까지로 설정하였음. 장기간 분석이 최종 목표임으로 시간 해상도는 월별로 선택하였음. 각기 다른 공간해상도는 subregion별로 공간 평균을 통한 시계열 자료 확보가 우선되므로 분석 결과 오차에 크게 기여하지 않음.

KOPRI 극지연구소

Table 2-1-1. Sea surface temperature products based on satellite observation

Products	Abbreviation	Periods	Temporal resolution	Spatial resolution	Provider	Sorce
Optimum Interpolation SST	OISST	1981-	Daily, Weekly, Monthly	0.25°	NOAA	AVHRR satellite data, buoy observations, ship observations, and others.
Extended Reconstructed SST	ERSST	1854-	Monthly	2°	NOAA's NCEI	Ship and buoy observations, satellite observations.
Hadley Centre Sea Ice and SST	HadISST	1870-	Monthly	1°	UK Met Office's Hadley Centre	Ship observations, buoy observations, AVHRR satellite data, among others.

<해양 표층 클로로필>

- 해색 원격 탐사로 추정될 수 있는 생물학적 지표인 표층 클로로필 농도 (Surface chlorophyll-a concentration, SChl)는 주요한 매개 변수 중 하나임.

1997년 NASA에 의해 시작된 위성 탐사 미션이 현재까지 지속되고 있어 20년 이상의 연속적인 전 지구 규모의 데이터 시퀀스를 획득할 수 있었음. 본 과제에서는 20년 이상의 해색 원격 탐사 자료를 기반으로 SChl 변동성 분석을 수행함. 본 과제에서 사용된 해색 원격 탐사 자료는 단일 위성자료가 아닌 합성 자료로서 Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Medium-spectral Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) 등과 같은 자료가 사용됨. 이러한 합성 자료는 위성 자료 기간을 늘리는 효과적인 방법으로 기후 시간 규모에서 SChl의 변화를 탐지하기 위한 요구 사항을 충족함.

- 본 과제에서 사용된 두 주요한 자료는 OC-CCI (OC)와 GlobColour (GC) 합성장 자료가 사용됨.
- European Space Agency (ESA)는 GlobColour Project를 수행했으며, 일환으로 1997년 9월부터 현재까지 Weighted averaging (AVW)와 Garver-Siegel-Mariorena (GSM), 두 종류의 합성자료를 제공하고 있음. AVW는 단일 센서 Level-2 자료의 가중 평균으로 계산된 것이며, GSM은 상호 보정 없이 원래 센서 파장의 정규화된 반사율을 사용한 것임(Mariorena and Siegel, 2005). 본 과제에서는 GSM 버전을 사용함.
- OC는 동일하게 ESA에서 제공하는 OC-CCI (Ocean Colour Climate Change Initiative)로 단일 센서의 원격 탐사 반사도(Remote Sensing Reflectanc, Rrs)를 합성하고 선택된 알고리즘을 통해 다양한 해색 산출물을 제공. 본 과제에서 사용된 두 종류의 합성 SChl 자료의 공간 해상도는 4km이며, 일별, 주별(실제로는 8일), 월별 등의 자료를 모두 제공하나 본 과제에서는 주별 자료가 사용됨.

KOPRI 극지연구소



Figure 2-1-2. Webpages of Ocean Colour Climate Change Initiative (OC-CCI) (left; https://www.oceancolour.org/) and GlobColour Project (right; https://www.globcolour.info/).

- 위에 언급된 해양 요소 자료(SST와 SChl)는 위성 자료에서 제공하는 불확실성 정보를 반영하여 일차적인 교정이 수행되었으며, 각 자료가 지니는 특징, 예를 들어 OISST의 해빙 영역 문제, 해색 자료의 cloud edge에서 여전히 잔존하는 spike와 같은 오차들을 어느 정도 해결함.

□ 연구내용 2-2. 북극 현장 관측 자료 확보 및 위성 기반 광역적 산출물 검보정

○ 달성실적 상세내용

<해양 표층 온도>

- 해양 표층 온도에 대한 현장 관측 자료는 NOAA에서 제공하는 in situ SST Quality Monitor version 2.10에서 제공하고 있음 (https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/sst/ iquam/). 1981년부터 전 지구 규모로 다양한 플랫폼(Argo, drfter, Mooring 등)으로 획득된 자료를 제공하고 있음. 그러나, 북극해에서의 관측 빈도는 상대적으로 낮음.
- 본 과제에서 사용되는 SST 자료들은 이미 전 지구 규모로 획득된 현장 관측 자료가 최적 보간법을 통하여 동화된 것으로 추가적인 검보정이 의미 없음. 그러나 북극 지역에 대한 검증 절차는 필요해 보임. 이는 향후 관측을 통해 획득된 자료를 바탕으로 수행할 예정임.

<해양 표층 클로로필>

- 북극 지역의 해양 표층 클로로필 관측 자료는 본 과제를 통해 꾸준히 수집하고 있음(세부연구목표 3번 참조). 그러나 북극은 구름의 존재 등과 같은 다양한 이유로 위성자료의 matchup이 제한적임. 또한, 본 과제에서 획득된 현장 관측 자료는 모두 척치해에 국한됨.
- 이전 다양한 연구에 의해서 matchup 결과는 북극에서 약 60%수준의 정확성을 보유하고 있으며, 지역적으로 해수의 특성이 상이하여 지역 알고리즘이 적용되어야 함.
- 본 과제는 북극 전 지역을 대상으로 하고 있으므로 지역적 알고리즘 적용이 힘듬. 따라서, 어느 정도의 부정확성을 감안하지만 시간 변화 분석에는 큰 문제가 되지 않을 것으로 보임.
- 차후 본 과제에서 획득된 자료들은 척치해에서의 해색 원격 탐사 알고리즘 개발에 사용될 예정임.

□ 연구내용 2-3. 해양 요소 장기 시계열 자료 구축과 계절별 변화 패턴 파악, 장기 변화 추세 정량화

○ 달성실적 상세내용

<해양 표층 온도>

- Figure 2-3-1에 북극해의 15개 subregion (세부연구목표2/연구내용 2-1 참조)을 포함하는 전체 지역의 SST 아노말리의 시계열과 경향성을 나타냄. 세 자료 세트 모두 증가하는 경향을 보여줌(ERSST: +0.13 ℃deg^{-1}, HadISST: +0.11 ℃deg^{-1}, OISST: +0.07 ℃deg^{-1})
- 그러한 경향은 대부분의 지역에서 동시에 나타나는 것이 아니라 eastern Arctic Ocean (Barents Sea, Greenland Sea, Norwegian Sea 등)에서 대부분 주도함. 이들 지역은 대서양 수괴가 대량으로 유입되는 지역으로 전 지구적 해양 기후 변화의 영향을 직접적으로 받음.
- 특히, ERSST에서는 2000년대 중반까지 eastern Arctic Ocean 지역의 SST의 증가 경향을 보이다가 이후 증가의 폭이 둔화되며 2010년대 중반부터는 오히려 감소하는 경향으로 나타남. 이는 시계열 자료 그림에서도 세 자료 모두에서 확인됨. 그러나 대체적인 경향은 증가 경향이 나타나며(Figure 2-3-2), 이러한 최근 감소에 대한 추가적인 연구가 요구됨.

KOPRI 극지연구소

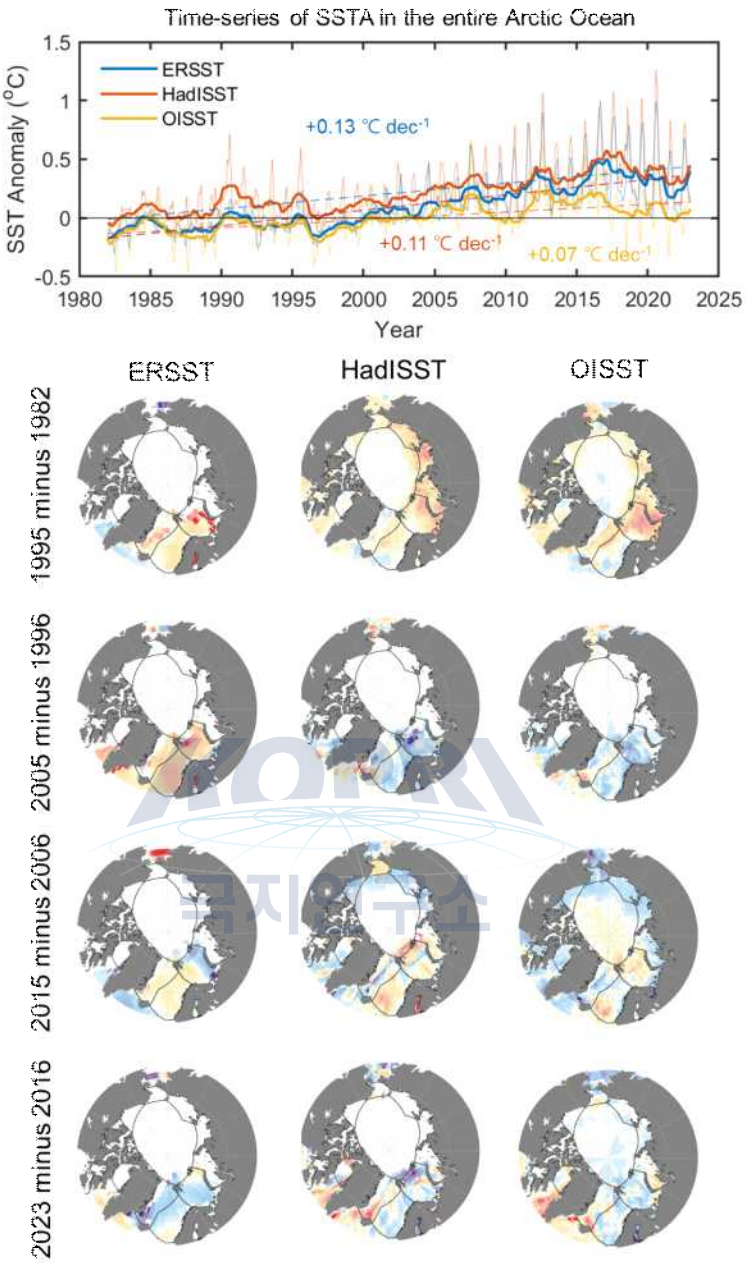


Figure 2-3-1. (Top panel) Time series of Arctic mean SST anomalies during 1982-2022 estimated from ERSST(blue), HadISST(red), and OISST(yellow). Thin lines show individual months and thick lines show smoothed data (13-month LOWESS filtering for the SST data). (Bottom panel) Maps of difference in SSTA calculated from annual data.

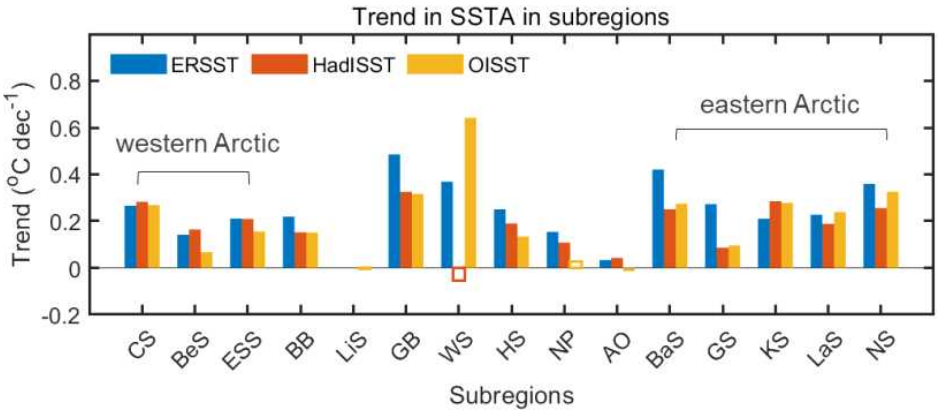


Figure 2-3-2. Trends in SST anomaly in subregions estimated from ERSST (blue), HadISST (red), and OISST (yellow). The bar plots without face color mean statistically insignificant (p>0.01).

<해양 표층 클로로필>

- Figures 2-3-3a & 2-3-3d는 OC와 GC의 SChl (unit: mg m^{-3})의 전 기간 평균 분포를 나타냄.
- Arctic Ocean 영역은 대부분 다년생 해빙의 존재로 인하여 결측되었음. 대부분 약 10 mg m^{-3}에 근접하는 SChl은 북극해의 연안 지역을 따라 형성되어 있음. 특히나 East Siberian Sea, Laptev Sea, Kara Sea 등지에서 넓게 분포하고 있음. 연안 지역을 제외하고 높은 클로로필 농도를 보이는 영역은 Arctic Ocean 영역 내에서 Chukchi Sea와 Beaufort Sea에 인접한 지역임.
- Figure 2-3-3b와 2-3-3e는 정규화된 SChl의 변화량을 보여주며 Barents Sea는 대부분의 영역이 100%이상의 높은 변화를 보임. 이 밖에도 Chukchi Sea, Beaufort Sea, Laptev Sea, Kara Sea 등지에서 일부 높은 변화 영역이 존재함. Greenland Sea는 특이하게 연안 지역에서 낮게 나타나는데, 이는 Norwegian Atlantic Current로 불리는 난류의 지류에서 높은 변화를 나타내고 한류가 흐르는 연안지역에서의 변화는 상대적으로 낮게 나타남.
- Figures 2-3-3c와 2-3-3f는 각 자료의 전 기간 중 극야(polar night) 기간을 제외하고 플랑크톤 일차 및 2차 bloom을 포함하는 기간인 4-10월 자료내에서 자료 관측률을 계산함. 그 결과 가장 높은 관측률은 54.5±17.4%(OC)와 65.2±23.4%(GC)로 Gulf of Bothnia에서 나타남. 그 다음 순으로 White Sea, Norwegian Sea, Hudson Strait의 순임. 가장 낮은 자료 관측률은 0.6±2.7%(OC)와 0.7±3.6%로 Lincoln Sea, 다음으로 Arctic Ocean이 그에 준하

는 수준으로 나타남 (OC: 0.6±2.0% & GC: 0.8±2.5%) (Table 2-3-1 참조).

- 일반적으로 GC 자료 관측률이 OC보다 높게 나타나며 이는 합성 방법의 차이로 인하여 발생하는 것으로 보임. 본 과제에서 정확한 SChl의 장기 변동성을 분석하기 위하여 전체 영역 중에서 자료 관측률이 1%도 못미치는 Linconln Sea와 Arctic Ocean은 분석에서 제외함 (잔여 영역 15개).

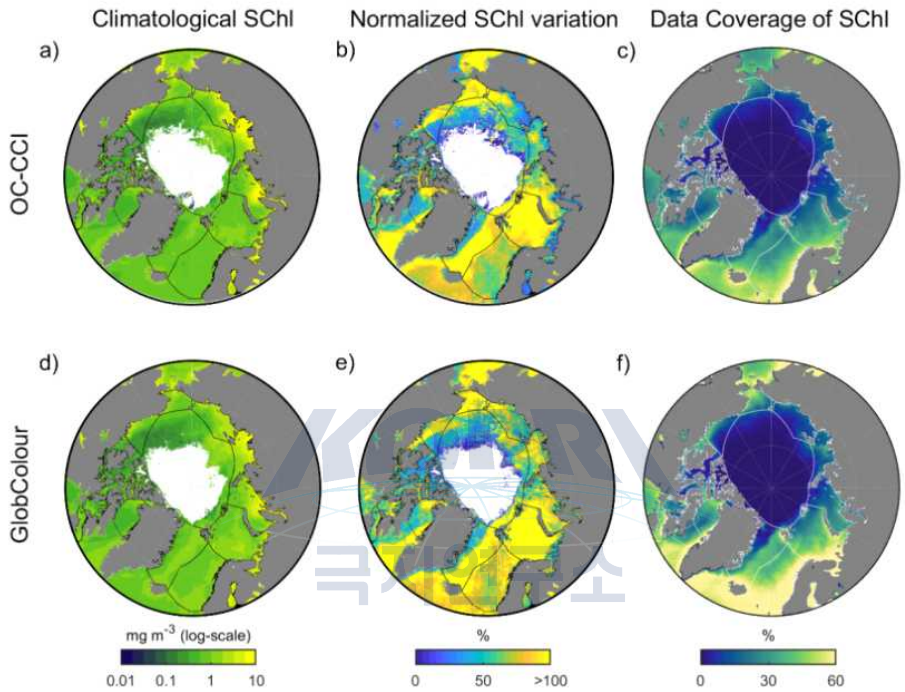


Figure 2-3-3. (a, d) Climatological SChl (surface chlorophyll-a concentration), (b, e) Normalized SChl variation (coefficient of variance), and (c, f) data coverage, estimated from OC-CCI (top panel) and GlobColour (bottom panel).

Table 2-3-1. Information on subregions and their data coverage

Subregion	Abbreviation	Area (km2)	Data Coverage (mean±standard deviation %) OC-CCI (OC)	GlobColour (GC)
Chukchi Sea	CS	346,259	22.9±7.9	31.7±11.2
Beaufort Sea	BeS	431,132	11.7±8.2	15.3±11.3
Hudson Strait	HS	200,039	33.5±5.9	45.0±8.7

Baffin Bay	BB	529,960	23.1±8.2	30.8±12.2
Lincoln Sea	LiS	35,262	0.6±2.7	0.7±3.6
Gulf of Bothnia	GB	113,419	54.5±17.4	65.2±23.4
White Sea	WS	90,531	42.7±11.9	57.7±18.3
East Siberian Sea	ESS	633,057	9.7±4.8	11.3±6.2
The Northwestern Passages	NP	1,062,173	11.2±9.6	13.7±12.5
Arctic Ocean	AO	5,120,993	0.6±2.0	0.8±2.5
Barents Sea	BaS	1,408,430	27.6±11.0	36.4±14.6
Greenland Sea	GS	1,186,456	21.9±12.8	28.5±17.6
Kara Sea	KS	896,938	13.5±6.5	18.2±9.8
Laptev Sea	LaS	513,667	13.1±4.6	17.1±7.2
Norwegian Sea	NS	1,437,096	41.3±10.2	53.4±12.1

- Figure 2-3-4은 13개의 Subregion에서의 SChl의 계절적 및 평균적인 계절 변화를 보여줌. 본 연구의 목적은 장기적인 변동성을 파악하기 위하여 1998년부터 2022년까지의 완전한 시계열 자료를 사용할 필요가 있음. 따라서 완전한 시계열 자료를 만들어내기 위해서 Gaussian filtering을 수행함. 연변화 시계열을 Gaussian fitting하여 전체 기간을 연결하는 방식으로 분석에 용이한 완전한 시계열 자료를 확보하고자 함.
- Gaussian filtering은 모든 지역이 double bloom이 존재한다는 가정하에 아래와 같은 식으로 수행됨.

$$SChl' = \beta_0 + BA_1 \exp\left[-\left(\frac{T - T_{1\max}}{2\sigma_1}\right)^2\right] + BA_2 \exp\left[-\left(\frac{T - T_{2\max}}{2\sigma_2}\right)^2\right]$$

- 여기서 β_0는 기저부(baseline)를, T는 시간이며, BA_1과 BA_2는 first와 second bloom의 amplitude를 의미함. $T_{\max}$와 σ는 각각 bloom이 최대가 되는 시기, bloom 기간과 연관된 변수로, 이 두 변수를 통해 bloom이 시작하는 시기(T_{int})를 $T_{\max} - 0.5\sigma$로 계산함.
- Figure 2-3-5는 각 계산된 변수들의 지역별 경향성을 나타냄. OC와 GC 모두 양의 경향을 보이는 지역은 GB와 WS로 두 지역 모두 SChl의 최대치(SChlmax) 경향도 높게 나타남(Figures 2-3-5a and 2-3-5b). 반대로, 음의 경향을 두 자료에서 모두 나타내는 지역은 KS가 유일하다. 이 지역의 SChlmax도 미약하나마 두 자료 모두 음의 경향을 보임.
- 가장 강한 first bloom의 BA 경향은 ESS에서 나타났으며, OC와 GC 각각

0.11±0.07 mg m^{-3} yr^{-1}과 0.06±0.06 mg m^{-3} yr^{-1}으로 양의 경향을 나타냄. 이 밖에도 확실하게 두 자료에서 모두 양의 경향을 나타내는 지역은 CS (OC: 0.07±0.02 mg m^{-3} yr^{-1}, GC: 0.02±0.02 mg m^{-3} yr^{-1})와 GS (OC: 0.02±0.01 mg m^{-3} yr^{-1}, GC: 0.02±0.02 mg m^{-3} yr^{-1})임.

KOPRI
극지연구소

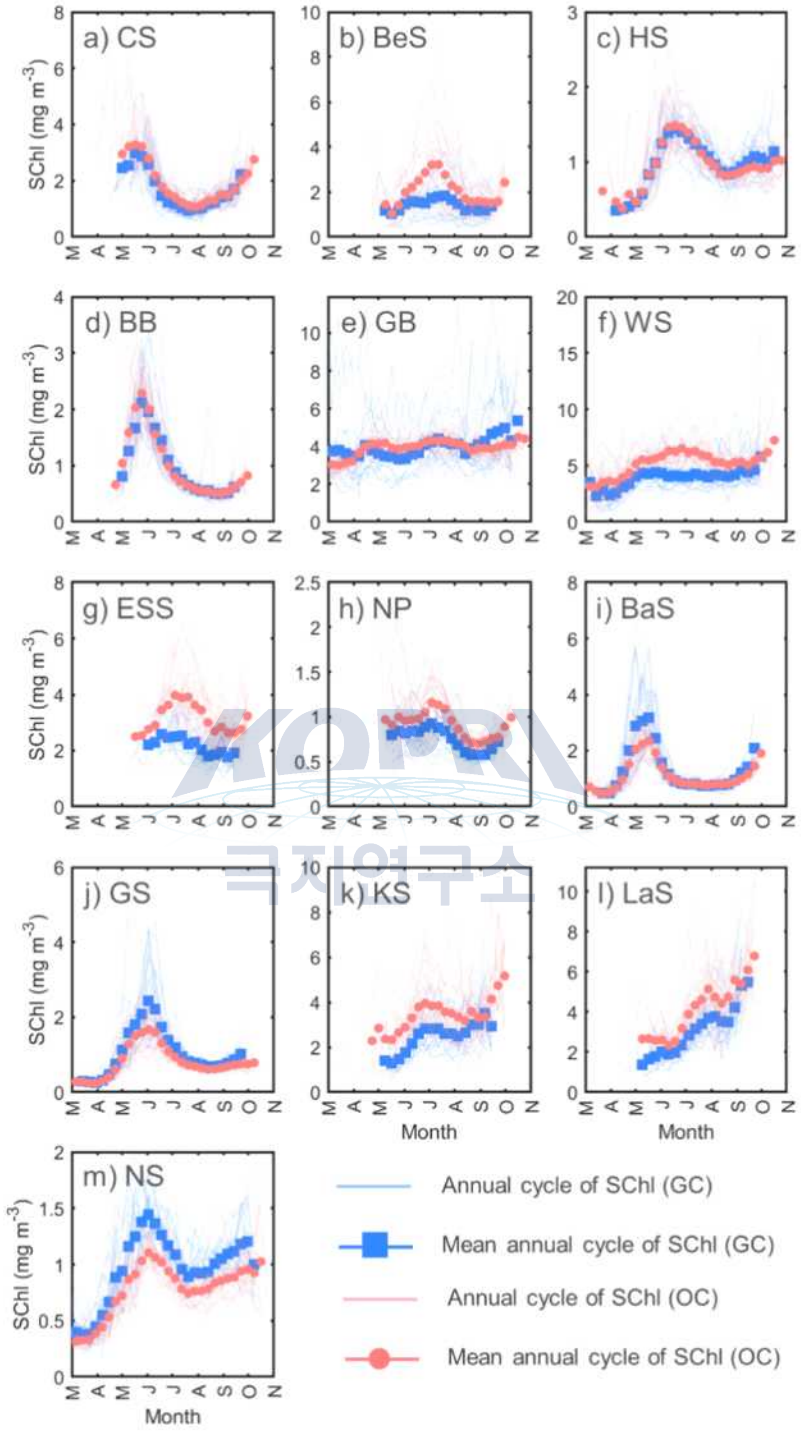


Figure 2-3-4. Annual cycles (light color) and mean annual cycle (solid color) of SChl in the individual Sector. The blue (red) series represents the GlobColor (OC-CCI) dataset.

- Second bloom의 BA는 가장 강한 양의 경향이 OC는 CS (0.61±0.25 mg m^{-3} yr^{-1}), GC는 GS (1.08±0.44 mg m^{-3} yr^{-1})에서 나타남.
- Bloom peak timing (Tmax)은 first bloom에서 가장 강한 경향이 WS에서 나타나는데 두 자료의 경향이 완전히 반대로 나타남 (OC: -0.17±0.15 days yr^{-1}, GC: 0.28±0.10 days yr^{-1}). Second bloom에 대한 Tmax는 ESS와 NS 순으로 두 자료세트에서 모두 강한 양의 경향을 보이며, CS, HS, BaS, LaS에서 음의 경향을 보임.
- 예상과는 달리, bloom initiation timing (Tint)의 경향은 Tmax의 경향과는 무관함. First bloom에 대해서는 ESS, NP, Second bloom에 대해서는 CS, HS, NP, BaS, LaS가 음의 경향을 보이며, 양의 경향은 first bloom에 대해서 GS, second bloom에 대해서 ESS와 NS가 두 자료에서 모두 확실하게 나타남.
- (총평) 두 자료의 분석 결과가 상이한 부분이 많음. 이는 두 자료가 비슷한 수준이라고 가정한다면 변화의 폭이 크지 않아 경향의 일치성이 낮은 것으로 보임. 그렇지 않다면 두 자료 중 어떤 자료가 더 북극해에 적합한 자료인지 판별할 필요가 있음.

KOPRI 극지연구소

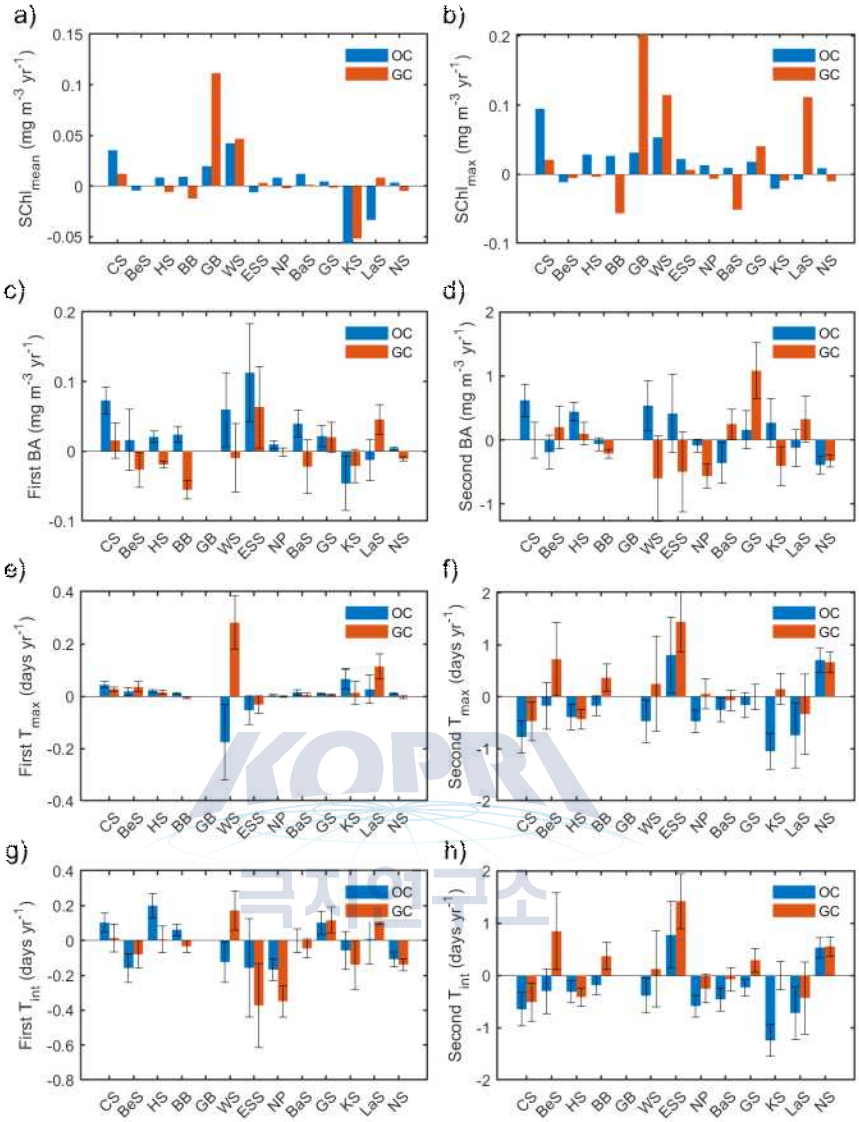


Figure 2-3-5. Trends of SChl and phenological properties in subregions (a) mean SChl, (b) max SChl, (c) first and (d) second bloom amplitude (BA), (e) first and (f) second bloom peak timings, (g) first and (h) second bloom initiation timings. The results yielded from OC (blue) and GC (red).

□ 연구내용 2-4. 해양 요소 변화율 계산하여 공간적 분포 특성 산정 및 전 지구적 변화율과 비교 분석 수행

○ 달성실적 상세내용

<해양 표층 수온>

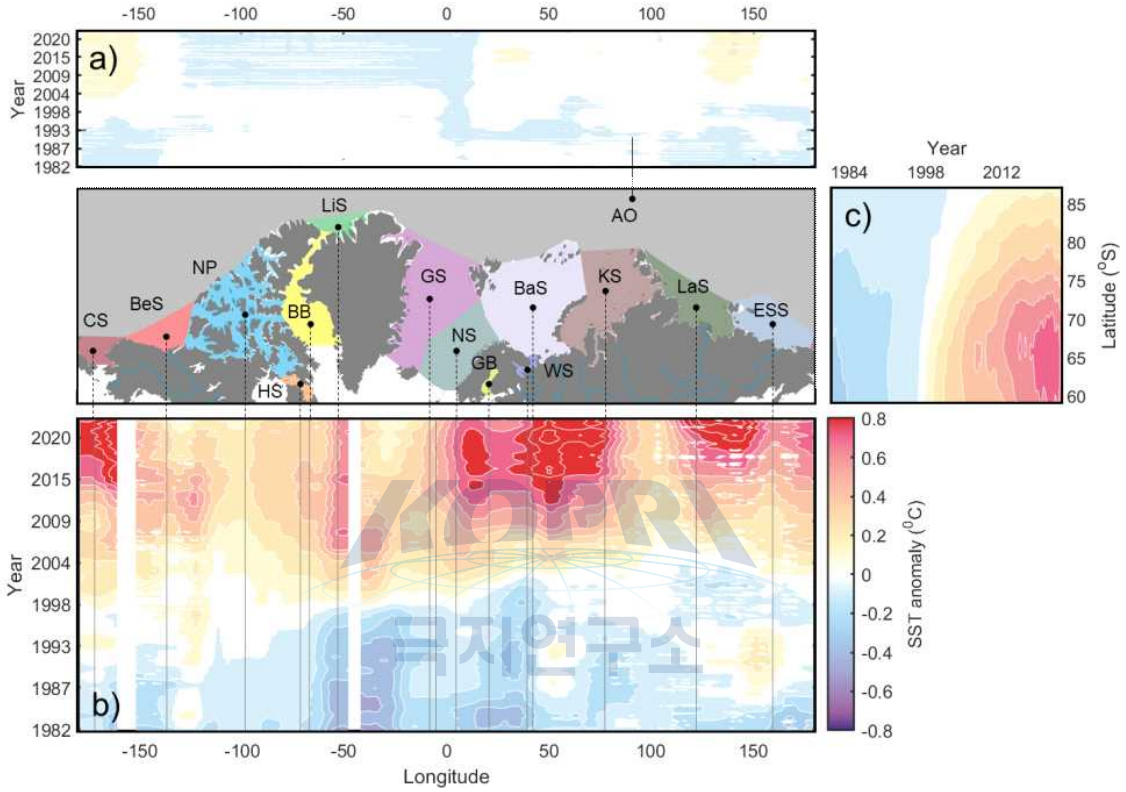


Figure 2-4-1. Temporal evolution of the meridional mean SST anomaly in the (a) Arctic Ocean and (b) the other subregions, and (c) for the zonal mean SST anomaly. The SST anomaly used in this figure is calculated by averaging three types of data sets (ERSST, HadISST, and OISST).

- Figure 2-4-1은 경위도 별 SST 아노말리의 시간에 따른 변화를 확인하기 위한 것으로 Figure 2-4-1a에서 나타나듯이 AO subregion은 유의한 변화는 없음. 대부분 연안에 인접한 subregions에서 SST 아노말리의 변화가 심함.
- Figure 2-4-2의 북극 평균 해류 특성을 고려했을 때, 대서양의 North Atlantic Current가 유입되는 경로 상의 NS, BaS, KS의 최근 SST 아노말리의 증가가 뚜렷함. 또한, 베링해를 통해 유입되는 태평양 수괴의 경로에 위치하는 CS 또한 증가 현상이 뚜렷함.

- LaS도 강력한 최근 SST 아노말리 증가 경향을 보이는 지역인데, 북극해 해류 경로에 직접적인 영향이 없는 지역으로 판단됨.
- LaS는 북극에서 가장 규모가 큰 레나(Lena)강 및 다른 중소 강의 하구가 위치한 지역으로 하천 유출의 직접적으로 영향을 받음. 담수 유입과 연관하여 해양 환경의 변화에 의한 결과로 판단됨. 관련된 추가적인 연구가 요구됨.
- 전반적인 최근 온도 증가 추이는 북극해 내부에서 비롯된 것으로 볼 수는 없음(Figure 2-4-1c) 북극해에서 해류가 유입하는 위도인 북위 60-65도에 열이 집중되어 있고이것이 북쪽으로 퍼지는 형태로 나타남.

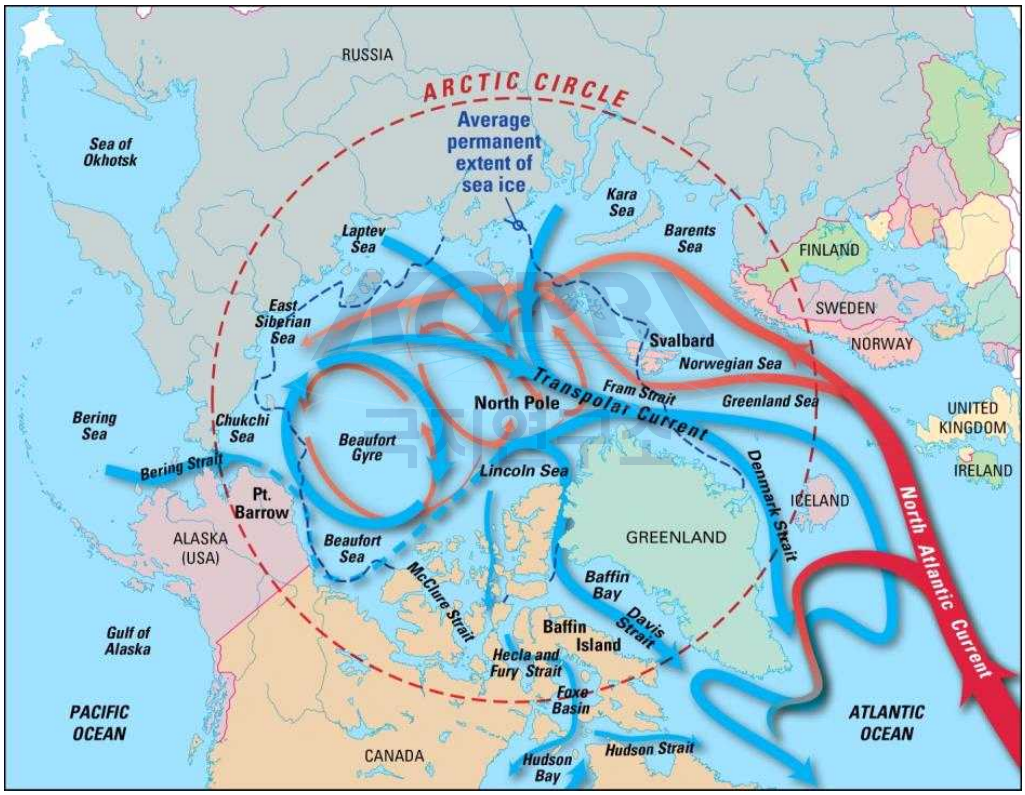


Figure 2-4-2. Arctic region currents. Blue currents are cold, relatively fresh water. Red currents are warm salty water. In the Arctic Ocean, the salt content of the warm currents makes them denser, so they flow below the fresher cold currents (Credit: USGS).

- Figure 2-4-3은 Figure 2-4-1에서 가장 높은 온도 증가 경향을 보였던 네 지역(CS, BaS, LaS, NS)의 연(주기: < 1년), 경년(3-9년), 및 10년(>10년) 주기를 가지는 변동성을 나타냄. 계절 내 변동을 포함한 연 변동성은 최근 들어 그

규모가 커지고 있음(즉, 계절적 변화가 뚜렷해짐).

- 경년 변동은 대체로 2-3년 주기가 가장 큰 기여를 함(Figure 2-4-3b). 각 지역의 경년 변동 간의 상관성은 유의하지 않음. 즉, 각기 다른 경년 변동의 근원을 가진다는 것을 암시함.
- 10년 주기 변동 또한 최근 들어 변동폭이 커졌음 (Figure 2-4-3c). 특히, CS에서 그 변동 크기 증가하고 주기가 길어짐. 1995년 전까지는 거의 대체로 네 지역 모두 유사한 10년 변동 주기 특성을 가지고 있었으나 이후로는 각기 다른 패턴을 보임. 즉, 이후 10년 주기 변동의 지역성(regionality)이 증가함.
- 비선형적 경향성을 통해 네 지역 모두 증가하는 패턴을 보이는 것을 다시 한번 확인함 (Figure 2-4-3d). 그러나, CS, BaS, LaS는 초기에 비하여 최근 더 급격히 변화하는 패턴을 보임. 반대로, NS는 과거 급격하게 증가했다가 최근 들어 그 증가폭이 완화되는 패턴을 보임.

KOPRI
극지연구소

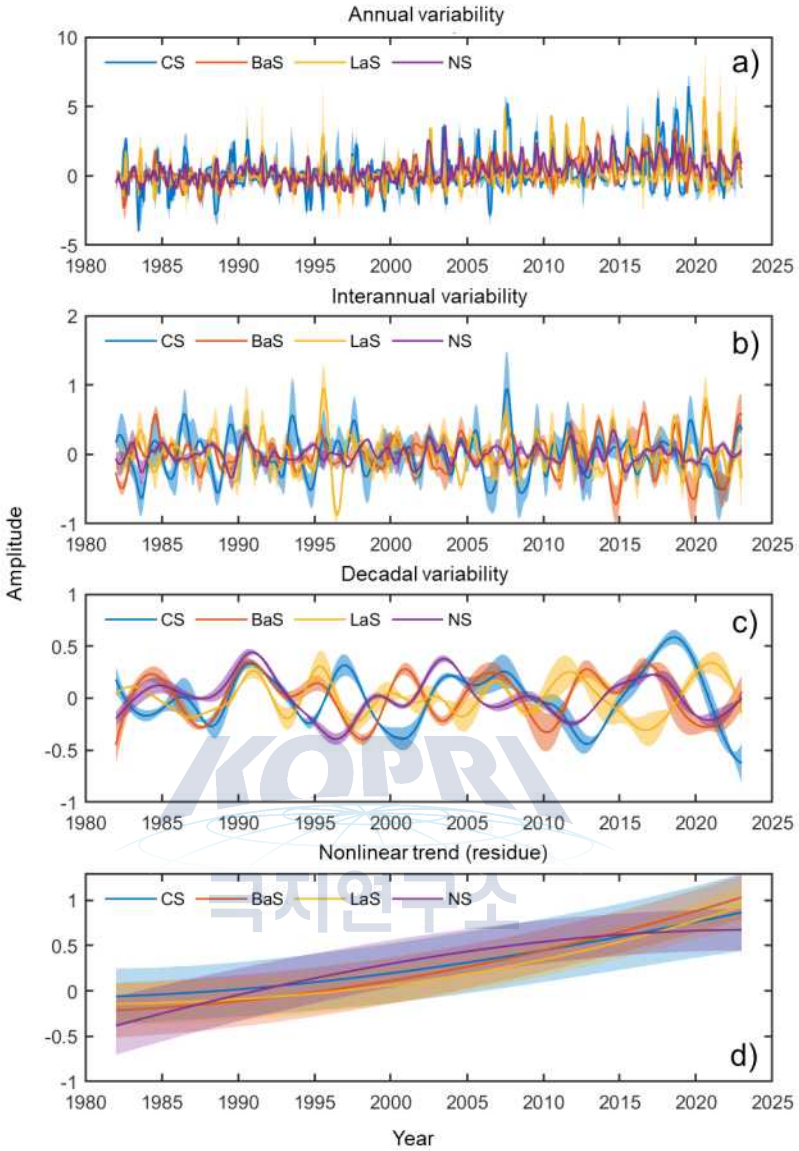


Figure 2-4-3. (a) annual, (b) interannual, and (c) decadal variability of SST anomaly in four subregions (CS: blue, BaS: orange, LaS: yellow, NS: purple), the regions showing the strongest linear increase trend (refer to Figure 8). (d) Residue excluding the variability with certain cycles from the original time series, that is, a non-linear trend.

<해양 표층 클로로필>

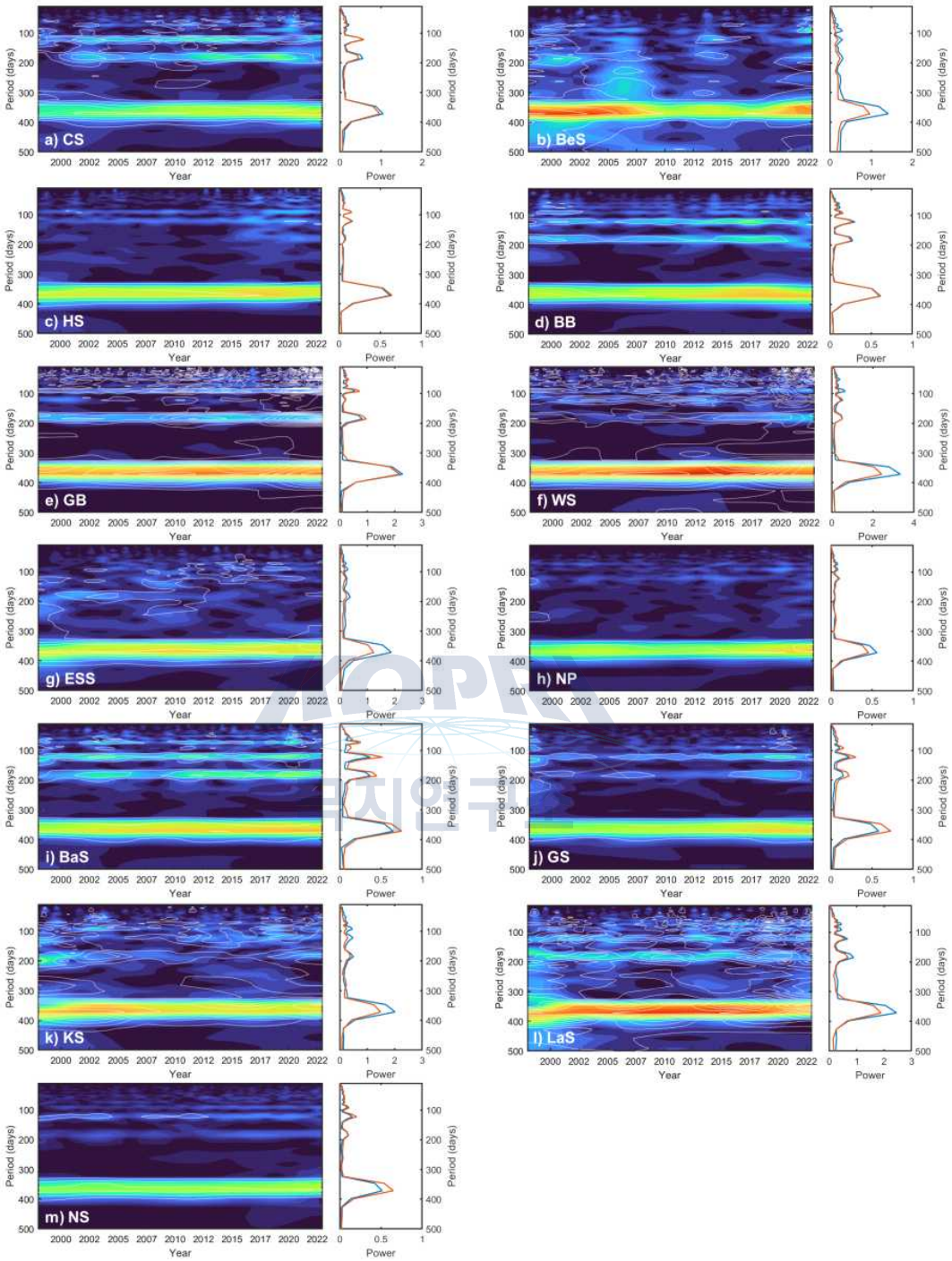


Figure 2-4-4. Wavelet power spectrum and time-averaged profile of wavelet power in the individual subregion. In spectrums, background color shows the results from OC and white solid contour line is from GC. In profiles, the blue and red represent OC and GC datasets, respectively.

- Figure 2-4-4은 웨이블렛 분석을 통해서 SChl의 시계열 자료에서 어떤 주기가 지배적이며 시간에 따라 어떻게 진화하는지를 파악하기 위하여 수행됨.
- 대부분 강한 계절적 변화(1년 주기)를 가짐 특히 강한 계절적 변화는 WS, GB, LaS에서 나타남. 계절 변화의 기여도를 생각했을 때 BeS, HS, ESS, NP, KS 등에서는 90%이상의 변화가 계절 성분에 의해 주도됨.
- BeS는 2010년대 계절적 성분의 약화 이후 최근 2020년대에 들어서면서 다시 강해짐. WS에서는 2010년대 중반 계절적 성분이 탁월하게 강화됨. 대부분 지역이 2010년대 중후반 이후로 계절적 성분이 강화되는 경향을 보임. 이는 해빙의 활동과 무관하지 않은 것으로 판단됨.
- 연변동 성분은 그리 강하게 나타나지 않음. 이는 이전의 경향성 분석 결과를 통해 추론된 사실과 부합함. 계절 내 변동 (intra-seasonal variation)은 위의 다섯 지역을 제외하고 어느 정도 나타남. 특히, 3개월 및 6개월 변동이 크게 발생하는 것으로 보임. 특히나 이 두 주기 성분이 전체 변화에 비하여 강하게 나타나는 지역은 BaS임. BaS는 submesoscale eddy의 활동이 빈번한 지역으로 그러한 해양 특성의 결과와 연관있을 것으로 추정됨.
- BAS에서 특징적인 것은 계절 내 변동의 강화 시기가 또 다른 주기가 보임. 약 10년의 주기로 강화되는 것으로 확인됨. 이는 차후 추가 연구가 필요함.
- 최근 전 지구적 SChl 변동 경향은 고위도(60도 부근)에서 높은 양의 경향을 나타내어 왔음(FIgure 2-4-5). 특히, 남극 주변 해역에서 높은 증가 경향을 보이며, 북반구에서는 북위 45도를 중심으로 상대적으로 높은 증가 경향을 보임. 앞선 wavelet 분석 결과에서 년주기 보다 더 긴 주기를 가지는 성분이 높지 않으며 (Figure 2-4-4에서는 생략됨), 경향 분석 결과에서 유의하지 않은 수준의 경향성을 미루어 보아 상대적으로 북극 지역의 변화는 크지 않음.
- (총평) 북극해역에서의 SChl 변화는 장기적인 변동 자체에 주목하는 것 보다도 계절 내 성분이 얼마나 빈번하게 발생하며 해양 물성과의 연관성을 바탕으로 관련된 메커니즘을 밝혀 내는 것이 더 중요한 것으로 판단됨.

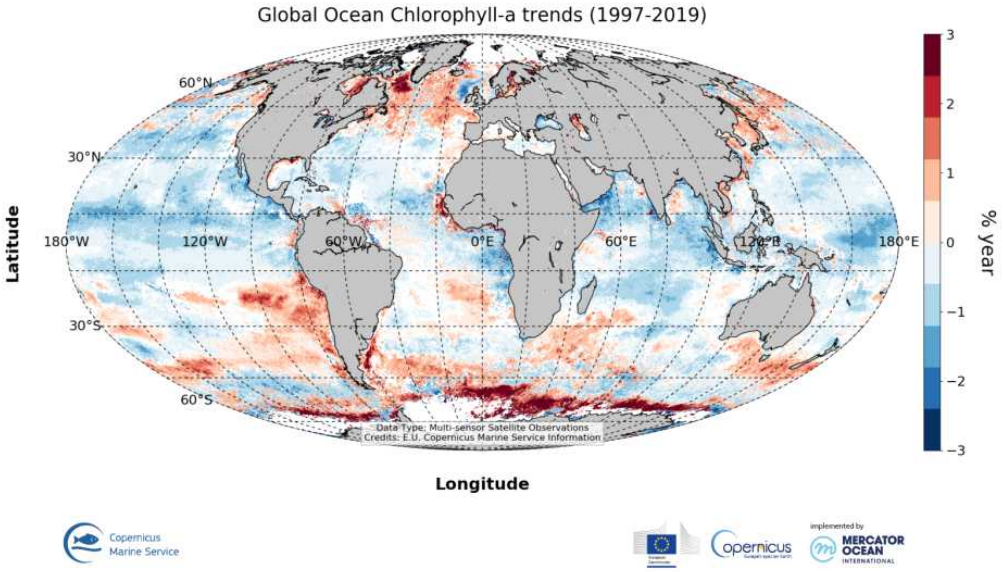


Figure 2-4-5. Global Ocean Chlorophyll-a trends (1997-2019). Trends are expressed as annualized percentages, with red indicating a positive trend and blue a negative trend. Areas with no significant trend are shown in white (Credit: CMEMS).

KOPRI
극지연구소

(3) 세부연구목표3. 산출물 검증 및 정보 제공을 위한 북극 현장조사

□ 연구내용 3-1. 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통한 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보

- 2023년 7월 30일부터 9월 2일까지 진행된 아라온 북극해 2항차 기간 동안, 다음과 같이 60개 연구정점 및 항해 경로상 해수 샘플링을 수행함.

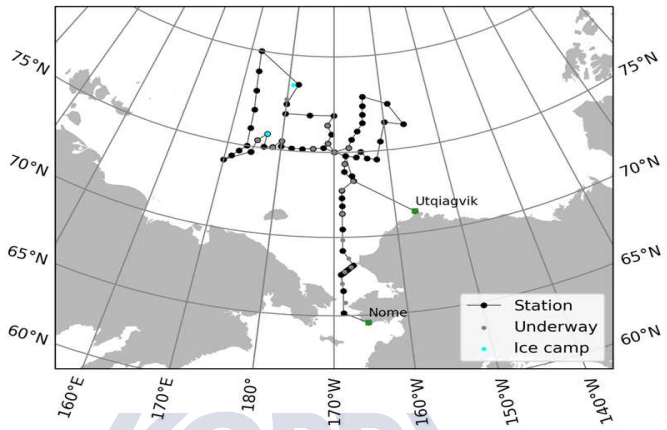


Figure 3-1-1. Second Araon Arctic route and the locations of seawater sample acquisition

KOPRI 극지연구소

Table 3-1-1. Information on the sample stations

No.	Site ID	Date(UTC)	latitute	longitute	CTD	Underway water sampling	Trios Ramses
1	Station-001	2023-08-03 5:26	65.17347	-168.691	O		
2	Underway-001	2023-08-03 9:24	65.86045	-168.418		O	
3	Station-002	2023-08-03 15:17	66.62995	-168.688	O		O
4	Underway-002	2023-08-03 18:01	67.08332	-168.805		O	
5	Station-003	2023-08-03 22:13	67.66998	-168.96	O		O
6	Underway-003	2023-08-04 2:01	67.83739	-168.428		O	
7	Station-006	2023-08-04 4:34	68.01298	-167.867	O		O
8	Underway-004	2023-08-04 7:36	68.12804	-167.495		O	
9	Station-008	2023-08-04 9:30	68.24199	-167.122	O		
10	Underway-005	2023-08-04 13:07	68.67914	-167.843		O	
11	Station-009	2023-08-04 16:55	69.16673	-168.667	O		O
12	Underway-006	2023-08-04 21:33	69.83187	-168.666		O	

13	Station-010	2023-08-05 1:56	70.5	-168.667	O		O
14	Underway-007	2023-08-05 8:10	71.43002	-168.667		O	
15	Station-013	2023-08-05 15:26	72.35949	-168.662	O		O
16	Underway-008	2023-08-05 20:25	72.83382	-168.658		O	
17	Underway-009	2023-08-06 3:31	73.34664	-166.695		O	
18	Station-016	2023-08-06 12:03	73.88621	-168.188	O		O
19	Underway-010	2023-08-06 16:35	74.34487	-168.05		O	
20	Station-018	2023-08-06 21:10	74.80084	-167.9	O		O
21	Underway-011	2023-08-07 4:32	75.02057	-169.937		O	
22	Underway-012	2023-08-07 8:14	75.50711	-171.214		O	
23	Station-021	2023-08-07 15:27	76.00124	-170.499	O		O
24	Underway-013	2023-08-07 20:58	76.48135	-171.306		O	
25	Station-023	2023-08-08 8:32	76.9949	-170.012	O		O
26	Station-024	2023-08-08 23:11	76.99255	-175.003	O		O
27	Station-025	2023-08-09 10:04	76.99799	179.9424	O		O
28	Underway-014	2023-08-09 22:55	77.75966	179.8887		O	
29	Ice camp-1	2023-08-10 18:20	78.52197	-179.022			
30	Station-027	2023-08-13 1:06	78.5411	-177.586	O		O
31	Station-028	2023-08-13 21:17	80.00017	172.4023	O		O
32	Station-029	2023-08-14 11:26	79.00002	172.8001	O		O
33	Station-030	2023-08-14 21:48	78.00006	173.1996	O		O
34	Station-031	2023-08-15 8:28	76.99989	173.5993	O		O
35	Station-032	2023-08-15 22:30	75.99926	173.6087	O		O
36	Station-033	2023-08-16 8:32	75.00006	173.6004	O		O
37	Station-036	2023-08-16 22:04	74.00248	170.1637	O		O
38	Station-037	2023-08-17 19:39	74.69368	174.6239	O		O
39	Underway-015	2023-08-18 5:41	75.39991	175.3303		O	
40	Station-039	2023-08-18 12:12	75.72666	177.1714	O		O
41	Ice camp-2	2023-08-19 16:37	75.9345	176.9729			
42	Station-040	2023-08-20 13:25	75.07497	176.8	O		
43	Underway-016	2023-08-20 18:42	75.10807	178.4203		O	
44	Underway-017	2023-08-20 23:06	75.50065	179.9999		O	
45	Station-043	2023-08-21 4:06	75.16518	-179.968	O		O
46	Station-045	2023-08-21 19:34	75.14995	-176	O		O
47	Underway-018	2023-08-22 1:07	75.19507	-173.988		O	

48	Station-047	2023-08-22 8:12	75.24049	-171.972	O		O
49	Station-048	2023-08-22 22:54	75.0206	-169.936	O		
50	Underway-019	2023-08-23 6:50	75.24587	-167.268		O	
51	Station-050	2023-08-23 12:14	75.69116	-166.638	O		
52	Underway-020	2023-08-23 19:51	76.21644	-165.23		O	
53	Station-052	2023-08-23 23:58	76.5674	-164.362	O		O
54	Station-054	2023-08-24 17:53	77.4674	-164.098	O		O
55	Underway-021	2023-08-25 1:23	77.92776	-163.967		O	
56	Underway-022	2023-08-25 6:33	77.67309	-161.528		O	
57	Station-056	2023-08-25 12:57	77.48206	-158.734	O		O
58	Underway-023	2023-08-25 21:31	76.93588	-157.583		O	
59	Station-057	2023-08-26 6:05	76.30391	-156.221	O		O
60	Station-058	2023-08-26 20:59	76.51887	-159.789	O		O
61	Underway-024	2023-08-27 5:00	75.98675	-160.528		O	
62	Station-059	2023-08-27 10:30	75.49845	-161.147	O		
63	Underway-025	2023-08-27 13:46	75.07299	-161.59		O	
64	Station-060	2023-08-27 19:27	74.51634	-162.152	O		O

- 연구정점에서의 CTD 채수는 표층, 아표층 엽록소 최대층(SCM), 유광층 경계 지점으로 세 깊이에서 이루어졌으며, 항해 경로상 표층에서 채수한 Underway를 합쳐 총 162개의 해수 샘플을 취득함.
- 채수한 해수 샘플은 각 1,000ml씩 나누어 클로로필-a(Chlorophyll-a), 부유퇴적물(SS, Suspened Sediment), 유색용존유기물(CDOM, Colored disolved organic matter)에 의한 흡광량을 측정하기 위해 필터링과 화학처리를 진행함.
- 흡광 특성은 250~800nm의 분광범위에서 측정되었으며, 다음은 각 샘플의 흡광특성 분석결과 예시임 (Figure 3-1-2).

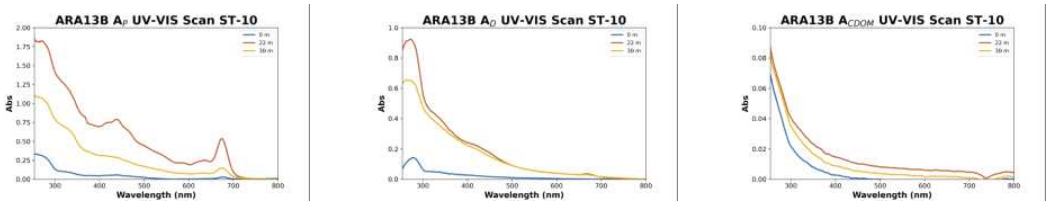


Figure 3-1-2. Examples of absorption properties of seawater samples obtained at the stations. (Left) Particles, (middle) detritus, (right) Colored dissolved organic matter.

- 또한 연구정점에서 채수한 해수 샘플과의 비교 분석을 위해서 분광복사계인 TriOS의 RAMSES를 이용하여 320~950nm 분광범위에서의 수중 복사 조고와 상하방 복사 휘도를 측정함. 해수 표층부터 유광층 경계까지 분당 10m의 속도로 내려가며 수직적인 변화를 연속적으로 측정함.
- 다음은 연구정점 10번에서 취득한 RAMSES의 깊이별 계측지를 나타냄 (Figure 3-1-3).

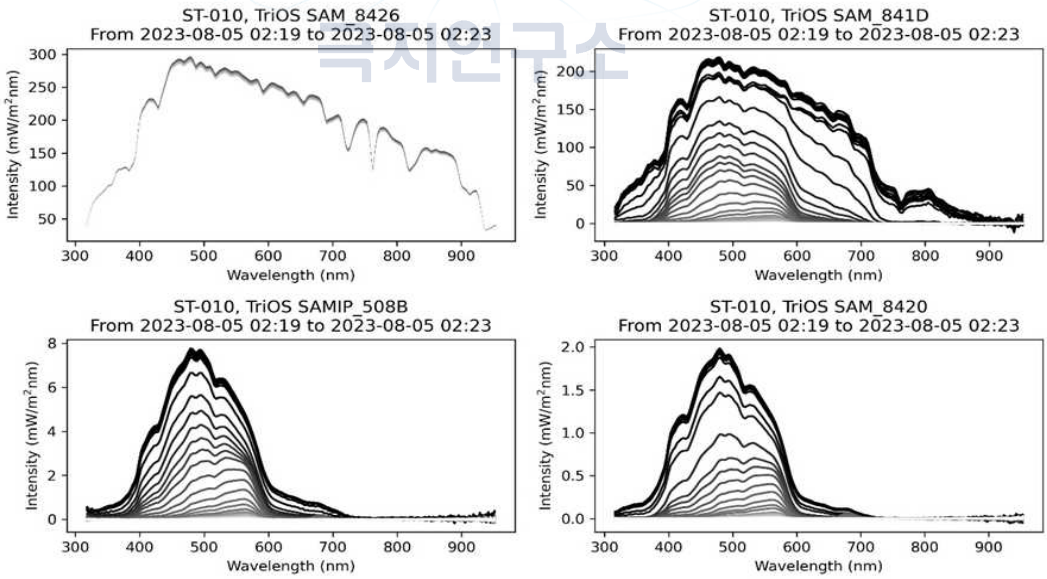


Figure 3-1-3. RAMSES observation results at the no.10 station.

- 상기 시료들은 실험실에서의 후처리를 위해 대기 중이며, 처리가 완료되면 분석 및 위성관측결과 검정에 활용할 계획임.

□ 연구내용 3-2. 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적 시스템 설치 및 자료 수집

○ 달성실적 상세내용

- 해빙을 구분하는 가장 보편적인 기준은 1년 이상 생존 여부임. 열역학적 기작에 의해 얼고 녹음은 1년의 주기성을 가지나, 그 속도는 열적 조건 외에도 동역학적 기작의 영향을 크게 받음. 즉, 이동과 변형에 의해 얼마나 갈라지고 겹쳐지는가는 해빙의 생존 여부에 영향을 미치며, 그 결과로서의 단년빙(First-year ice)과 다년빙(Multi-year ice)의 물성 또한 다름.
- 해빙을 관측하는 방법으로 시계열 영상에서의 동일 패치를 추적하는 위성원격탐사가 대표적이나, 북극해 전역에 대한 분해능의 한계는 통상 시간적으로는 1일, 공간적으로는 수십 km에 이름. 이는 해빙이 겪는 열역학적 기작을 분석하고 모사하기에는 크게 모자람이 없다. 그러나 동역학적 기작은 다름. 시간적 지속성은 변형의 경우 이벤트성으로 매우 짧으며 이동의 경우는 이보다는 길지만, 대기장, 해류장의 영향으로 변동성이 크고, 공간적으로는 주로 선형으로 발달하기에 탐지를 위해 고해상도가 요구됨. 따라서 위성원격탐사를 통한 관측 결과는 실제와는 다르게 완곡한 변화를 나타냄. 이 시공간적 평활화(smoothing) 효과는 필연적으로 현장 관측 자료와의 비교를 통해 보완, 해석되어야 함.
- 해빙 영역 중 특히 해수-해빙 경계부 주변인 Marginal Ice Zone(이하 MIZ)은 해파의 영향을 받음. 여기서 해파는 일부 해빙 아래로 침투하면서 감쇄된 효과를 가지나, 지금처럼 해빙이 줄어드는 추세에서는 해파에 의한 영향력은 상대적으로 강화됨. MIZ는 해양과 해빙이 만나는 경계부이자 표층의 상(phase)이 달라지는 변화부이기 때문에 해빙 원격탐사와 해빙 모델링 모두에서 가장 발전이 더딘 영역이기 때문에 더욱 현장 관측의 필요성이 높음.
- 2023년 8월의 북극해 2항차에서는 해빙 이동과 변형 관측을 목표로 소형 부이(buoy) 장비를 설치하고 그 관측 결과를 위성통신을 통해 실시간으로 수신함. 아래 그림은 이에 사용된 OpenMetBuoy로, 노르웨이 기상청 소속의 연구원 Jean Rabault가 오픈소스 기반으로 개발한 소형 해빙 부이임. OpenMetBuoy는 가로 12cm, 세로 12cm, 높이 9cm의 작은 상자 안에 GNSS 수신장치, Iridium 통신장치 및 배터리를 장착하여 부이의 위치를 측정할 뿐만 아니라, 6축 가속도 센서를 통해 움직임도 측정함. 이 움직임은 해양에서는 해

파의 유의파고(significant wave height)를 나타내고, 해빙에서는 해파가 해빙 영역으로 전파되면서 감쇄(damping)된 유의파고를 나타내며, 이 감쇄는 해빙의 두께, 강도, 해수-해빙 경계선으로부터의 거리 등에 의해 달라짐.

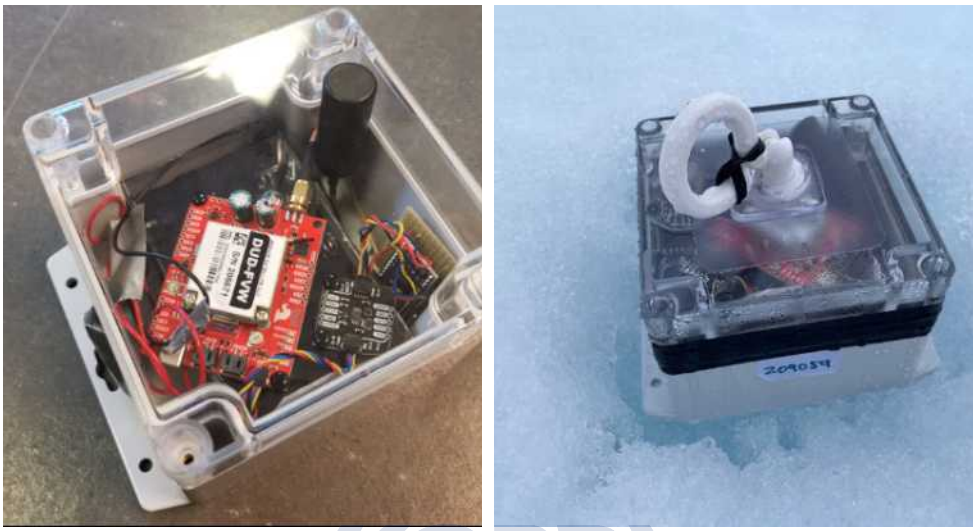


Figure 3-2-1. Photos of the ice-wave buoy in operation

- 이번 현장 조사에서는 총 13개의 부이를 다양한 조건의 해빙에 설치하여 감쇄 조건에 따른 변화와 해빙의 물성을 분리 분석하고자 함. 아래 그림은 13개 부이를 설치한 장소와 2023년 8월 25일의 해빙 농도 분포를 같이 도시함.

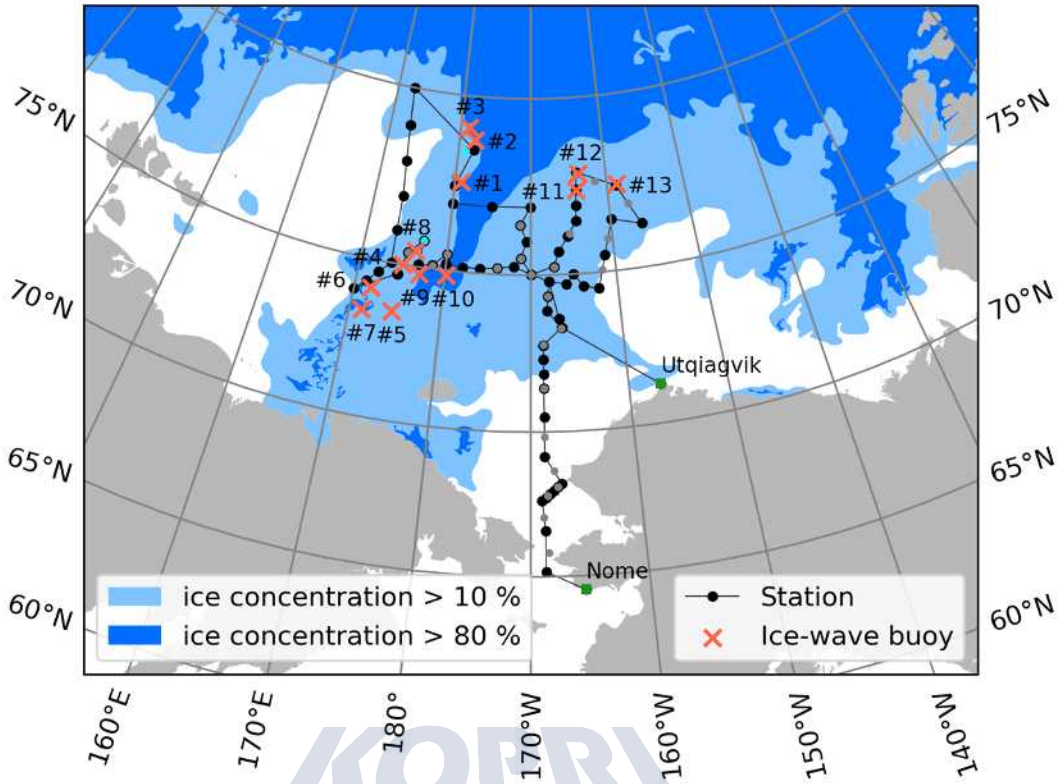


Figure 3-2-2. Location map of the ice-wave buoy deployment

KOPRI 극지연구소

- 소형 부이 설치의 장소 조건은 두께 0.8~2m의 해빙으로 주변이 둘러싸인, 해수-해빙 경계선으로부터 50km 이상 떨어진 해빙 지역 내부이며, 상기 조건을 만족했을 때의 기대 수명은 3주 이상임. 13개의 소형 부이 설치 장소는 대부분이 조건들을 만족함. 설치는 아라온호를 이용해 목표 해빙에 접안 후 선체의 크레인을 이용해 선체로부터 15m 떨어진 위치에 안착시키는 방식으로 진행함.



Figure 3-2-3. Ice conditions over the locations of ice-wave buoy deployment

KOPRI 극지연구소

- 13개 소형 부이로부터 발신되는 Iridium short burst 데이터는 10분 간격의 부이 좌표와 30분 간격의 해파 스펙트럼을 담고 있음. 아래 그림은 2023년 8월 10일에 설치한 2번 부이의 위치 변화를 도시함. 이는 연구항차 기간 중 실시한 해빙캠프 지역에 설치되었기에 선상에서 크레인을 이용하는 방식보다 더 해빙 안쪽 깊숙한 곳에 안정적으로 설치할 수 있었으며, 이에 다른 부이들보다 긴 기대 수명을 가짐. 실제로 해당 부이는 예상 수명을 넘어 약 1개월간 작동함. 이동 궤적은 관성운동에 의한 전형적인 12시간 주기의 반시계 방향의 회전을 보여주며, 시작 위치와 끝 위치를 보면 실제 해빙의 이동 속도와 방향이 선형성과는 거리가 먼 것을 알 수 있음.

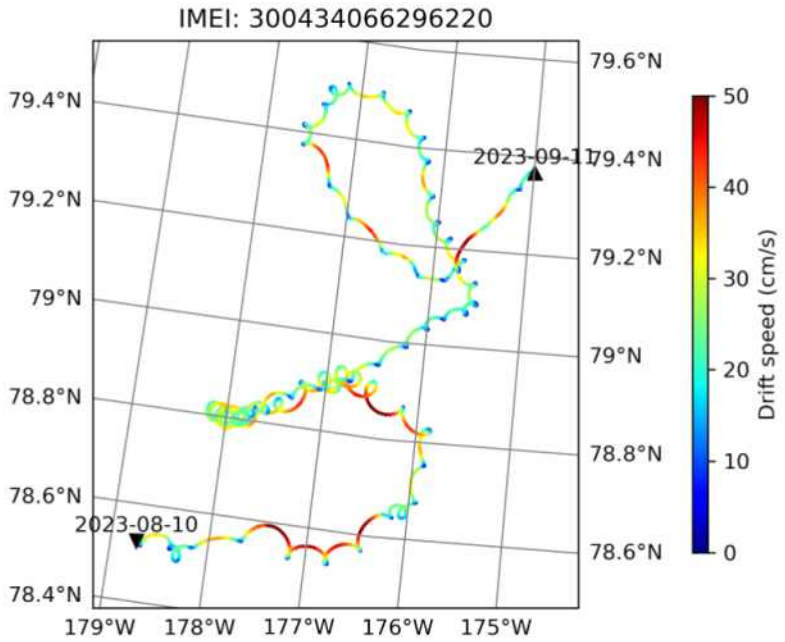


Figure 3-2-4. Drift trajectory of the ice-wave buoy #2

- OpenMetBuoy의 특장점은 전술한 바와 같이 6축 가속도 센서를 이용한 해파 정보의 추가 측정임. 아래 그림은 마찬가지로 2번 부이가 측정한 유의파고와 해파 주기를 보여줌. 유의파고의 크기로부터 감쇄 정도를 추정할 수 있으며, 짧은 시간 동안 튀는 값으로부터 부이 설치 장소 주변에서 이벤트성 해빙 변형이 발생한 시점과 규모를 추정할 수 있음. 해파 주기 또한 유사하게 침투한 해파가 해빙 감쇄로 인해 늘어진 정도를 나타내며, 해빙에서의 주기가 해양에서보다 길기 때문에 부이가 설치된 위치의 상변화를 지시함.

KOPRI 극지연구소

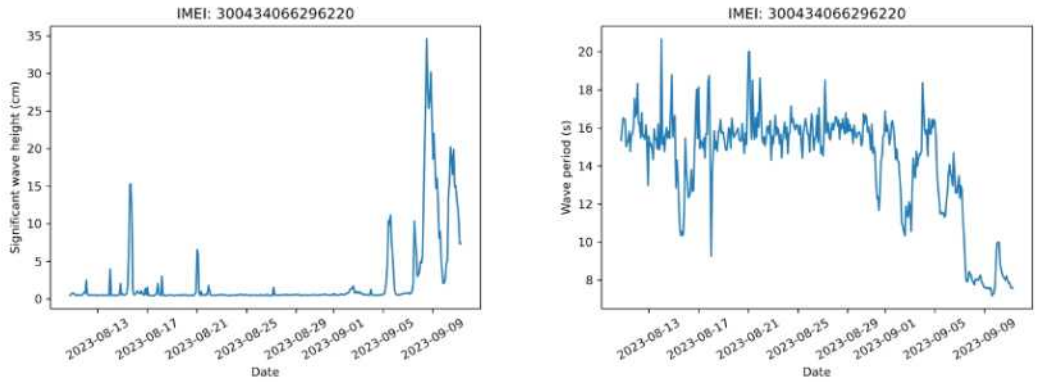


Figure 3-2-5. Significan wave height and wave period of the ice-wave buoy #2

- 전체 13개 부이의 관측자료는 개별적 분석 후 시공간에 대한 네트워크 분석을 거쳐 동시베리아 북극해 해빙의 동역학적 물성을 제시할 것이며, 나아가 위성원격탐사 영상으로부터 MIZ 범위 및 해파 기인 변형량 산정, 해빙 모델링의 모사 정밀도 향상에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대함.

□ 연구내용 3-3. 북극해 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개선 및 산출물 검증을 위한 해빙 코어 자료 확보 및 얼음 특성 자료 수집

○ 달성실적 상세내용

- 해빙 캠프에서 지름 9cm 해빙 코어 2개 확보하였으나 온도와 염도 측정은 코어 1개에서만 진행됨.

KOPRI 극지연구소

Table 3-3-1. Temperature and salinity of an ice core, measured at the ice camp

Depth (cm)	Temp (C)	Salinity (ppt)
0	-0.4	0.1
10	-0.4	0.0
20	-0.7	1.0
30	-0.6	2.0
40	-0.9	2.8
50	-1.0	3.8
60	-1.1	4.9
70	-	-
80	-	-
90	-1.1	3.9
100	-1.3	3.8
110	-1.1	3.5

□ 연구내용 3-4. 북극해 해빙 표면 세부 공간정보자료구축 및 분석을 위한 다종센서 기반 저고도 및 지상 스캔 자료 획득

○ 달성실적 상세내용

- 초분광, 라이다, 고해상도 광학 영상 동시 획득



Figure 3-4-1. Multi-sensor system used in this study

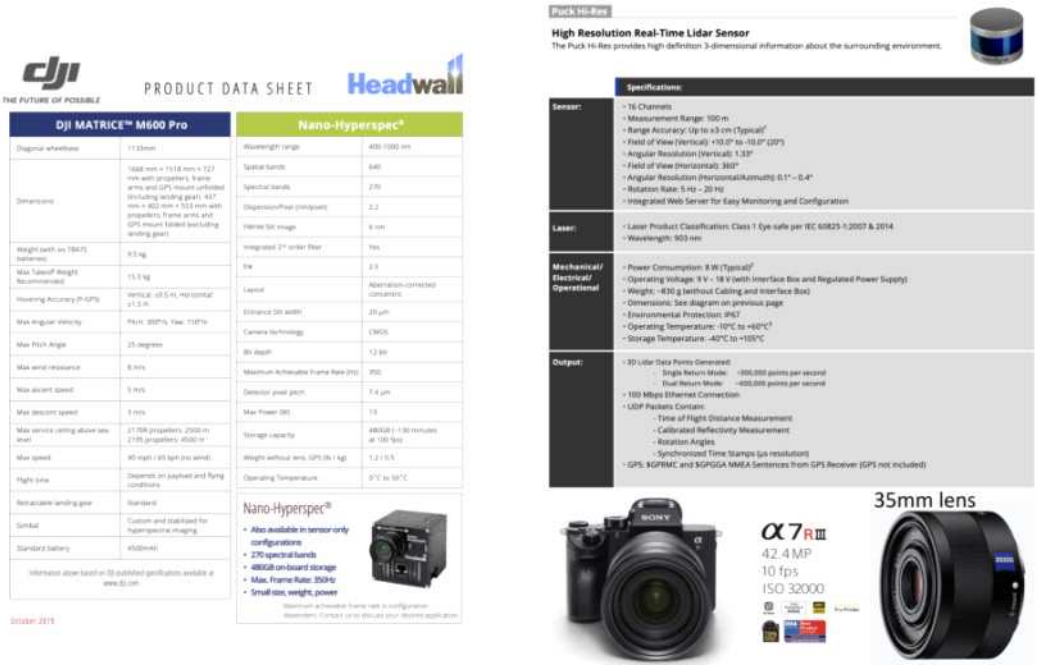


Figure 3-4-2. Specifications of the UAV and multi-sensors used in this study

- 연구지역인 북극해 해빙캠프 지역은 두께 2m 정도이며, 융빙호가 다수 분포하는 해빙으로 무인기 원격탐사 이외에도 융빙호 화학분석 및 생물분석 등 다양한 정보를 획득한 지역임.
- 무인기 이착륙 지점 근처에 초분광영상의 방사보정을 위한 타겟 3종을 설치하여 초분광영상을 분광반사율값으로 보정하는데 사용함. 초분광영상의 방사보정은 두가지 단계로 이루어지는데, 첫째로 렌즈커버를 이용하여 센서에 의해 기록된 화소값을 Radiance값으로 변환하는 작업과 디텍터별 민감도 차이에의 의해 발생하는 줄무늬현상을 동시에 보정한 후, 분광반사 타겟의 분광반사율 정보를 이용한 밴드별 선형회귀모델을 통해 계산된 초분광영상의 분광반사율 변환 과정임.

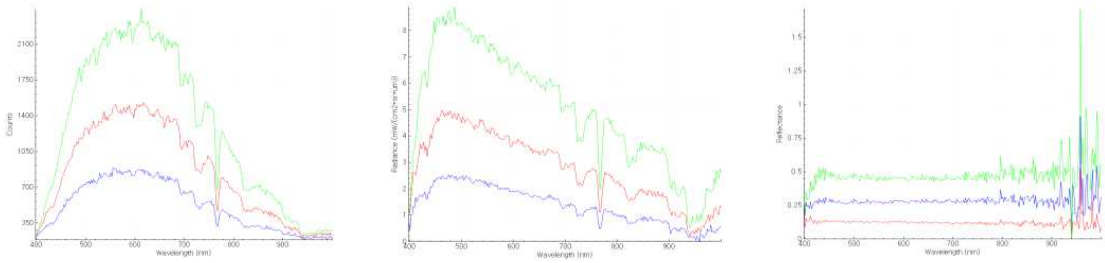


Figure 3-4-3. Digital number value (left), Radiance value (center) and Reflectance value (right) of the spectral target by wavelength

- 지표 기준 고도 약 20 m 높이에서 획득된 다종센서 기반자료로 초분광영상, 라이다 포인트 클라우드, 고해상도 RGB 광학영상을 획득하였음. 각 자료는 고해상도 RGB 광학영상의 경우 0.9 cm, 초분광영상은 4 cm의 공간해상도와 총 273개의 분광밴드 자료를 획득함.

KOPRI
극지연구소

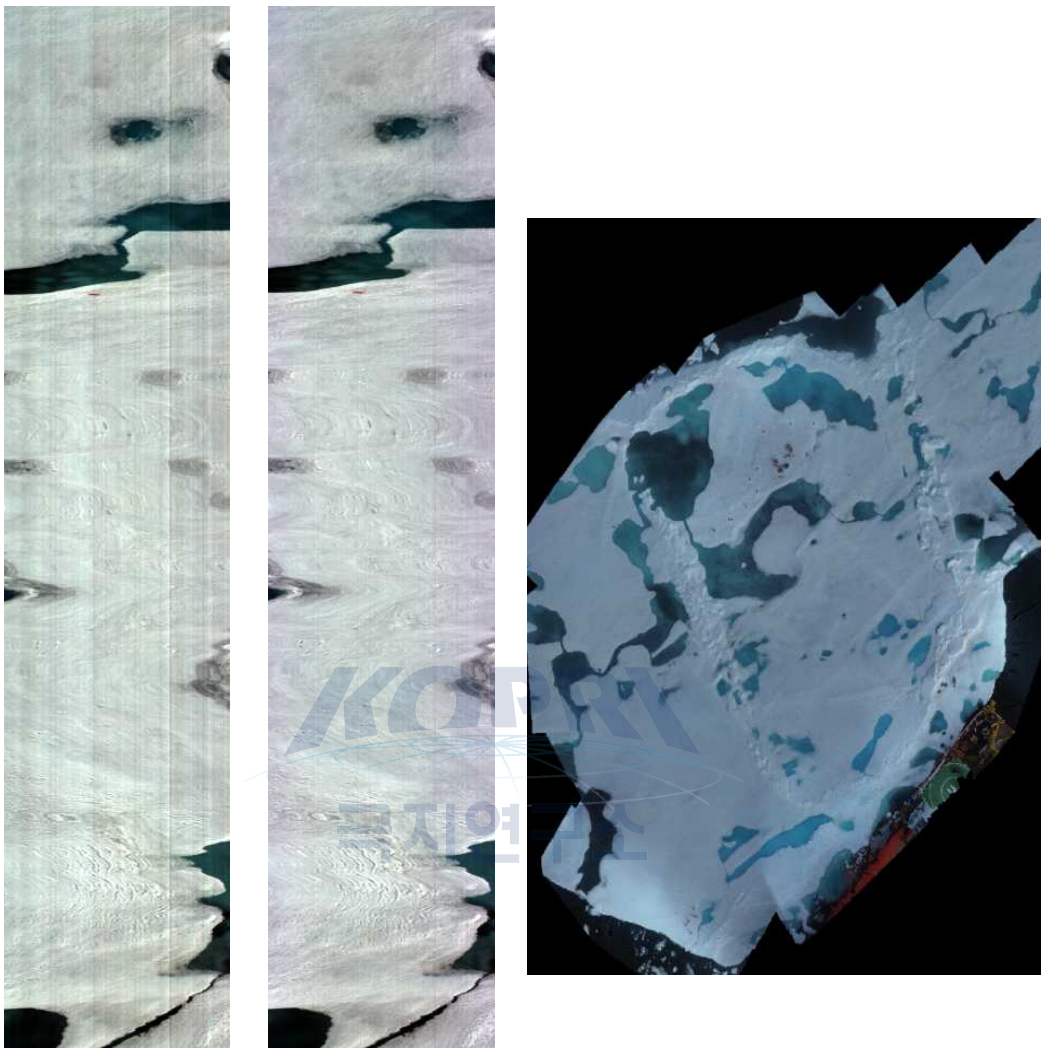
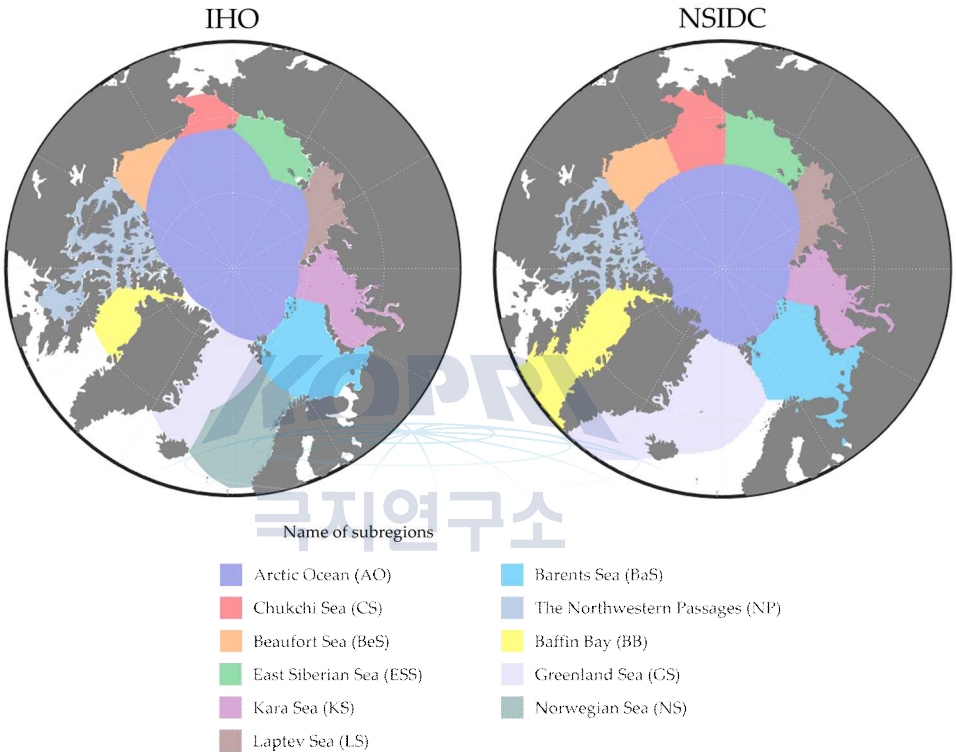


Figure 3-4-4. (Left) Initial image acquired by hyperspectral UAV, (center) radiance image, and (right) registered RGB optical image.

마. 2024년 5차년도 연구 요약

- 본 과제에서는 북극해의 지역별 해빙 및 해양 요소에 대한 분석을 위하여 국제수로기구 IHO가 발간한 23번째 특별 간행물 “Limits of Ocdeans & Seas”에서 제안된 해양과 바다의 경계 중 북위 60도 이상을 포함하는 해역에 대하여 소영역으로 세분화하여 분석을 수행함. 또한 일부는 NSIDC에서 제안한 별도의 세분 영역도 적용하여 비교함.



Map of Arctic Ocean subregions as defined by IHO (left) and NSIDC (right) criteria

(1) 세부연구목표1. 북극해 해빙 시공간 변동성의 해역/산출물간 관계 분석

□ 연구내용 1-1. 해빙 특성의 시공간적 변동 특성들간의 이종 상관성 분석과 환경변수장과의 해역별 변동 연관성 분석

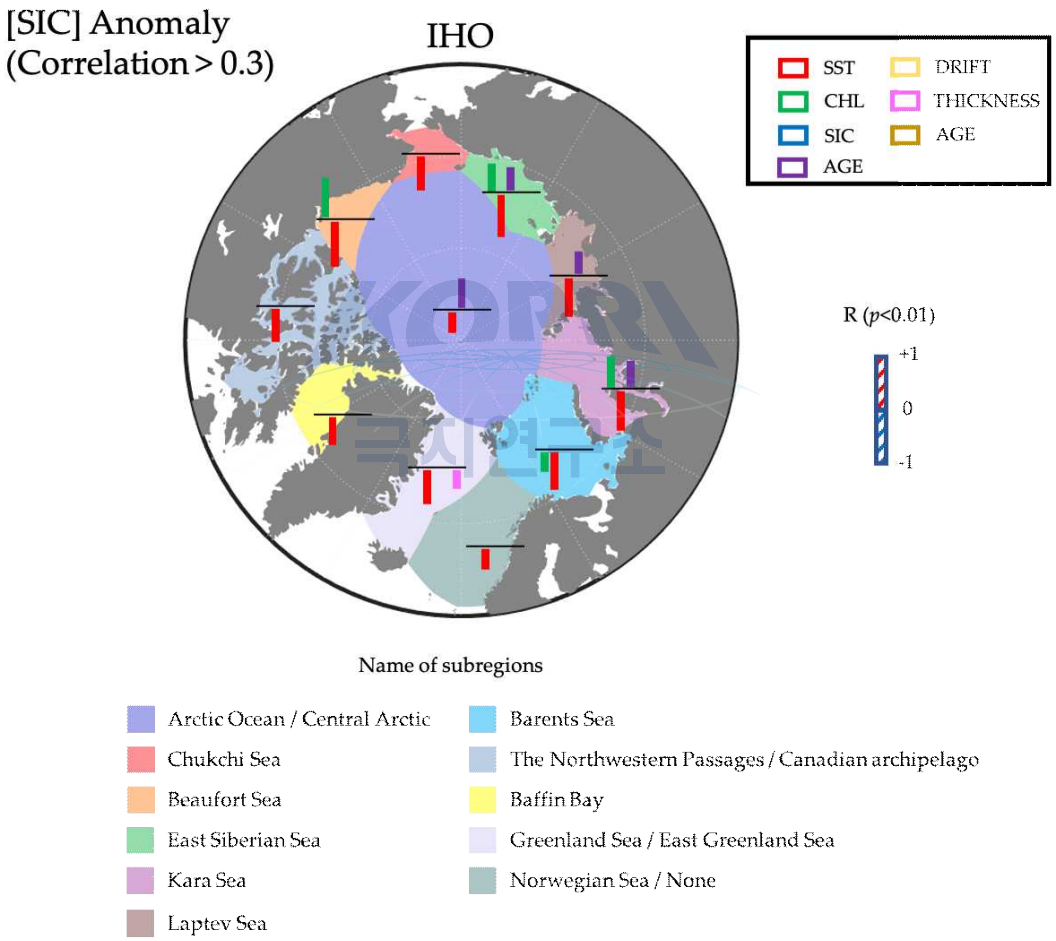
- 전년도 연구에 이어 당해연도에는 해빙 특성 중 농도 (SIC), 나이 (AGE), 이동 (DRIFT), 두께 (THICKNESS), 강도 (STRENGTH)의 5개 요소, 그리고 해양 특성 중 클로로필농도 (CHL)와 온도 (SST)의 2개 요소에 대한 이종 상관성을 분석하였으며, 이하에 각 해빙 특성과 나머지 특성간의 관계를 기술

함.

- 단, THICKNESS의 경우는 나머지와는 달리 관측이 아닌 경험적 모델식에 의한 추정이므로 별도 분석함.
- 각 요소는 평균 변동성을 제거한 이상치(Anomaly)에 대한 비교를 수행함.

○ 해빙 농도 (Sea Ice Concentration, SIC)

- 아래 그림은 각 해역에서의 SIC와 다른 해빙 변수들간의 상관관계를 나타냄.

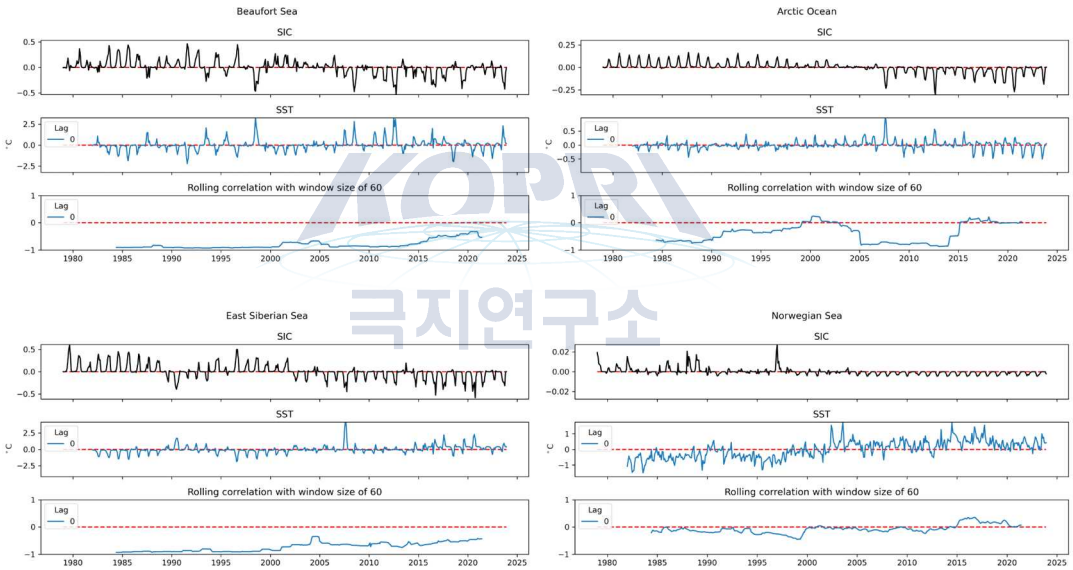


Spatial distribution of the correlations between
sea ice concentration (SIC) anomaly and other sea ice and oceanic parameters

- 거의 전 해역에서 SIC는 SST와 음의 상관관계(평균 -0.59)를 가짐.
- SIC와 SST의 음의 상관관계는 직관적으로 해빙이 녹아 농도가 낮아질 때 노

출된 해수에서 단파(shortwave) 에너지 흡수에 의해 해수온이 상승하는 것과, 상승한 해수온이 주변의 해빙을 녹여 해빙의 농도가 더 낮아지는 피드백 효과를 지시함. 또한 이 피드백은 계절성(seasonal)변화 및 장기변화 둘 다에 있어 유효함.

- 해역에 있어 Baffin Bay나 Canadian Archipelago와 같이 육지에 둘러싸여 폐쇄적인 해역을 제외하면 상관관계가 0.33, 0.34로 낮은 중앙북극해, 노르웨이해와 0.6 이상으로 높은 나머지로 양분됨.
- 아래 그림은 상관관계가 높으면서 장기간에 걸쳐 해빙 면적이 크게 줄어든 보퍼트해와 동시베리아해, 그리고 상관관계가 낮은 중앙북극해와, 노르웨이해에 대한 SIC와 SST의 시계열 변화 및 5년(60개월) 동적 상관관계를 도시함.

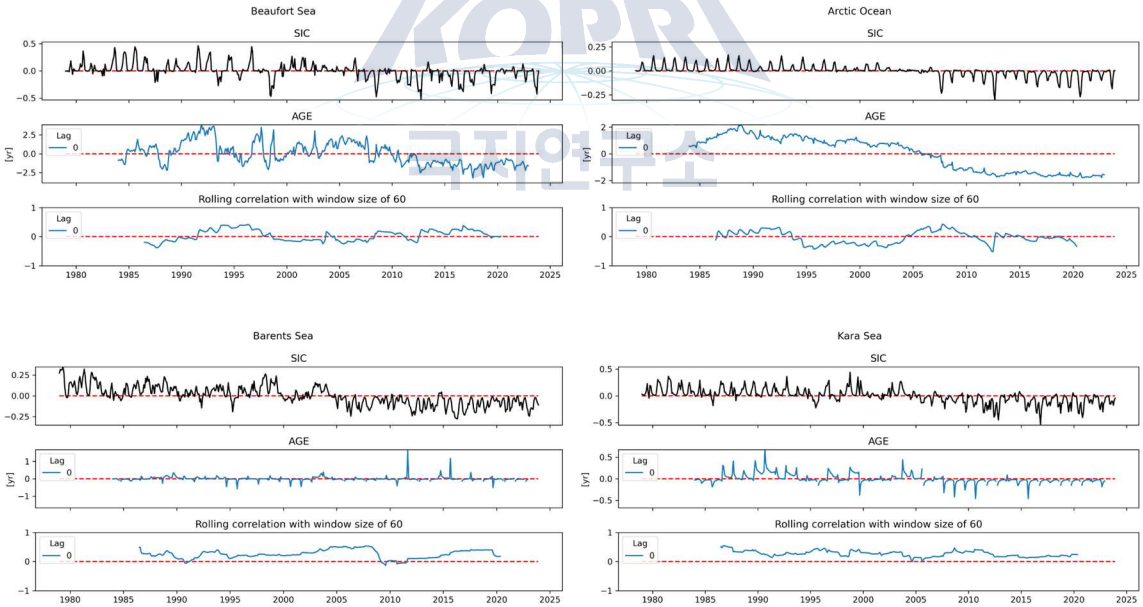


Time series and moving correlations between sea ice concentration (SIC) anomaly and sea surface temperature (SST) anomaly for four representative subregions.

- 보퍼트해와 동시베리아해의 경우 2000년 이후에 점차 상관성이 약화되는 경향이 있으며, 이는 전반적인 해빙 농도 감소와 해수온 상승이 전술한 수온과 융빙간의 직접적인 열교환이라는 관계의 강화가 아니라 다른 요소와의 복합적인 관계의 비중이 커짐을 지시함.
- 중앙북극해의 경우 2005년과 2014~2015년을 중심으로 상관성에 큰 변화가 보이며, 해당 시기에 다른 해빙/해양 요소 및 환경 변수, 모드와 대조가 필요함.
- 노르웨이해의 경우 장기적 해수온 상승이 뚜렷하여 북대서양으로부터의 유입

수의 점진적 변화가 보이나 해당 지역의 해빙량은 연중 매우 적어서 유의미한 상관계수가 아님.

- 동시베리아해, 랍테브해, 카라해 등 러시아쪽 해역과 중앙북극해에서 SIC는 AGE와 양의 상관관계(평균 0.43)를 가짐.
- SIC와 AGE의 양의 상관관계는 장기적으로 북극해 전반에 걸친 SIC 감소와 AGE 감소가 경향이 일치함을 지시함.
- 계절성 변화는 결빙기에 초년빙(First Year Ice, FYI)의 면적 증가로 인해 전체 면적에서 FYI가 차지하는 비중이 높아져서 평균 AGE가 감소, 융빙기에 FYI의 면적 감소로 인해 전체 면적에서 FYI가 차지하는 비중이 낮아져서 평균 AGE가 증가하는 음의 상관관계를 가짐.
- 아래 그림은 상관관계가 상대적으로 낮은 보퍼트해와 척치해, 그리고 상관관계가 높은 중앙북극해와 카라해에 대한 SIC와 AGE의 시계열 변화 및 5년(60개월) 동적 상관관계를 도시함.



Time series and moving correlations between sea ice concentration (SIC) anomaly and sea ice age (AGE) anomaly for four representative subregions.

- 보퍼트해의 경우 SIC와 AGE 모두에서 연간 변화가 심하며, 이는 보퍼트 자이어(gyre)의 영향에 의해 해당 지역의 해빙 공급의 비율이 지역 자생 FYI와 중앙북극해, 캐나다 북부의 다년빙(Multi-Year Ice, MYI) 사이에서 변화하기

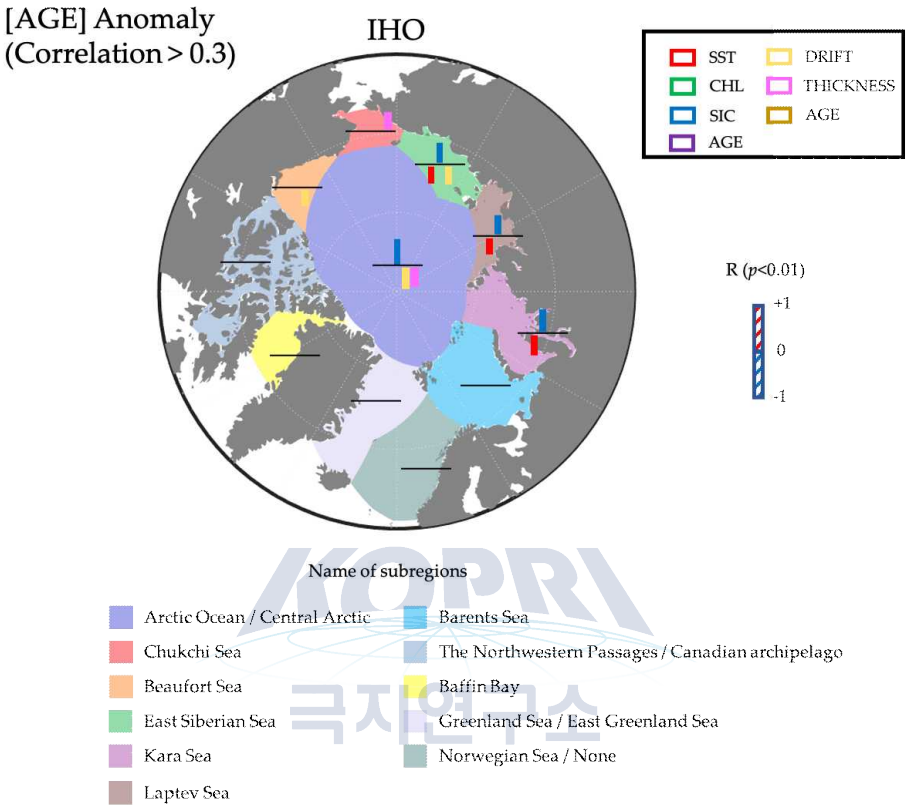
때문일 것으로 사료됨. 즉, 해빙 기원이 동적이기 때문에 SIC와 AGE의 관계 또한 기원에 의해 유동적일 것으로 추정함.

- 바렌츠해의 경우 장기패턴에서 해빙 농도는 꾸분히 감소하였으나 해빙 나이에 뚜렷한 변화는 없었기에 상관관계가 0.17로 낮았음. 다만 5년 동적 상관관계는 양호하며, 단기 변화에 있어 계절성 변화는 유지하되 보퍼트해의 경우처럼 외부요인에 의한 연간 변화는 적음.
- 중앙북극해의 경우 SIC와 AGE 모두에서 장기적으로 매우 뚜렷한 감소가 있기에 장기패턴 상관관계가 0.51로 가장 높았으나 5년 동적 상관관계는 전반적으로 낮으며, 뚜렷한 장기 감소세에 더하여 연간 변화 또한 크다는 것을 지시함.
- 카라해, 랍테브해, 동시베리아해는 공통적으로 장기패턴 상관계수와 5년 동적 상관관계가 양호한데, 장기패턴은 둘 다 감소세이며, 단기패턴은 계절성 변화가 잘 유지됨을 지시함. 도시한 자료는 각 요소의 이상치이므로 전술한 SIC와 AGE의 음의 상관성 계절성은 이상치에서는 반대로 양의 상관성을 나타냄. 즉, 평균 대비 적은 융빙(양의 SIC 이상치)은 평균 대비 높은 나이(양의 AGE 이상치)로 나타나며, 이 관계가 과거 30년간 안정적으로 유지되는 환경임. 이는 해당 지역 해빙 공급 기원이 지역 자생이라는 점에 기인하는 것으로 추정됨.
- 단, 바렌츠해, 카라해는 타 해역에 비해 해빙 감소가 더 빠르게 발생하는 영역이며, SIC와 AGE의 관계가 안정적이지 해빙의 상태가 안정적인 것은 아님에 주의 요함.

KOPRI 극지연구소

○ 해빙 나이 (Sea Ice Age, AGE)

- 아래 그림은 각 해역에서의 AGE와 다른 해빙 변수들간의 상관관계를 나타냄.

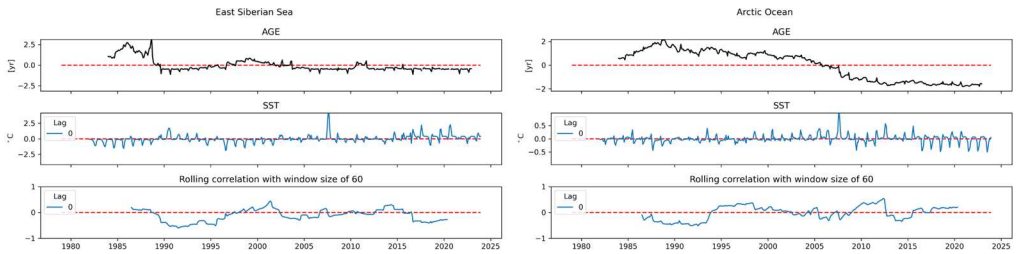


Spatial distribution of the correlations between
sea ice age (AGE) anomaly and other sea ice and oceanic parameters

- AGE와 SIC의 상관관계는 전술하였으므로 생략함.
- 동시베리아해, 랍테브해, 카라해 등 러시아쪽 해역과 중앙북극해에서 AGE는 SST와 음의 상관관계(평균 -0.33)를 가짐.
- AGE와 SST의 음의 상관관계는 SIC와 SST의 관계에서와 마찬가지로 직관적으로 해빙이 녹아 노출된 해수에서 단파(shortwave) 에너지 흡수에 의해 해수온이 상승하는 것과, 상승한 해수온이 주변의 해빙을 녹여 전반적으로 해빙 중 단년빙의 비율이 늘어나는 (해빙의 평균 나이가 낮아지는) 피드백 효과를 지시함. 또한 이 피드백은 계절성(seasonal)변화 및 장기변화 둘 다에 있어 유효함.
- 해역에 있어 러시아쪽 해역을 제외하면 상관관계가 매우 낮은데, 이는 상기

피드백을 유지할만큼 해빙의 구성이 정적인 영역이 한정되기 때문으로 추정함.

- 아래 그림은 상관관계가 높으면서 단기에 해빙 면적이 크게 줄어든 동시베리아해, 그리고 상관관계가 낮으면서 장기에 걸쳐 꾸준히 해빙 면적이 줄어든 중앙북극해에 대한 AGE와 SST의 시계열 변화 및 5년(60개월) 동적 상관관계를 도시함.

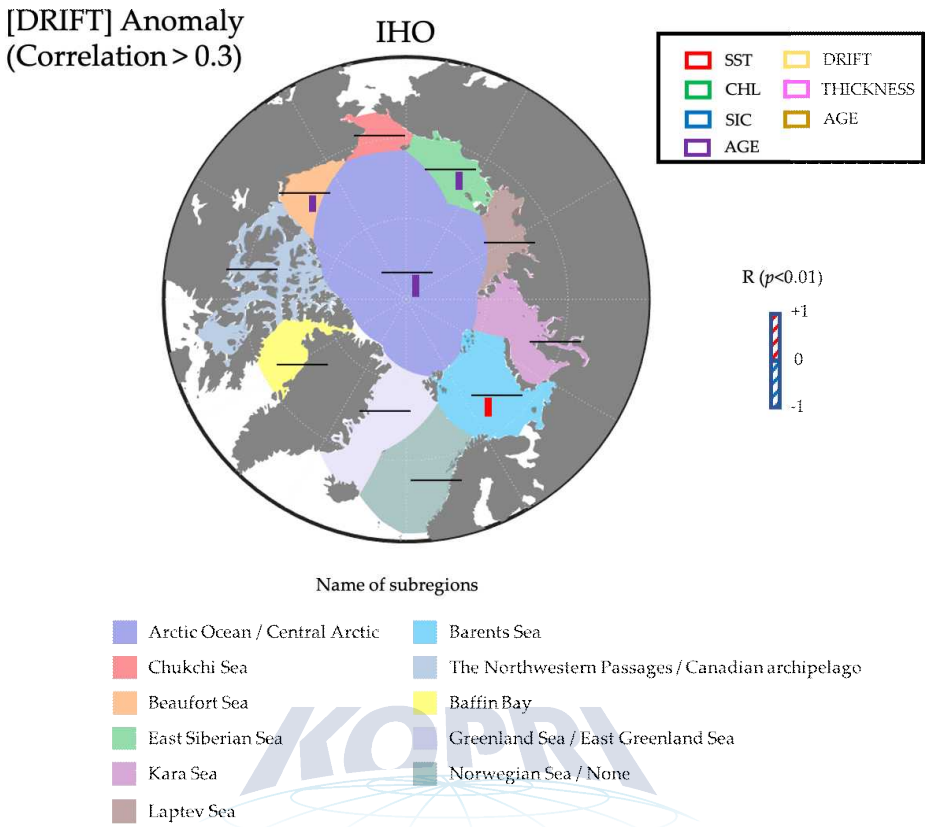


Time series and moving correlations between sea ice age (AGE) anomaly and sea surface temperature (SST) anomaly for two representative subregions

- 동시베리아해의 경우 1988년 이후에 다년빙이 일시에 크게 감소, 동일 시기에 SST 또한 일시적으로 상승했으며, 이는 5년 동적 상관관계에서 높은 음의 상관관계로 나타남. 그러나 1996년 이후 큰 변화가 발생하지는 않다가 2010년대 중반에 이르러 다시 SST가 상승하나 AGE의 경우 이미 단년빙 위주의 구성이기에 포화값에 가까운 것으로 판단됨 (AGE는 1 미만일 수 없음).

○ 해빙 이동 (Sea Ice Drift, DRIFT)

- 아래 그림은 각 해역에서의 DRIFT와 다른 해빙 변수들간의 상관관계를 나타냄.

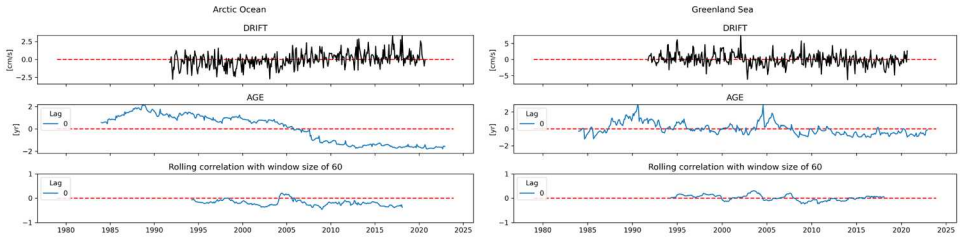


Spatial distribution of the correlations between
sea ice drift (DRIFT) anomaly and other sea ice and oceanic parameters

- 해빙의 이동량이 많은 보퍼트해, 동시베리아해, 중앙북극해에서 DRIFT는 AGE와 음의 상관관계(평균 -0.36)를 가짐.
- DRIFT와 AGE의 음의 상관관계는 단순히 나이가 어린 해빙일수록 질량이 적어 동일 외력에 대해 더 많이 움직이는 것으로는 설명하기 어려움. 다년빙은 북극해의 서쪽에 몰려있으며, 보퍼트해 또한 다년빙이 많음. 또한 바람에 대한 항력은 표면이 거친 다년빙에서 더 큼.
- DRIFT는 주변이 얼음이 아니라 물인 경우에 유동성을 확보하여 값이 커지며, 융빙기에 먼저 해수가 드러나는 곳은 주로 단년빙 영역이기 때문에 AGE와 음의 상관관계를 가지나, 그러나 전술한 항력 등과 상반된 관계에 있어 상관계수 자체가 높은 값을 가지지는 않는 것으로 추정함.
- 아래 그림은 상관관계가 높으면서 단기에 해빙 면적이 크게 줄어든 동시베리아해, 그리고 상관관계가 낮으면서 장기에 걸쳐 꾸준히 해빙 면적이 줄어든 중

앙북극해에 대한 AGE와 SST의 시계열 변화 및 5년(60개월) 동적 상관관계를 도시함.

- 해역에 있어 러시아쪽 해역을 제외하면 상관관계가 매우 낮은데, 이는 상기 피드백을 유지할만큼 해빙의 구성이 정적인 영역이 한정되기 때문으로 추정함.
- 아래 그림은 상관관계가 높은 중앙북극해, 그리고 상관관계가 낮은 그린란드해에 대한 DRIFT와 AGE의 시계열 변화 및 5년(60개월) 동적 상관관계를 도시함.

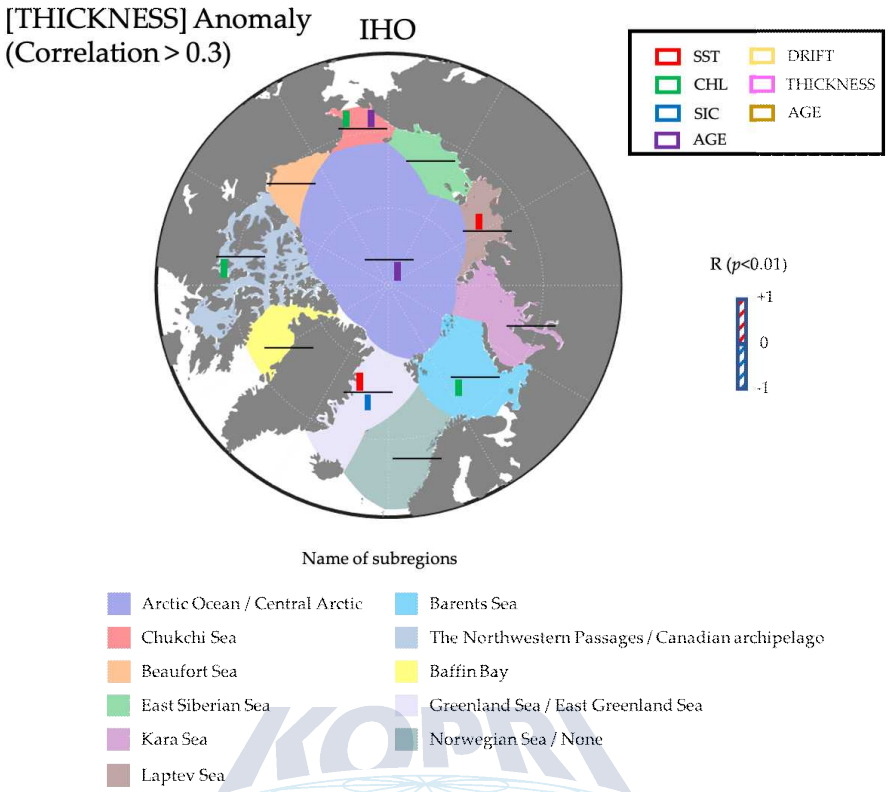


Time series and moving correlations between sea ice drift (DRIFT) anomaly and sea surface temperature (AGE) anomaly for two representative subregions

- 중앙북극해는 장기적으로 DRIFT의 증가와 AGE의 감소가 뚜렷하며, 동적 상관관계에서도 둘의 음의 상관관계가 지속적으로 유지됨.
- 반면 그린란드해는 장기적으로 DRIFT와 AGE는 특별히 증/감소세가 강하지 않음. 그러나 이 해역의 해빙은 그린란드 연안의 고착빙을 제외하면 거의 중앙북극해로부터 이동하여 흘러들어오기 때문에, 북극해 서부의 다년빙과 동부의 단년빙의 유입 비율에 따라 연간 변화가 큼. 동적 상관관계 또한 음과 양을 오가면서 낮은 값을 유지함.

○ 해빙 두께 (Sea Ice Thickness, THICKNESS)

- 아래 그림은 각 해역에서의 THICKNESS와 다른 해빙 변수들간의 상관관계를 나타냄.

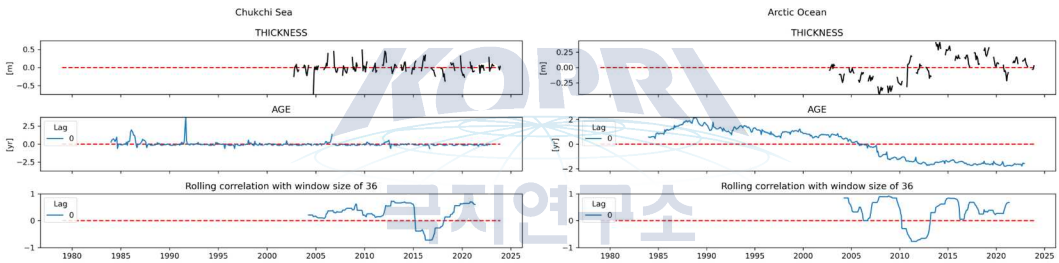


Spatial distribution of the correlations between sea ice thickness (THICKNESS) anomaly and other sea ice and oceanic parameters

KOPRI 극지연구소

- THICKNESS와 AGE는 척치해에서 양의 상관관계(0.35)를, 중앙북극해에서 음의 상관관계(-0.37)를 보이는 상반된 모양을 보임.
- THICKNESS는 현재 가장 많이 사용되는 레이더/레이저 고도계 기반 freeboard 측정 방법으로는 결빙기에 해당하는 10월~4월까지밖에 측정할 수 없음에 주의 요함.
- 결빙기 초기에 단년빙의 영역이 빠르게 증가하며 평균 AGE는 감소하나 이후 결빙기가 끝날때까지 거의 변동이 없음. 단, 여기서 분석 대상은 이상치이므로 연간차이는 있음.
- 결빙기 전체에 걸쳐 동일 해빙에서 THICKNESS는 증가하나 결빙기에 새로 생긴 해빙인 단년빙의 영역이 확장되어 각 해역 내 전체 해빙에서의 평균 두께는 오히려 결빙기 초반에 감소하고 이후에 증가함. 마찬가지 여기서 분석 대상은 이상치이며, 연간차이가 있고, 직전 융빙기의 융빙 속도가 다음 결빙기의 결빙 속도에 직관적으로 영향을 미치지는 않는 것에 주의 요함.

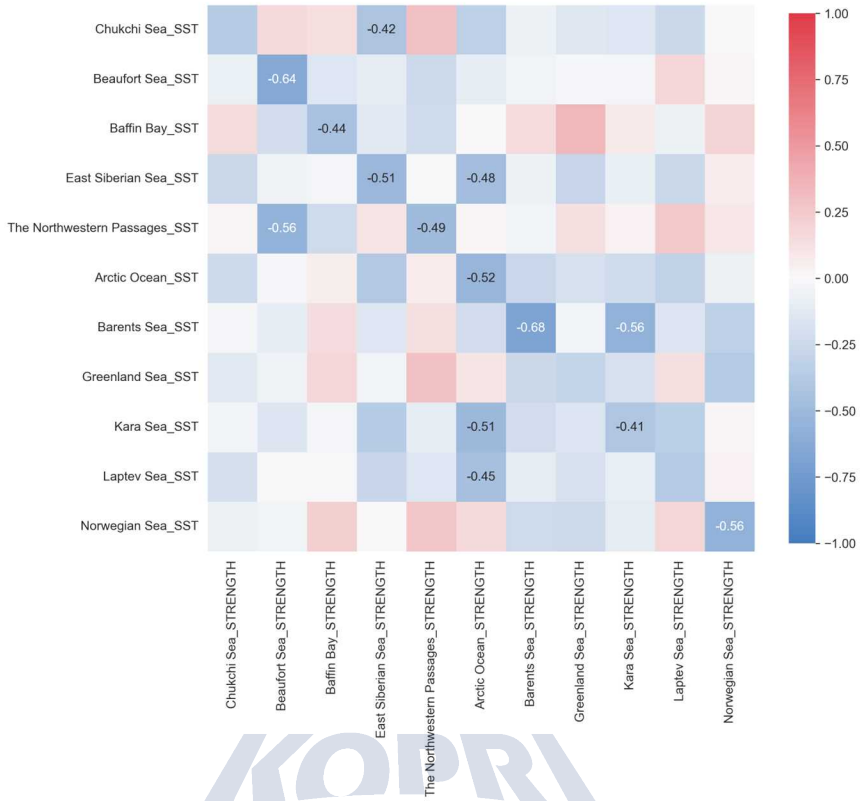
- 척치해에서 보이는 양의 상관관계는 장기적으로 THICKNESS와 AGE가 동일한 방향으로 변하는 것을 지시하지만 각각이 뚜렷한 변동성을 보이지는 않으며, 특히 AGE의 경우 융빙기말과 결빙기초에 1로 포화되므로 물리적인 의미를 찾기 어려움.
- 반면 중앙북극해에서의 음의 상관관계는 장기적으로 뚜렷한 AGE의 감소세에 반하여 THICKNESS 또한 전반적으로는 감소하기에 발생하는 양의 상관관계보다는 기록적인 9월 해빙면적 최소를 기록했던 2007년과 2012년, 2020년 직후에 일시적으로 THICKNESS가 크게 떨어졌다가 회복하는 기간동안에 AGE는 회복 없이 점점 감소하기에 발생하는 음의 상관관계에 기인하는 것으로 추정함.
- 아래 그림은 상기 설명을 뒷받침하기 위한 THICKNESS와 AGE의 시계열 변화 및 3년(36개월) 동적 상관관계를 도시함.



Time series and moving correlations between sea ice thickness (THICKNESS) anomaly and sea ice age (AGE) anomaly for two representative subregions.

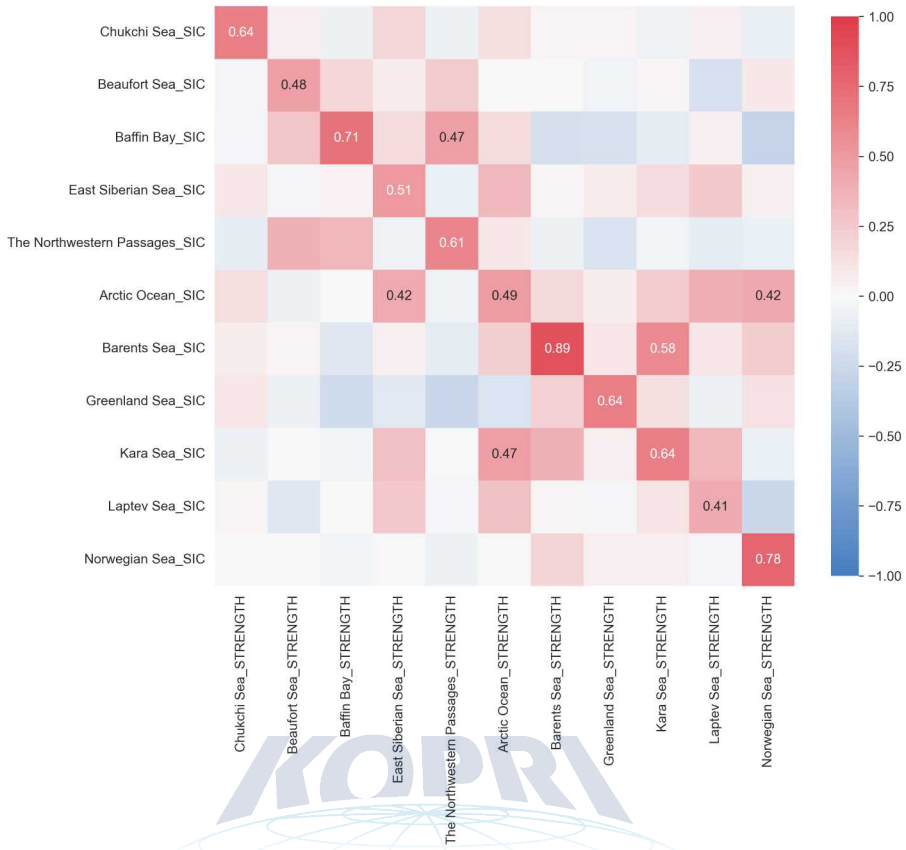
○ 해빙 굽힘 강도 (Sea Ice Flexural Strength, STRENGTH)

- 상관계수가 0.5 이상일 경우에만 분석에 포함하였으며 전체적인 상관 패턴은 특정 지역 간의 강한 관계에 중점을 두었음.



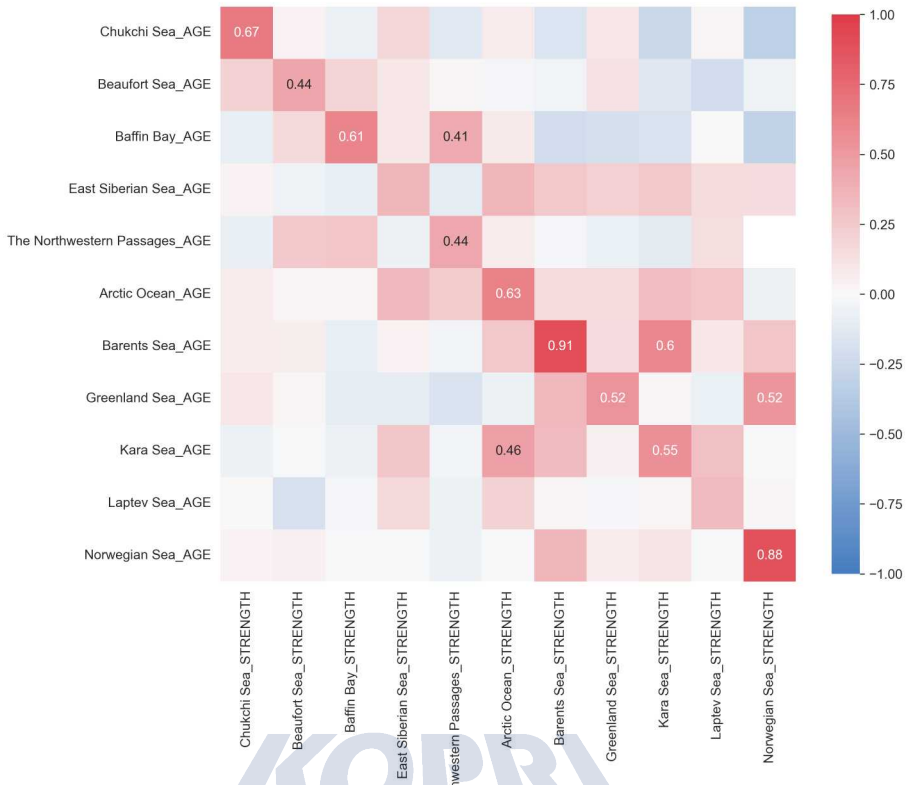
KOPRI 극지연구소

- STRENGTH는 북극 여러 지역에서 SST와 강한 음의 상관관계가 나타남. 이는 SST가 증가할수록 해당 지역의 STRENGTH가 약해지는 경향을 시사함. 예를 들어, 척치해와 보퍼트해에서는 비교적 강한 음의 상관관계가 있음(-0.366, -0.637). 일부 지역에서는 SST가 증가할 때 해빙이 약화되지 않고 오히려 강화되는 양의 상관관계를 보임. 배핀만에서는 SST와 STRENGTH 사이에 양의 상관관계(0.152)가 나타나며, 이 지역에서는 SST의 상승이 강도의 약화로 직접 연결되지 않을 수 있음. 이는 해류나 국지적인 환경적 요인 등이 복합적으로 작용하기 때문일 것으로 의심됨.



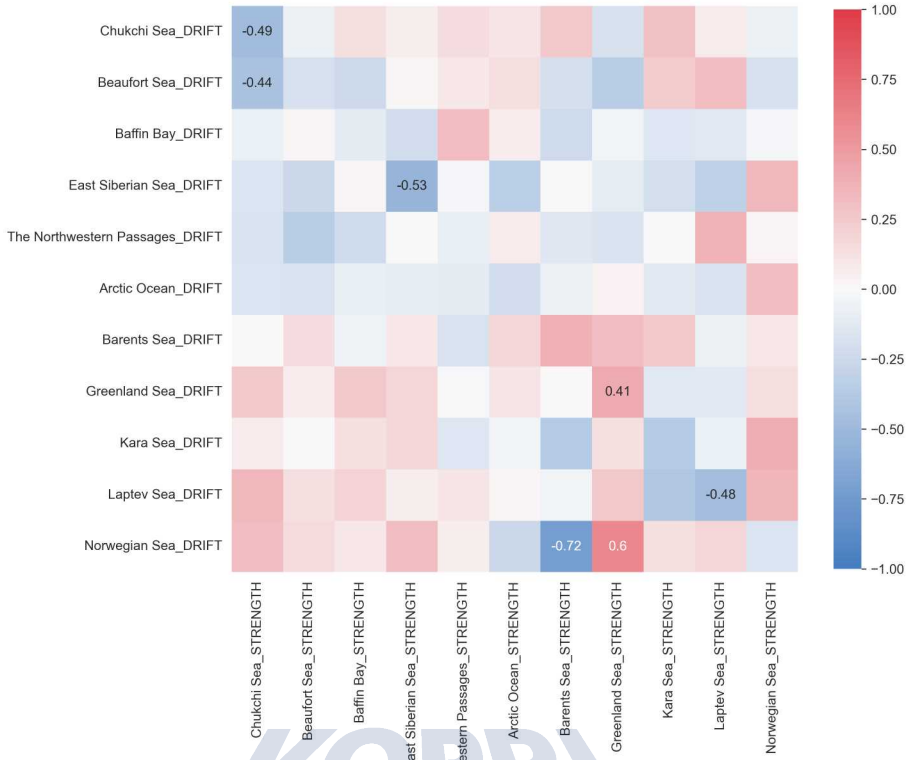
KOPRI
극지연구소

- 일반적으로 STRENGTH와 SIC는 북극 주요 해역에서 일정한 양의 상관관계를 나타냄.
- 특히 바렌츠해, 바핀만, 그린란드해와 같은 지역에서 더욱 강한 상관관계를 보이며, 이러한 시공간적 패턴은 SIC가 높을 때 그 지역의 STRENGTH가 더 높아지는 경향이 있음을 시사함.
- 다른 해역의 SIC가 한 해역의 STRENGTH에 영향을 미칠 수 있는 것으로 보임.
- 배핀만의 STRENGTH는 척치해와 북서항로와 높은 상관관계를 보이며, 동시베리아해의 STRENGTH는 보퍼트해 SIC와 중간 정도의 상관관계를 보임.



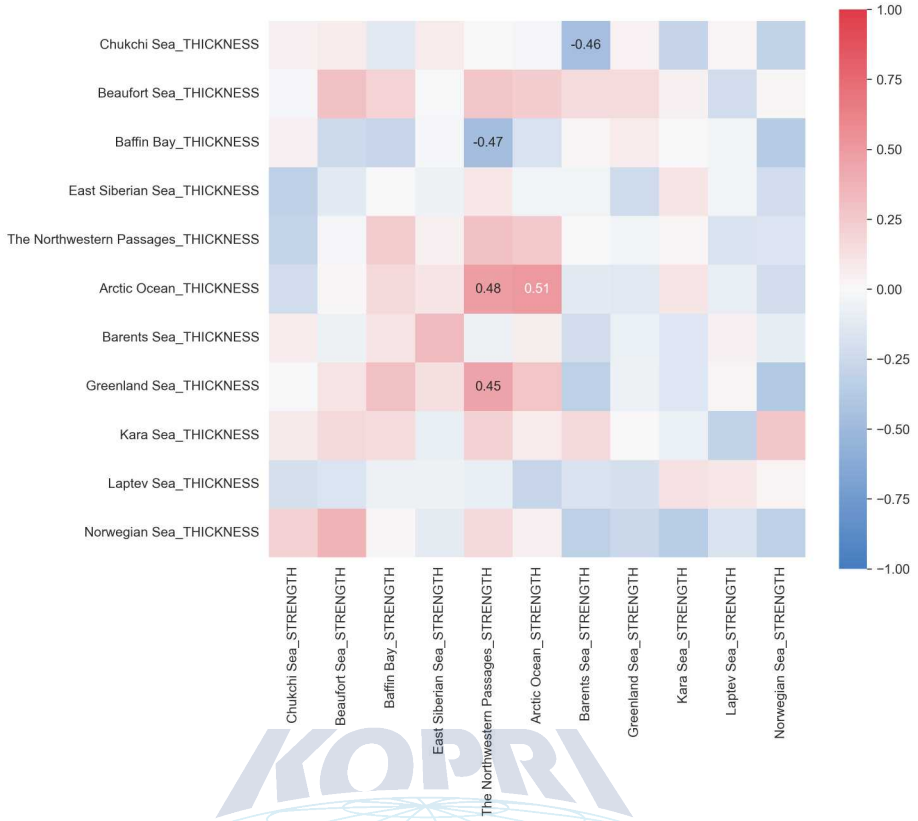
KOPRI 극지연구소

- 대부분의 해역에서 STRENGTH와 AGE 사이에 강한 양의 상관관계가 관찰됨.
- 척치해와 배핀만에서는 두 산출물간 상관관계가 0.67, 0.61로 강한 양의 관계로 나타났으며, 보퍼트해와 북서항로는 0.44로 중간 수준의 양의 상관관계를 보임.
- 이러한 패턴은 AGE가 높아질수록 해당 해역의 STRENGTH가 강해지는 경향을 보여줌.
- 다른 해역의 AGE가 한 해역의 STRENGTH에 영향을 미치는 경향도 관찰됨.
- 배핀만의 STRENGTH는 북서항로 AGE와 0.41 중간 정도의 상관관계를 보이며, 반대로 북서항로의 STRENGTH는 배핀만의 AGE와 0.44 상관관계를 보여 상호 영향을 시사함.



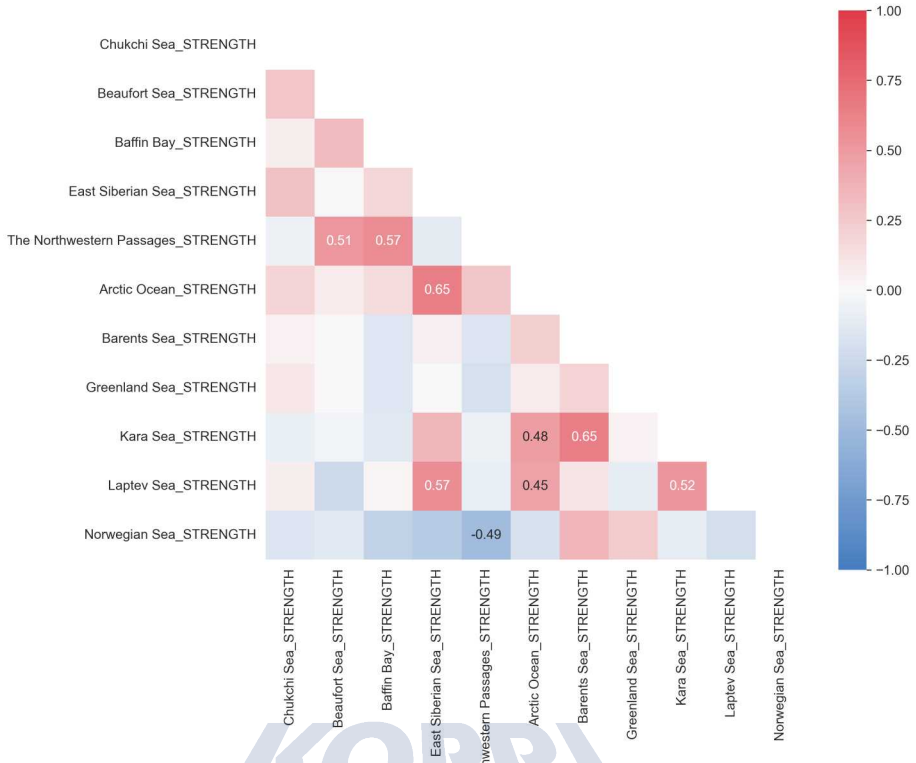
KOPRI
극지연구소

- STRENGTH와 DRIFT는 전반적으로 음의 상관 관계를 보였으나 뚜렷한 특징은 관찰되지 않음.
- 척치해, 동시베리아해, 랍테프해에서는 STRENGTH와 DRIFT 간에 음의 상관관계가 나타났으며, 이는 DRIFT가 증가할수록 STRENGTH가 감소하는 경향을 나타냄.
- 반대로 그린란드해에서는 0.41의 양의 상관관계를 보였으며 DRIFT가 증가할수록 STRENGTH가 증가하는 경향을 나타냄.



KOPRI
극지연구소

- STRENGTH와 THICKNESS 사이의 상관관계는 해역별로 다양한 패턴을 나타내며, 특정 지역에서는 THICKNESS가 증가함에 따라 STRENGTH가 증가하거나 감소하는 상호작용이 존재함.
- 북극해에서는 STRENGTH와 THICKNESS 간 중간 수준의 양의 상관관계를 보였으며, 즉 북극해에서는 THICKNESS가 증가할수록 STRENGTH도 함께 증가하는 패턴을 보임.
- 북서항로는 북극해와 그린란드해의 THICKNESS와 양의 상관관계가 관찰되었나 배핀해는 음의 상관관계를 보임.
- 해빙 산출물의 해역별 변동 상관성은 다음 그림과 같음.

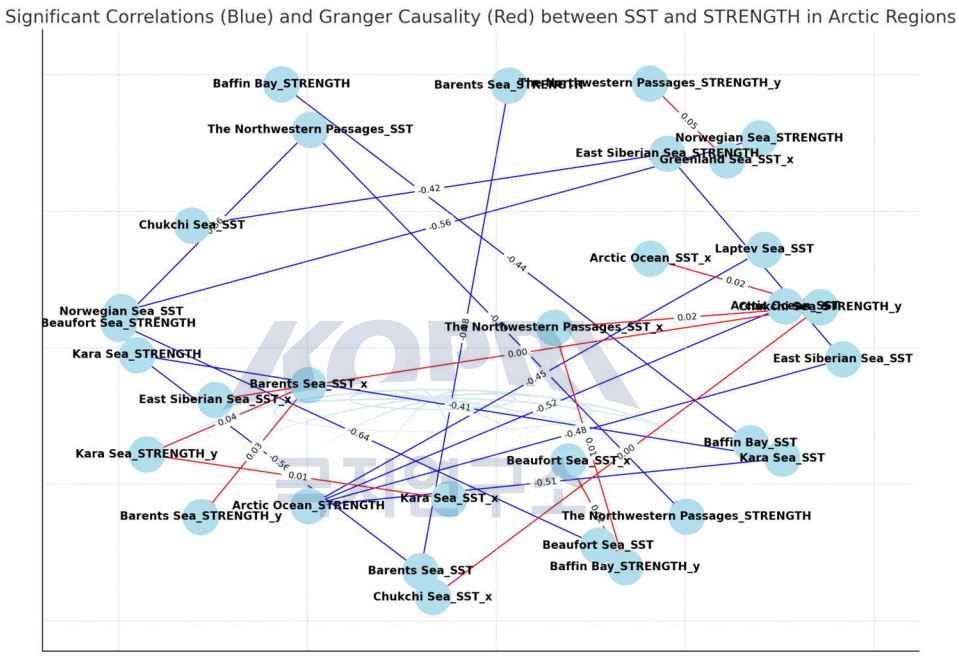


KOPRI
극지연구소

- 북극 해역 간의 STRENGTH 변화가 시공간적으로 어떻게 연관되어 있는지를 파악하고자 하였으며, 추후 해빙의 분포 또는 기후 변화로 인한 영향을 분석하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대됨.
- 주요 발견으로 북서항로의 STRENGTH가 배핀만과 보퍼트해 지역의 변화와 상당히 일관된 패턴을 보임.
- 배핀만은 지리적으로 인접해 있어 하나의 지역 변화가 다른 지역에 직접적인 영향을 미칠 수 있음.
- 북극해와 동시베리아해 간의 높은 상관관계는 북극해 중심부의 해빙 역학이 동시베리아해에 큰 영향을 미치거나, 그 반대일 가능성을 시사함.
- 또한, 북극해는 카라해와 바렌츠해의 변화와도 강한 상관관계를 보이는데, 이는 대서양 해수의 유입이나 바람 패턴 등과 같은 유사한 기후 및 해양 영향을 반영할 수 있음.
- 전반적으로 동시베리아해, 랍테프해, 카라해와 같은 동부 북극 해역 간의 상관관계가 서부 해역보다 강하며, 이는 유사한 기후 및 해양 요인의 영향을 받

고 있음을 시사할 수 있음.

- 북극해는 동시베리아해와 같은 주변 해역과 강한 상관관계를 나타내며, 이는 북극해가 북극 전역의 해빙 역학을 주도하는 중요한 역할을 하고 있음을 나타냄.
- 다음 그림은 STRENGTH와 SST간의 유의미한 상관관계를 바탕으로 SST의 과거 값이 STRENGTH를 예측하는데 도움이 되는지 여부를 검토하기 위해 진행한 Granger 인과성 테스트 결과를 도시함.



- 일반적으로 p-value가 특정 임계값보다 낮으면 SST가 해당 지역에서 STRENGTH에 대해 유의미한 예측 능력을 가진다는 것을 의미하며 본 연구에서는 0.05 임계값을 사용함.
- 해역별 STRENGTH와 SST 간의 상관계수를 도출한 결과 전반적으로 음의 상관관계를 관측하였으며, 이는 SST의 증가가 일반적으로 STRENGTH의 감소와 연관됨을 나타냄.
- 북극에서 SST의 상승이 융빙을 촉진하여 STRENGTH 또한 감소시키는 물리적 과정을 잘 나타내는 것으로 보임.
- 대부분의 유의미한 상관관계는 같은 해역 내에서 나타나며, 이는 SST가 주로 지역적으로 STRENGTH에 더 큰 영향을 미친다는 것을 시사함.

- 척치해, 동시베리아해, 북서항로의 SST가 척치해의 STRENGTH에 영향을 끼치는 것으로 보이며, 특히 동시베리아해의 SST는 매우 유의한 p-value값을 보여 척치해의 STRENGTH를 강하게 예측할 수 있음을 시사함.
- 이러한 결과는 동시베리아와 그 주변 지역의 온난화가 척치해의 해빙을 약화시킬 수 있다는 것을 의미함.
- 보퍼트해 SST가 배핀만의 STRENGTH에 영향을 주는 것으로 나타났으나 인접하지 않은 지역의 해수 온도 변동이 어떻게 영향을 끼치는지는 추가적인 분석이 필요함.
- 결론적으로 높은 상관관계를 보인 지역들은 Granger 인과성 테스트에서도 대부분 유의한 결과를 보였으며, 이는 SST의 변화가 실제로 STRENGTH의 변화를 예측할 수 있음을 나타냄.
- 또한 SST의 변화가 다른 북극 지역의 STRENGTH에 영향을 미칠 수 있음을 보였으며 (동시베리아해와 보퍼트해) 이러한 지역의 SST의 지속적인 모니터링과 분석이 중요할 것으로 사료됨.

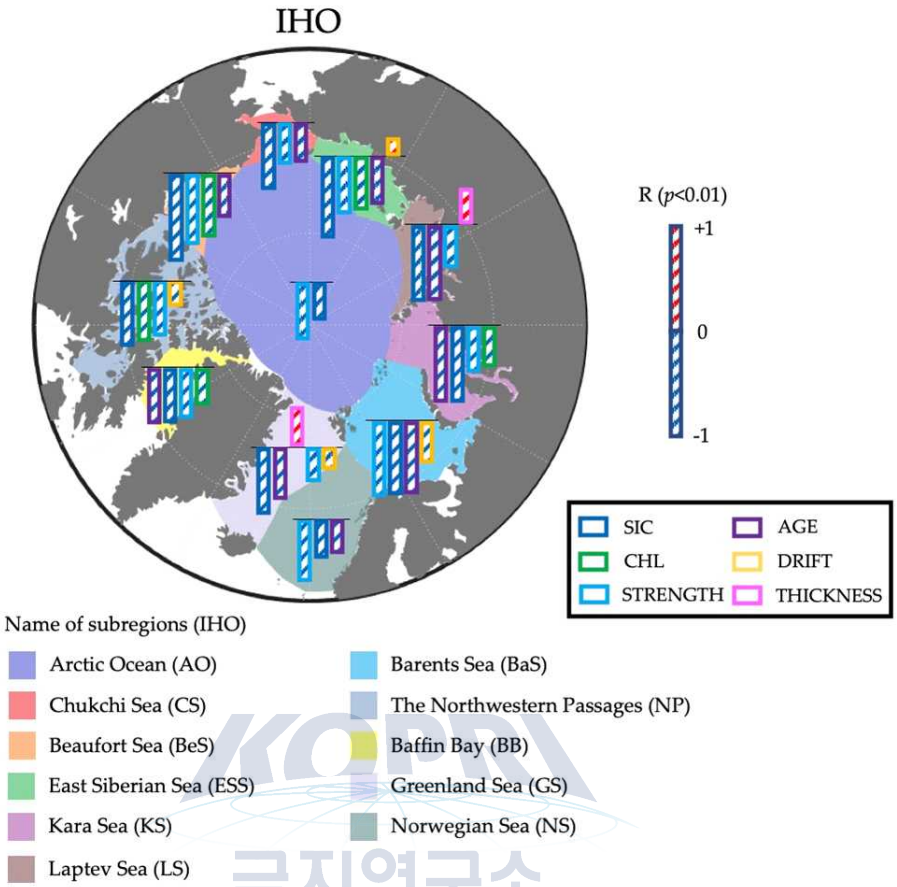
KOPRI 극지연구소

(2) 세부연구목표2. 북극해 해빙-해양 상호관계 규명

□ 연구내용 2-1. 해양과 해빙 간의 상호 작용 분석

○ 해수면 온도 (Sea Surface Temperature, SST)

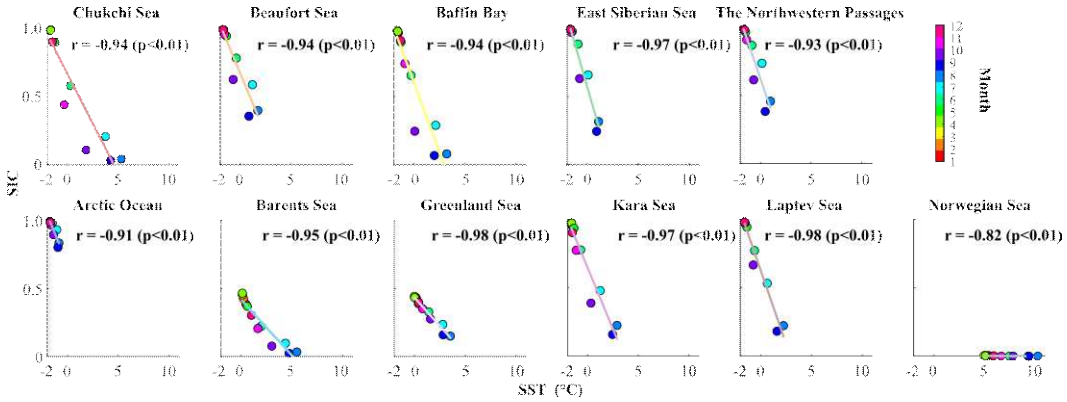
- 북극해 해빙-해양 상호관계를 이해하기 위해 해양의 물리적 특성을 대표하는 기초 변수인 해수면온도 자료와 해양의 생태적 특성을 대표하는 엽록소농도 자료를 활용하여 해빙 요소들과의 상관성 분석을 수행함.
- 다음 그림은 북극해의 각 지역별 해수면온도와 해빙요소들과의 상관성을 공간적으로 나타냄. 해수면온도는 해빙의 요소들과 대체적으로 음의 상관관계를 보였으며, 대부분의 영역에서 해빙요소 중 해빙농도와 가장 상관성이 높게 나타났음. 지역에 따른 해수면온도변동성은 해빙농도 외에 해빙강도 및 해빙의 나이 요소들과도 높은 상관성을 보였으나 Arctic Ocean과 Norwegian Sea를 제외하고는 해빙농도와 비슷한 상관성을 보였음.



Spatial distribution of correlations between monthly anomalies of sea surface temperature (SST) and some oceanic and sea-ice parameters in the Arctic region. The color bar represents Pearson correlation coefficient (p <0.01), with edge color that indicates the parameter: CHL (chlorophyll-a), SIC (sea ice concentration), AGE (ice age), DRIFT (ice drift), THICKNESS (ice thickness), and STRENGTH (flexual strength)

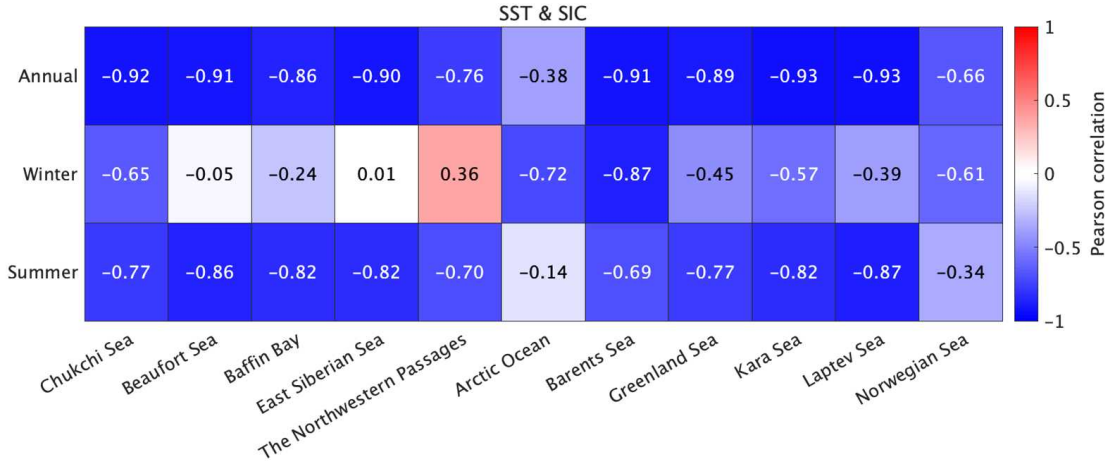
- 북극해에서 해빙요소 중 해수면온도와 가장 강한 음의 관계를 나타내는 해빙농도에 대해 해수면온도와의 상관성을 시간에 따라 상세하게 분석함.
- 북극해 각 영역별 계절적 상관관계는 강한 음의 상관관계를 보이며, 해수면온도가 가장 높은 여름철(7-9월) 시기에 해빙농도가 가장 낮게 나타나고, 해수면온도가 가장 낮은 겨울철(1-3월) 시기에 해빙농도가 높게 나타나며 계절적인 큰 편차를 보임. 그러나 지역적으로 Arctic Ocean과 Norwegian Sea의 경우 양 변수에서 계절적인 편차가 상당히 작게 나타나는데, 연중 내내 해빙이 존재하는 Arctic Ocean은 SIC값이 0.8 이상으로 높고 해수면온도도 0°C 이하 값을 보인 반면, Norwegian Sea의 경우 해빙농도가 거의 0의 값을 보이며 연중 내

내 북극해에서 해수면온도값이 가장 높은 5℃ 이상의 값을 보임.



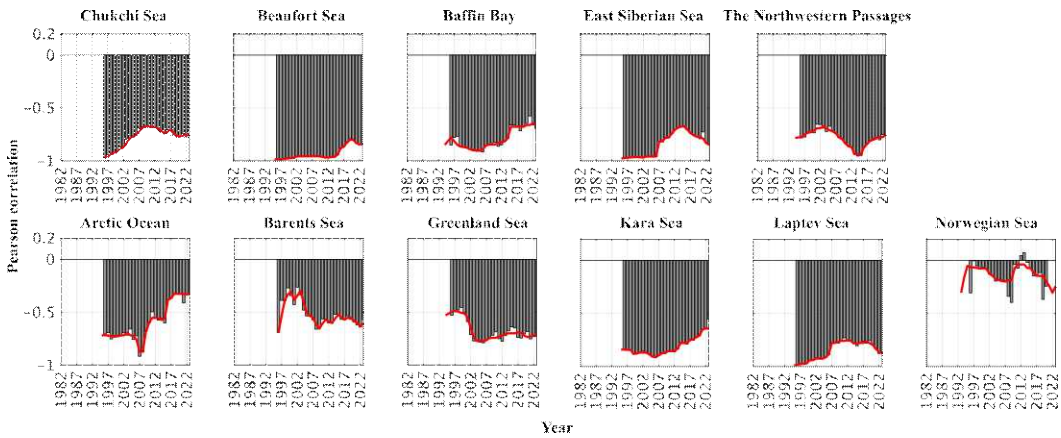
Scatter plot between monthly SST and SIC averaged during the period from 1982 to 2023. The colorbar represents month.

- 북극해 해빙과 해양 간 계절별 편차가 강하게 발생함에 따라 해빙이 가장 많이 존재하는 겨울철 시기와 해빙이 가장 적게 존재하는 여름철 시기를 나눠 해빙농도와 해수면온도와의 상관성을 분석함.
- 연평균값에 대한 상관성은 Arctic Ocean과 Norwegian Sea를 제외하고 북극해 전 영역에서 강한 음의 상관관계를 보였는데, 계절에 따라 상당한 편차를 보임. 해빙의 농도가 높아지는 겨울시기 대비 해빙의 농도가 낮아지는 여름시기에 해빙농도와 해수면온도와의 상관성이 높게 나타나나 다른 지역과 달리 Arctic Ocean과 Norwegian Sea 지역에서는 여름철 시기 동안 두 변수 간 유의하지 않은 관계를 보임.



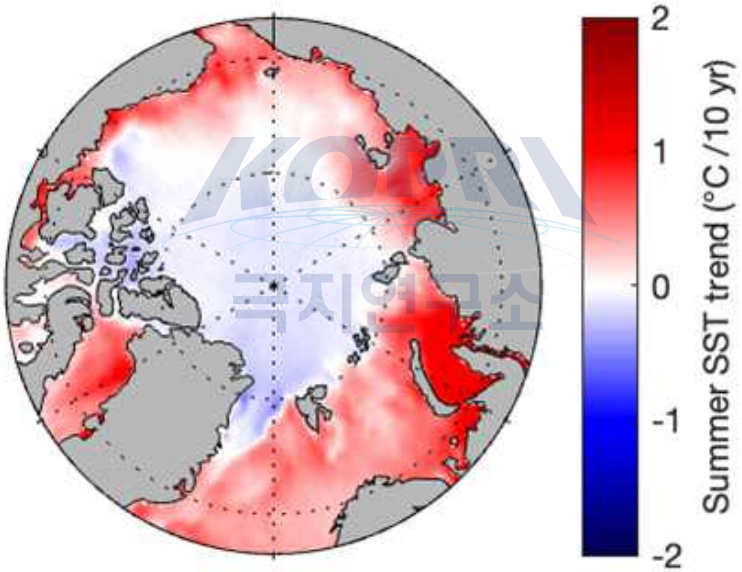
Correlation heatmap for annual, winter seasonal, summer seasonal mean times series between SST & SIC

- 각 계절별 상관성의 연도별 변동성을 이해하기 위해 15년 간격으로 해빙농도와 해수면온도와의 상관계수를 계산함. 지역별로 Arctic Ocean 영역을 제외하고는 여름철 시기동안 연도별 상관성에 대한 변동은 대체적으로 큰 차이를 보이지 않으며, 전체 연구기간동안의 상관성이 연구기간동안 일정하게 유지되었음을 나타냄. 그러나 Arctic Ocean의 경우 연도에 따라 상관계수가 -0.7에서 -0.3까지 큰 폭으로 감소하는 패턴을 보임. 해빙농도가 거의 0에 가까운 Norwegian Sea에서는 연도에 따른 큰 편차없이 해빙과 해수면온도와의 상관계수가 유의하지 않게 나타남.

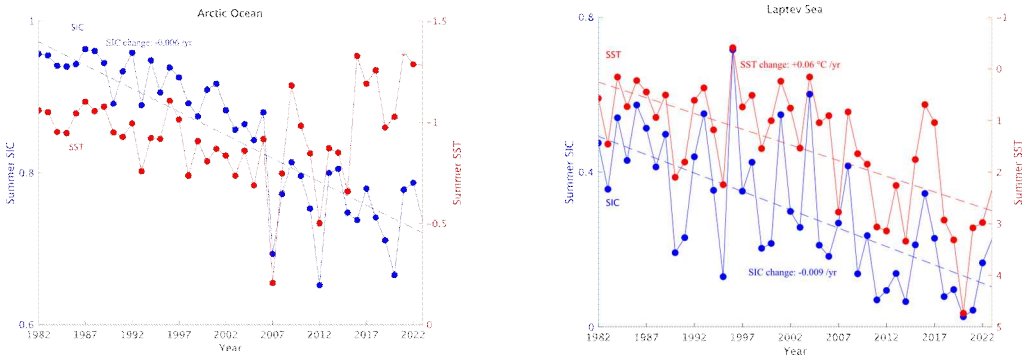


Moving correlation analysis between summer SST & SIC timeseries for a 15 yr window. The red line indicates median smoothing for the moving correlation coefficient.

- 아래 그림은 연구기간동안 북극해에서의 여름철 해수면온도 변화 경향을 나타냄. Arctic Ocean을 제외한 영역에서 10년 당 약 2°C 씩 증가되는 패턴을 보여줌. 그러나 다른 영역과 달리 Arctic Ocean에서는 유의한 증가가 나타나지 않음. Arctic Ocean에서의 시계열자료를 살펴보면 여름철 해빙농도는 연당 0.006씩 감소되며 2007년을 기점으로 큰 폭으로 농도값이 감소된 반면 해수면온도는 2007년을 기점으로 증가되는 패턴에서 감소되는 패턴으로 바뀜. 반면 다른 해역의 경우 Laptev Sea에서의 시계열 자료 패턴과 같이 해수면온도 자료와 해빙자료 간 강한 음의 상관관계를 보이며 시간에 따라 매우 밀접한 변동을 보임.

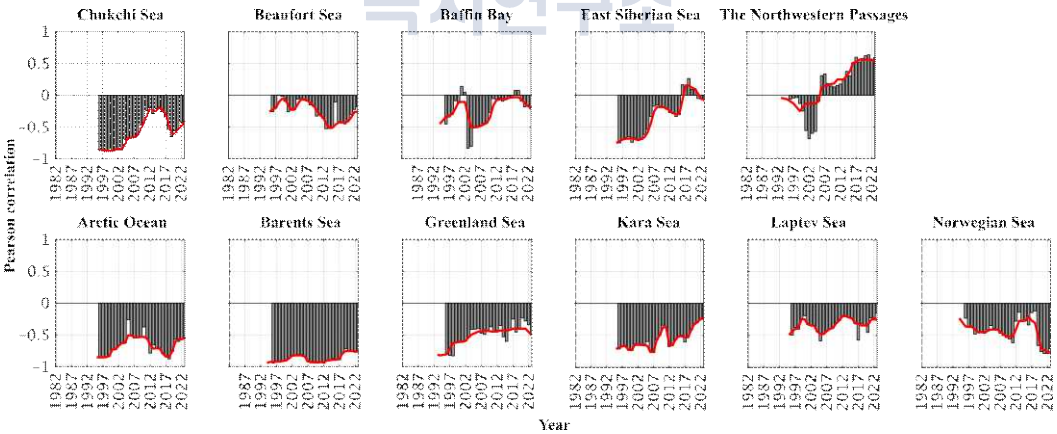


Linear trend in summer SST during the period of 1982-2023

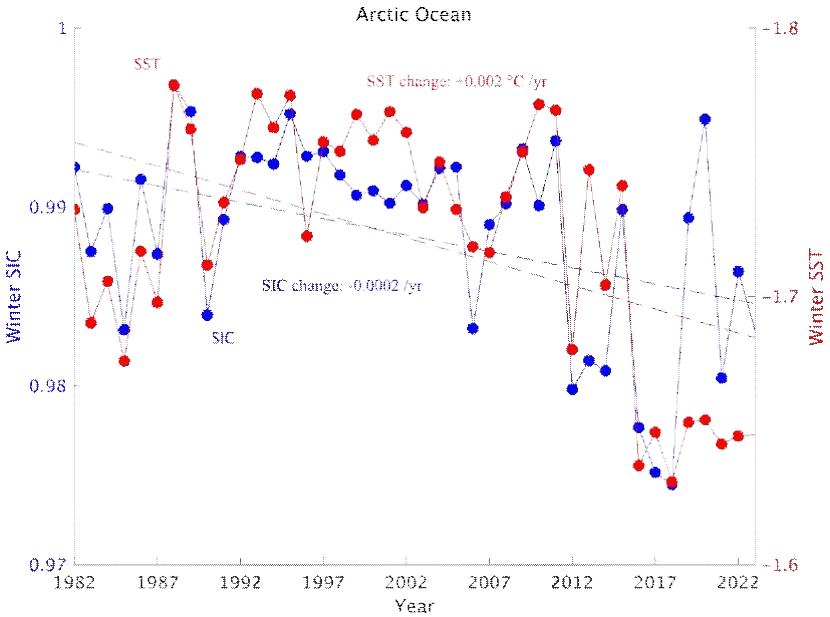


Timeseries of summer SST (° C) and SIC in (left) Arctic Ocean and (right) Laptev Sea.

- 반면 겨울철 해수면온도와 해빙농도간의 분석기간에 따른 상관성은 Arctic Ocean에서 대체적으로 강한 음의 상관성을 보였음. 북극 해역 전 영역적으로 여름철 시기 대비 해수면온도와의 상관성이 낮게 나타났는데, East Siberian Sea와 Northwester Passages에서는 분석기간에 따라 큰 편차를 보임. 아래 그림은 Arctic Ocean에서의 겨울철 기간 동안 해수면온도와 해빙농도의 시계열 자료를 보여주며, 여름철 시기와 달리 음의 상관관계가 연구기간 내내 뚜렷하게 나타났음을 보여줌.



Moving correlation analysis between winter SST & SIC timeseries for a 15 yr window. The red line indicates median smoothing for the moving correlation coefficient.

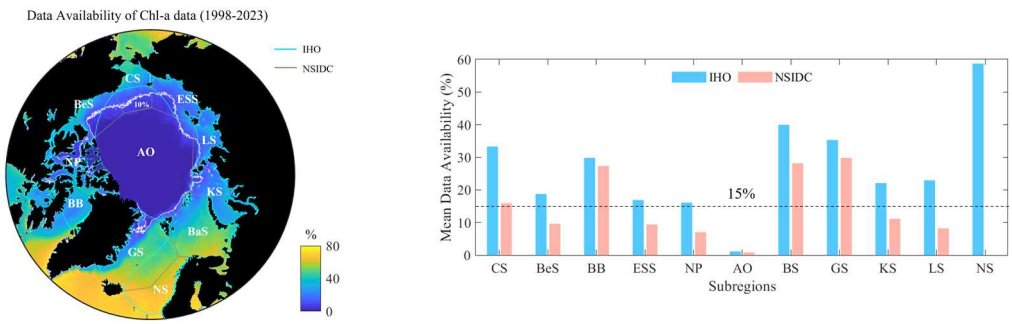


Timeseries of winter SST (° C) and SIC in Arctic Ocean

○ 해양 클로로필 농도 (Chlorophyll-a Concentration, CHL)

- CHL 자료는 해빙, 구름 등 다양한 원인으로 인하여 극지방의 결측률이 상당히 높음. 따라서 불필요한 분석 절차를 제거하기 위하여 아래 그림과 같이 자료 사용률을 계산함.

KOPRI 극지연구소

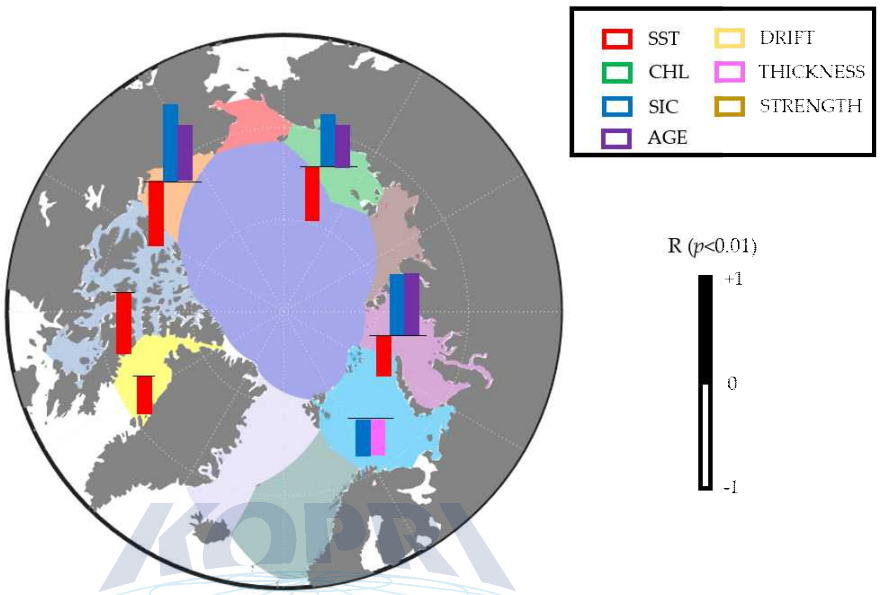


(left) Spatial distribution of data availability of CHL data and
(right) mean data availability at each Arctic subregion

- 그 결과, 평균 3% 미만의 관측률을 나타낸 Arctic Ocean (AO) 지역은 분석에서 제외함. 또한 NSIDC의 구분 기준은 AO 지역을 상대적으로 작게 포함하고 있어 연안 지역의 평균적인 결측률을 높임. 따라서 본 해양 요소 분석에서

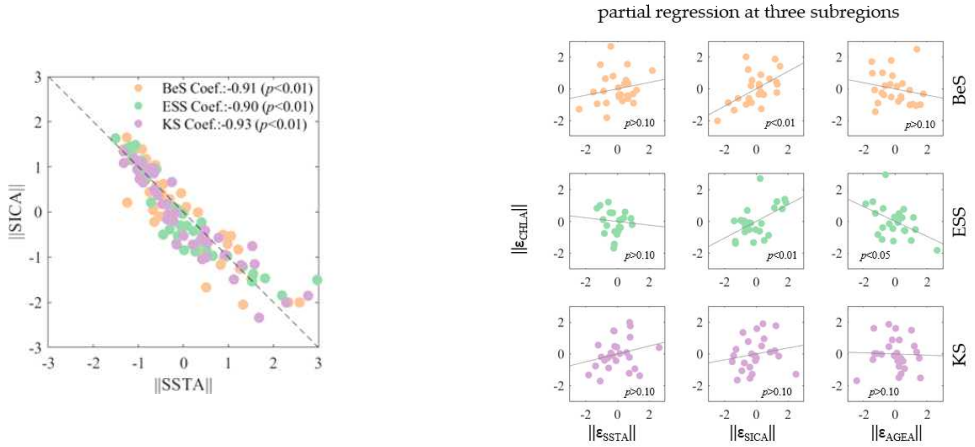
는 NSIDC 기준은 적용하지 않음.

- 다음 그림은 북극해 하위 지역별 월별 CHL 시계열자료와 해양 및 해빙 요소 간의 상관성을 지도 상에 표현함. 표시된 상관계수는 모두 p<0.01에 포함됨.



Spatial distribution of correlations between chlorophyll-a concentrationi anomaly (CHL) and some oceanic and sea-ice parameters in the Arctic region. The colored bars represent different parameters: SST (sea surface temperature) as red, SIC (sea ice concentration), AGE (ice age), DRIFT (ice drift), THICKNESS (ice thickness), and STRENGTH (flexual strength) as blue, purple, yellow, magenta, and brown, respectively. R represents the Pearson correlation coefficient, with significance level p<0.01.

- BeS, ESS와 KS 세 지역은 모두 해수면온도(SST), 해빙면적비(SIC), 해빙 연령(AGE)와의 상관계수 절대값은 모두 0.3이상임. 상관 패턴 또한 유사함.
- SST는 대체로 해수가 유출입되는 지역(CS, GS, NS)들을 제외하고 약한 음의 상관성을 보임.
- BaS에서는 다른 몇몇 지역과는 달리 SIC와 음의 상관성을 보임. 또한, 유일하게 해빙 두께와 약하지만 유효한 음의 상관성을 지님.
- CHL 아노말리와 동일한 요소 및 상관 방향을 가지는 세 지역(BeS, ESS, KS)에서 CHL 아노말리의 변화에 대한 각 요소의 기여를 산정함.



(left) Relationship between normalized SST and SIC anomalies at the three subregions, (right) partial regression among normalized SIC, SST, and AGE anomalies.

- SIC와 SST 아노말리 간의 강한 양의 상관성으로 다중공선성에 위배됨. 다중 회귀 분석 모델 수립을 위한 변수 제거 일환으로 부분 회귀를 분석한 결과, BeS는 오직 SIC만, ESS에서는 SIC와 AGE 아노말 리가 영향을 크게 미침. KS는 유효한 인자가 없었음.

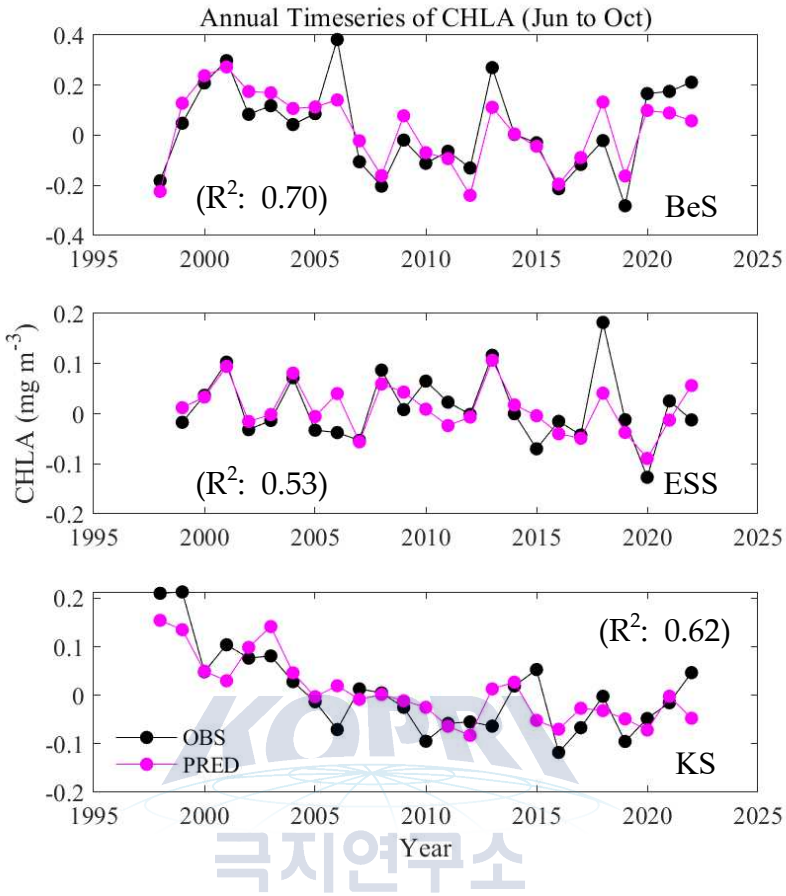
KOPRI 극지연구소

Results of multiple linear regression

Entire model significance: p<0.01

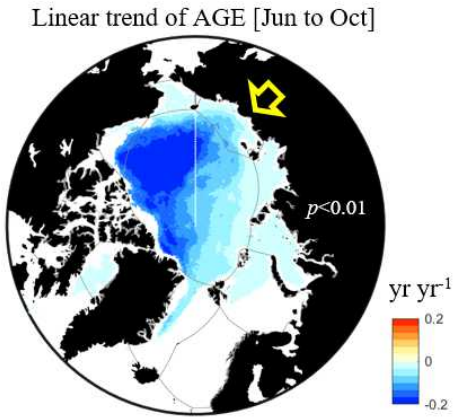
Subregion	Predictors	Unstd. Coef.		Std. Coef.	t statistic	p-value	VIF	Rel. Importance (%)
		β	SD error	B				
BeS	Intercept	0.0988	0.0223	-	4.4262	0.000	-	-
	SIC	0.9016	0.0219	0.8392	7.3994	0.0000	1.0000	100.00
ESS	Intercept	0.0326	0.0136	-	2.3935	0.0261	-	-
	SIC	0.7107	0.1683	1.4236	4.2226	0.0004	5.0677	46.54
	AGE	-0.1595	0.0587	-0.9162	-2.7175	0.0129	5.0677	53.46
KS	Intercept	0.0469	0.0126	-	3.7115	0.0011	-	-
	SIC	0.4635	0.0761	0.7856	6.0901	0.0000	1.0000	100.00

- 분석 결과, BeS와 KS는 SIC 아노말리 만으로 CHL 아노말리를 70%, 62% 설명 가능함. 반면, ESS는 SIC와 AGE 아노말리로 전체 CHL 아노말리 변동성의 53%를 설명함. 모사 결과는 아래 그림을 참조.



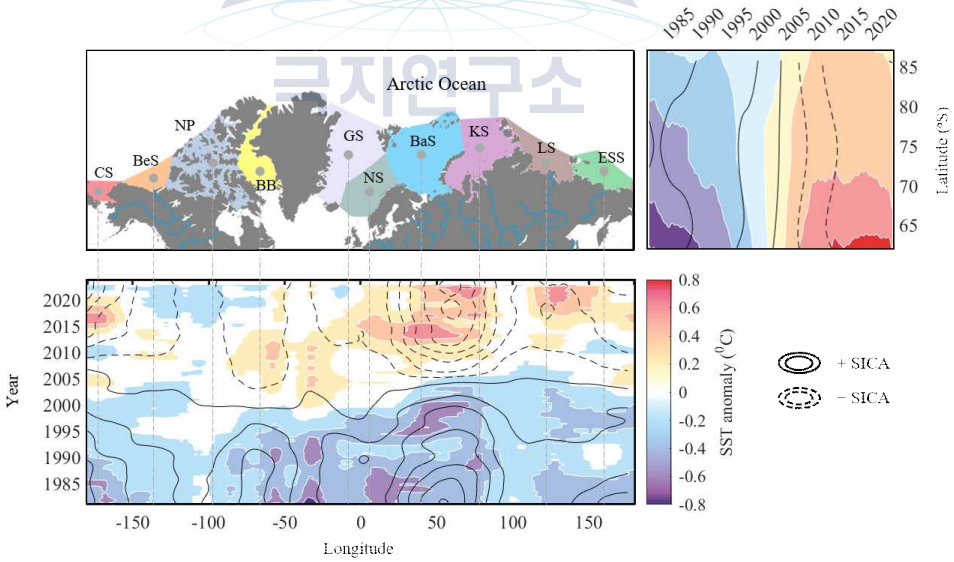
Annual timeseries of observed (black) and predicted (magenta) CHL anomaly at three subregions
(top: BeS, middle: ESS, and bottom: KS)

- CHL 아노말리는 세 지역 모두, SICA로 대부분 설명 가능함. 단, ESS에서는 절반 정도의 기여 (46.54%). 유독 ESS에서는 AGE가 높은 기여를 함. ESS는 AO를 제외하고 AGE의 장기적 변화를 겪는 유일한 하위 지역임 (아래 그림 참조).



Map of linear trend of AGE

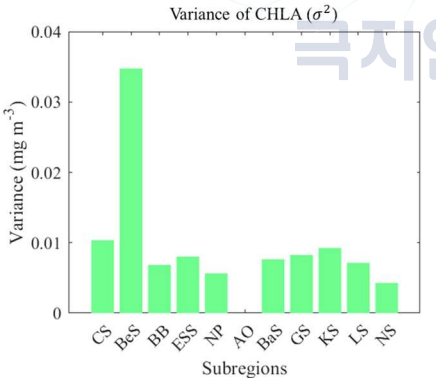
- 대부분의 북극해 지역에서 SST 아노말리와 SIC 아노말 리가 강한 음의 상관성으로 보임. 특히, 태평양과 대서양 해수가 유입되는 지역을 중심으로 강한 상관성을 보임 (아래 그림 참조).



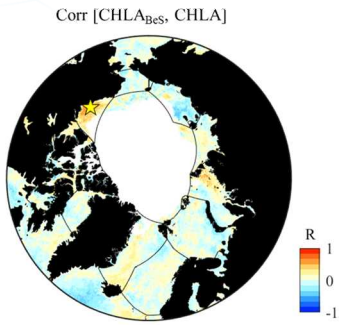
Arctic SST and SIC anomalies from 1985 to 2020.
(Top left) Map of Arctic regions. (Main panel) Longitudinal SST anomalies (color scale) with SICA contours (solid lines for positive, dashed for negative).
(Right panel) Latitudinal SST anomaly changes over time. Color scale represents SST anomalies from -0.8° C (purple) to 0.8° C (red).

- 2000년대 초를 기점으로 해수면 온도는 증가, 해빙은 감소. 이러한 변화는 해수면 온도가 아북극지역에서 전파하는 듯한 형태를 보임. 저위도에서 시간에 따른 변화가 영향을 미친 것으로 보이나 해양은 주요 경로가 아님. 만약 해양이 경로라고 한다면 북극해 출입지역(CS 혹은 NS)에서의 변화가 다른 하위지역으로 전파되는 형태로 나타나야 함. 관련하여 해빙은 위도상 변화가 뚜렷하지는 않음.
- CHLA 변동은 BeS에서 가장 크게 나타남 (아래 그림 좌측). 이것은 아노말리를 바탕으로 계산된 것이므로 계절적 변동성과는 무관함. 해당 자역은 다른 지역에 비하여 변동성이 약 3.5배임. 이러한 변동은 다른 지역과의 연결성이 없음 (아래 그림 우측). 해당 지역에 고립되어 발생하는 변동으로 해양 기원보다는 육상 혹은 대기 기원의 변동성일 가능성이 높음.
- 이전 CHL과의 상관성 IHO 공간 분포 지도에서 제시한 대로, 대부분의 하위지역에서 CHLA는 SICA와의 양의 상관성을 보임. 다만, 오직 BaS에서만은 미미하지만 유효한 음의 상관성을 나타냄. 이 지역은 더불어 THICKNESS와도 음의 상관성을 보이는 유일한 지역임.

KOPRI 극지연구소



Bar chart showing the variance (σ^2) of chlorophyll anomaly (CHLA) across different subregions.

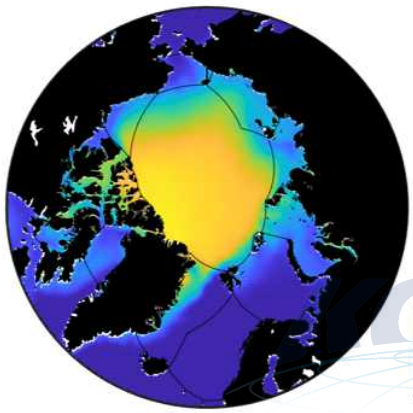


Correlation map between CHLA in the Beaufort Sea (CHLA$_{BeS}$) and overall CHLA in the Arctic region. The yellow star marks the location with the highest correlation between the average annual cycle time series of BeS.

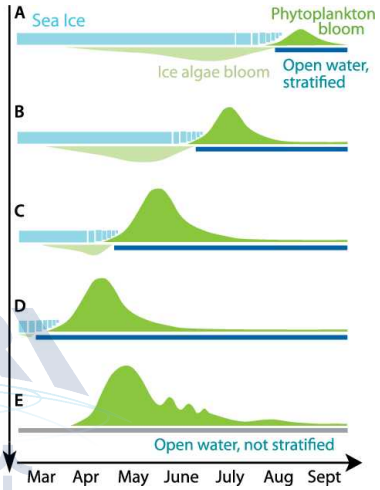
- 대부분의 지역은 SICA와 SSTA가 음의 상관성을 띄며, BaS 역시 그러함. BaS는 CHL이 발달하는 시기에 다른 지역과 달리 해빙이 거의 존재하지 않음

(아래 그림 좌측). 일반적으로 북극에서의 클로로필 대번성은 ice alge 혹은 phytoplankton에 의해 발생하는데, 연중 따뜻한 대서양 해류가 유입되는 바렌츠해는 ice alge에 의한 대번성보다 phytoplankton에 의한 대번성이 주도됨 (아래 그림 우측).

- BaS에서 CHL이 높은 이유는 충분한 빛과 영양분이 풍부한 따뜻한 흐름과 높은 온도가 식물 플랑크톤 증식에 유리한 조건을 조성함. 따라서 SST와 양의 상관관계임 (SIC와 음의 관계, 그러나 인과관계는 크지 않음).



Map for SIC climatology during spring and summer months



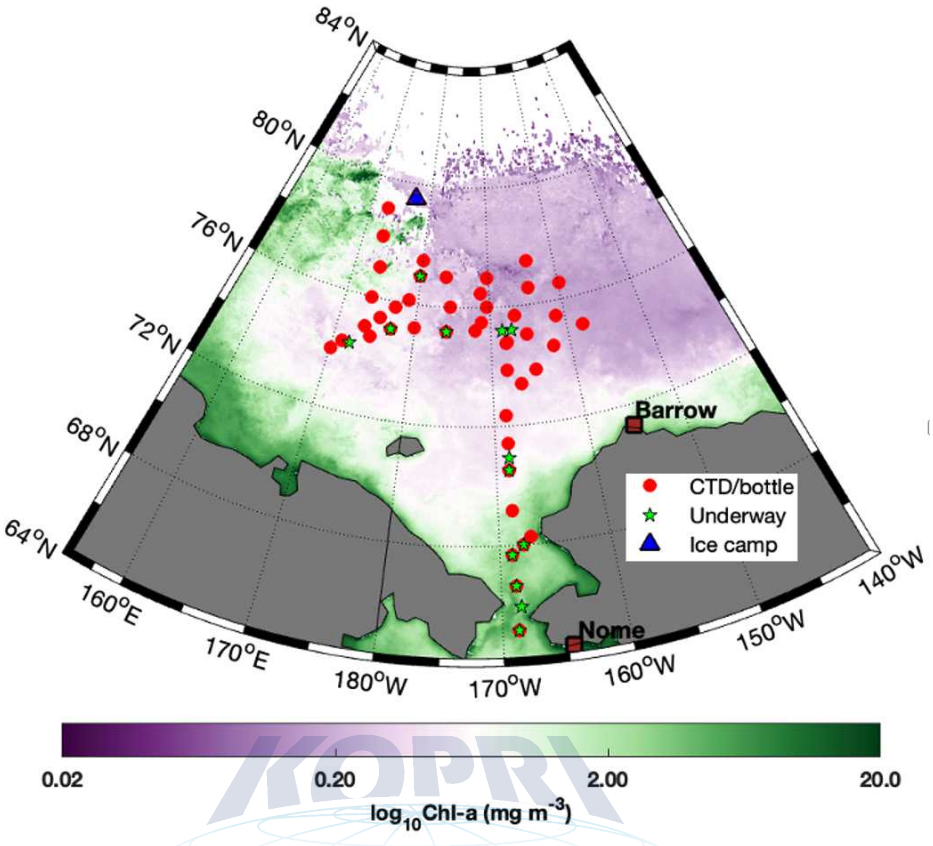
Timing of ice algae and phytoplankton bloom development (Wassmann and Reigstad, 2011)

KOPRI 극지연구소

(3) 세부연구목표3. 산출물 검증 및 정보 제공을 위한 북극 현장조사

□ 연구내용 3-1. 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통한 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보

- 본 연구에서는 위성자료 기반 북극해 해수 광 특성자료에 대한 검보정을 목적으로 2024년 7월 31일부터 8월 26일까지의 기간동안 아라온 북극1항차(ARA15A)에 참여하여 총 59개의 연구정점 및 항해 경로상(underway)에서의 해수 광학특성 현장관측자료를 획득함. 총 59개의 관측정점은 46개의 CTD 채수정점 및 13개의 underway 정점을 포함함.



Map of station locations during the ARA15A cruise. Background contours denote the mean VIIRS-derived chlorophyll-a (Chl-a) concentrations averaged during August 2012-2023.

- 각 정점 당 북극해 해수의 광학특성을 파악하기 위한 요소로 해수 구성 입자인 식물플랑크톤, 부유물질, 용존유기물 등에 의해 결정되는 고유한 광 특성(Inherent optical property, IOP)과 해수 구성 입자 뿐 아니라 공급되는 빛의 특성 등 해수 밖의 광학적 특성에 따라 값이 결정되는 겉보기 광 특성(Apparent optical property, AOP)에 대한 현장관측자료를 획득함.
- 해수의 광학적 특성 중 IOP를 파악하기 위해 CTD 채수정점에서는 CTD 및 형광엽록소 수직프로파일 자료를 토대로 각 정점의 유광층 내 대표수심인 표층, 엽록소농도 최대층(SCM), 저층에 해당되는 수심 등 약 3~4개의 수심에서 채수를 수행하였고, underway 정점은 표층에 대한 채수 샘플로 총 149개의 채수 샘플을 획득함 (아래 표 참조).

A list of stations for ocean optical observations during ARA15A cruise

No.	Site ID	Date time (UTC)	Latitude (° N)	Longitude (° E/W)	CTD /bottle sampling	Underway sampling	TriOS RAMSES	Sampling depth (m)
1	ST-001	2024.07.31 23:13	65.1734	-168.6909	v		v	0, 20, 42
2	U-001	2024.07.31 23:13	65.1734	-168.6909		v		0
3	U-002	2024.08.01 05:45	65.9615	-168.4185		v		0
4	ST-002	2024.08.01 09:23	66.6299	-168.6874	v			0, 15, 35
5	U-003	2024.08.01 09:23	66.6299	-168.6874		v		0
6	ST-003	2024.08.01 16:41	67.6700	-168.9600	v		v	0, 17, 24, 41
7	U-004	2024.08.01 16:41	67.6700	-168.9600		v		0
8	ST-006	2024.08.02 00:11	68.0130	-167.8670	v		v	0, 22, 32, 45
9	U-005	2024.08.02 00:11	68.0130	-167.8670		v		0
10	ST-008	2024.08.02 04:23	68.2417	-167.1215	v		v	0, 25, 38
11	ST-009	2024.08.02 11:26	69.1669	-168.6666	v			0, 17, 42
12	ST-010	2024.08.02 20:00	70.5000	-168.6669	v		v	0, 18, 34
13	U-006	2024.08.02 20:00	70.5000	-168.6669		v		0
14	U-007	2024.08.03 00:32	70.9370	-168.6671		v		0
15	ST-011	2024.08.03 03:09	71.4301	-168.6670	v		v	0, 15, 42
16	ST-013	2024.08.03 10:55	72.3695	-168.6394	v			0, 15, 45
17	ST-015	2024.08.03 21:42	73.3679	-166.6608	v			0, 15, 65
18	ST-016	2024.08.04 04:10	73.8616	-168.1471	v		v	0, 33, 70
19	ST-018	2024.08.04 13:00	74.7907	-168.0845	v		v	0, 35, 70
20	ST-019	2024.08.04 00:00	75.4995	-171.1757	v			0
21	ST-020	2024.08.05 04:00	76.0107	-170.3888	v		v	0, 26, 80
22	ST-021	2024.08.05 09:40	76.4617	-171.1843	v			0
23	ST-022	2024.08.05 17:49	76.9857	-170.2606	v		v	0, 30, 50
24	ST-023	2024.08.06 05:49	77.0015	-176.3239	v		v	0, 30, 70

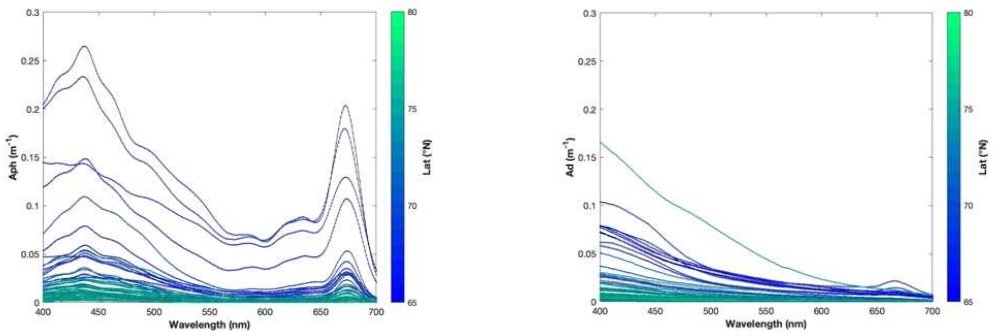
KOPRI 극지연구소

25	ST-024	2024.08.06 15:37	76.9659	179.8873	V		V	0, 22, 50
26	U-008	2024.08.06 15:37	76.9659	179.8873		V		0
27	ST-025	2024.08.06 21:25	77.4889	179.9998	V			0, 20, 50
28	ST-026	2024.08.11 22:38	79.5022	177.3436	V		V	0, 18, 50
29	ST-027	2024.08.12 11:43	78.9943	172.7815	V		V	0, 15, 50
30	ST-028	2024.08.12 22:41	78.0471	173.0961	V		V	0, 16, 50
31	ST-029	2024.08.13 08:03	77.0059	173.6832	V		V	0, 18, 40
32	ST-030	2024.08.13 21:41	75.9796	173.5746	V		V	0, 20, 50
33	ST-031	2024.08.14 03:46	75.3851	175.3079	V		V	0, 35, 50
34	ST-032	2024.08.14 07:49	74.9883	173.5466	V		V	0, 26, 50
35	ST-034	2024.08.14 16:17	74.3331	171.2025	V			0, 43, 48
36	ST-035	2024.08.14 18:41	73.9935	170.0570	V		V	0, 30, 40
37	U-009	2024.08.15 00:56	74.3210	172.1441		V		0
38	ST-036	2024.08.15 07:30	74.7005	174.5193	V			0, 25, 50
39	ST-037	2024.08.15 22:10	75.0627	176.9476	V		V	0, 28, 70
40	U-010	2024.08.15 23:55	75.0628	176.9545		V		0
41	ST-038	2024.08.16 08:49	75.8017	177.0503	V			0, 30, 50
42	ST-039	2024.08.17 01:52	76.1225	178.7981	V			0, 26, 70
43	ST-041	2024.08.17 15:34	75.2062	-179.9905	V		V	0, 32, 70
44	ST-042	2024.08.18 10:48	76.0139	-175.3888	V			0, 30, 70
45	ST-043	2024.08.18 20:10	75.1608	-175.8542	V		V	0, 18, 45, 70
46	U-011	2024.08.18 20:31	75.1638	-175.8373		V		0
47	ST-044	2024.08.19 06:57	75.2386	-172.0138	V		V	0, 25, 70
48	U-012	2024.08.19 20:53	75.1961	-168.5134		V		0
49	ST-045	2024.08.20 04:50	75.0237	-165.3623	V		V	0, 50, 100
50	ST-046	2024.08.20 21:45	74.5164	-162.1516	V		V	0, 50, 80, 100

KOPRI 극지연구소

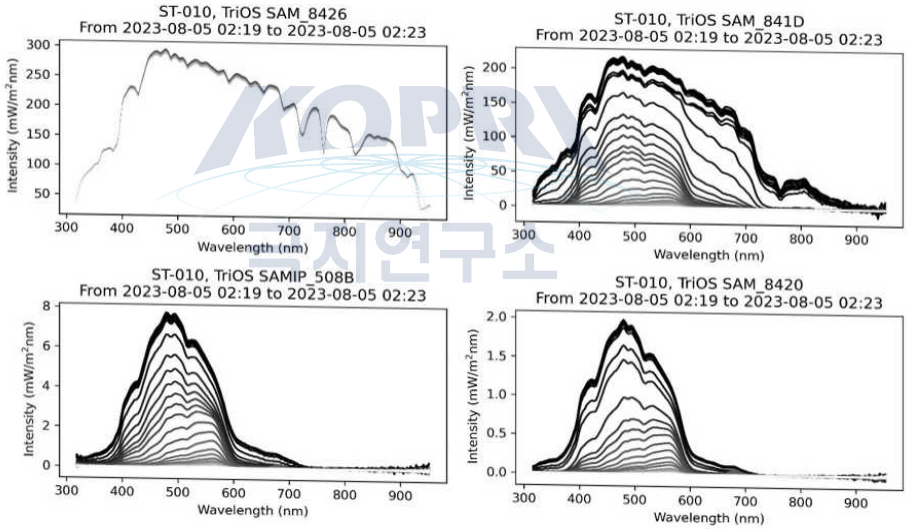
51	ST-047	2024.08.21 09:31	75.0311	-157.9143	V			0, 60, 100
52	ST-048	2024.08.21 17:17	75.4985	-161.1465	V		V	0, 45, 100
53	ST-049	2024.08.22 04:02	76.5391	-159.8894	V		V	0, 45, 100
54	ST-050	2024.08.22 19:24	77.4534	-164.0873	V		V	0, 32, 70
55	ST-051	2024.08.23 08:10	76.5674	-164.3614	V			0, 55, 100
56	ST-052	2024.08.23 18:03	75.6748	-166.6542	V		V	0, 40, 80
57	U-013	2024.08.24 00:30	75.2080	-167.2784		V		0
58	ST-053	2024.08.24 02:50	74.8055	-167.8818	V		V	0, 45, 100
59	ST-054	2024.08.24 02:50	73.8000	-164.7000	V			0, 28, 80

- IOP 변수 중 식물플랑크톤과 부유물질의 흡광도 시료를 확보하기 위해 해수의 상태에 따라 25 mm GF/F (Whatman) 필터지를 사용하여 해수 약 1,000 ml 정도 필터 하였으며, 유색용존유기물의 흡광도 시료를 확보하기 위해 0.2 μm 시린지 필터를 사용하여 50 ml 해수를 필터하였음. 또한 식물플랑크톤 및 부유물질의 농도를 측정하기 위해 25 mm GF/F (Whatman) 필터지를 사용하여 해수를 1,000 ml 정도 필터하였고, 필터된 시료는 -80℃ 초저온 냉동고에 보관됨.
- 추후 채수 샘플은 실험실에서 분광광도계를 사용하여 250~800 nm의 분광범위에서 측정될 예정이며, 아래 그림은 식물플랑크톤 및 부유물질의 흡광특성에 대한 아라온 관측 위도별 분석결과 예시를 나타냄.



(left) An example of absorptions by phytoplankton (left) and detritus (right) at the ARA13B. The color bar indicates the latitude of sampling stations.

- AOP에 대한 광학특성은 수직 프로파일러 형태로 표층부터 유광층 깊이까지 수직적으로 반사도를 측정하는 TriOS RAMSES 장비 및 연속적으로 해수면 반사도를 측정하는 장비인 초분광계 HyperSAS를 이용하여 320~950 nm 분광 범위에서의 자료를 획득하였음. TriOS RAMSES 장비의 경우 해수 표층부터 유광층 경계까지 분당 약 10 m의 속도로 내려가며 수직적인 변화를 연속적으로 측정하였으며, HyperSAS의 경우에는 연구기간 동안뿐만 아니라 아라온호가 인천항에서 북극해로 이동하고, 다시 인천항으로 돌아오는 이동항해 기간 동안에 대해 연속적으로 해수면 반사도 값을 관측함. 아래 그림은 ARA15A 연구항차 동안 정점 26에서 관측된 TriOS RAMSES의 깊이별 계측지를 나타냄.



TriOS observation results recorded at the ST-026 during ARA15A cruise

- 북극은 해수의 복합적인 특성으로 인하여 해색 관측의 부정확성이 상당히 높은 지역임. 특히, 연안역의 경우 기후 변화와 연관된 육상 기원 담수 유입, 융빙수 거동에 표층 해양 생태 요인에 상당한 변화를 야기함.
- 현재까지 광범위한 북극 전 해역에서 특정 해역에 대한 최적 알고리즘들이 개발되어 왔으나 급변하는 기후 변화로 인하여 이러한 알고리즘의 업데이트는 빈번히 이루어져야 함. 따라서 본 과제에서 확보된 해수 광학 특성은 해색 관측 산출물 (해양 클로로필 등)에 대한 검보정에 활용하여 정확성과 신뢰성을

확보할 수 있을 것으로 기대함.

- 위성 자료에의 검보정 적용은 충분한 양의 샘플이 누적되는 3차년도(2025) 현장조사까지 마친 후, 단계 종료 전에 수행 예정임.

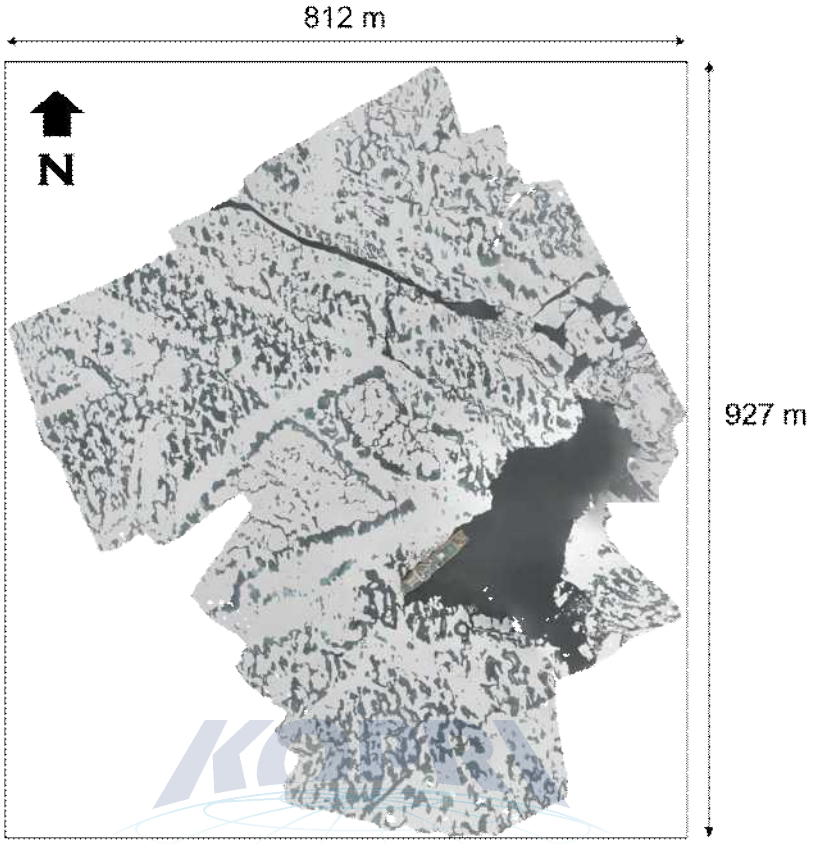
□ 연구내용 3-2. 북극해 해빙 표면 세부 공간정보자료구축 및 분석을 위한 항공촬영 자료 확보

- ARA15A의 해빙 캠프 기간 중인 2024년 8월 9일, 헬리콥터를 이용하여 고도 약 70 m에서 해빙의 고해상 항공사진을 촬영함.
- 각 항공사진은 60% 이상의 중첩율을 가지도록 비행중 0.5초 인터벌로 반복촬영 하였으며, 광역촬영을 위해 비행 경로를 격자로 구성함.
- 항공사진은 다음과 같이 영상 모자이킹, point cloud 추출 및 보간, DEM 생성, 정사보정 과정을 통해 정교한 해빙 표면 자료로 처리함.



Processing steps for generating an ortho-mosaic image

- 총 획득 영상은 347장이며, 위 처리 과정을 통해 다음 그림과 같이 공간해상도 5 cm의 고해상 정밀 해빙 표면 영상 및 DEM을 확보함.



Helicopterborne mosaiced and ortho-rectified image over sea ice camp site

극지연구소

- 확보한 정사 영상 및 DEM은 아래의 3D 레이저 스캐닝 자료와 함께 해빙 표면의 거칠기 분석 및 위성영상 기반 측정 결과의 검보정에 활용할 수 있을 것으로 기대함.
- 위성 자료에의 검보정 적용은 충분한 양의 샘플이 누적되는 3차년도(2025) 현장조사까지 마친 후, 단계 종료 전에 수행 예정임.

□ 연구내용 3-3. 북극해 해빙 표면 세부 공간정보자료구축 및 분석을 위한 지상 관측 자료 확보

- ARA15A의 해빙 캠프 기간 중, 아라온호 정박 위치로부터 약 50 m 떨어진 지점을 중심으로 다음 사진과 같이 3D 레이저 스캐너를 이용하여 해빙 표면 지형을 측정함.



3-D laser scanner operation for measuring ice surface roughness

- 측정에 사용한 3D 레이저 스캐너는 1500 nm 파장의 적외선을 사용하여 최대 반경 130 m 내의 범위에 대한 레이저 반사 시간 및 강도를 측정하여 3 mm 정밀도의 point cloud를 구성함. 동시에 RGB 카메라를 통한 가시광 영역의 정보도 취득함.
- 단, 극지에서는 공기 중 눈 등이 많이 날려 산란이 심하기 때문에 높은 정밀도를 유지하기 위한 실효 반경은 30 m 수준이며, 이에 광역 측정을 위해서는 측정 위치를 옮겨가며 반복 측정해야 함.
- 본 현장조사에서는 9회 반복 측정을 통해 약 160 m X 160 m 영역의 자료를 획득했으며, 다음 그림은 획득 자료를 가공하여 해빙 지표의 모습을 복원한 3차원 자료를 보임.

KOPRI 극지연구소



Colorized 3-D scan of the sea ice surface and IBRV ARAON

- 측정자료는 추가 처리/분석 후 영상레이더 위성영상의 후방산란값과 비교하여 영상레이더 기반 해빙 거칠기 추정 알고리즘 개발 및 검증에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대함.
- 위성 자료에의 검보정 적용은 충분한 양의 샘플이 누적되는 3차년도(2025) 현장조사까지 마친 후, 단계 종료 전에 수행 예정임.

□ 연구내용 3-4. 북극해 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개선 및 산출물 검증을 위한 해빙 코어 자료 확보 및 얼음 특성 자료 수집

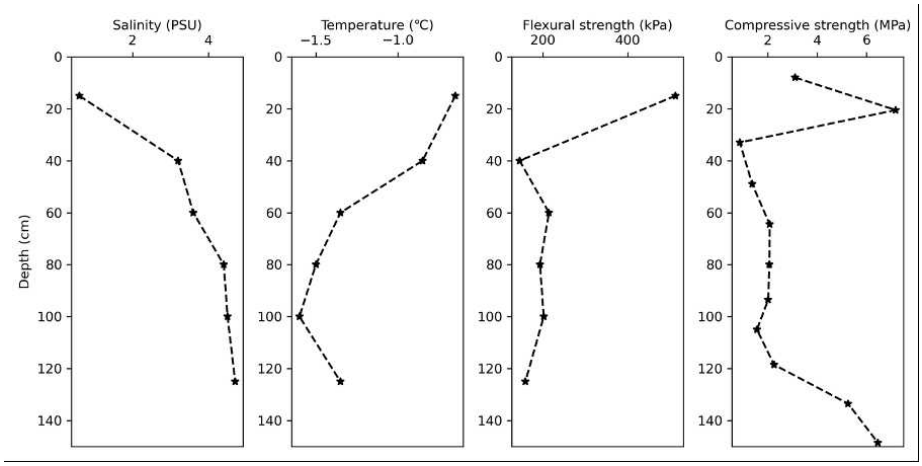
- ARA15A의 해빙 캠프 기간 중, 다음 사진과 같이 직경 10 cm의 코어러를 사용하여 해빙 코어를 채취함.
- 굽힘강도 측정용 코어는 10~20 cm 단위로 분절하였으며, 각 분절된 코어마다 중심부의 온도를 측정하고 녹인 후, 염도를 측정함. 이후 온도와 염도로부터 추정한 염수부피비를 Timco & O'Brien이 제시한 경험식에 대입하여 굽힘강도를 계산함.
- 압축강도 측정용 코어 또한 10~20 cm 단위로 분절하였으며, 각 분절된 코어는 UTM을 이용하여 직접 압축파쇄강도를 측정함.



Ice coring using a 10 cm diameter ice corer

- 해빙 코어는 해빙 캠프시에 3D 레이저 스캐너를 설치했던 위치 주변에서 채취했으며, 해당 지역의 해빙 두께는 평균 2 m 수준이었음. 당시 해빙 표면은 대체로 평탄했으며, 표층에 약 15~25 cm의 눈층이 존재함.
- 두 개의 코어를 획득 후 각각 하나씩 굽힘강도 측정용과 압축강도 측정용으로 사용함.
- 다음 그림은 두 개의 코어를 분석한 염도, 온도, 굽힘강도, 압축강도 결과를 나타냄.

KOPRI 극지연구소



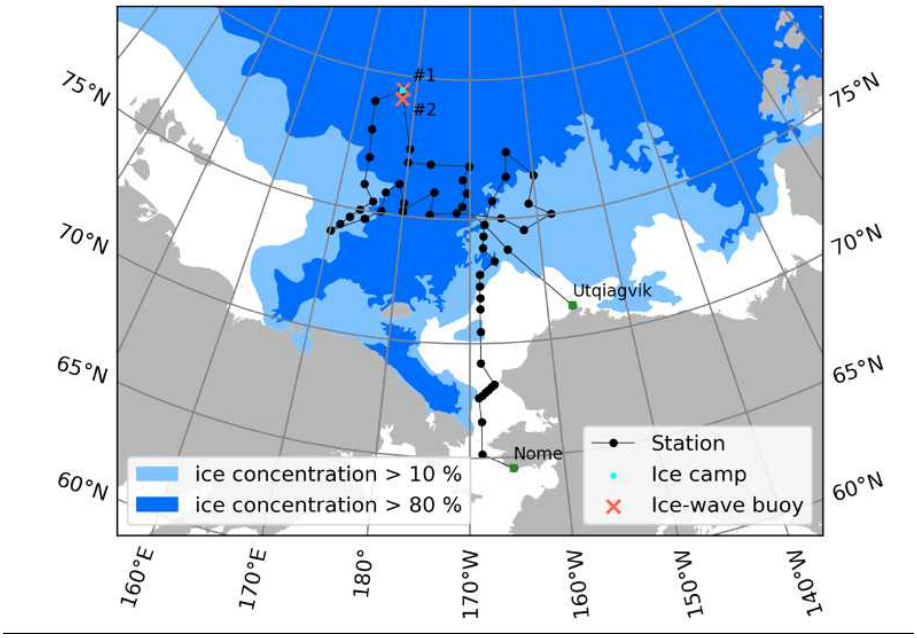
Salinity, temperature, flexural strength, and compressive strength profiles of the ice cores with respect to depth from the surface

- 측정자료는 추가 처리/분석 후 위성/재분석장 기반 해빙 강도 추정 알고리즘의 개발 및 검보정에 활용될 수 있을 것으로 기대함.
- 위성 자료에의 검보정 적용은 충분한 양의 샘플이 누적되는 3차년도(2025) 현장조사까지 마친 후, 단계 종료 전에 수행 예정임.

□ 연구내용 3-5. 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적 시스템 설치 및 자료 수집

- 해빙 영역 중 특히 해수-해빙 경계부 주변인 Marginal Ice Zone(이하 MIZ)은 해파의 영향을 받음. 여기서 해파는 일부 해빙 아래로 침투하면서 감쇄된 효과를 가지나, 지금처럼 해빙이 줄어드는 추세에서는 해파에 의한 영향력은 상대적으로 강화됨. MIZ는 해양과 해빙이 만나는 경계부이자 표층의 상(phase)이 달라지는 변화부이기 때문에 해빙 원격탐사와 해빙 모델링 모두에서 가장 발전이 더딘 영역이기 때문에 더욱 현장 관측의 필요성이 높음.
- 2024년 8월의 북극해 1항차에서는 1차년도(2023)에 이어 해빙 이동과 변형 관측을 목표로 소형 부이(buoy) 장비를 설치하고 그 관측 결과를 위성통신을 통해 실시간으로 수신함. 사용된 장비는 OpenMetBuoy로, 노르웨이 기상청 소속의 연구원 Jean Rabault가 오픈소스 기반으로 개발한 소형 해빙 부이임. OpenMetBuoy는 가로 12cm, 세로 12cm, 높이 9cm의 작은 상자 안에 GNSS 수신장치, Iridium 통신장치 및 배터리를 장착하여 부이의 위치를 측정할 뿐만 아니라, 6축 가속도 센서를 통해 움직임도 측정함. 이 움직임은 해양에서는 해파의 유의파고(significant wave height)를 나타내고, 해빙에서는 해파가 해빙 영역으로 전파되면서 감쇄(damping)된 유의파고를 나타내며, 이 감쇄는 해빙의 두께, 강도, 해수-해빙 경계선으로부터의 거리 등에 의해 달라짐.
- 이번 현장 조사에서는 총 2개의 부이를 다양한 조건의 해빙에 설치함. 아래 그림은 부이를 설치한 장소와 2024년 8월 12일의 해빙 농도 분포를 같이 도시함.

KOPRI 극지연구소



Location map of the deployed wave buoys

- 소형 부이 설치의 장소 조건은 두께 0.8~2 m의 해빙으로 주변이 둘러싸인, 해수-해빙 경계선으로부터 50 km 이상 떨어진 해빙 지역 내부이며, 상기 조건을 만족했을 때의 기대 수명은 3주 이상임. 2개의 소형 부이 설치 장소는 대부분이 조건들을 만족함. 설치는 헬리콥터를 이용해 목표 해빙에 착륙 후 손으로 해빙 중앙부에 안착시킴. 아래는 부이를 설치한 해빙을 헬리콥터에서 찍은 사진이며, 표는 두 개 부이의 설치 일자와 위치를 나타냄.



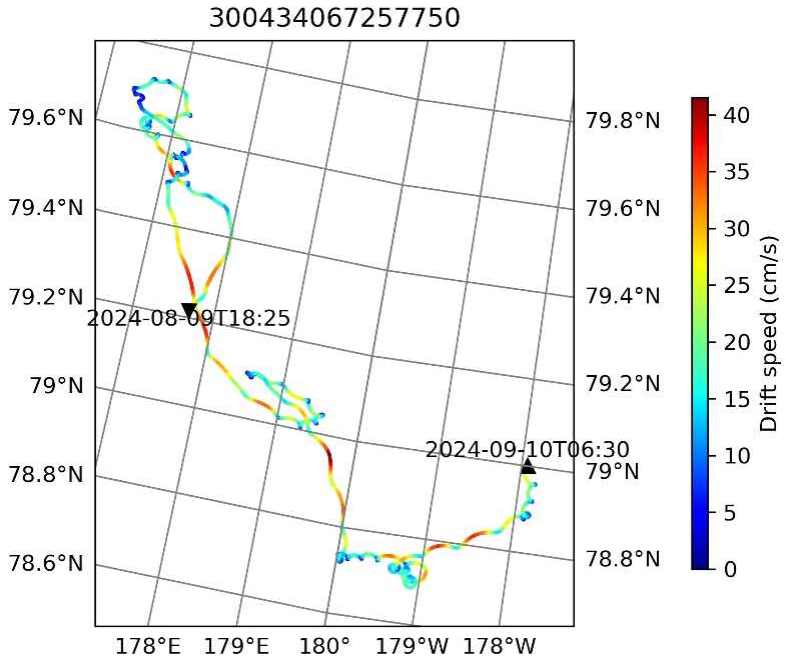
Ice condition over the locations of wave buoy deployment

List of the deployed wave buoys

Number	Date(UTC)	Latitude	Longitude
1	2023-08-09 18:25:00	79.2211185	177.6815935
2	2023-08-12 18:00:44	79.5445753	177.6057469

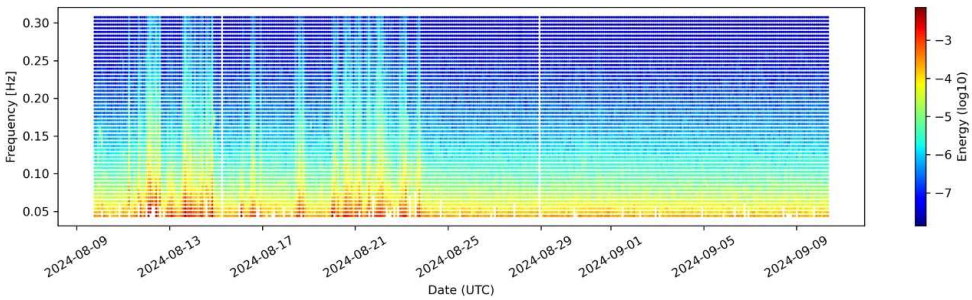
KOPRI 극지연구소

- 소형 부이로부터 발신되는 Iridium short burst 데이터는 10분 간격의 부이 좌표와 30분 간격의 해파 스펙트럼을 담고 있음. 아래 그림은 1번 부이의 위치 변화를 도시함. 해당 부이는 예상 수명을 넘어 약 1개월간 작동함. 이동 궤적은 관성운동에 의한 전형적인 12시간 주기의 반시계 방향의 회전을 보여주며, 시작 위치와 끝 위치를 보면 실제 해빙의 이동 속도와 방향이 선형성과는 거리가 먼 것을 알 수 있음.



Drift trajectories of the wave buoy #1

- OpenMetBuoy의 특장점은 전술한 바와 같이 6축 가속도 센서를 이용한 해파 정보의 추가 측정임. 아래 그림은 마찬가지로 1번 부이가 측정한 해파 스펙트럼을 보여줌. 스펙트럼 강도로부터 유의파고를 추정할 수 있으며, 짧은 시간 동안 튀는 값으로부터 부이 설치 장소 주변에서 이벤트성 해빙 변형이 발생한 시점과 규모를 추정할 수 있음. 해파 주기 또한 유사하게 침투한 해파가 해빙 감쇄로 인해 늘어진 정도를 나타내며, 해빙에서의 주기가 해양에서보다 길기 때문에 부이가 설치된 위치의 상변화를 지시함.



Wave spectrum of the wave buoy #1

- 부이 관측자료는 개별적 분석 후 시공간에 대한 네트워크 분석을 거쳐 동시베리아 북극해 해빙의 동역학적 물성을 제시할 것이며, 나아가 위성원격탐사 영상으로부터 MIZ 범위 및 해파 기인 변형량 산정, 해빙 모델링의 모사 정밀도 향상에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대함.
- 위성 자료에의 검보정 적용은 충분한 양의 샘플이 누적되는 3차년도(2025) 현장조사까지 마친 후, 단계 종료 전에 수행 예정임.

KOPRI
극지연구소

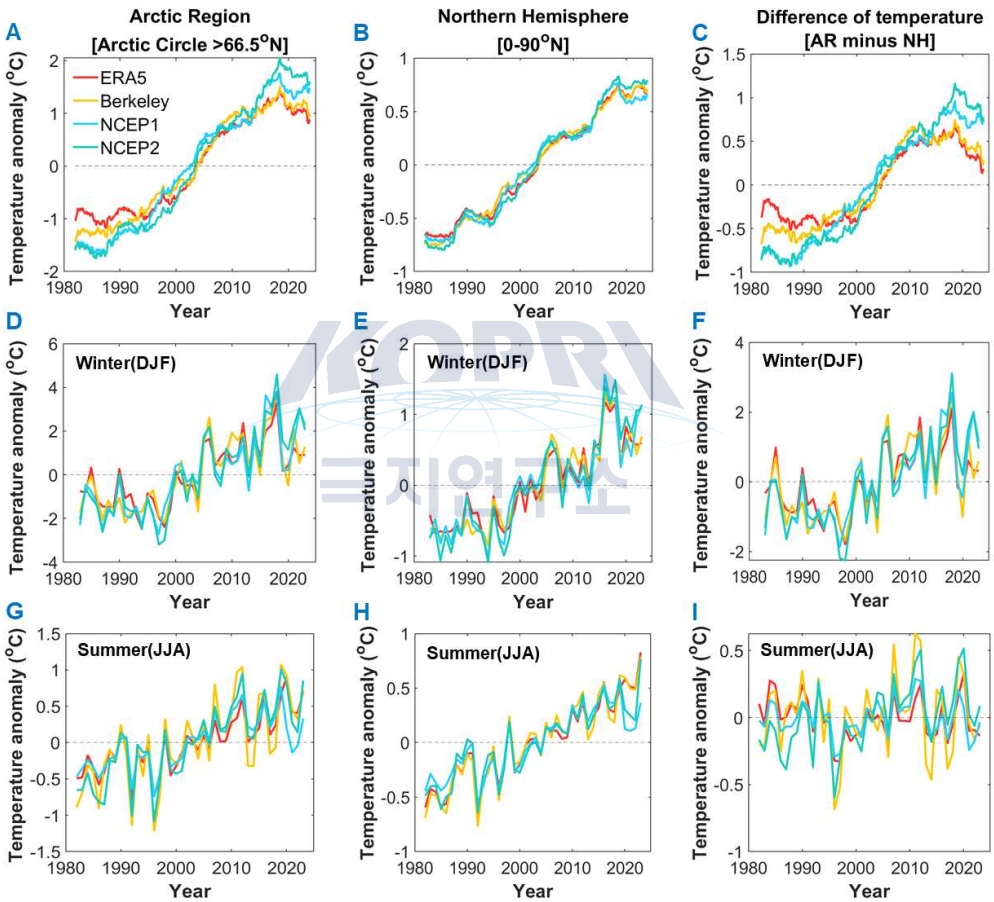
바. 2025년 6차년도 연구 요약

(1) 세부연구목표1. 북극해 해빙-해양 변동과 기후변화의 상관관계 분석

□ 연구내용 1-1. 기후 인자 지수와 북극해 해빙-해양 환경 변화와의 관련성 분석

○ 북극해 해빙/해양 환경 변화에 대한 온난화 상관관계 산정 및 상호 피드백 분석

- 북극해 해빙-해양 환경 변화에 대한 온난화 상관성 산정 및 상호 피드백 분석을 위해 대표적인 온난화 지수를 선정함.



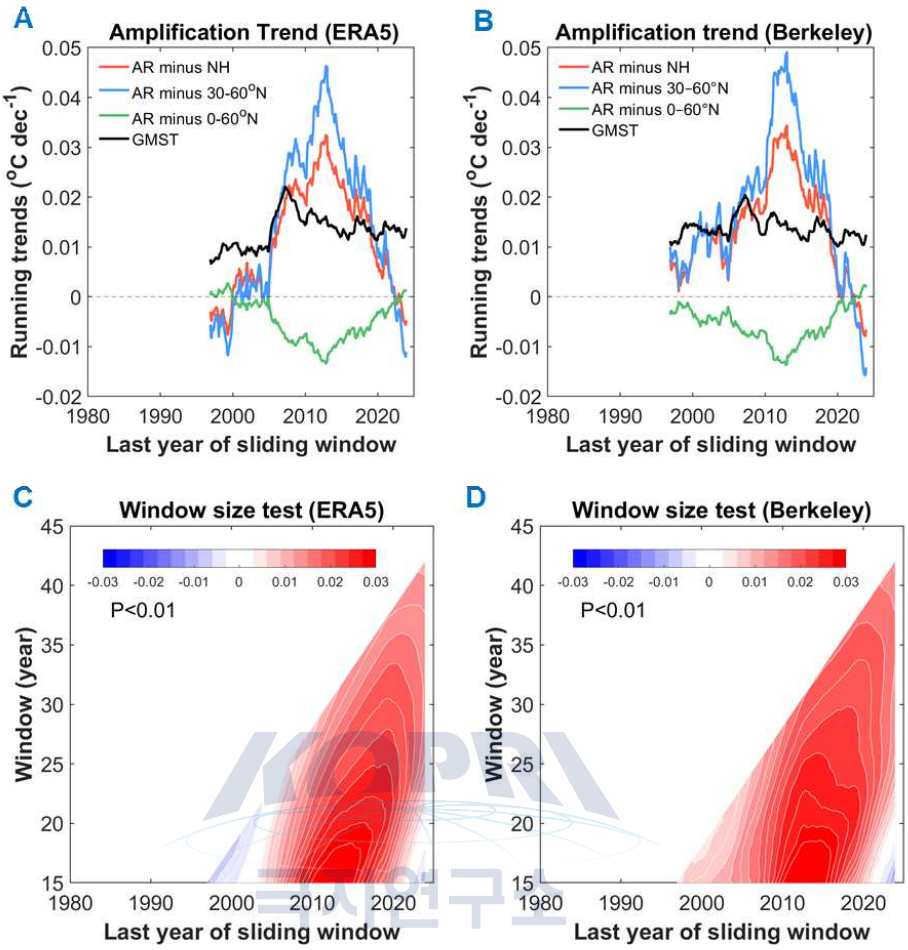
북극 지역(AR, 위도 66.5° N 이상)과 북반구(NH, 0-90° N)의 기온 이상(Temperature Anomaly) 변화 비교. (A-C) 전체 연평균 기준: (A) 북극 지역의 기온 이상, (B) 북반구의 기온 이상, (C) 북극과 북반구 간의 기온 이상 차이. (D-F) 겨울철(DJF) 기준: (D) 북극 지역, (E) 북반구, (F) 두 지역 간 차이. (G-I) 여름철(JJA) 기준: (G) 북극 지역, (H) 북반구, (I) 두 지역 간 차이. A-C는 월별자료이며 15년 이동 평균으로 표현함. D-I는 연별자료.

- 북극 지역은 위도 66.5°N 이상(Arctic Circle)으로 정의하며, 1980년대 초부터

기온이 지속적으로 상승해 왔음. 특히 2010년대 중반까지 뚜렷한 증가세를 보였으며, 이후 다소 완화되는 양상이 관측됨 (Fig A).

- 북반구 전체의 기온 변화 또한 유사한 패턴을 보이나(Fig B), 북극의 온도는 2000년대 중반까지는 북반구 평균에 비해 상대적으로 낮은 수준이었음 (Fig C).
- 2000년대 이후 북극 기온이 급격히 상승하면서, 이러한 현상은 “Arctic Amplification (AA)”으로 정의됨. AA는 2010년대 중반까지 강화되었으나 이후 약화되는 경향이 나타남.
- 겨울철(DJF)의 기온 변화는 Fig A - C의 패턴과 유사하게, 북극 증폭의 주요 시기 및 경향을 잘 반영함. 반면, 여름철(JJA)은 전반적 온난화가 관측되나, 위도에 따른 차별적인 경향은 뚜렷하지 않음 (Fig G - I).
- 본 연구는 최근 2010년대 중반 이후 관측되는 북극 증폭 약화 현상에 주목하며, 이에 기여하는 요인을 규명하고자 함.

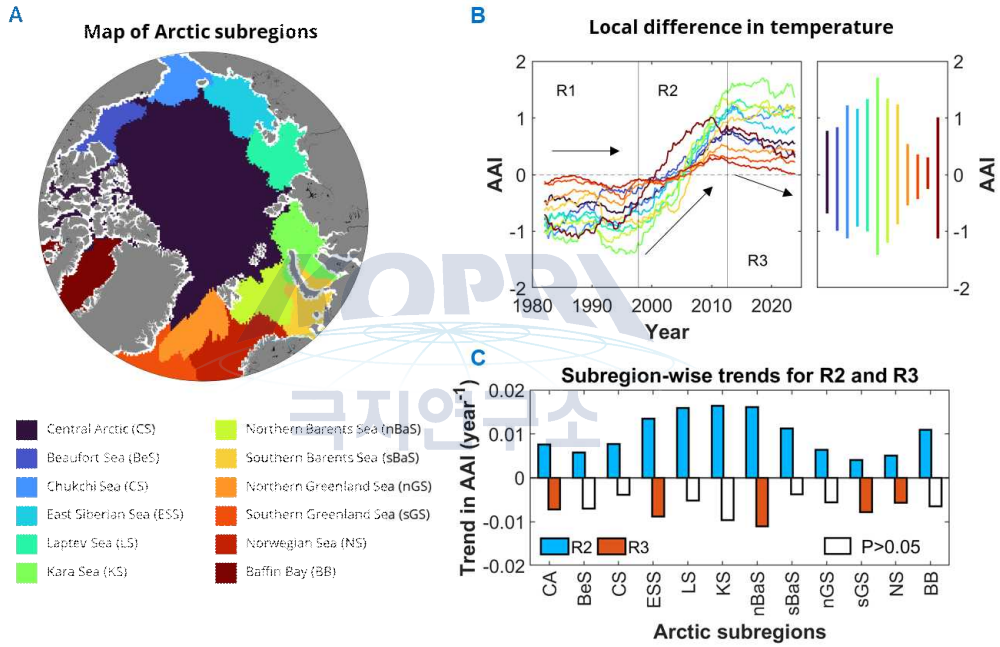
KOPRI
극지연구소



AA 추세와 슬라이딩 윈도우 크기에 따른 통계적 유의성 검정. (A-B) 북극과 북반구, 중위도, 저위도 간의 기온 상승률 차이를 21년 슬라이딩 윈도우 방식으로 계산한 북극 증폭 추세: (A) ERA5, (B) Berkeley 재분석 자료 기반. (C-D) 다양한 슬라이딩 윈도우 크기에 따른 증폭 추세의 통계적 유의성(p-value): (C) ERA5, (D) Berkeley. 붉은색 음영은 유의수준 0.01 미만(P < 0.01)을 나타냄.

- 본 연구에서는 유사한 경향을 보이는 두 가지 자료(ERA5 및 Berkeley)를 비교 대상으로 선정함. 북극의 겨울 기온은 1990년대 중반 이후부터 북반구 전체 평균보다 빠르게 상승해 왔으며(Fig A & B), 특히 중위도(30 - 60°N)에 비해 두드러진 온난화 경향을 보임.
- 2012년까지는 강한 북극 온난화가 지속되었으며, 이는 분석에 사용된 슬라이딩 윈도우 크기와 무관하게 일관된 결과를 나타냄(Fig C & D). 이후 ERA5 기준 2012년, Berkeley 기준 2011년부터 북극 증폭(AA)이 점차 완화되는 경향이 확인됨.

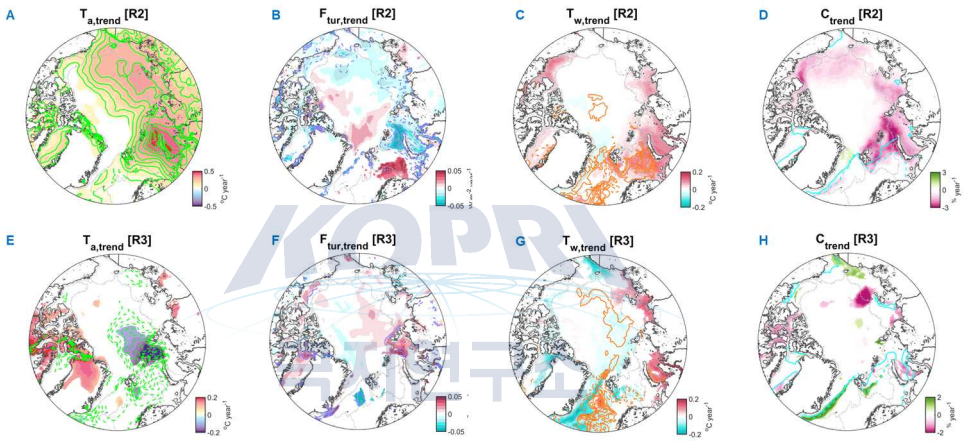
- 본 연구에서는 북극과 중위도 간의 기온 차이를 이용해 **북극 증폭 지수 (Arctic Amplification Index, AAI)**를 정의하고, 이를 온난화를 대표하는 지표로 활용함.
- 기존 연구에 따르면, 고온의 대서양 수괴(Atlantic Water)의 유입이 바렌츠-카라 해역의 해빙 손실을 억제하고, 해양-대기 상호작용을 촉진함으로써 북극 대기 온난화를 유발하는 주요 메커니즘으로 알려져 있음.
- 따라서 본 연구는 **2012년경 이후 관측되는 북극 증폭의 둔화 현상에 주목하고, 그 원인을 다양한 인자 기반 분석을 통해 규명**하고자 함.



북극 지역 세분화 및 지역별 북극 증폭 지수(AAI: Arctic Amplification Index) 분석. (A) 12개의 북극 아지역(Arctic subregions) 구분 지도. (B) 각 지역에서의 AAI 시계열 변화와 지역 간 차이 비교. 시계열 구간은 R1(1980-1996), R2(1996-2012), R3(2012~2023)로 구분됨. (C) R2와 R3 기간 동안의 지역별 AAI 추세 비교. 채워진 막대는 통계적으로 유의한 결과($p < 0.05$)를 나타냄.

- 전년도 정의된 12개의 북극 아지역(Fig A)을 대상으로, 각 지역의 AAI 시계열을 분석함. Multiple change point detection 기법을 적용한 결과, 1996년과 2012년이 주요 변곡점으로 자동 검출됨. 이에 따라 AAI 변화 양상을 세 시기로 구분함: 안정기(R1: 1984-1996), 증폭기(R2: 1996-2012), 둔화기(R3: 2012-2023) (Fig B).

- R2와 R3 기간 동안의 AAI 경향성은 지역적 차이를 보임(Fig C). R2 기간에는 대부분의 아지역에서 AAI가 상승하였으며, 특히 동시베리아해(ESS), 랍테프해(LS) 등 러시아 연안 해역과 카라해(KS), 북/남 바렌츠해(nBaS, sBaS) 등 대서양 영향권 지역에서 뚜렷한 증폭이 관측됨.
- R3 기간의 둔화 경향은 자료 기간이 짧아 통계적으로 유의하지 않은 지역이 많지만, 일부 지역(nBaS, sGS, NS 등)에서는 유의한 둔화가 나타남. 이들 지역은 대서양과 인접하거나 그 영향권에 위치함.
- 요약하자면, **최근 북극 증폭의 약화는 대서양과 연계된 아지역, 특히 바렌츠-카라해 (Barents-Kara Seas, BKS) 중심으로 진행되고 있음**을 시사함.

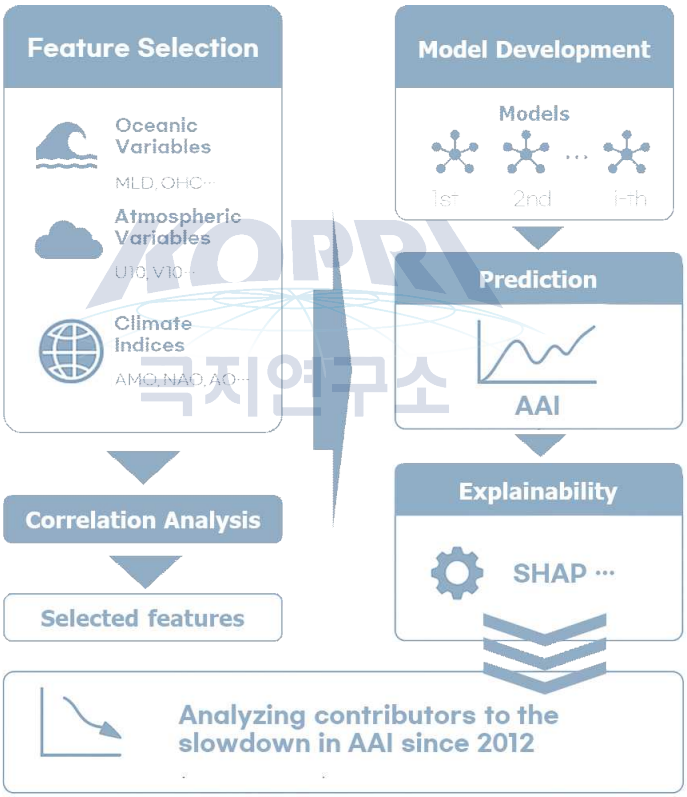


북극 지역의 기온 (Ta), 난류 열 플럭스 (Ftur), 해수면 온도(Tw), 해빙 농도(C) 아노말리에 대한 R2 및 R3 기간 동안의 경향성 분포 비교. (A-D) R2 기간 (1996-2012), (E-H) R3 기간 (2012~2023)에 대한 경향성 공간분포. (A,E) 표층 대기 온도의 경향 분포이며 초록색 contour는 AAI의 분포를 나타냄 (양: 실선, 음: 점선). (B, F) 현열 플럭스 분포이며 푸른색 contour는 잠열 플럭스의 분포를 나타냄 (양: 실선, 음: 점선). (C, G) 해수면 온도 경향성과 해양 열 함유량 (ocean heat contents, OHC)를 주황색 contour로 표시함 (양: 실선, 음: 점선). (D, H) 해빙 농도 분포이며, 하늘색 contour는 해빙의 여름철(실선) 및 겨울철(점선) 가장자리를 나타냄.

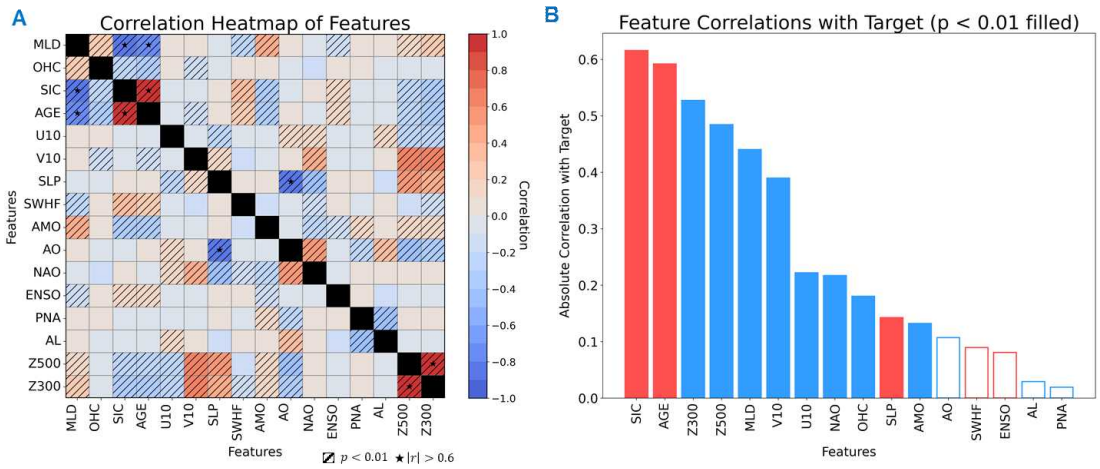
- R2 기간의 양상은 기존 연구들이 제시한 북극 증폭 메커니즘과 대체로 일치함(Fig A - D). 그러나 R3 기간에서는 R2와 다른 변화 양상이 뚜렷하게 나타남.
- BKS 지역을 중심으로 AAI와 대기 온도 모두 감소하는 경향이 관측됨(Fig E). 이 지역에서는 오히려 현열 플럭스가 점진적으로 증가하는 경향을 보임

(Fig F).

- OHC 자료를 통해 Atlantic Water inflow가 R3 기간에 뚜렷하게 감소했음을 확인할 수 있으며(Fig G), 동시에 해빙 가장자리는 계절과 무관하게 뚜렷한 후퇴를 보임(Fig H).
- 그러나 이러한 선형적인 접근만으로는 **비선형적인 AAI 변화의 원인을 확실하게 밝혀낼 수 없음**. 이에 따라. 본 연구에서는 다양한 인공지능 모델을 활용하여 AAI를 정밀하게 모사하고, 모사된 모델의 설명 가능한 방식을 통해 **BKS 지역을 대상으로 R3 기간의 AAI 둔화 양상에 영향을 미치는 해양-해빙-기후변수들의 상호작용과 중요도를 집중 분석**함.



R3기간의 AAI 둔화 원인 분석을 위한 인공지능 연구 흐름도



입력 변수 간의 상관성 및 AAI(Arctic Amplification Index)와의 관련성 분석. (왼쪽) 변수 간의 상관계수 히트맵. 격자무늬로 표시된 영역은 $p < 0.01$이면서 별표는 상관계수(|r|)가 0.6 이상인 경우를 나타냄. (오른쪽) 각 변수와 타겟(AAI) 간의 상관성. 채워진 막대는 $p < 0.01$ 수준에서 유의한 상관관계를 나타냄.

- 상관성 분석 결과를 바탕으로 변수 간 중복성(Fig A) 및 AAI와의 비상관성(Fig B)을 고려하여, 총 9개의 핵심 입력 인자가 최종 선택됨. i) 해양 인자: 혼합층 깊이(Mixed Layer Depth, MLD), 해양 열 함유량(Ocean Heat Content, OHC) ii) 해빙 인자: 해빙 농도(Sea Ice Concentration, SIC), iii) 대기 인자: 동서 바람(U10), 남북 바람(V10), 해면기압(Sea Level Pressure, SLP), 300 hPa 지오포텐셜 고도(Z300), iv) 기후 지수: 대서양 다년변동(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO), 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation, NAO)
- 인공지능 모델은 회귀를 기반으로 하는 3가지 머신러닝 모델 (model 1-3)이 시범 적용됨. 다음 그림은 모델 구현에 사용한 Python 코드의 일부를 나타내며, 개발 모델 자체는 KPDC에 등록함.

```python
from scipy.stats import pearsonr
from mpl_toolkits.axes_grid1 import make_axes_locatable
import matplotlib.dates as mdates
from datetime import datetime, timedelta
from scipy.io import loadmat
import networkx as nx
from sklearn.linear_model import LinearRegression, ElasticNet
from sklearn.linear_model import Ridge
from sklearn.neighbors import KNeighborsRegressor
from sklearn.svm import SVR
from xgboost import XGBRegressor
from lightgbm import LGBMRegressor
from catboost import CatBoostRegressor
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor, ExtraTreesRegressor
from sklearn.neural_network import MLPRegressor
os.chdir("D:\Research\Ongoing\slowdown_AA")
#%%#########################################################################
### 함수 정의
############################################################################
def mean_absolute_percentage_error(y_true, y_pred):
    y_true, y_pred = np.array(y_true).ravel(), np.array(y_pred).ravel()
    mask = y_true != 0
    return np.mean(np.abs((y_true[mask] - y_pred[mask]) / y_true[mask])) * 100
def model_performance(y_train, y_train_hat, y_test, y_test_hat):
    Train_MSE = mean_squared_error(y_train, y_train_hat)
    Test_MSE = mean_squared_error(y_test, y_test_hat)
    print("Train MSE, %.4f, Test MSE: %.4f" % (Train_MSE, Test_MSE))
    Train_R2 = r2_score(y_train, y_train_hat)
    Test_R2 = r2_score(y_test, y_test_hat)
    print("Train R2, %.4f, Test R2: %.4f" % (Train_R2, Test_R2))
    Train_MAE = mean_absolute_error(y_train, y_train_hat)
    Test_MAE = mean_absolute_error(y_test, y_test_hat)
    print("Train MAE, %.4f, Test MAE: %.4f" % (Train_MAE, Test_MAE))
    Train_RMSE = np.sqrt(mean_squared_error(y_train, y_train_hat))
    Test_RMSE = np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_test_hat))
    print("Train RMSE, %.4f, Test RMSE: %.4f" % (Train_RMSE, Test_RMSE))
    Train_mape = mean_absolute_percentage_error(y_train, y_train_hat)
    Test_mape = mean_absolute_percentage_error(y_test, y_test_hat)
    print("Train MAPE, %.4f, Test MAPE: %.4f" % (Train_mape, Test_mape))
def feature_import(forest,X_train_fin):
    feature_importance = pd.DataFrame({
        'feature': X_train_fin.columns,
        'importance': forest.feature_importances_
    }).sort_values('importance', ascending=False)
    plt.figure(figsize=(12, 8))
    sns.barplot(x='importance', y='feature', data=feature_importance)
    plt.title('Feature Importance in Random Forest Model')
    plt.xlabel('Importance')
    plt.ylabel('Features')
    plt.tight_layout()
    plt.show()
    return feature_importance
```

인공지능 모델 개발 코드의 일부 캡쳐 화면

극지연구소

Data Registration Confirmation

KPDC
KoreaPolarDataCenter

AI model for simulating climate connectivity between the ocean and sea ice environment

A model simulating climate index (Arctic amplification) fluctuations associated with sea ice based on the relationship between sea ice and environmental factors

Identifier

Entry ID	KOPRI-KPDC-00003026
DOI	doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00003026

Metadata

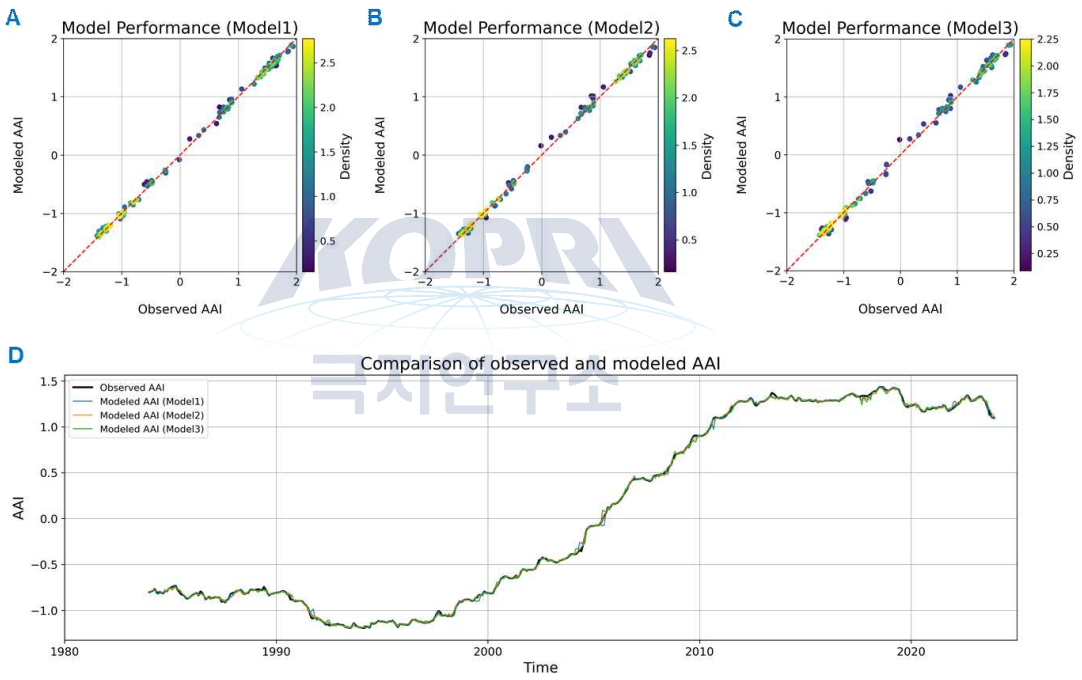
Science Keyword	EARTH SCIENCE > CRYOSPHERE > SEA ICE
ISO Topic	Environment
Personnel	Jinku Park (jinku_park@kopri.re.kr)
Research period	2025-09-01 ~ 2025-12-04
Registration Date	2025-12-04
Location	OCEAN > ARCTIC OCEAN
Spatial Coverage	**RECTANGLE** lat:90, lon:-180 lat:60, lon:180
Data Center	Korea Polar Data Center

인공지능 모델 개발 코드의 KPDC 등록 인증서

- 장기적인 관점에서 분석을 요하므로 해당 입력 및 타겟 자료들은 5년 이동 평균을 수행한 후 적용됨. 훈련 자료는 전체 자료의 70%, 테스트 자료는 30%로 설정됨. 테스트 자료에 대한 모델 수행 결과는 아래 테이블과 같음.

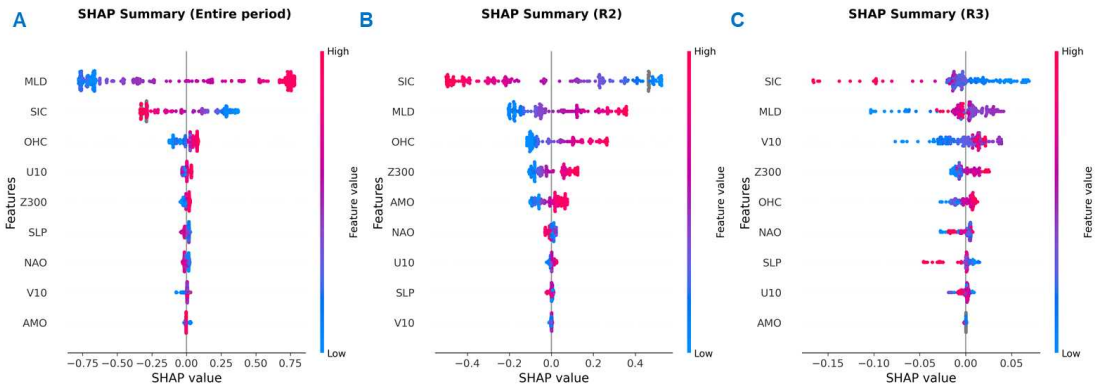
모델 수행력 결과에 대한 통계. 본 결과는 전체 자료 30%의 테스트 자료에 대해서만 제시함

	Evaluation metrics				
Models	R^2	MSE	MAE	RMSE	MAPE
Model 1	0.999	0.001	0.020	0.030	7.958
Model 2	0.999	0.000	0.015	0.021	2.156
Model 3	0.999	0.001	0.019	0.031	8.527



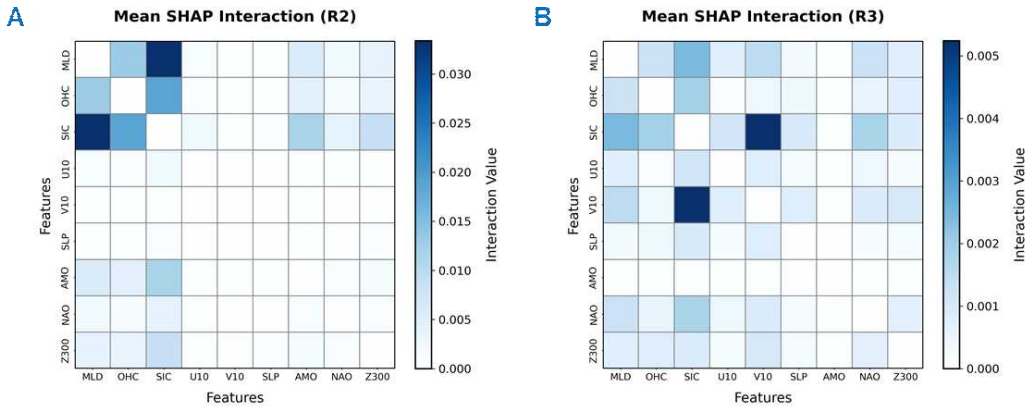
AAI 모사 모델 수행력 비교. (A-C) 각 모델의 테스트 데이터 자료의 모델 결과 비교. (D) 실제 AAI와 각 모델에서 예측된 시계열 변화의 비교. 여기서 시계열 자료는 15년 이동 평균을 하여 나타냄.

- 세 모델 모두 실제 AAI의 변화와 완전히 일치하는 결과를 보이나, Model 2가 약간 더 좋은 성능을 보임. 본 인공지능 모델은 예측을 위한 모델이 아니며, 과적합을 역으로 응용한 방식이므로 1에 가까운 R^2값이 전혀 문제되지 않음. 편의를 위해 현 단계에서 가장 좋은 성능인 Model2에 대한 분석만 수행함.



SHAP 분석 요약. (A) 전체 기간, (B) AA 증폭 기간(R2), (C) AA 둔화 기간 (R3)

- 전체 기간(Fig A)과 R2(증폭기) 기간(Fig B) 동안 해빙 농도(SIC), 혼합층 깊이 (MLD), 해양 열 함유량(OHC)이 AAI 예측에 가장 큰 영향을 미침. 이는 북극 증폭의 주요 메커니즘이 해빙 - 해양 상호작용에 기반함을 뒷받침함.
- R3에서는 대부분 변수들의 SHAP 값이 축소되어 모델 설명력이 분산되고 약화된 양상 (Fig C). 특히 **Z300(상층 기압)과 V10(남북 바람)의 기여도가 상대적으로 증가해, 대기 역학의 중요성이 강화됨**을 보여줌.
- 해빙 농도(SIC)는 R2(증폭기)와 R3(둔화기) 두 시기 모두에서 AAI에 가장 큰 영향을 미친 핵심 인자로 나타남. 해빙은 본질적으로 비선형적인 변화 특성을 가지므로, 본 결과는 **R2와 R3 기간의 해빙 변화가 동일한 원인이 아닌, 서로 다른 기작 또는 환경 조건에 의해 발생했을 가능성을 시사함.**
- AMO, NAO 등의 기후 지수는 R2 시기에는 일정한 설명력을 보였으나, R3 (둔화기)에는 기여도가 급격히 감소. 이는 대서양계 기후 요인의 영향력이 북극 증폭 초기에는 유의했지만, 최근 둔화기에는 감소했음을 시사함. 또한, 지연 효과를 고려하지 않았기 때문에, 이들의 실질적인 영향력을 완전히 배제할 수는 없음.

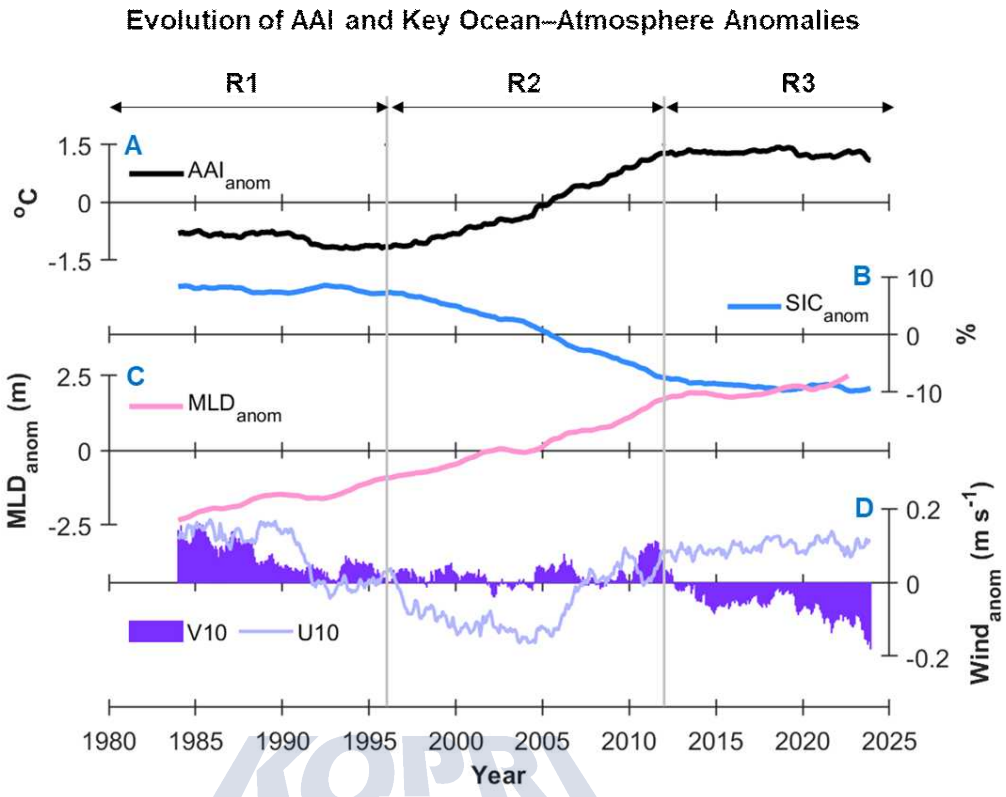


R2(증폭기, A) 및 R3(둔화기, B) 기간 동안의 평균 SHAP 상호작용 값 분석 히트맵

- SHAP 응용 분석을 통해 입력 인자 간의 상호작용 정도를 R2(증폭기, Fig A)와 R3(둔화기, Fig B) 기간에 대하여 분석함. 분석 결과는 아래의 표에서 요약하여 제시함.

SHAP 분석 결과 및 가정 수립

항목	R2(증폭기)	R3(둔화기)	내용
SIC -MLD	아주 강한 상호작용	약화됨	과거에는 해빙과 혼합층의 결합 효과가 강했음 → 최근엔 독립 작용 및 다른 요인과의 작용 가능성 증가
가정: 과거에는 AW 유입 → MLD 깊이 증가 → SIC 감소 → AAI 강화라는 전통적 열-해빙 메커니즘이 강하게 작용함			
SIC -V10	매우 미약	강한 상호작용	최근에는 해빙과 남북 바람 간의 상호작용이 강화됨 → 대기-해빙 결합 영향이 커졌다는 증거
가정: 최근에는 바람에 의한 해빙 이동, 연직 혼합의 관계가 변화하여 AAI에 영향 → 동역학적 메커니즘 강화 신호			
MLD -OHC	강한 상호작용	낮아짐	해양 내부 역학적 연결성은 과거에 더 강했던 것처럼 보임
가정: 대서양수 유입은 여전히 존재하지만, 표층 열 분포의 영향력이 약화되거나 더 비선형화될 수 있음			
NAO -V10	거의 없음	미약	기후 지수 기반의 바람 조절 메커니즘이 최근 들어 일부 등장한 가능성
가정: 대규모 기후 모드보다는 지역적 바람·해빙·혼합층간의 국지적 상호작용이 더 중요하게 작용			
전체 값 범위	인자간 상호작용이 더 큼	전반적으로 낮음	R2가 전반적으로 상호작용이 더 구조화됨 → R3에서는 영향 요인이 더 분산되어 있거나 약화됨

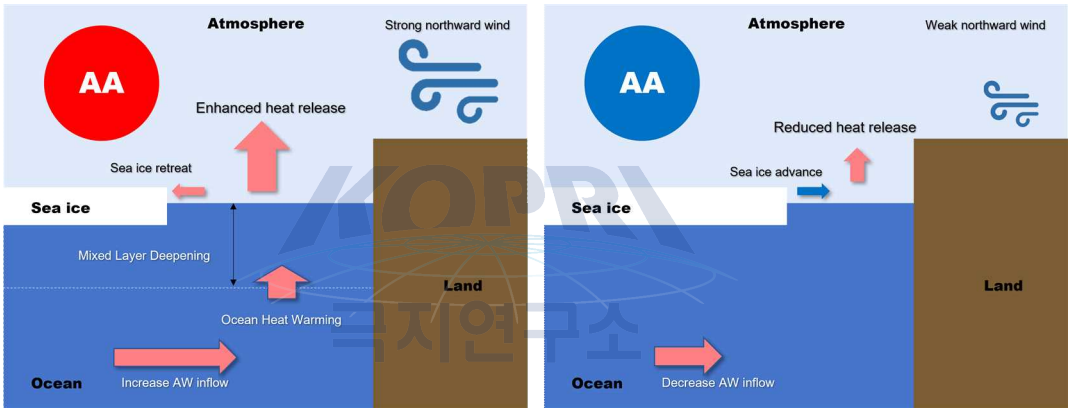


북극 증폭 지수(AAI)와 주요 해양-대기 변수들의 이상(anomaly) 시계열 변화 (1980-2023). (A) AAI, (B) 해빙 농도(SIC), (C) 혼합층 깊이(MLD), (D) 동서(U10) 및 남북(V10) 바람 성분의 이상값. 세로선은 세 시기 (R1: 안정기, R2: 증폭기, R3: 둔화기)의 전환 시점을 구분함 (1996년, 2012년).

- R2 (1996 - 2012, 증폭기) 기간 동안, AAI가 본격적으로 상승 시작. 북극 증폭이 급속히 전개됨. SIC는 빠르게 감소하며 이는 해빙 손실이 북극 대기 온난화에 핵심 기여함과 연관됨. MLD는 지속적으로 증가하며 이는 해수면에서의 열저장 강화, 해양-대기 열 교환 증가 가능성 시사함. 바람 성분의 추이는 안정적이나, U10(동서 바람)은 약한 서풍 성분에서 변화 관측됨. 요약하면, 해수-기와의 직접 열 교환이 증가하고 북극 증폭이 가속화될 수 있음.
- AAI가 둔화되는 R3 (2012-2023) 기간 동안, 북극 증폭이 급속히 전개됨. SIC는 여전히 감소하지만, 속도는 둔화됨. MLD는 고점을 유지하며, 해양 혼합이 정체된 듯한 양상임. 눈에 띄는 특징은 V10의 강한 남향 이상과 U10의 변화를 보이며 이는 BKS 지역적 대기역학의 영향 증가 가능성을 시사함.
- 종합하여, 기존 문헌들의 주장대로 북극 증폭은 주로 해빙 손실과 해양 열저장 강화에 의해 촉진됨. 다만, <u>2012년 이후로 해빙 손실이 지속되었음에도</u>

불구하고 증폭은 둔화되며, 단순 선형 메커니즘 외의 요인(예: 대기 역학적 조절, 내부 변동성 등)이 개입했음을 시사함. 이는 비선형적 전환점의 가능성, 또는 북극 시스템이 새로운 기후 조절 체계로 전이 중일 수도 있음을 암시함.

- 현재까지는, 기존 연구들이 단순 상관성을 기반으로 연구를 수행한 것에 반하여 본 과제에서는 변수 간 **비선형 상관성을 기반**으로 AAI에 영향을 미치는 요인들을 식별하였으나, 명확한 인과 관계는 아직 입증되지 않음.
- 향후 본 과제에서는 **다양한 인공지능 모델을 적용하여 변수 중요도 분석의 일관성과 신뢰성을 검증**하고, **인과 기반 가설의 검증에 초점을 맞춘 연구**를 지속할 계획임.



북극 증폭 강화 기간(좌)과 둔화 기간(우)의 주요한 요인에 대한 모식도

- 위 그림은 북극 증폭 강화 기간(R2) 및 둔화 기간(R3)의 주요한 요인들의 특징에 대한 간략한 모식도로 표현함.
- 북극 증폭 강화 시에는 대서양 유입수의 증가와 육상 기원 북풍의 강화로 인해 열적 및 동적 요인에 따른 해빙의 후퇴가 강화됨. 이는 곧 해양에 저장되어 있는 많은 양의 열이 대기로 빠져나감에 따라 북극 증폭이 강화되는 결과를 나타냄.
- 이 시기에는 혼합층이 깊어지며 따뜻한 심층수가 표층으로 더 쉽게 전달되어, 해빙 감소를 더욱 가속하는 내부 해양 피드백이 강화.
- 반대로 북극 증폭이 둔화되는 시기에는 대서양 유입수의 약화로 인하여 해양에 저장되는 열자체가 줄어들 뿐만 아니라 북풍의 약화로 인하여 해빙이 밀려나가지 못하고 해수면에 덮개 역할을 하여 대기로의 열전달을 방해함. 이는 곧

북극 증폭의 둔화를 일으키는 요인으로 작용함

- 둔화기에는 약해진 혼합층 심화와 감소한 대서양계 해수 유입이 해수 상층의 온도 상승을 제한하며, 이는 해빙 회복(advance)을 안정적으로 유지하는 데 기여함
- 결과적으로, R2-R3 전환 과정은 대기-해빙-해양이 동시에 상호작용하는 다중 피드백 체계에 의해 결정되며, 단일 요인보다는 복합적 거동이 북극 증폭 강도 변동의 핵심으로 작용함.

(2) 세부연구목표2. 산출물 검증

□ 연구내용 1-1. 현장조사자료 기반 북극 빙권 위성자료 검정

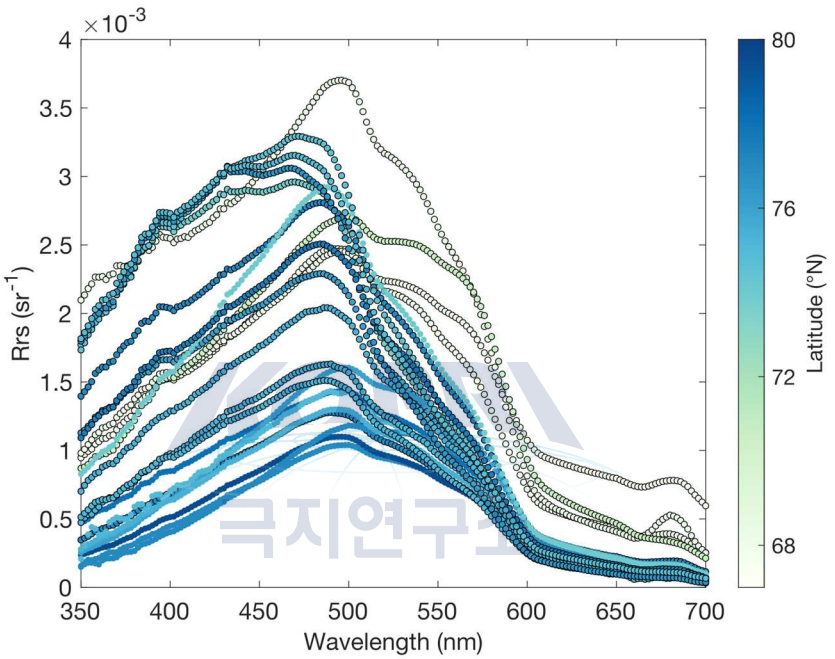
○ 위성 관측 자료 보정 및 현장 자료 모니터링의 중요성

- 정확성 향상: 위성 센서는 대기 영향, 센서 자체의 오차, 관측 환경 변화 등으로 인해 체계적 오차를 가질 수 있음. 현장에서 직접 측정한 정확한 현장 자료를 기준으로 위성 자료를 비교하고 보정함으로써, 이 오차를 줄이고 위성 자료의 절대적인 정확도 향상 가능.
- 신뢰성 확보: 보정된 위성 자료는 연구, 정책 결정, 재해 대응 등 다양한 분야에서 더욱 신뢰할 수 있는 정보로 활용 가능.
- 센서 성능 변화 감지: 위성 센서는 시간이 지남에 따라 성능이 저하되거나 특성이 변할 수 있음. 지속적인 현장 모니터링은 이러한 시간적 변화를 감지하고, 이에 맞추어 위성 자료를 재보정하거나 자료 품질 저하 시점을 파악하는 데 필수적임.
- 알고리즘 검증 및 개선: 위성 관측값을 사용자가 원하는 물리량으로 변환하는 역산 알고리즘의 성능을 현장 자료를 통해 주기적으로 검증하고 개선하는 데 활용 가능.
- 장기 시계열 자료 품질 유지: 기후 변화 연구 등 장기간에 걸친 위성 자료 분석 시, 일관성 있고 동일한 품질의 자료를 확보하여 추세 분석의 신뢰도 향상 가능.

○ 북극 해수 광 특성 자료수집 및 인공위성 관측 결과 검정

- 위성자료의 정확도 향상을 목적으로 아라온호 북극항차에 참여하여 북극 해수의 광학적 특성에 대한 현장 관측 자료를 지속적으로 수집 및 분석하였음.
- 아래 그림은 2024년도 아라온 북극항차(ARA15A) 기간 동안 각 관측 정점에

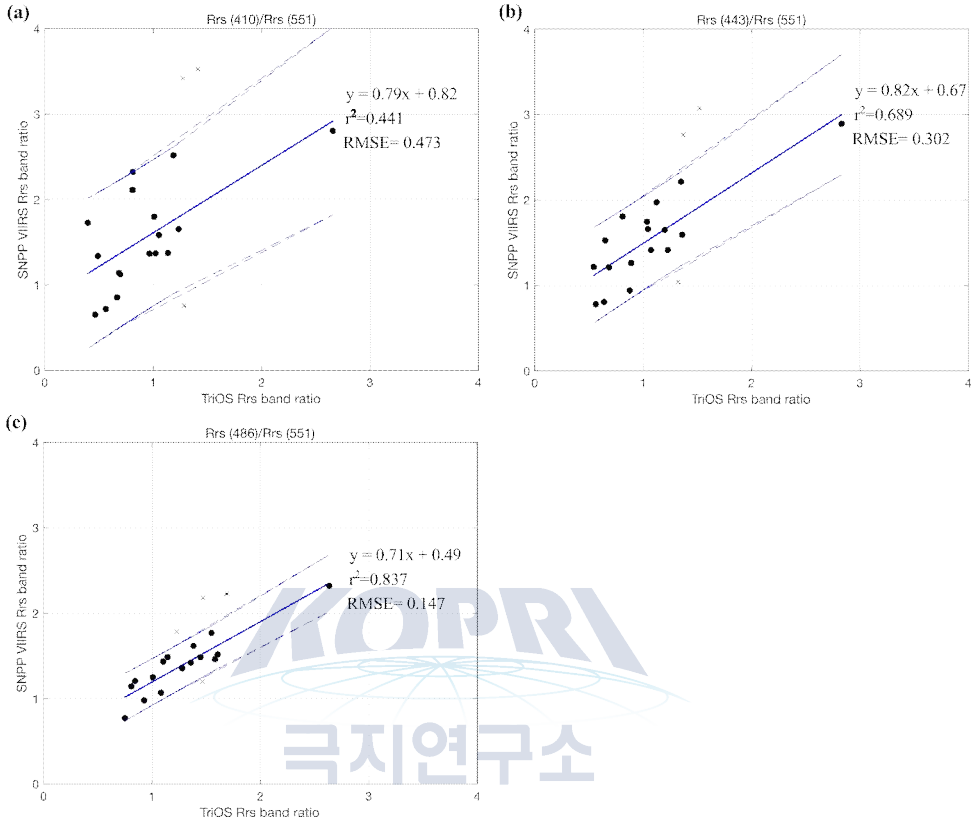
서 TriOS RAMSES 장비를 활용하여 측정한 표층 원격반사도(Rrs)의 분광 분포를 나타냄. TriOS RAMSES 장비는 수직 프로파일러 형태로, 해수 표층부터 유광층 깊이까지의 수직적인 원격반사도(Rrs)를 연속적으로 측정할 수 있는 장비임. 정점별 표층 원격반사도(Rrs)의 분광 스펙트럼은 청색 및 적색 파장대에서 상대적으로 낮은 값을 나타내며, 녹색 파장대에서 높은 값을 보이는 특징을 나타냄.



Spectra for TriOS Ramses-derived surface remote sensing reflectance (Rrs) measured at each station during the ARA15A cruise. Color indicates latitude.

- 연구기간 동안 획득한 실측 원격반사도(Rrs) 자료를 활용하여 SNPP-VIIRS 위성 반사도 자료에 대한 비교검증을 수행하였음. SNPP-VIIRS 센서로부터 제공되는 410, 443, 486, 551 nm 파장의 원격반사도 자료를 활용하였으며, 극지방 해역의 해색 자료 가용성 한계를 고려하여 8일간 평균값(8-day composite) 자료를 사용하였음. 위성자료와 현장 관측 정점을 매칭하기 위해 각 정점에 해당하는 3×3 픽셀의 평균값을 적용하여 분석을 수행하였음.
- 가용할 수 있는 위성-현장 매칭 관측 자료의 개수는 총 20개였으며, 해당 자료를 바탕으로 비교분석을 수행한 결과, 전반적으로 현장 관측값과 위성자료

간의 일치도가 양호한 것으로 나타났음. 특히 blue-green ratio 중 486 nm 파장대의 blue band를 활용한 비율에서 높은 정확도를 보였음.



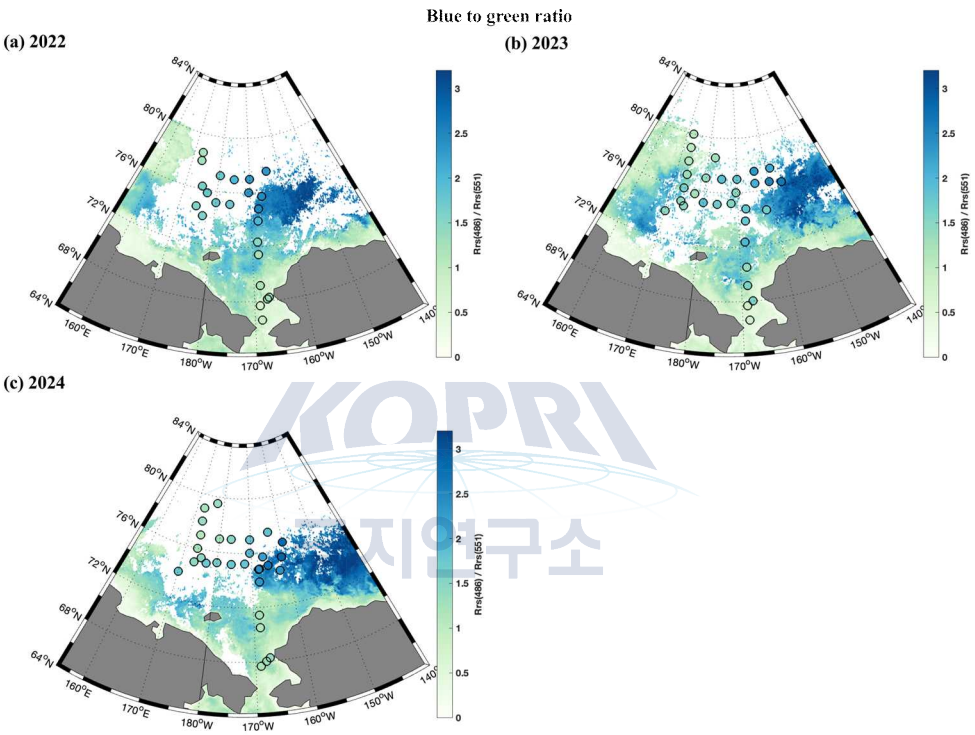
Comparison between in situ and satellite-derived Rrs blue-green ratios. (a) Rrs(410)/Rrs(551), (b) Rrs(443)/Rrs(551), and (c) Rrs(486)/Rrs(551). The solid blue line is the fitted line. Dashed lines are 90% confidence interval. The marker x indicates outliers.

○ 북극 해수 광 특성 고유 산출물 시험 생산, 기존 산출물과의 비교분석과 활용 제안

- 연구 기간 동안 획득한 가용 가능한 실측 원격반사도 자료를 활용하여 보정된 blue-to-green ratio에 대한 8월 평균 공간분포 자료를 시험적으로 생산하였음. 'Blue-to-green ratio'는 해수의 식물플랑크톤 농도, 부유물질, 유색 용존유기물(CDOM) 등의 광학적 특성을 파악하는 중요한 지표로 해양 생산성 및 환경 모니터링에 유용하며, 급변하는 북극해와 같은 지역에서 해색 관측의 정확도를 향상시키는 데 중요한 변수임.
- TriOS RAMSES 장비를 활용하여 측정한 표층 원격반사도(Rrs)에 대한

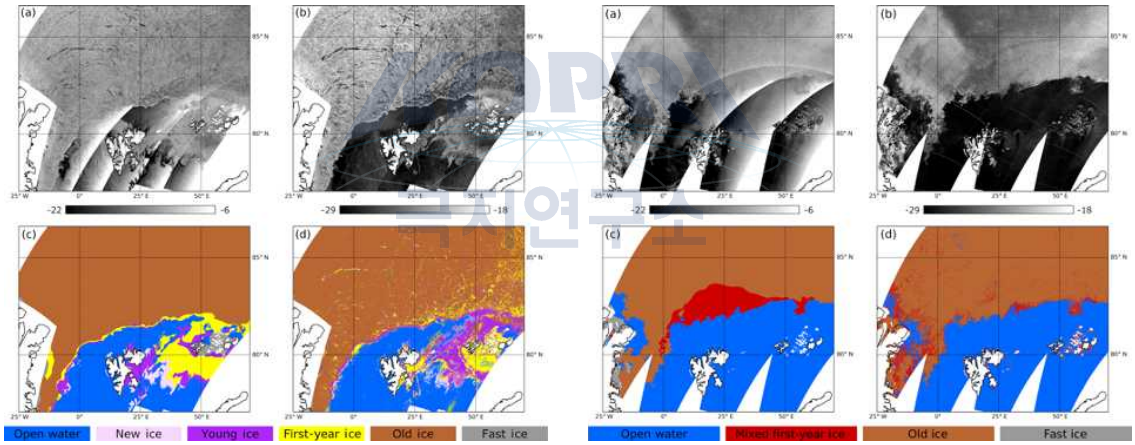
blue-to-green ratio 비와 현장 자료로 보정된 SNPP VIIRS 자료의 분포는 공간적으로 비교적 유사한 경향을 보임.

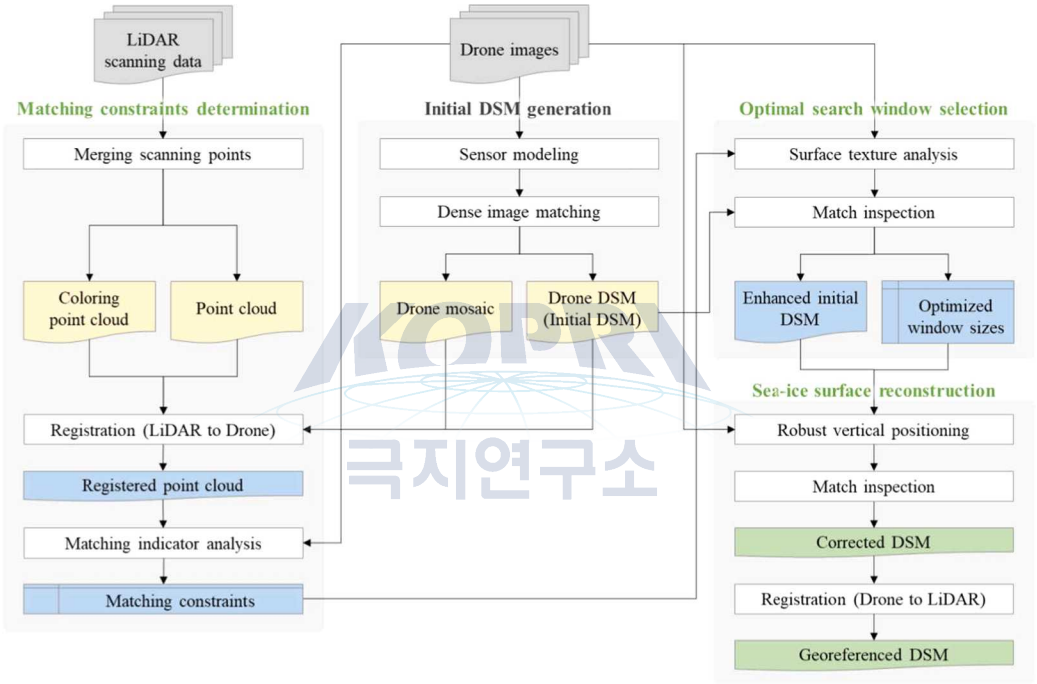
- 보정된 해수 광학 특성에 대한 위성 자료는 향후 해양 클로로필 농도나 생산성 등 다양한 해양 환경 모니터링에 활용 가능함. 이를 통해 북극 해양의 변화를 보다 정확하게 추적하고, 기후변화의 영향을 분석하는 데 중요한 역할을 할 것임.



Spatial distribution of blue (486 nm) to green ratio (551 nm) in the Arctic region. The color bar represents corrected blue to green ratio derived from SNPP VIIRS, with TriOS Ramses stations measured in (a) 2022, (b) 2023, and (c) 2024.

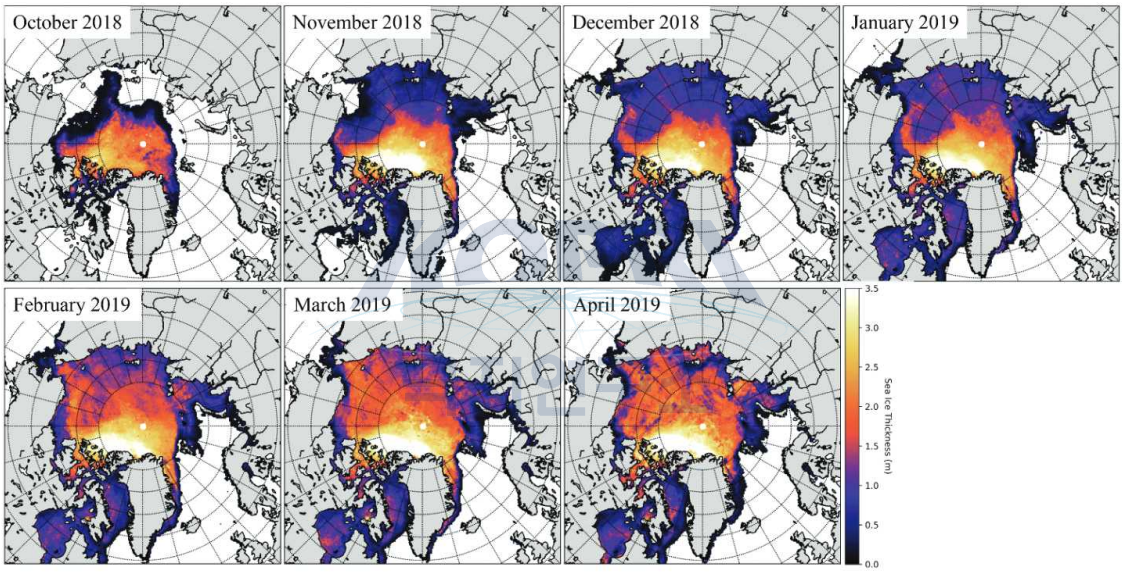
2. 대표적 우수성과

우수성과 - 1.	인공위성 영상레이더 기반 해빙 유형 분류 (JCR 2018 기준 mrnIF 94.3 SCI(E) 논문 게재)
성과 내용	○ 영상레이더와 주간 해빙 유형 지도를 기계학습하여 반자동으로 해빙 유형 지도를 생산하는 새로운 접근방법을 제안함. ○ 겨울철과 여름철 해빙에 대해 각각 87%, 67%의 분류정확도로 해수/단년빙/다년빙을 구분하는 알고리즘을 개발함.
성과의 우수성	○ 학습 및 검증 샘플을 수작업으로 준비하던 기존 알고리즘에 반해 표준화된 디지털 해빙 유형 지도를 이용함으로써, i) 알고리즘의 반자동화를 통해 작업시간 단축 및 유효 샘플 수 증가, ii) 샘플 수 증가를 통한 훈련 및 검증 신뢰도 향상. ○ 기개발 영상 노이즈 제거 기술 적용으로, Sentinel-1 기반으로는 최초의 다중 해빙 유형 분류 알고리즘을 개발함. ○ mrnIF 상위 10% 저널에 성과 게재 - SCIE 목록 중 Geosciences, Multidisciplinary 카테고리 소속 200개 저널 중 IF 12위 저널에 논문 게재
 개발된 해빙 유형 분류 알고리즘 적용 결과와 NIC 주간 해빙 지도의 비교	
증빙자료	Jeong-Won Park, Anton Korosov, Mohamed Babiker, Joong-Sun Won, Morten Wergeland Hansen, and Hyun-Cheol Kim. 2020. Classification of sea ice types in Sentinel-1 synthetic aperture radar images, *The Cryosphere*, 14:2629-2645, https://doi.org/10.5194/tc-14-2629-2020

우수성과 - 2.	무인기를 이용한 해빙 표면 수치표면모델 생성 기술 개발 (JCR 2019 기준 mrnlF 100 SCI(E) 논문 게재)
성과 내용	○ 무인기를 이용한 해빙 표면 수치표면모델(DSM) 생성 기술 개발 - 표면 텍스쳐가 적고 상시 이동하는 해빙의 특성상 DSM 제작을 위한 영상 스테레오 정합 이 어려움 - 이 연구에서는 상기 한계점의 극복을 위해 객체기반 영상정합의 과정에 있어 네 가지 기술적 개선을 제안하고, 기존 방법 대비 향상도를 검증함.
성과의 우수성	○ 무인기 기반 해빙 수치표면모델 제작을 위한 최고 성능의 기술 개발 - 기존 방법의 알려진 성능인 RMSE 26 cm를 크게 상회하는 RMSE 8 cm 달성 ○ mrnlF 최상위 저널에 성과 게재 - SCIE 목록 중 Geography, Physical 카테고리 소속 50개 저널 중 IF 1위 저널에 논문 게재
 개발한 무인기 기반 해빙 수치표면모델 제작 방법의 흐름도	
증빙자료	Jae-In Kim, Chang-Uk Hyun, Hyangsun Han, and Hyun-Cheol Kim. 2021. Digital surface model generation for drifting Arctic sea ice with low-textured surfaces based on drone images, *ISPRS Journal of Photogrametry and Remote Sensing*, 172:147-159, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.12.008	

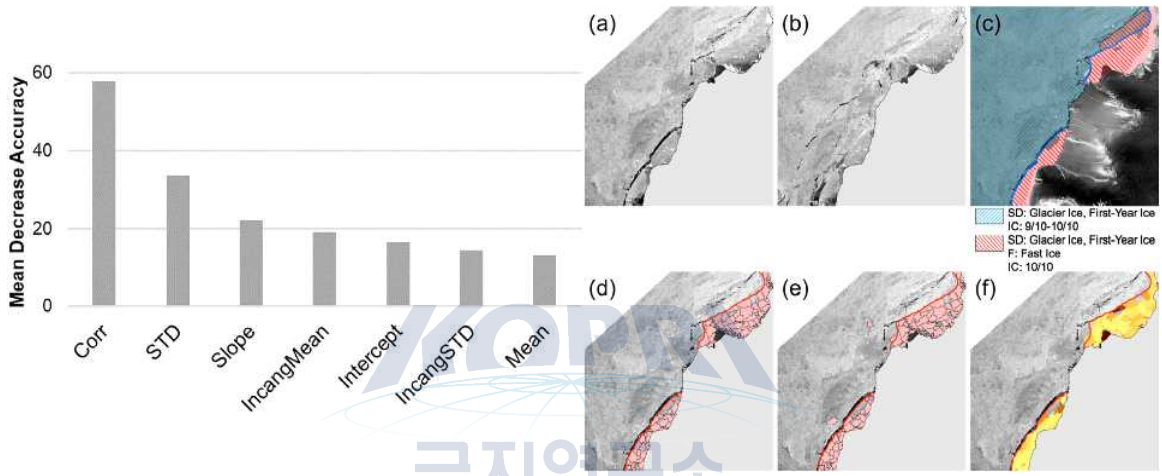
KOPRI 극지연구소

우수성과 - 3.	AMSR2 수동마이크로파 센서 기반 일간 북극 해빙두께 산출 인공지능 모델 개발 (JCR 2019 기준 mrnIF 93.2 SCI(E) 논문 게재)
성과 내용	○ 수동마이크로파 기반 일간 북극 해빙두께 산출 인공지능모델 개발 - 위성 고도계 해빙두께 산출이 일반적이나 1개월 자료 합성을 통해서만 북극 전체에 대한 해빙두께 맵핑이 가능한 한계점을 인공지능모델을 이용하여 수동마이크로파 밝기온도 자료로부터 산출 - 수동마이크로파 신호와 해빙두께간의 물리적 관계 한계점을 인공지능모델과 입력피쳐간 합성을 통해 극복
성과의 우수성	○ 세계 최초로 겨울철 북극 전체에 대한 일간 해빙두께 지도 작성 - 고도계 자료와 비교시 약 10cm의 정확도 오차로 해빙두께 산출 ○ mrnIF 상위 10% 저널에 성과 게재 - SCIE 목록 중 Geography, Physical 카테고리 소속 60개 저널 중 IF 5위 저널에 논문 게재

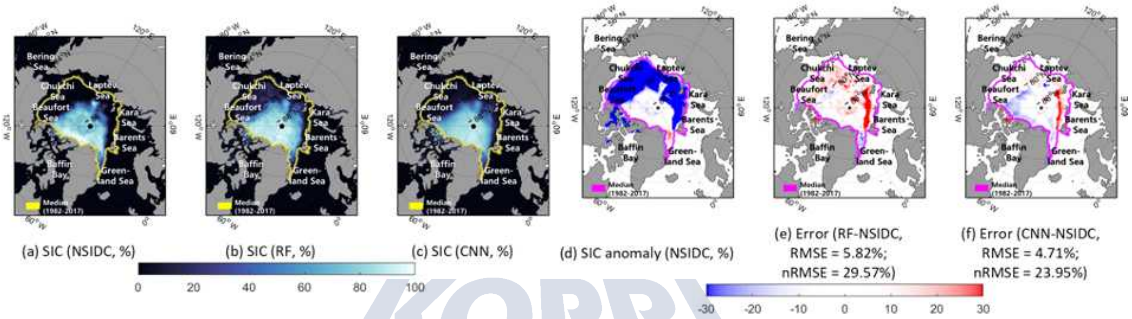


수동마이크로파 자료로부터 산출된 일간 해빙두께 지도

증빙자료	Junhwa Chi and Hyun-Cheol Kim. 2021. Retrieval of daily sea ice thickness from AMSR2 passive microwave data using ensemble convolutional neural networks. *GIScience & Remote Sensing*, 58(6):812-830, https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1943213

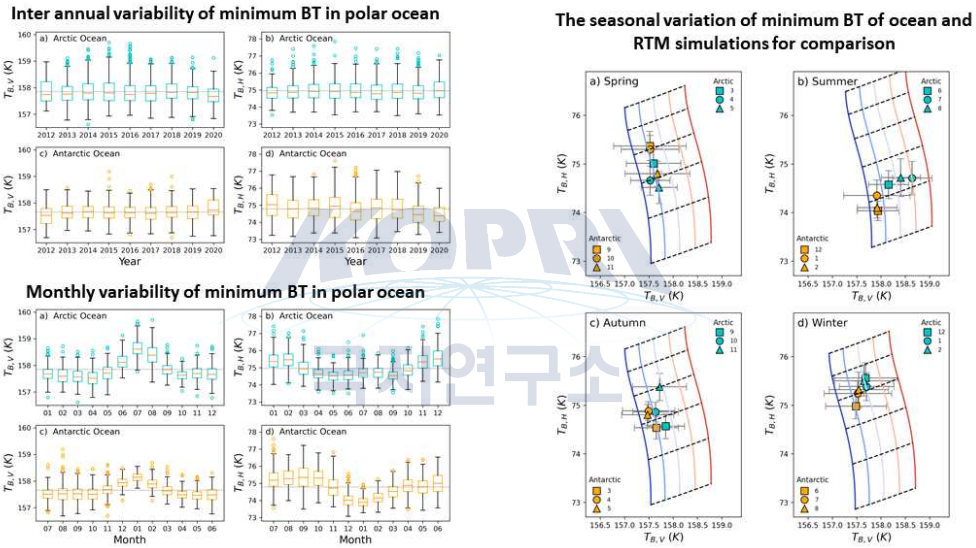
우수성과 - 4.	인공위성 영상레이더를 이용한 고착빙 탐지 (JCR 2018 기준 mrnIF 97.6 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 영상 분할, 상관관계 분석, 기계학습을 결합하여 영상레이더 기반으로 고착빙을 탐지하는 새로운 알고리즘 개발함. ○ 5일 간격의 영상 페어에서 후방산란강도의 상관도와 표준편차는 객체기반 고착빙 탐지에 있어 결정적임을 발견함.
성과의 우수성	○ 기존 X- 또는 C-밴드의 위상간섭기법 기반 기술과는 다른, L-밴드의 후방산란강도 기반의 새로운 고착빙 탐지 기술을 제안함. ○ 동일궤도 조건을 만족하지 않아도 영상 페어의 중첩 영역에 대해 적용이 가능하므로, 기존 알고리즘 대비 고착빙 탐지 주기를 단축시킬 수 있음.
 (좌) 고착빙 탐지 기계학습 알고리즘의 입력 피쳐 중요도, (우) 고착빙 탐지 결과 예시	
증빙자료	Miae Kim, Hyun-Cheol Kim, Jungho Im*, Sanggyun Lee, and Hyangsun Han (2020) “Object-based landfast sea ice detection over West Antarctica using time series ALOS PALSAR data” *Remote Sensing of Environment*, 242, 111782 https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111782

KOPRI 극지연구소

우수성과 - 5.	인공위성과 재분석 자료의 기계학습을 통한 월별 해빙 농도 예측 (JCR 2018 기준 mrnlF 94.3 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 위성관측 일별 해빙 농도, 일별 해수면 온도와 월별 ECMWF 재분석 자료를 이용하여 CNN 기반의 해빙 농도 예측 모델을 개발하고, RF 기반의 모델 대비 성능 향상치를 분석함. ○ 과거의 해빙 농도는 해빙 내부 영역의 상태를 예측하는데 가장 중요한 역할을 했으나, MIZ에 가까운 곳에서는 기상/해양 요소가 더 큰 영향을 미침을 발견함.
성과의 우수성	○ 딥러닝 기반 예측 모델은 기후 이상 패턴 기반 예측 모델보다 우월한 예측 성능을 보임. ○ 개발한 CNN 모델은 극적 변동이 발생했던 2007년과 2012년에 대해서도 5% 이하 RMSE의 예측 성능을 보임.
 실제 해빙 농도와 예측 (RF 및 CNN 기반) 해빙 농도의 비교	
증빙자료	Young Jun Kim, Hyun-Cheol Kim, Daehyeon Han, Sanggyun Lee, Jungho Im* (2020) “Prediction of monthly Arctic sea ice concentrations using satellite and reanalysis data based on convolutional neural networks” *The Cryosphere*, 14 (3), pp. 1083-1104 https://doi.org/10.5194/tc-14-1083-2020

KOPRI 극지연구소

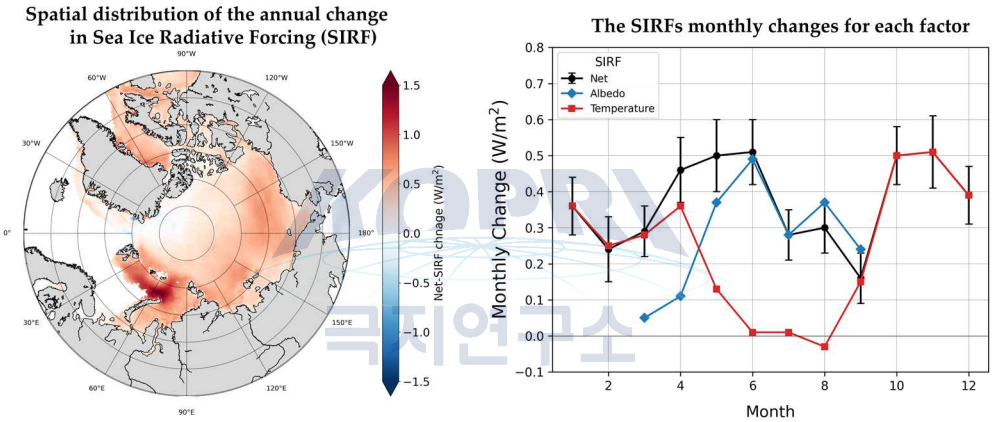
우수성과 - 6.	극지 해양/해빙에서 AMSR2 6.925 GHz 채널의 최소 밝기온도의 시공간 변동성 분석 (JCR 2019 기준 mrnIF 72.4 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 수동형 마이크로파 위성 센서 (AMSR2) 관측 자료를 북극 증폭의 증거 발견. - 위성 마이크로파 센서에서 관측한 남/북극 해수의 밝기온도에서 계절 변동성을 파악함. - 복사전달모델 기반 이론 계산치와 비교 통해 물리 변수의 변동성 파악 - 위성 기반 산출물의 정확도 향상을 위해 변수의 변동성도 함께 고려되어야 함을 제안
성과의 우수성	○ 북극 증폭의 새로운 증거 제시 - 북극 지역의 온난화 영향이 마이크로파 위성 관측 자료에 포함되어 있음을 확인 ○ 추가 관측 없이 기존의 자료를 참신한 아이디어로 분석함으로써 얻은 성과



수동마이크로파 위성센서 AMSR2를 이용한 8년 동안의 해수 최소 밝기온도의 연간 분포 (왼쪽 위)와 월별 분포 (왼쪽 아래). 복사전달모델과 비교했을 때 북극 여름철의 높은 해수면 온도 특징이 뚜렷하게 보임 (오른쪽)

증빙자료	Young-Joo Kwon, Sung-Wook Hong, Jeong-Won Park, Seung-Hee Kim, Jong-Min Kim, Hyun-Cheol Kim* (2021) "Spatial and temporal variability of minimum brightness temperature at the 6.925 Ghz band of AMSR2 for the arctic and antarctic oceans" *Remote Sensing*, 13 (11), 2122 https://doi.org/10.3390/rs13112122

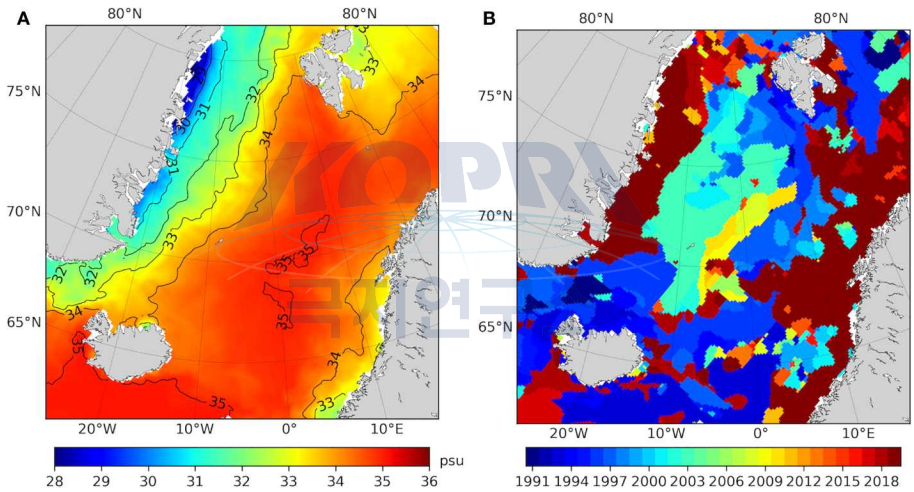
우수성과 - 7.	1982-2015년 북극 지역의 표면 알베도와 표면온도에 따른 해빙 복사강제력 평가 (JCR 2020 기준 mrnIF 86.9 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 북극의 표면 알베도와 표면온도에 따른 해빙 복사강제력 평가 - 북극의 해빙 변화에 따른 복사강제력(SIRF)을 알베도와 함께 표면온도를 고려하여 추정. - 계절과 지역에 따라 알베도와 온도에 의한 SIRF 변화 양상이 다르게 나타났으며, 특히 겨울철에는 온도-SIRF만이 두드러지게 나타나 북극 증폭에 있어 표면온도의 중요성 강조.
성과의 우수성	○ 알베도와 표면온도에 의한 복사강제력(temperature-SIRF)을 함께 고려한 북극 해빙 변화의 복사 메커니즘을 정교하게 분석. - 연도별, 계절별, 지역별로 알베도와 온도가 각각 다른 영향력을 가지며 변화 속도 또한 상이함을 규명함으로써, 북극 해빙 변화 예측 및 복사 모델 개선에 기여할 수 있는 정량적 기반을 제공함.

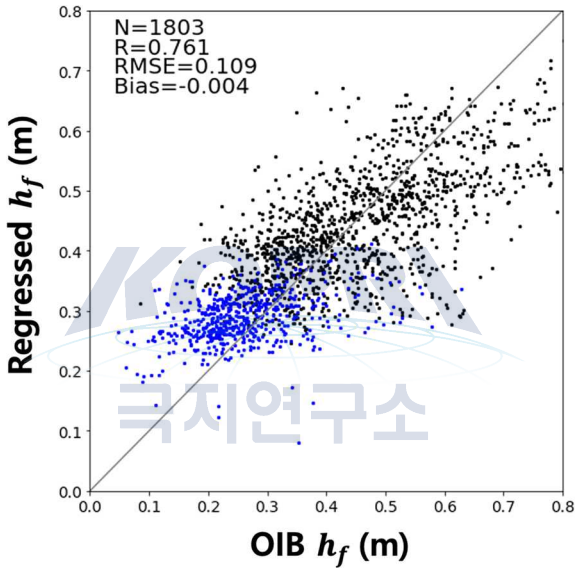


SIRF 연간 변화의 공간 분포(오른쪽), 1981년부터 2015년까지 각 요인에 대한 SIRF의 월 변화 (오른쪽)

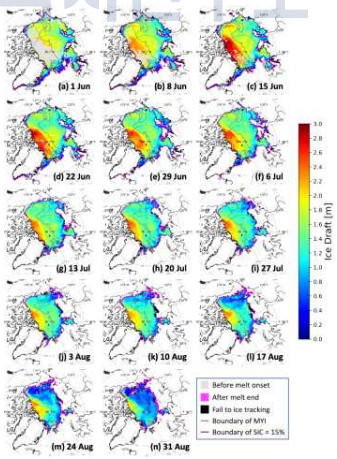
증빙자료	Noh-Hun Seong, Hyun-Cheol Kim, Sungwon Choi, Donghyun Jin, Daeseong Jung, Suyoung Sim, Jongho Woo, Nayeon Kim, Minji Seo, Kyeong-Sang Lee, Kyung-Soo Han* (2022) "Evaluation of Sea Ice Radiative Forcing according to Surface Albedo and Skin Temperature over the Arctic from 1982-2015" *Remote Sensing*, 14 (11), 2512 https://doi.org/10.3390/rs14112512

KOPRI 극지연구소

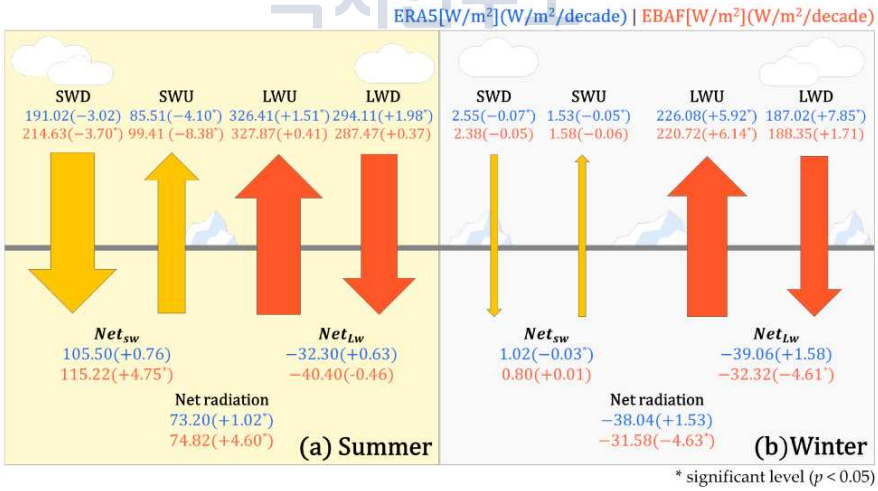
우수성과 - 8.	30년간(1991-2019) 노르딕해 표층 염분의 변동성 (JCR 2020 기준 mrnlF 95.4 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ Nordic seas 내 지역별 염분 변동 특성 정량화 - 그린란드해와 노르웨이해의 30년간 표층 염분 변화를 월간 재분석자료(TOPAZ4)를 통해 분석. GS에서는 계절성과 해류 수송 및 해빙 면적 변화가 주요인으로 작용, NS에서는 북대서양진동(NAO)과 아한대와류(SPG)에 따른 기후계 영향이 주도적으로 나타남을 규명. ○ Nordic seas 염분 변화의 장기 경향성 및 기후변화 연계 검토.
성과의 우수성	○ 위성 및 현장관측이 어려운 고위도 해역에서 TOPAZ4 재분석 자료의 신뢰성 비교 검증, 장기적 시계열 분석을 통한 재분석 기반 고위도 해양 모니터링 방법론의 타당성을 제시. ○ 표층 염분 변화와 심층 혼합 조건과의 관계를 강조함으로써, 대서양 자오선 순환(AMOC)과 같은 전지구 순환계의 선행조건으로서의 북유럽해 역할에 대한 기초 연구 제공
 1991~2019년 기간 동안의 표층 최소 염분의 공간분포(왼쪽), 최소 염분이 나타난 해의 공간분포(오른쪽)	
증빙자료	Ji-Eun Park, Hyun-Cheol Kim*, Kyoung-Ho Cho (2022) “Variability of Near-Surface Salinity in the Nordic Seas Over the Past Three Decades (1991-2019)” *Frontiers in Marine Science*, 9, 969159 https://doi.org/10.3389/fmars.2022.969159

우수성과 - 9.	수동마이크로파 위성 관측을 활용한 겨울철 북극 해빙 총 프리보드 추정 (JCR 2020 기준 mrnIF 33.3 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 북극 해빙 총 프리보드 추정을 위한 수동마이크로파 위성 관측 기반 기법 개발 - 여러 주파수 조합의 마이크로파 밝기온도와 다중 선형 회귀식을 활용해 ICESat-2의 프리보드 자료를 대체할 수 있는 새로운 total freeboard 추정 방법 개발. - AMSR2 자료 기반, 계절별 변화하는 해빙의 공간분포 포착 및 시공간적 분석 활용 가능성 제시
성과의 우수성	○ 수동마이크로파 위성 관측 자료의 넓은 공간적 범위와 장기 기록 활용을 통해 L-밴드 방사계 및 라이다 고도계 기반 해빙 두께 추정 방법 간의 관측 공백을 보완 가능 ○ Operation IceBridge 자료와 비교하여, 양호한 정확도를 확보하여 실제 관측 기반 분석자료로 활용 가능함을 입증.
 Regressed Hf와 OIB Hf의 산점도. 검은색은 다년빙, 파란색은 단년빙을 나타냄.	
증빙자료	Jong-Min Kim, Byung-Ju Sohn, Sang-Moo Lee, Hoyeon Shi, Young-Joo Kwon, Sang-Woo Kim, Hyun-Cheol Kim* (2022) “The Estimation of the Total Freeboard of Arctic Sea Ice in Winter Using Passive Microwave Satellite Measurements” *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 39 (10), pp. 1611-1627 https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0105.1

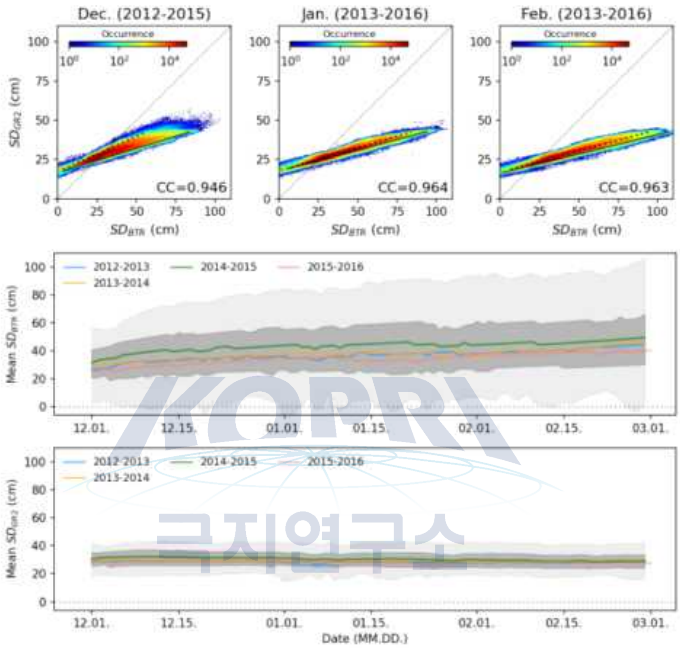
극지연구소

우수성과 - 10.	여름철 북극 해빙 두께 일간 산출법 세계 최초 개발 (JCR 2021 기준 mrnIF 96.7 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 수동마이크로파 위성관측을 통한 북극해 해빙의 여름철 두께 산출 방법 제시하였으며, 이는 그동안 미지의 영역이었던 여름철 해빙 두께 관측에 큰 도움이 될 것으로 전망 ○ 개발된 방법을 통해 2021년 여름(6~8월)의 일간 해빙두께 분포를 성공적으로 복원하였으며, 복원된 분포는 해빙의 여름철 감소를 개연성 있게 제시함 ○ 현장관측자료와의 검증 결과는 개발된 산출법이 북극 전역에 걸쳐 높은 정확도를 보이며, 선행연구(Landy et al., 2022)에 비해서도 매우 향상된 정확도를 가지고 있음을 제시
성과의 우수성	○ 세계 최초로 여름철 북극 해빙 두께 분포를 매일 산출할 수 있는 방법 개발 - 수동마이크로파 위성 자료를 사용한 방법으로는 최초 ○ 기존의 유일한 여름철 해빙 두께 산출방법 (Landy et al., 2022, Nature)에 비해 더 우수한 시공간 해상도와 정확도를 보임 - 80km 수준 해상도, 15일 간격 -> 25km 수준 해상도, 일일 간격 - 오차수준 평가에서 33%(다년빙), 40%(단년빙) -> 12%(다년빙), 33%(단년빙) 수준으로 오차 개선 ○ 수동마이크로파 위성관측은 40년간 지속된 관측 기록이 있어 알고리즘 개선과 검보정을 통해 과거의 해빙 두께 기록 복원까지 가능성이 열림 ○ 여름철 해빙 두께 자료는 대기-해양-해빙 간 에너지 수지 변화, 해빙 아래의 해수에서의 일차 생산성, 북극항로 개척 연구 및 운항지원, 수치예보모델과 기후변화 모델의 경계조건 개선 및 그에 따른 전반적 성능 개선 등 많은 분야에서 수요가 큼
 2021년 6월 1일부터 8월 31일까지 7일 간격 해빙두께 산출 예시	
증빙자료	Jong-Min Kim, Sang-Woo Kim, Byung-Ju Sohn, Hyun-Cheol Kim, Sang-Moo Lee*, Young-Joo Kwon, Hoyeon Shi, Andrey V. Pnyushkov (2023) “Estimation of summer pan-Arctic ice draft from satellite passive microwave observations” *Remote Sensing of Environment*, 295, 113662 https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113662

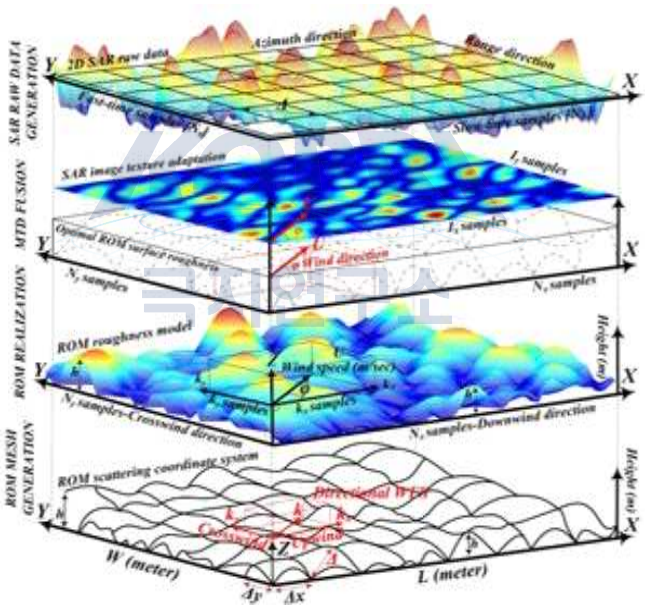
극지연구소

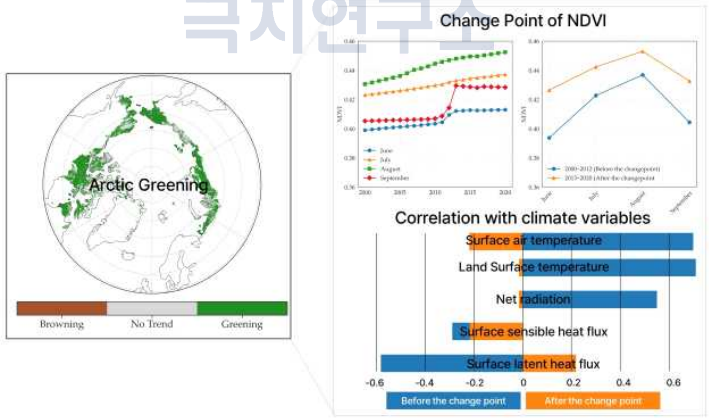
우수성과 - 11.	위성 및 재분석 자료를 활용한 북극 지역의 복사에너지 수지 변화 종합 (JCR 2021 기준 mrnIF 85.5 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 위성기반 자료와 재분석 자료를 종합하여 북극 지역의 지표 복사에너지 수지 변화의 장기 변화 관측 - 북극권 전체 지역에서 위성기반 자료(CERES)는 -1.0 W/m2/decade, 재분석 자료는 1.4 W/m2/decade의 변화 패턴 ○ 북극의 지표 복사에너지 수지의 요소별 특징 분석 - 단파 복사에너지의 경우 두 자료의 시/공간 패턴 유사하나 재분석 자료에서 더 강한 변화 강도를 보임 - 장파 복사에너지의 경우 극점 중심으로 위성기반 자료와 재분석 자료의 상이한 변화 패턴 관측 ○ 북극의 극단적 조건인 여름과 겨울을 기준으로 에너지 수지의 변화를 종합 - 최근 20년간의 복사에너지의 장기 변화 및 통계적 특징 요약
성과의 우수성	○ 북극의 복사에너지 수지 변화를 관측 기반/재분석 기반을 종합하여 에너지 수지의 변화를 종합 ○ 재분석 자료와 위성 기반 자료의 복사에너지 수지가 상이한 장기 변화 패턴이 관측됨을 밝혀냄 - 위성기반 복사에너지 수지가 일반적인 얼음-알베도 피드백과 다른 경향이 관측됨을 밝혀냄 - 두 자료의 상이한 패턴이 장파복사 에너지에서 발생됨을 밝혀냄 ○ 종합적인 복사에너지 수지의 정보는 북극의 에너지 불균형, 수송, 대기와 지표 사이의 상호작용을 분석하고 예측하는 데 사용 가능
	
증빙자료	Minji Seo, Hyun-Cheol Kim, Noh-Hun Seong, Suyoung Sim, Kyung-Soo Han* (2023) “Variability of Surface Radiation Budget over Arctic during Two Recent Decades from Perspective of CERES and ERA5 Data” *Remote Sensing*, 15 (3), 829 https://doi.org/10.3390/rs15030829

KOPRI 극지연구소

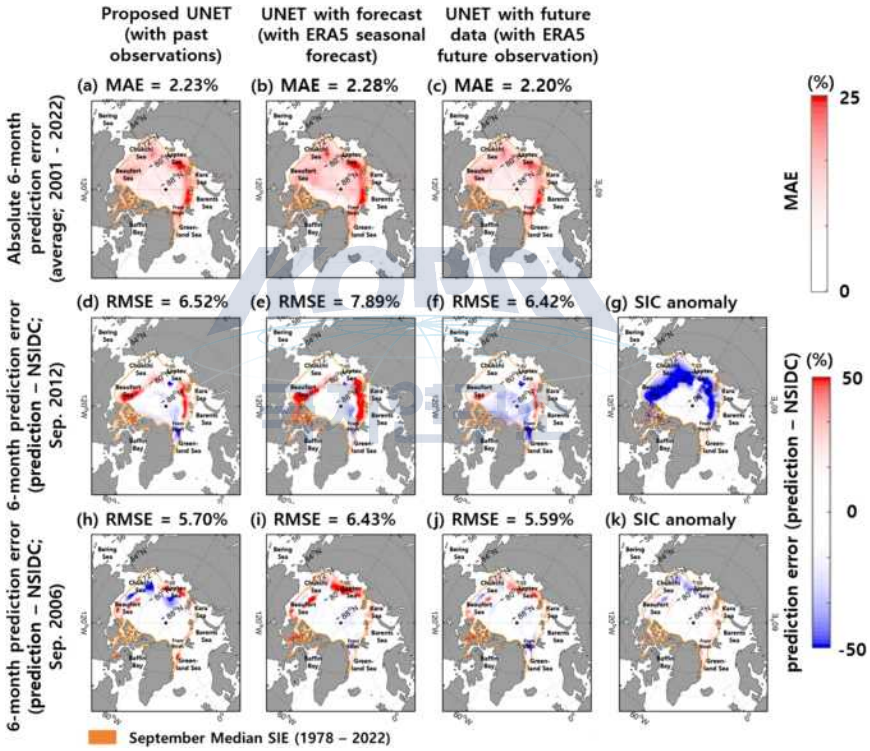
우수성과 - 12.	해빙 적설층의 밀도와 입자크기 변동성 확인 (JCR 2021 기준 mrnIF 95.3 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 해빙 적설층의 밀도와 입자크기 변동성 확인 - 수동형 마이크로파 위성으로 겨울철 적설 두께 산출 시 영향력 분석 - 관측자료의 한계점 극복 가능성 제시
성과의 우수성	○ 북극 해빙의 적설층 두께 산출 가능성 확인 - 겨울철 믿을만한 적설층 두께 및 밀도 산출 없음 - 본 연구의 분석 결과에서 처음으로 산출 가능설을 확인함
	
증빙자료	Young-Joo Kwon, Hyun-Cheol Kim*, Jong-Min Kim, Jeong-Won Park, Seung Hee Kim (2023) “Sensitivity of Passive Microwave Satellite Observations to Snow Density and Grain Size Over Arctic Sea Ice” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 4302810 https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3322401

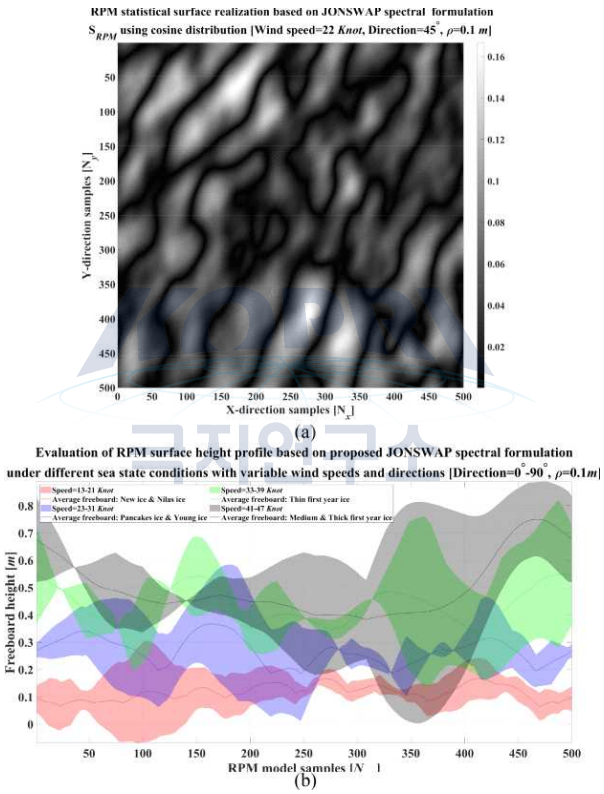
KOPRI 극지연구소

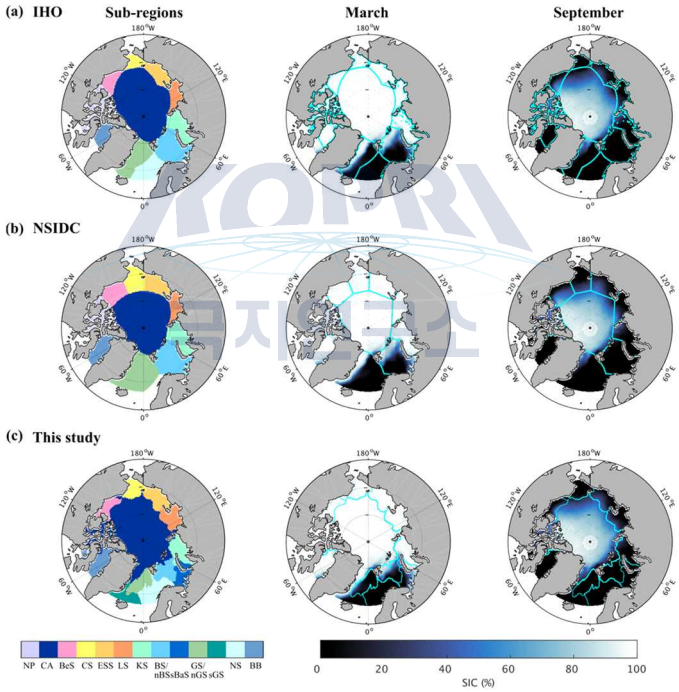
우수성과 – 13.	SAR 해양 관측 및 레이더 시스템 성능 향상 기술 개발 (JCR 2022 기준 mrnIF 63.8 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 다양한 해양 파동 수식을 통합하여 해양 표면을 표현하는 복합 3D 모델링 접근법을 제시함 ○ 해양 상태 상호작용이 3D 해양 모델과 파동 산란 현상에 미치는 영향을 분석하였으며, 기존 방법론의 한계를 극복하기 위해 기존 해양 거칠기 모델을 결합하는 새로운 융합 방법을 제안함 ○ 이 방법은 기존 모델들의 강점을 결합하여 더욱 정확한 해양 거칠기 표현을 제공하였으며, 파동 패턴과 방향성을 유지하면서 레이더 영상화 분석 능력을 개선하였음
성과의 우수성	○ SAR 관점에서 최적화된 모델의 전자기적 특성을 분석하고 향상된 해양 관측 SAR 시스템 설계에 기여할 수 있는 데이터를 제공함 ○ 해양 환경에서 레이더 시스템의 성능을 향상하고, 다양한 해양 상태에서의 신호 왜곡 문제를 해결하는 데 이바지함 ○ 방향성 파동 산란과 해양 표면 거칠기를 결합한 최초의 방법을 제시하고 증명함
 Reduced-Order Model 경계조건, 표면 거칠기 패턴, 재구성, 움직임 탐지 특징 융합, 그리고 SAR 전자기 상호 작용 조사 3차원 공간 영상화 분석 결과 모습	
증빙자료	Iman Heidarpour Shahrezaei, Hyun-Cheol Kim* (2024) “Directional Wave Scattering Distribution Modes Analysis and Synthesis of Random Ocean Media Roughness for SAR Electromagnetic Interactions Using Feature Fusion in Dynamic Sea States: A Survey” *IEEE Access*, 12, pp. 44351-44382 https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380201

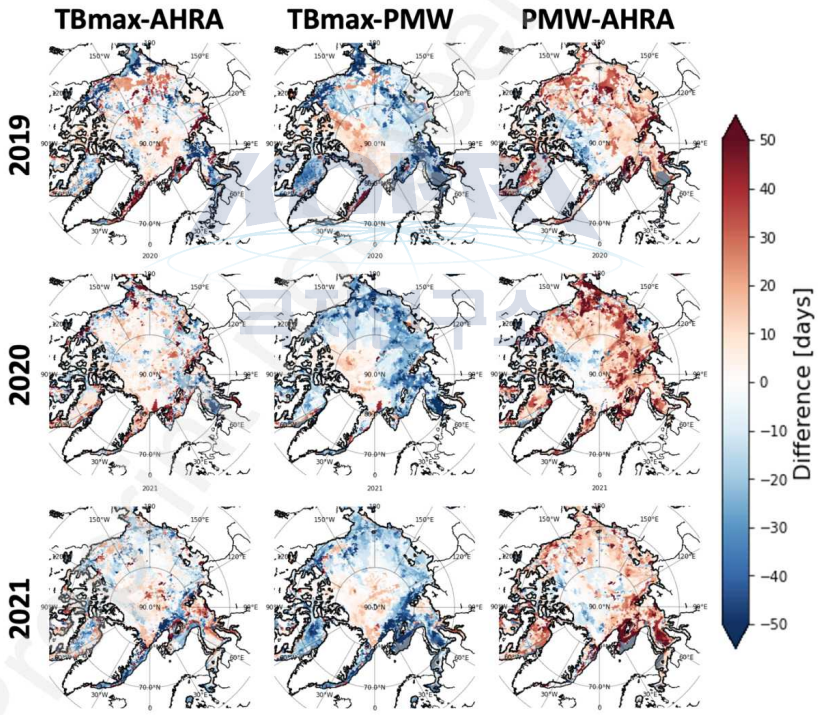
우수성과 - 14.	기후변화에 따른 북극권 장기적 생태 변화 예측과 정확한 변화 감지 기술 개발 (JCR 2022 기준 mrnIF 85.0 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 지난 20년간 북극 지역의 위성 기반 NDVI 변화 분석하여 북극의 녹화 경향을 모니터링 ○ NDVI 변화와 기후변수(온도-강수량) 간의 밀접한 상관성을 확인하여 기후변화가 북극 생태계에 미치는 영향을 정량적으로 분석 ○ NDVI 변화 지점을 식별하여 북극 녹화 현상의 주요 전환 시기를 파악하였으며, 북극 시기별 생태적 변화 패턴을 제시함 ○ 북극 전역에서의 NDVI 변화가 지역마다 다르게 나타나는 현상을 분석하여 특정 지역에서의 녹화가 더 활발하거나 지연되는 이유를 제시함 ○ 현재와 미래의 기후변화에 대한 시나리오를 기반으로 북극 녹화 현상의 장기적 변화 추세를 예측하여 기부 변화 대응 정책 수립에 중요한 과학적 근거를 제공함
성과의 우수성	○ 고해상도 위성 기반 NDVI 데이터를 장기간 걸쳐 분석함으로써 북극의 식생 변화를 정밀하게 추적할 수 있는 혁신적 방법론 제공 ○ NDVI와 기후변수 간 상관성 규명함으로써 기후변화가 북극 지역의 생태계에 미치는 영향을 명확히 증명함 ○ 위성 데이터를 사용해 주요 변화 지점을 감지하는 기술을 개발하여 중요한 생태학적 변화 시점을 실시간으로 모니터링할 수 있는 가능성을 제공함 ○ 지역별 상이한 녹화 패턴을 분석하여 지역 맞춤형 기후 대응 전략 수립의 근간을 수립함 ○ 미래 기후 시나리오에 따른 NDVI 변화를 예측함으로써 기후변화가 북극 생태계에 미치는 장기적 영향력 및 대비/대응을 위한 근거를 제시함
 북극권 녹화 현상을 지시하는 분석 결과	
증빙자료	Minji Seo, Hyun-Cheol Kim* (2024) “Arctic Greening Trends: Change Points in Satellite-Derived Normalized Difference Vegetation Indexes and Their Correlation with Climate Variables over the Last Two Decades” *Remote Sensing*, 16 (7), 1160 https://doi.org/10.3390/rs16071160

KOPRI 극지연구소

우수성과 - 15.	딥러닝을 활용한 북극 해빙 농도의 장기 예측 : 지표면 온도, 복사, 바람 조건의 영향 (JCR 2022 기준 mrnIF 96.3 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ UNET 기반 장기 북극 해빙 농도 예측 모델 개발 및 성과 분석 - UNET 기반 딥러닝 모델을 통해 최대 12개월 앞까지의 해빙 농도를 예측할 수 있는 장기 예측 모델을 개발함. - 개발된 UNET 모델은 연간 과거 자료 검증 결과, 3개월부터 12개월까지의 모든 예측 기간에서 기존의 네 가지 기준모델 (C3S, DP, CNN, ConvLSTM)보다 더 정확하고 안정적인 예측 성능을 나타냈다.
성과의 우수성	○ 기존 예측 모델(C3S, DP, CNN, ConvLSTM)에 비해 모든 기간(3, 6, 9, 12개월)에서 더 낮은 RMSE(평균 약 5.9%)로 우수한 성능을 입증함. ○ 2007, 2012, 2019, 2020년과 같은 극단적 해빙 후퇴 시기에도 RMSE 8% 이하의 안정적 정확도를 유지함.
 2001년 9월부터 2022년 9월까지의 6개월 예측에 대한 평균 절대 오차. 제안된 UNET 모델을 사용하여 현재 및 과거 데이터(a, d, h), ERA5 예측 데이터(b, e, i), 그리고 예측 데이터를 대체한 미래 관측 ERA5 데이터(c, f, j)를 활용했을 때의 예측 오차(예측값 - NSIDC)를 2012년 9월과 2006년 9월에 대해 보여줌.	
증빙자료	Young Jun Kim, Hyun-cheol Kim, Daehyeon Han, Julienne Stroeve, Jungho Im* (2024) “Long-term prediction of Arctic sea ice concentrations using deep learning: Effects of surface temperature, radiation, and wind conditions” *Remote Sensing of Environment*, 318, 114568 https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114568

우수성과 - 16.	구조적 특징 융합을 이용한 해상 상태 상호작용에 따른 해빙 표면 유형 특성화 및 SAR 체적 후방산란 특성 분석 (JCR 2023 기준 mrnIF 90.6 SCIE 저널 논문 게재)
성과 내용	○ 해수면 상태에 따른 해빙 자유수면 형상과 SAR 산란 특성 분석을 위해 Random Polar Media(RPM) 기반 수치모델링 및 MIZ 분류 체계를 개발. ○ 구조적 특징 융합(Transform-domain Fusion Method, TFM)을 통해 다양한 해수면 조건에서의 RPM 데이터를 통합하여 최적의 기준 해빙 모델을 재구성함.
성과의 우수성	○ 기존의 현장기반 경험적 방법론에 의존하지 않고 SAR 기반 원격탐사에서의 전자기 산란 해석을 수치 모델로 정밀하게 구현. ○ GMM 기반 MIZ 유형 분류와 Siamese CNN을 활용한 다중 해상도 분석을 통해 해빙 표면 거칠기 및 산란체 특성 해석의 정밀도를 크게 향상시킴.
 해빙 표면 높이 프로파일. (a) 특정 해상 상태 조건 하에서의 2차원 모델. (b) 다양한 해상 상태 하에서의 해빙 표면 높이 특성화.	
증빙자료	Iman Heidarpour Shahrezaei, Hyun-Cheol Kim* (2025) “Sea-Ice Surface Types Characterization and SAR Volume Backscattering Properties in Response to Sea States Interactions Using Structural Feature Fusion” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18, pp. 7967-7981 https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3548597

우수성과 - 17.	해양 물리적 특성에 기반한 북극해의 공간적 지역 구분 (JCR 2023 기준 mrnIF 86.9 SCIE 논문 게재)
성과 내용	○ 1982-2023년 NOAA OISST 데이터를 활용하여 북극해를 해양 물리 특성 기반의 12개 공간 아지역으로 K-means 클러스터링을 통해 구분함. ○ 해수면온도(SST), 해수면염도(SSS), 해양 표층 해류, 해빙농도(SIC) 등 다양한 물리적 지표를 반영하여 각 아지역의 계절별 공간 이질성과 동질성을 효과적으로 나타냄.
성과의 우수성	○ 제안된 12개 아지역 구분은 각기 다른 물리적 동역학(SST, SIC, 해류, SSS) 및 기후변화 영향(특히 여름철 SST 변화)의 공간적 패턴을 명확히 구분 지어, 가속화되는 북극 환경변화의 지역별 상세 분석 및 예측을 위한 효과적인 과학적 기반을 제공함. ○ 장기 고해상도 위성 관측 SST 자료와 객관적 클러스터링 기법을 적용함으로써, 기존의 지리적 또는 경험적 구분 방식보다 북극해의 복잡한 물리적 특성 및 최근 변화를 더 정밀하게 반영하는 공간 구획 체계를 제시함.
 (a) IHO, (b) NSIDC, (c) 본 연구에서 클러스터링한 부지역 구분(왼쪽)과 3월(중앙) 및 9월(오른쪽)의 해빙농도(SIC) 기후값 분포도를 중첩하여 표시한 지도	
증빙자료	Joo-Eun Yoon, Jinku Park, Hyun-Cheol Kim* (2025) “Spatial Regionalization of the Arctic Ocean Based on Ocean Physical Property” *Remote Sensing*, 17 (6), 1065 https://doi.org/10.3390/rs17061065

우수성과 - 18.	북극 해빙의 연속적인 융해 시작 탐지를 위한 고도화된 알고리즘 (JCR 2023 기준 mrnIF 97.0 SCIE 논문 게재)
성과 내용	○ 해빙 표면의 마이크로파 방사 특성(융해 시작일에 최대 휘도 온도를 나타냄)에 기반한 새로운 북극 해빙 융해 시작일(MOD) 탐지 알고리즘(TBmax 알고리즘)을 개발하여 연속적인 MOD 추정 정확도를 개선함. ○ 부이 및 재분석 자료 검증과 기존 알고리즘 결과와의 상호 비교를 통해, 개발된 TBmax 알고리즘이 기존 방법들보다 더 정확하고 안정적인 범북극 MOD 추정 성능(부이 대비 편향 0.1일, 재분석 대비 -4.5일)을 보임을 입증함.
성과의 우수성	○ 본 연구에서 개발된 TBmax 알고리즘은 기존 PMW 및 AHRA 알고리즘 대비 MOD 추정 정확도가 우수하며, 특히 in-situ 및 ERA5 자료와의 비교에서 가장 낮은 RMSD 값을 기록하여 높은 신뢰성을 입증함. ○ TBmax 알고리즘은 해빙 초기 융해 시점(EMOD)과 연속 융해 시점(MOD)을 구분할 수 있어 해빙 상태 분류 및 해빙 두께 산정 정확도 향상에 기여할 수 있는 고도화된 기법이다.
 2019년(상단 패널), 2020년(중간 패널), 2021년(하단 패널)에 대해, (왼쪽 열) 통합 TBmax와 AHRA 결과 간의 차이, (중간 열) 통합 TBmax와 통합 PMW 결과 간의 차이, 그리고 (오른쪽 열) 통합 PMW와 AHRA 결과 간의 차이에 대한 북극 지역 분포를 나타냄.	
증빙자료	Jong-Min Kim, Hyun-Cheol Kim*, Jeong-Won Park, Jinku Park, Minji Seo, Sang-Moo Lee (2025) “Advanced algorithm for continuous melt onset detection on Arctic sea ice” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63, 4301514 https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3560261

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성

1. 연차별 목표 대비 달성도

구분	연구목표 달성내용				계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1단계 1년차 (2020)	1. 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성 자료 분석 기반기술 개발	1-1. 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류를 위한 자료 구축 및 자료 산출을 위한 원형 알고리즘 개발	0.68	✓ Sentinel-1 기반 추출 영상텍스쳐와 NIC 주간해빙지도 기반 기계학습을 통한 겨울철 3종, 여름철 2종 분류 지도 작성 원형 알고리즘 개발 완료 ✓ Sentinel-1 기반 피쳐트래킹과 패턴매칭의 하이브리드 알고리즘 적용을 통한 2km 공간해상도의 해빙 이동 벡터 지도 작성 원형 알고리즘 개발 완료	100
		1-2. 수동형 마이크로파 원격탐사 기반 북극 해빙 두께 산출을 위한 자료 구축 및 자료 산출을 위한 원형 알고리즘 개발		✓ 해빙 두께 산출 알고리즘 개발을 위한 자료 구축 완료 ✓ 해빙 방출율 산출을 위한 원형 알고리즘 개발 완료 ✓ 해빙 두께 산출 위한 원형 기술 확보	
		1-3. 딥러닝을 이용한 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발		✓ AMSR2와 딥러닝을 이용한 겨울철 모든 해빙종류에 대한 CryoSat-2 해빙두께 산출 정확도에 준하는 해빙두께 산출 모델 개발 완료 (CryoSat-2 대비 6cm 내외의 오차)	
		1-4. 다중편파 영상레이더 후방산란 및 편파분석 자료와 북극 현장자료 사이의 상관 분석을 통한 북극 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개발		✓ Sentinel-1 영상레이더 후방산란계수 활용을 위해 북극 해빙캠프를 통해 확보한 GPS 자료를 활용하여 마이크로파 입사각에 따른 해빙 표면 후방산란계수 특성 분석 및 위성영상 보정 완료 ✓ 입사각 효과가 보정된 Sentinel-1 영상레이더 후방산란계수의 다중편파비와 2017~2018년에 확보된 북극 해빙 코어 자료에서 유도된 brine volume과 로그회기 모델분석을 수행하여 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개발 완료	
		1-5. 해빙 표면 융빙호 분포 광학 원격탐사 자료 구축 및 해빙 표면 융빙호 면적과 형태 특성화 기술 개발		✓ 북극해 현장에서 획득된 고해상도 영상 2,498장 활용 해빙 표면 융빙호 분포 분석을 위한 광학 원격탐사 자료 구축 완료 ✓ 영상 분할(segmentation) 후 생성된 객체(object) 기반 해빙 표면 융빙호 면적과 형태 특성화 기술 개발 완료	
		1-6. 동토의 지형 및 식생 변화 모니터링을 위한 무인기기반 초분광/라이다 데이터 전처리 기술 개발		✓ 라이다 포인트 클라우드 기반 수치표고모델 생성 기술 확보 ✓ 수치표고모델을 이용한 초분광 자료의 정밀 기하보정 기술 개발 완료	
	2. 인공위성 관측 결과 검보정을 위한 과거	2-1. 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보	0.32	✓ 북극 해수 광 특성 자료(Absorption coefficient of phytoplankton, NAP, CDOM) 및 현장자료(Chlorophyll-a, suspended sediment) 연구정점 Underway 포함) 70곳에 대한 자료 확보 완료	100
		2-2. 북극해 해빙 이동 벡		✓ 북극해 해빙 현장 연구 지점에 해빙 이동	

	북극 현장조사 및 고해상 위성영상 분석	터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집		✓ 을 추적할 수 있는 트래커 2개 설치 완료 ✓ 해빙 트래커로부터 각각 120일과 47일 기간 동안의 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 위치 전송자료 확보 완료	
		2-3. 북극해 해빙 굽힘강도 산출 결과 검증을 위한 과거 해빙 코어 자료 분석과 해빙 두께 정보를 이용하여 간접적으로 해빙 강도 결과를 검증		✓ 2019년 8월 14일과 17일에 진행된 해빙캠프에서 확보한 다년생 해빙코어 5개에서 염분과 온도 프로파일을 분석함. ✓ 보퍼트해 지역의 해빙 두께 자료(CS2SMOS)를 활용하여 2018년 10월 15일 해빙 강도를 추정하였으며 영상레이더 자료에서 추정된 강도 (2018.08.17.~23.)와 비교 검증함.	
		2-4. 위성 초분광/광학 자료와 기 구축된 무인기 자료를 이용한 처리 기법 개발 및 현장조사 지역 사전 조사		✓ 열카르스트 지형의 정밀 탐지와 진화 과정 모니터링 위해 알래스카 대상 10년 기간 동안 51건의 1 m 공간해상도의 고해상도 시계열 데이터셋 구축 및 변화 탐지 기반 마련 완료 ✓ 현장조사 출장으로 인해 활용 가능한 위성, 무인기 영상 수집. ✓ Pleiades 고해상도 다중분광, PRISMA 위성 초분광, 무인기 초분광 영상 확보 및 기본 자료처리를 통한 정사영상 및 수치표면모델 제작	
	계		1.0		100
1단계 2년차 (2021)	1. 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성 자료 분석 기반기술 고도화	1-1. 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류 기술 고도화	0.8	✓ 고해상 X-밴드 영상에의 적용과 이종센서 융합 활용 확장 및 검증 완료.	100
		1-2. 수동형 마이크로파 원격탐사/딥러닝을 이용한 해빙 두께 산출 기술 고도화		✓ 수동마이크로파 밝기온도 및 위성 고도계 자료 기반 북극 해빙의 건현 높이 (total freeboard height) 추정 및 검증 ✓ 딥러닝을 이용한 수동마이크로파 기반 일간 북극해빙 두께 산출 모델 개발	
		1-3. 북극 해빙 굽힘강도 산출 기술 고도화		✓ 수동마이크로파와 대기모델 자료를 활용한 저해상도 대안산물출 시계열 제작 완료. ✓ 대안산출물과 영상레이더 다중편파 자료로부터 제작된 산출물 비교분석. ✓ 굽힘강도 산출 알고리즘 개선을 위한 추가 해빙코어 자료 확보 중.	
		1-4. 다중 광학 원격탐사 기반 해빙 표면 융빙호 분포 탐지 및 매핑		✓ 고해상도 광학영상과 고도계 자료를 융합하여 융빙호의 분포 탐지 및 매핑 검증	
		1-5. 무인기 기반 초분광/라이다 데이터 융합분석 기술 개발		✓ RGB-초분광-라이다 정밀 정합 기술 개발 및 검증 완료.	
	2. 인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 현장 조사	2-1. 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집	0.2	✓ 북극 해수 광 특성 자료(식물플랑크톤, NAP, CDOM에 대한 흡광계수) 및 현장자료 (클로로필 및 부유물질 농도), Underway를 포함한 총 128개 포인트에 대한 자료 확보 완료.	100
		2-2. 북극해 해빙 코어 자료수집 및 분석		✓ 코로나19로 인한 해빙캠프 취소. 검증용 대체물 생산 및 분석으로 대체.	
		2-3. 북극해 해빙 위치추적 자료수집 및 분석		✓ 코로나19로 인한 해빙캠프 취소. 기확보 MOSAiC 부이 자료 분석으로 대체.	
		2-4. 동토 지역 초분광/라이다 자료 구축 및 분석		✓ 동토 지역 출장 취소로 인해 국내에서 통신 제약 조건으로 자료 획득 시험으로 대체. ✓ 자료획득-처리에 이르는 일련의 과정 정의	

KOPRI 극지연구소

	계		1.0		100
1단계 3년차 (2022)	1. 빙권 구성요소 변화 특성 분석	1-1. 해빙 시공간 변동성 및 환경요소 간의 상관성 분석	0.6	✓ 영상레이더 기반 해빙 이동 산출물을 기반으로 신규 변형 산출물 개발 완료 ✓ 해빙 이동/변형과 유형 간 시공간 매칭에서의 불연속적 변화 탐지 및 원인 해석 완료	100
		1-2. 다중 광학 원격탐사 센서 기반 해빙 표면 융빙호 시공간 변동 분석		✓ 리드 발생 위치와 융빙호의 분포를 비교하여 동역학적 요인이 융빙호 비율에 미치는 영향 분석	
		1-3. 시계열 초분광 및 수치표면모델 자료 융합을 통한 동토 특성 변화 연구		✓ 수치표면모델을 이용한 2019년 대비 스노우펜스 주변 지형변화 분석	
	2. 현장조사 기반 빙권 위성 관측 결과 검정	2-1. 북극 해수 광 특성 자료수집	0.4	✓ 북극 해수 광 특성 자료(Absorption coefficient of phytoplankton, NAP, CDOM) 및 현장자료(Chlorophyll-a, suspended sediment) 연구정점 Underway 포함) 70곳에 대한 자료 확보 완료 인천항에 시료 도착 후 빠른 마무리 분석 예정.	100
		2-2. 북극 해빙 코어 자료 확보		✓ 2022년 8월 14일과 17일에 진행된 해빙캠프에서 확보한 다년생 해빙코어 3개에서 염분과 온도 프로파일을 분석 완료.	
		2-3. 북극 해빙 이동 위치 추적 실측자료 확보		✓ 북극해 해빙 현장 연구 지점에 해빙 이동을 추적할 수 있는 트래커 설치 및 47일 기간 동안의 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 위치 전송자료 확보 완료	
		2-4. 동토지역 초분광/라이다 자료 구축		✓ 무인기를 이용하여 카운실 지역의 극지연구소 거점 연구사이트에서 LiDAR, 초분광, RGB 자료 획득	
	계		1.0		100
2단계 1년차 (2023)	1. 북극해 결빙해역 해빙 요소 시공간 장기 변화 도출	1-1. 개발된 해빙 특성 산출기술을 적용하여 장기 해빙 특성 산출물 생산	0.53	✓ 해빙유형: 2015년~2022년 겨울철 5종, 여름철 3종 해빙 분류의 공간해상도 2 km 급 산출물 제작 완료 ✓ 해빙이동/변형: 2015년~2022년 해빙 이동의 공간해상도 2 km 급 산출물 제작 완료 ✓ 해빙두께: 2012년~2022년 겨울철(11월-3월) 공간해상도 25 km 급 산출물 제작 완료 ✓ 해빙강도: 2010년~2023년 가을-겨울철 해빙 강도 공간해상도 25 km 급 산출물 제작 완료	100
		1-2. 해빙 산출물 북극해 전역 시공간 변동 특성 분석		✓ 해빙유형: 60도 이상 북극해를 세부해역별로 나누어 과거 17년간 단년빙/다년빙 비율의 10월~4월 계절적 변화 패턴 추출, 연도별 평균 변화 추세 계산, 변동 모드의 공간적 분포 분석 수행 및 결과물의 KPDC 등록 완료 ✓ 해빙이동/변형: 60도 이상 북극해를 세부해역별로 나누어 과거 30년간 해빙 이동 속도의 계절적 변화 패턴 추출, 연도별 평균 변화 추세 계산, 변동 모드의 공간적 분포 분석 수행 및 결과물의 KPDC 등록 완료. ✓ 해빙두께 : 2012년 11월 ~ 2022년 3월까지 월별 평균을 제작하여 계절성 변동, 10년 이상 장기 변동, EOF 변동 모드 분석 수행. 결과물의 KPDC 등록 완료 ✓ 해빙강도: 2010년~2023년 동안 10월~4월 사이의 일, 월, 연평균으로 구분하여 겨울철 해빙 강도 계절성 변동, 장기 변동, EOF 변동 모드 분석 수행. 결과물의	

KOPRI 극지연구소

				KPDC 등록 완료.	
	2. 북극해 결빙해역 해양 요소 시공간 장기 변화 도출	2-1. 북극해 해수 온도 및 표층 클로로필에 대한 위성 기반 산출물 확보	0.27	✓ ERSST, HadISST, OISST의 기초 처리 및 북극해 자료 확보 완료 ✓ OC-CCI & GlobColor ✓ 해상도 4 km 급, 1998년~2022년 (25년) ✓ 잔존 오차치를 통계 처리한 데이터 확보	100
		2-2. 북극 현장 관측 자료 확보 및 위성 기반 광역적 산출물 검보정		✓ 검보정 결과 문헌 조사를 통한 정략적인 정확성 확보	
		2-3. 해양 요소 장기 시계열 자료 구축과 계절별 변화 패턴 파악, 장기 변화 추세 정량화		✓ 북극해의 13개 해역에서의 연속적 시계열 자료 구축 ✓ 북극해 전역의 bloom phenology 특성의 경향성 분석	
		2-4. 해양 요소 변화율 계산하여 공간적 분포 특성 산정 및 전 지구적 변화율과 비교분석 수행		✓ 해양 수온 변화가 두드러지는 지역 확인 ✓ 해양 수온 변동성에 대한 주기 분석 결과 확보 ✓ 해양 표층 클로로필의 변동성에 대한 탁월 주기 파악	
	3. 산출물 검증 및 정보 제공을 위한 북극 현장조사	3-1. 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통한 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보	0.20	✓ 2023년 7월부터 9월 2일까지 총 64개 연구정점 및 항해 경로상 위치에서 해수 샘플링 수행하여 검보정 자료 확보	100
		3-2. 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적 시스템 설치 및 자료 수집		✓ 다양한 해빙에 OpenMetBuoy 13개 설치하여 자료 수집 완료	
		3-3. 북극해 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개선 및 산출물 검증을 위한 해빙 코어 자료 확보 및 얼음 특성 자료 수집		✓ 해빙캠프에서 해빙코어 2개 확보 ✓ 얼음 온도와 염분은 1개 코어에서만 측정	
		3-4. 북극해 해빙 표면 세부 공간정보자료구축 및 분석을 위한 다종센서 기반 저고도 및 지상 스캔 자료 획득		✓ 초분광, 라이다, 고해상도 광학 영상 동시 획득	
	계		1.0		
2단계 2년차 (2024)	1. 북극해 해빙 시공간 변동성의 해역/산출물간 관계 분석	1-1. 해빙 특성의 시공간적 변동 특성들간의 이종 상관성 분석 및 환경변수장과의 해역별 변동 연관성 분석	0.53	✓ 북극해 세부 영역 별 해빙 특성 산출물간 관계 분석 결과 확보 ✓ 해빙 산출물의 해역별 변동 상관성 분석 결과 확보 ✓ 2차 산출물인 해빙 굽힘강도와 해빙-해양 1차 산출물간 관계 분석 결과 확보	100
	2. 북극해 해빙-해양 상호관계 규명	2-1. 북극해 해양 요소와 해빙의 상호작용 이해에 근거한 북극해 환경변화 전망	0.27	✓ 북극해 세부 영역 별 해빙-해양 요소 상관성 분석 결과 확보 ✓ 해빙 면적비를 통한 클로로필 연변화 과거 변화 모사 모델 결과 확보 ✓ 클로로필 변화와 연관한 해빙 면적비 변화의 기원 추정을 위한 일차적 근거 자료 확보	100
	3. 산출물 검증	3-1. 현장 시료 취득 및 분석과 위성자료와의 대조를 통해 산출물의 품질을 유지	0.20	✓ 총 59개 연구정점 및 항해 경로상 위치에서 해수 샘플링 수행하여 검보정 자료 획득 및 분석	100

KOPRI 극지연구소

		하고 해빙/해양 특성 추출 결과를 검증		✓ OpenMetBuoy 2기 설치하여 해빙 이동 및 해파 강도 자료 획득 및 분석 ✓ 해빙캠프에서 해빙코어 2개 자료 획득 및 분석 ✓ 고해상 항공영상 및 해빙 표면 레이저 스캐닝 자료 획득 및 분석	
	계		1.0		100
2단계 3년차 (2025)	1. 북극해 해빙-해양 변동과 기후변화의 상관관계 분석	1-1. 2차년도에서 분석된 상관성/연동성을 바탕으로 통합된 관계 모델을 생성하고 기후요소와의 상관관계를 정량화하여 분석	0.80	✓ 해빙-기후요소 상관관계 분석도 제작 ✓ 해양-기후요소 상관관계 분석도 제작 ✓ 해양-해빙 환경의 기후 연동성 모사 인공지능 모델 제작 ✓ 과거 40년간 북극 증폭 변동의 시공간적 특성과 관련 해빙-해양-기후요소의 관계 분석 및 기후 시스템 전이 현상 분석	100 (추정치)
	2. 산출물 검증	2-1. 현장 시료 취득 및 분석과 위성자료와의 대조를 통해 산출물의 품질을 유지하고 해빙/해양 특성 추출 결과를 검증	0.20	✓ 본사업 수행기간 6년간의 아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다종 센서 저고도(무인기 등) 원격탐사 영상 촬영, 해빙 표면 지형 스캔, 해빙 코어 취득, 트래커 설치를 수행 ✓ 시료 분석 후 해빙/해수 특성 산출물의 검증 및 결과보고서 작성	100 (추정치)
	계		1.0		100

2. 정량적 연구성과

년도 (과제연차)	성과목표	지표	목표치 (A)	달성 (B)	가중치 %(C)	평가기준	달성도(%)	
							(D=B/A)	(D*C)
2020 (1단계 1차년도)	북극 빙권 구성요소 위성 모니터링을 위한 기반기술 구축	해빙 유형 지도	52	52	20	(평가방법) 다양한 유형의 해빙이 혼재하는 Fram Strait 지역에 대한 2 km 공간해상도의 3종 (해수, 단년빙, 다년빙) 분포도 위성 산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	100	20
		해빙 이동 지도	12	12	10	(평가방법) 해빙의 이동이 빠르고 방향이 일정한 Fram Strait 지역에 대한 2 km 공간해상도의 해빙 이동 벡터 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	100	10
		해빙 강도 지도	2	2	10	(평가방법) 북극해 현장조사 자료가 존재하는 지역에 대한 500 m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 현장조사 자료 기록 및 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	100	10
	과거 현장조사 및 고해상 위성자료 분석 기반 북극 빙권	현장 관측을 통한 공해상 영상 산출물	1	1	10	(평가방법) 북극해 해빙에 대한 표면 특성 관측 목적 10 cm 공간해상도의 영상 산출물 건수 확인 (근거자료) 영상 산출물 메타데이터 기록	100	10
		위성 영상 및 수치	1	1	10	(평가방법) 동토 지역에 대한 1 m 공간해상도의 영상 및 수치표면모델 산출물 건수 확인	100	10

	위성 관측 결과 검정	표면 모델				(근거자료) 영상 산출물 메타데이터 기록		
	관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	3	9	40	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCIE 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	100 (300)	40
2021 (1단계 2차년도)	북극 빙권 구성요소 위성 모니터링 기술 고도화	해빙 유형 지도	52	52	8	(측정방법) 다양한 유형의 해빙이 혼재하는 Fram Strait 지역에 대한 2 km 공간해상도의 5종 (해수, 단년빙, 다년빙)분포도 위성 산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터기록 (KPDC 등록)	100	8
		해빙 이동 지도	52	52	8	(측정방법) 해빙의 이동이 빠르고 방향이 일정한 Fram Strait 지역에 대한 2 km 공간해상도의 해빙 이동벡터 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터기록 (KPDC 등록)	100	8
		해빙 강도 지도	2	2	7	(측정방법) 북극해 현장조사 자료가 존재하는 지역에 대한 500 m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 현장조사 자료 기록 및 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	100	7
		해빙 두께 지도	12	12	7	(측정방법) 북극해 지역에 대한 25 km 공간해상도의 해빙 두께지도 산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 자료 기록 (KPDC 등록)	100	7
	현장조사 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검정	해빙 코어	3	3	10	(측정방법) 북극해 해빙 코어 개수 확인 (근거자료) 해빙 코어 사진 및 얼음 특성 (두께, 염도, 온도) 기록	100	10
		현장 관측을 통한 공해상 영상 산출물	1	1	10	(측정방법) 북극해 또는 연안 해빙에 대한 표면특성 관측 목적 10 cm 공간해상도의 영상 산출물 건수 확인 (근거자료) 영상 산출물 메타데이터 기록	100	10
		무인기 영상 및 수치표면 모델	1	1	10	(측정방법) 동토 지역에 대한 10 cm 공간해상도의 영상 및 수치표면모델 산출물 건수 확인 (근거자료) 영상 산출물 메타데이터 기록	100	10
	관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	2	4	20	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	100 (200)	20
		mrnIF 80 이상 논문 수	1	3	20	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	100 (300)	20
2022 (1단계 3차년도)	북극 빙권 구성요소	해빙 변형 지도	12	12	20	(측정방법) 위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 2 km 공간해상도의 해빙 유형별 변형률 위성산출물 건수 확인	100	20

	특성변화 분석					(근거자료) 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)		
		해빙 강도 지도	12	12	10	(측정방법) 북극해 전 지역에 대한 500 m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	100	10
	현장조사 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검정	해빙 코어	3	3	20	(측정방법) 북극해 해빙 코어 개수 확인 (근거자료) 해빙 코어 사진 및 얼음 특성 (두께, 염도, 온도) 기록	100	20
	관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	3년 누적 5	3년 누적 8	10	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	100 (160)	10
		mrnIF 80 이상 90 미만 논문 수	3년 누적 4	3년 누적 4	30	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	100	30
		mrnIF 90 이상 논문 수	3년 누적 1	3년 누적 6	10	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	100 (600)	10
2023 (2단계 1차년도)	북극해 결빙해역의 해빙 요소 시공간 장기 변화 연구	해빙 유형의 시공간 변동성 분석도	3	3	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	8
		해빙 이동/변형의 시공간 변동성 분석도	3	3	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	8
		해빙 두께의 시공간 변동성 분석도	3	3	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	8
		해빙 강도의 시공간 변동성 분석도	3	3	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	8
	북극해 결빙해역의 해양 요소 시공간 장기 변화 연구	해양 수온의 시공간 변동성 분석도	2	2	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	8
		해양 클로로필의 시공간 변동성 분석도	2	2	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	8

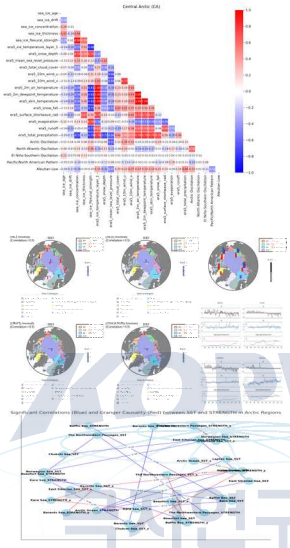
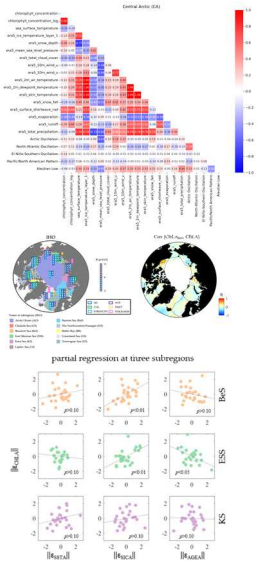
극지연구소

	산출물 검증	현장 시료 분석 보고서	1	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	12
	관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	2	2	20	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	100	20
		mrnIF 80 이상 90 미만 논문 수	1	4	20	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	100 (400)	20
2024 (2단계 2차년도)	북극해 해빙 시공간 변동성의 해역/산출물간 관계 분석	이종 산출물간 상관성 분석도	1	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	12
		환경변수와의 상관성 분석도	4	4	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	12
	북극해 해빙-해양 상호관계 규명	해빙-수온 상호작용 모식도	1	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	12
		해빙 변화의 해양생태계 영향 분석도	1	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	12
	산출물 검증	현장 시료 분석 보고서	1	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	100	12
	관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	2	1	20	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	50	10
		mrnIF 80 이상 90 미만 논문 수	2	1	20	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	50	10
2025 (2단계 3차년도)	북극해 해빙-해양 변동과 기후변화와의 상관관계 분석	해빙-기후요소 상관관계 분석도	1	1	16	KPDC 등록 메타데이터 건수	16	16
		해양-기후요소 상관관계 분석도	1	1	16	KPDC 등록 메타데이터 건수	16	16
		해양-해빙 환경의 기후 연동성 모사 인공지능 모델	1	1	16	KPDC 등록 메타데이터 건수	16	16
	산출물 검증	현장 시료 분석 보고서	1	1	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	12	12
	관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만	3년 누적 5	5	15	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	100	15

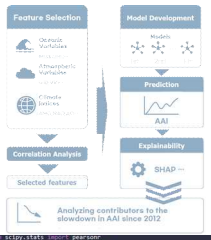
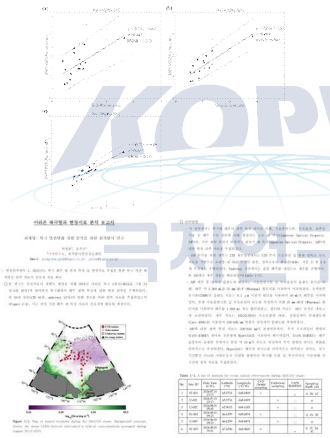
KOPRI 극지연구소

		논문 수						
		mrnIF 80 이상 90 미만 논문 수	3년 누적 4	4	15	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	100	15
		mrnIF 90 이상 논문 수	3년 누적 1	4	10	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	100	10

3. 증빙자료

성과목표	성과지표	
북극해 해빙-해양 변동과 기후변화와의 상관관계 분석	해빙-기후요소 상관관계 분석도	 해빙 산출물이 환경변수 및 기후지수와 가지는 상관관계를 정량화한 분석도를 해역별로 제작. KPDC 등록 (KOPRI-KPDC-00002815)
	해양-기후요소 상관관계 분석도	 해양 산출물이 환경변수 및 기후지수와 가지는 상관관계를 정량화한 분석도를 해역별로 제작. KPDC 등록 (KOPRI-KPDC-00002816)

KOPRI 극지연구소

	해양-해빙 환경의 기후 연동성 모사 인공지능 모델	  해양-해빙-기후요소와 기후지수 간의 상관성 분석을 바탕으로 회귀를 기반으로 하는 3가지 머신러닝 모델 및 딥러닝 대조 모델의 구축과 변수 중요도 및 인과관계 분석 KPDC 등록 (KOPRI-KPDC-00000326)
산출물 검증	현장 시료 분석 보고서	 현장 측정 해수 광특성, 해빙 이동 궤적 등 인공위성 산출물과 직접 비교 가능한 항목에 대한 검정과 최적화를 통한 위성 산출물에의 보정 및 결과 분석 KPDC 등록 (KOPRI-KPDC-00003025)
관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수 3년 누적 5건	달성 3건, 60% --> 5건, 100% (mrnIF 90 이상 7건 중 2건 차입)

<table>
<tr><td></td><td></td><td>
<table>
<tr><th>번호</th><th>논문명</th><th>저자</th><th>학술지명</th><th>게재일</th><th>mrnIF</th></tr>
<tr><td>1</td><td>Geometric and Radiometric Quality Assessments of UAV-Borne Multi-Sensor Systems: Can UAVs Replace Terrestrial Surveys?
https://doi.org/10.3390/drones7070411</td><td>지준화 외 6</td><td>DRONES</td><td>2023-06-22</td><td>72.7</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Directional Wave Scattering Distribution Modes Analysis and Synthesis of Random Ocean Media Roughness for SAR Electromagnetic Interactions Using Feature Fusion in Dynamic Sea States: A Survey
https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380201</td><td>Iman Heidar pour Shahre zaei 외 1</td><td>IEEE ACCESS</td><td>2024-03-21</td><td>63.8</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Temporal glacier velocity variations and their controlling factors in the Nathorstbreen glacier system, Svalbard
https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2025.11.004</td><td>Suprati m Guha 외 1</td><td>EGYPTIAN JOURNAL OF REMOTE SENSING AND SPACE SCIENCES</td><td>2025-11-23</td><td>66.13</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td></td><td>mrnIF 80 이상 90 미만 논문 수

3년 누적 4건</td><td>
달성 3건, 75% --> 4건, 100%
(mrnIF 90 이상 7건 중 1건 차입)
<table>
<tr><th>번호</th><th>논문명</th><th>저자</th><th>학술지명</th><th>게재일</th><th>mrnIF</th></tr>
<tr><td>1</td><td>Variability of Surface Radiation Budget over Arctic during Two Recent Decades from Perspective of CERES and ERA5 Data
https://doi.org/10.3390/rs15030829</td><td>서민지 외 4</td><td>IEEE ACCESS</td><td>2023-02-01</td><td>85.5</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Arctic Greening Trends: Change Points in Satellite-Derived Normalized Difference Vegetation Indexes and Their Correlation with Climate Variables over the Last Two Decades
https://doi.org/10.3390/rs16071160</td><td>서민지 외 1</td><td>REMOTE SENSING</td><td>2024-03-27</td><td>85.0</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Spatial Regionalization of the Arctic Ocean Based on Ocean Physical Property
https://doi.org/10.3390/rs17061065</td><td>윤주은 외 2</td><td>REMOTE SENSING</td><td>2025-03-18</td><td>86.9</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td></td><td>mrnIF 90 이상 논문 수

3년 누적 1건</td><td>달성 7건, 700% --> 4건, 100%
(7건 중 mrnIF 40 이상 80 미만으로 2건 차출, mrnIF 80 이상 90 미만으로 1건 차출, 달성도 최대치는 100%) <u>(초과달성)</u></td></tr>
</table>

번호	논문명	저자	학술지명	게재일	mrnIF
1	A Monostatic Forward-Looking Staring Spotlight SAR Raw Data Generation and Hybrid-Domain Image Formation Modifications Based on Extended Azimuth Nonlinear Chirp Scaling Autofocusing https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3212993	Iman Heidar pour Shahre zaei 외 1	IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS	2022-10-10	93.9
2	Estimation of summer pan-Arctic ice draft from satellite passive microwave observations https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113662	김종민 외 7	REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT	2023-06-12	96.7
3	Sensitivity of Passive Microwave Satellite Observations to Snow Density and Grain Size over Arctic Sea Ice https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3322401	권영주 외 4	IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING	2023-10-06	95.3
4	Long-term prediction of Arctic sea ice concentrations using deep learning: Effects of surface temperature, radiation, and wind conditions https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114568	김영준 외 4	REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT	2024-12-11	96.3
5	Sea-Ice Surface Types Characterization and SAR Volume Backscattering Properties in Response to Sea States Interactions Using Structural Feature Fusion https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3548597	Iman Heidar pour Shahre zaei 외 1	IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING	2025-03-05	90.6
6	Advanced algorithm for continuous melt onset detection on Arctic sea ice https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3560261	김종민 외 5	IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING	2025-04-15	97.0
7	A novel sea ice floe fragmentation index using Sentinel-2 and AMSR2 satellite data based on machine learning https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104911	김우혁 외 5	INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION	2025-10-18	91.9

금지연구소

4. KPDC 등록 이행실적

데이터 이름[1]	메타데이터 ID[2]	메타데이터 제목[3]	원시데이터 등록여부[4]
해빙 유형 지도	KOPRI-KPDC-00001468	Satellite SAR data-based sea ice drift vectors in Fram Strait (2019-2020)	등록
해빙 이동 지도	KOPRI-KPDC-00001467	Satellite SAR data-based sea ice types in Fram Strait (2019)	등록
해빙 변형 지도	KOPRI-KPDC-00001974	Satellite SAR data-based sea ice total deformation rate in the Arctic Ocean (2020)	등록
해빙 강도 지도	KOPRI-KPDC-00001459	Arctic Sea Ice Flexural Strength	등록

해빙 두께 지도	KOPRI-KPDC-00002033	Daily sea ice thickness maps from 2018 to 2019	등록
현장 관측을 통한 공해상 영상 산출물	KOPRI-KPDC-00001559	High-resolution melt pond image from UAV	등록
위성 영상 및 수치표면모델	KOPRI-KPDC-00001470	Multispectral satellite image and digital surface model for Council, AK	등록
해빙 유형 시공간 변동성 분석도	KOPRI-KPDC-00002333	Seasonal variabilities of Arctic sea ice types	등록
	KOPRI-KPDC-00002334	Long-term variabilities of Arctic sea ice types	등록
	KOPRI-KPDC-00002335	Spatio-temporal change modes of Arctic sea ice types	등록
해빙 이동/변형 시공간 변동성 분석도	KOPRI-KPDC-00002336	Seasonal variabilities of Arctic sea ice drift	등록
	KOPRI-KPDC-00002337	Long-term variabilities of Arctic sea ice drift	등록
	KOPRI-KPDC-00002338	Spatio-temporal change modes of Arctic sea ice drift	등록
해빙 두께의 시공간 변동성 분석도	KOPRI-KPDC-00002218	Spatial variation of seasonal/monthly sea ice thickness distribution of Arctic sea ice	등록
	KOPRI-KPDC-00002219	Monthly long term trend of Arctic mean sea ice thickness	등록
	KOPRI-KPDC-00002295	Arctic sea ice thickness EOF mode and PC time series	등록
해빙 강도의 시공간 변동성 분석도	KOPRI-KPDC-00002205	Spatio-Temporal Variations of Flexural Strength of Arctic Sea Ice	등록
해양 수온의 시공간 변동성 분석도	KOPRI-KPDC-00002299	Annual, Interannual, and decadal variabilities in SST anomaly in four Arctic subregions	등록
	KOPRI-KPDC-00002298	Meridional mean SST anomaly in the Arctic Ocean	등록
해양 클로로필의 시공간 변동성 분석도	KOPRI-KPDC-00002240	Wavelet analysis results from remotely-sensed chlorophyll time series data	등록
	KOPRI-KPDC-00002239	Trends in ocean surface phytoplankton bloom properies from ocean color remote sensing	등록
현장 시료 분석 보고서	KOPRI-KPDC-00002340	In-situ data of ARA14B for supporting remote sensing	등록
이종 산출물간 상관성 분석도	KOPRI-KPDC-00002648	Interrelationship between sea ice parameters in the Arctic region	등록
환경변수와의 상관성 분석도	KOPRI-KPDC-00002649	Relationship between sea ice and environmental parameters in the Arctic region	등록
	KOPRI-KPDC-00002657		등록
	KOPRI-KPDC-00002658		등록
	KOPRI-KPDC-00002659		등록
해빙-수온 상호 작용 모식도	KOPRI-KPDC-00002642	Relationship between sea surface temperature and sea-ice parameters in the Arctic region	등록
해빙 변화의 해양생태계 영향 분석도	KOPRI-KPDC-00002634	Prediction of annual timeseries of surface chlorophyll anomaly in the Beaufort, East Siberian, and Kara Seas	등록
현장 시료 분석 보고서	KOPRI-KPDC-00002820	In-situ data of ARA15A for supporting remote sensing	등록
해빙-기후요소 상관관계 분석도	KOPRI-KPDC-00002815	Relationship between sea ice and climatological parameters in the Arctic region	등록

해양-기후요소 상관관계 분석도	KOPRI-KPDC-00002816	Relationship between ocean and climatological parameters in the Arctic region	등록
해양-해빙 환경의 기후 연동성 모사 인공지능 모델	KOPRI-KPDC-00003026	AI model for simulating climate connectivity between the ocean and sea ice environment	등록
현장 시료 분석 보고서	KOPRI-KPDC-00003025	In-situ data of ARA16A for supporting remote sensing	등록
원시데이터 등록률[5]			100 %

5. 기타 성과

가. 인력활용/양성 성과

(1) 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
6	6	0	0	0	4	2	6	0	0

○ 연수연구원 지원

- 연수연구원(‘20~‘21) 김재인 박사는 극지에서의 무인기 활용에 관한 연구를 수행했으며, 연구 성과로 국제학술지에 2편의 주저자 논문을 게재함. 이후 한국항공우주연구원 선임연구원으로 이직함.
- 연수연구원(‘20~‘24) Iman 박사는 극지 해빙 촬영 영상 내의 전자기적 신호 특성에 관한 연구를 수행했으며, 연구 성과로 국제학술지에 5편의 주저자 논문을 게재함. 이후 한국해양대학교 연구교수로 이직함.
- 연수연구원(’20~‘22) 권영주 박사는 수동형 마이크로파 센서 기반 북극 해빙의 물리 특성 연구를 수행했으며, 연구 성과로 국제학술지에 2편의 주저자 논문을 게재함. 이후 한국과학기술원 박사후연구원으로 이직함.
- 연수연구원(‘21~‘23) 박지은 박사는 위성 자료를 활용한 북극 저차영양생태 환경변화 분석 연구를 수행했으며, 연구 성과로 국제학술지에 1편의 주저자 논문을 게재함. 이후 미국 뉴욕시립대학교 박사후연구원으로 이직함.
- 연수연구원(‘21~‘24) 서민지 박사는 위성 자료를 활용한 북극 식생 환경변화 분석 연구를 수행했으며, 연구 성과로 국제학술지에 2편의 주저자 논문을 게재함. 이후 국가산림과학원 연구사로 이직함.
- 연수연구원(’22~‘25) 김종민 박사는 수동마이크로파 위성을 활용한 여름철 북극 해빙 두께 추정 연구를 수행했으며, 연구 성과로 국제학술지에 3편의

주저자 논문을 게재함. 미국 채프먼대학교 박사후연구원으로 이직함.

○ 학생 지원

- 위탁과제를 통해 석사/박사 과정생 다수를 간접 지원함.

(2) 장·단기 연수지원 성과

장기 (2월 이상)		단기 (2월 미만)	
국내	국외	국내	국외
0	0	0	0

(3) 산업기술인력 양성 성과

프로그램명	프로그램 내용	교육기관	교육 개최회수	총 교육시간	총 교육인원
해당 사항 없음					

KOPRI 극지연구소

나. 국제화/협력 성과

(1) 국내·외 공동 연구협력 실적(위탁연구 제외)

연구협력 파트너	수행형태	연구협력 내용(목표)	수행 결과 및 우수성
독일 AWI 및 MOSAiC 국제공동연구팀	공동	✓ 쇄빙선 Polarstern의 표류 궤적을 따라 아리랑 및 기타 위성 영상 제공 및 분석 지원 ✓ 현장관측 자료와의 연계를 통한 해빙 특성 산출 알고리즘 개발/검증	 ✓ 북극 기후 다학제 국제공동연구 프로그램인 MOSAiC에 한국 대표 참여 ✓ 아리랑 5호 기반 해빙 이동장 분석, 국제 공동 연구팀과 분석 자료 교환 ✓ 아리랑 5호 및 COSMO-SkyMed 영상 기반 해빙 이동장과 MOSAiC 부이와의 비교검증 진행. 이탈리아 팀과 SCI 논문 1편 게재
노르웨이 NERSC	공동	✓ 유럽 위성자료 공유 및 해빙 예측 기술 공유 ✓ 해빙 특성 산출 기술 개발	 ✓ EU의 INTAROS (국제공동 북극관측) 프로그램에 한국 대표 참여 ✓ 해빙 분류 및 이동장 산출 기술 개발로 SCI 논문 1편 게재 ✓ 해파-해빙 부이 공동 설치/운용 실험 진행 중
미국 IARC	공동	✓ 북극 공동 현장관측 계획 및 데이터 교류	✓ 2021년 하계 알래스카 연안해빙 지역 국제 공동 현장조사를 계획하였으나 코로나19로 인한 취소 ✓ 상방 조사 소나(SONAR) 관측 자료를 통한 북극해 (세베르나야제믈랴 제도 북쪽 연안) 해빙두께 공동 분석, SCI 논문 1편 게재

KOPRI 극지연구소

(2) 인력교류 성과

외국 연구자 유치				해외 파견			
유치기간(월)	국적	학위	전공	파견기간(월)	파견국	학위	전공
0.2	러시아	박사	원격탐사	-	-	-	-

○ 달성실적 상세내용(의의, 기대효과 등)

- 2022년 9월 19일부터 24일까지 연구협력 파트너인 노르웨이 NERSC의 해빙 원격탐사/모델링 전문가 Anton Korosov 박사를 초청하여 해빙 원격탐사 연구 기술에 대한 지식 교류.
- 해파-해빙 상호물리작용 연구와 관련한 북극해 공동현장조사활동을 계획하고, 태평양 섹터의 조사활동은 극지연이, 대서양 섹터의 조사활동은 NERSC가 수행하여 두 관측 결과를 모아 북극해 전역에 대한 연구로 확장시킬 것을 협의. 2023년부터 아라온호 북극해 연구항차에서 공동으로 해파-해빙 부이를 설치/운용 후 현재 결과 분석 진행 중.

(3) 학술회의 개최 성과

명칭	기술분야	규 모			개최장소	지원금액 (백만원)
		참가국	인원	기간(일)		
한국해양학회 춘계학술대회	해양학 / 원격탐사	1	300	2020.07.22.~23. (2일)	부산	1
대한원격탐사학회 추계학술대회	원격탐사	1	300	2020.11.04.~06. (3일)	온라인	2
International Symposium on Remote Sensing	원격탐사	3+α (3개국 공동주관)	400	2021.05.26.-28. (3일)	온라인	1.5
국제여성과학기술인 융합학술대회 BIEN 2021	Bio, Information, Environment, Nano	15	300	2021.08.18.-20. (3일)	대전/온라인	2
GeoAI 데이터학회 추계학술대회	인공지능 / 원격탐사	1	300	2021.11.24.-26. (3일)	부산	5
GeoAI데이터학회 춘계워크샵	인공지능 / 원격탐사	1	200	2022.06.15.-16. (2일)	부산	1
대한원격탐사학회 추계학술대회	원격탐사	1	300	2022.11.07.-09. (3일)	부산	2
GeoAI 데이터학회 추계학술대회	인공지능 / 원격탐사	1	300	2022.11.15.-18. (4일)	제주	2
GeoAI 데이터학회 추계학술대회	인공지능 / 원격탐사	1	300	2023.11.08.-10.(3일)	제주	6

KOPRI 극지연구소

대한원격탐사학회 추계학술대회	원격탐사	1	300	2023.11.15.-17.(3일)	경주	2
대한원격탐사학회 추계학술대회	원격탐사	1	400	2024.10.16.-18.(3일)	경주	3
GeoAI 데이터학회 추계학술대회	인공지능 / 원격탐사	1	300	2024.11.06.-08.(3일)	제주	3
GeoAI 데이터학회 추계학술대회	인공지능 / 원격탐사	1	400	2025.11.05.-08.(4일)	제주	6

○ 달성실적 상세내용(의의, 기대효과 등)

- 과제 관련 연구 수행 결과 발표
- 극지연구소에서 수행 중인 과제 홍보
- 북극 해빙 예측을 위한 위성/모델링 융합연구 활성화 방안 마련
- 북극 해빙 위성정보 활용연구 확대 및 한국형 극지위성 개발의 토대 구축
- 극지원격탐사 분야 국내 연구 네트워크 구축

(4) 국제협력 성과

MOU 체결			수요조사			공동연구	
대상국	대상기관	수집자료(건)	대상국	과제접수(건)	과제도출(건)	대상국	협약연구비 (백만원)
덴마크	덴마크공대						

- 덴마크공대 DTU Space와 무인기 기반 원격탐사 연구 협력 관계 구축 (2020~) 및 MoU 체결 (2025.01.15.)

(5) 기타 성과

○ 위성탐사빙권정보센터 언론 홍보 및 외부기관 소속 방문자 접객 목록

날짜	내역	
2020.01.13.	미국 국무부 해양수산부문 부차관보 대리 외 2명	
2020.02.05.	덴마크 고등교육과학부 부국장 외 4명 방소	
2020.10.21.	더불어민주당 정일영 의원 외 5명 방소	
2020.11.11.	한국해양수산연수원 원장 방소	
2020.11.16.	해양수산부 국장 방소	
2020.12.10.	해양수산부 장관, 해양정책관, 해양개발과장 방소	
2021.02.23.	외교부 북극협력대표 외 1명 방소	
2021.03.04.	주한 노르웨이 대사 방소	

2021.05.20.	주한 캐나다 대사 방소
2021.07.02.	주한 칠레 대사 방소
2021.07.26.	극지연구소 대학생 기자단(폴라이터) 방소
2021.07.26.	주한 아르헨티나 대사 방소
2021.09.30.	해양수산부 신임 해양정책관 방소
2021.10.13.	아리랑TV 촬영
2021.10.22.	과학기술정보통신부 연구개발투자심의 국장 방소
2021.11.23.	해양수산부 신임 사무관 방소
2021.12.16.	주칠레 한국 대사 방소
2022.01.07.	외교부 제2차관 방소
2022.01.20.	주한 핀란드 대사 방소
2022.02.17.	해양수산부 신임 해양정책관 방소
2022.03.15.	주한 칠레 대사 차관 방소
2022.03.24.	산업통상자원부 MOU 관련 참석자 방소
2022.04.20.	KBS 인터뷰
2022.06.15.	한-중 해양과학공동연구센터 소장 방소
2022.07.05.	한국천문연구원 원장 및 연구원 방소
2022.07.12.	환경부 주관 '탄소중립 서포터즈' 방소
2022.07.21.	극지연구소 메타버스 제작 협조
2022.07.26.	부산대학교 견학
2022.09.16.	미국 스트랫포 연구소 수석 부회장 방소
2023.01.15	주한 뉴질랜드 대사 방소
2023.02.28	국립해양조사원 방소
2023.03.7	호주 타즈마니아주 총리 및 남극대표단 방소
2023.03.07	스웨덴 북극대사 방소
2023.03.29	주베이징그린란드대표부 방소
2023.04.05	국립환경과학원 방소
2023.06.20.	대한민국 합동참모본부 방소
2023.06.26.	극지연구소 대학생 기자단 폴라이터 방소
2023.06.28.	해양수산과학기술진흥원 이사진 방소
2023.06.30.	극지기술연구회 방소


경기신문

극지연구소, 북극해빙 변화 추적 인공위성 관측기술 개발

극지연구소는 북극해빙의 실제 변화를 추적할 수 있는 인공위성 관측 기술을 개발했다고 24일 밝혔다.

극지연구소 김현철 박사 연구팀은 북극해빙(바다얼음)을 만나 반사된 전자기파를 분석해 해빙의 움직임이나 해빙 가장자리에서 나타나는 변화를 확인하는 데 성공했다. 풍향, 풍속에 따라 변하는 해빙 표면의 거칠기 모델을 적용해 관측자료에서 자연 현상의 영향을 찾아낸 것이다.

현재 운용 중인 국내외 인공위성 대다수는 해빙 관측을 목적으로 제작한 것이 아니기 때문에 수







KOPRI 극지연구소

2023.07.05.	Matthew L. Druckenmiller 박사(IASC 미국대표) 방소
2023.08.10.	인천대학교(글로벌리더십프로그램) 방소
2023.09.01.	국방대학교 국방관리대학원 하용훈 부교수/김수민 해군 소령 방소
2023.09.13.	해양수산 과학기술 연구기관장 방소
2024.01.17.	KBS 인터뷰
2024.02.23.	캐나다 메모리얼 대학교 총장
2024.04.02.	극지연구소-국립수산과학원 업무협약 이후 센터 방문
2024.04.03.	해양수산부 해양개발과장
2024.04.15.	KIOST 감사
2024.04.18.	인천대학교 북방물류 교육협력 및 인력양성 사업단
2024.04.22.	캐나다 연구자 협력 회의
2024.05.03.	한국극지연구위원회
2024.05.14.	극지연구소 해군간 업무협약 이후 센터 방문
2024.05.27.	폴라이터 8기
2024.08.05.	국토지리정보원 원장 방소
2024.09.06.	NOAA 연구자 방소
2024.09.30.	과학기술정보통신부 공공에너지조정과장 및 담당 공무원 방소
2024.11.21.	과학기술정보통신부 혁신본부장
2024.11.25.	Katrin Jakobsdottir 극지대화(Polar Dialogue) 의장(아이슬란드 전 총리) 방소
2024.12.13.	노르웨이 연구자 방소
2024.12.30.	인하대학교 학생 기자단 방소
2025.01.10.	외교부 극지협력대표 방소
2025.01.23.	UST KOPRI스쿨 동계 극지과학 탐험 행사
2025.03.11.	해양수산과학기술진흥원(KIMST) 원장 방소
2025.04.15.	덴마크 DTUSpace 및 주한덴마크대사관 방소







○ 국내기관 MoU 체결

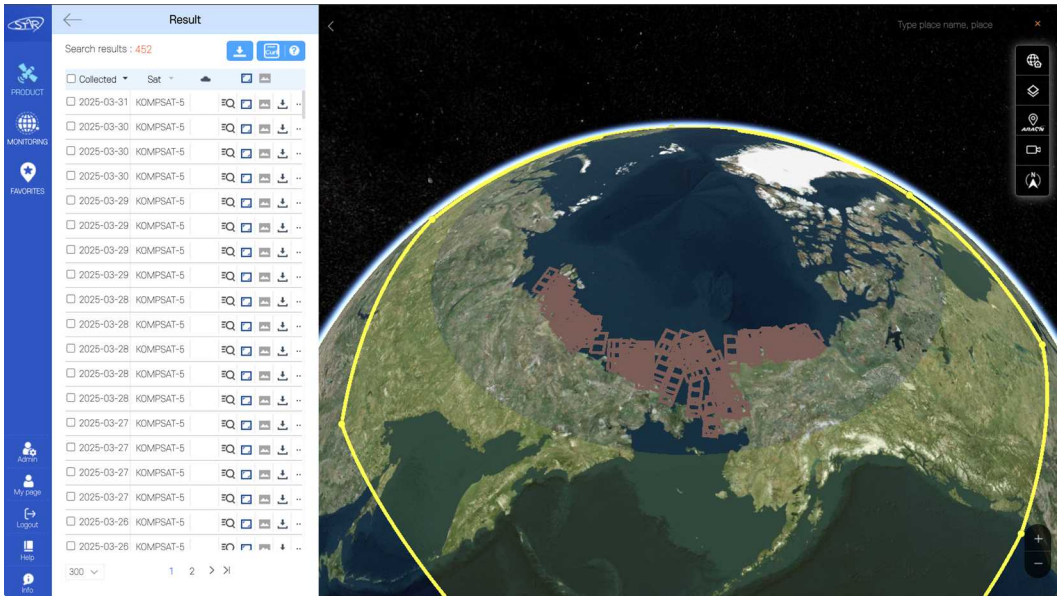
인공위성 자료 활용 협력을 위한 MoU 2건 체결

- 2022.02.24. 극지연구소-한국항공우주연구원
- 2022.03.24. 극지연구소-인하대학교-인하공업전문대학-한화오션(구 대우조선해양)

○ 범부처 협동을 통한 극지 관측 인공위성 자료 구축

- 범부처 협동연구 MOU를 통해 한국항공우주연구원으로부터 본과제 수행기간 중 아리랑 3호 / 3A호 / 5호 위성의 극지 관측 영상 총 21,190장 획득

KOPRI 극지연구소



아리랑 위성의 2025년 3월 북극 관측 영상 수집 예

○ 본과제 개발 해빙 정량 자료의 기존 자료 대비 우수성 요약

KOPRI 극지연구소

산출물	우수성
해빙 유형	시간해상도 대폭 향상(2 km), 다년빙 오판별 문제 해결
해빙 이동/변형	2 km 고해상 이동/변형 제공, 리드 신규 산출 및 이동 정확도 개선
해빙 두께	연중 관측 가능, 1일 간격, 고정밀 두께(고도계 대비 2,800% 향상)
해빙 강도	기존 부재, 최초의 해빙 강도 산출 가능
해빙 리드/융빙호	리드 신규 탐지, 융빙호 고정밀 탐지로 열/물질 교환 분석 강화
해빙 파편화 지수	기존에 없던 지수 신설, 해빙 녹는 속도 예측 정확도 향상에 기여 가능성
해빙 거칠기	위성 기반으로 시공간 제약 해소, 장기 변화 분석 가능
해빙 표면온도	결측 없이 산출(MODIS 한계 해결), 복사강제력 분석 정확도 상승
복사강제력	단파·장파 통합 제공(극지 최적화), 기후모델 에너지 오차 개선

○ 본과제 개발 산출물의 대외 배포 사례

- MOSAiC 연구진에 본 과제 개발 고해상 해빙 이동장 데이터 배포 (2021.07.) 및 공동 연구 논문 출판 (2021.10.)
- 한양대학교 연구진에 본 과제 개발 해빙 두께 데이터 제공 (2025.10.) 및 논문 작업 진행 중.

○ 연구 진행 중 구축 위성 산출물 목록

산출물	시간 범위	공간 범위
해빙 유형	2005.01.~2023.12.	북극해 전역
해빙 이동/변형	1991.01.~2020.12.	북극해 전역
해빙 두께	2012.11.~2022.03.	북극해 전역
해빙 강도	2010.10.~2023.04.	북극해 전역
해빙 리드/융빙호	2019.05.~2019.09.	북극해 전역
해빙 파편화 지수	2018.06.~2021.06.	북극해 전역
해빙 거칠기	2015.04.~2019.12	북극해 전역
해빙 표면온도	1991.01.~2023.12.	북극해 전역
복사강제력	1991.01.~2023.12.	북극해 전역
해수면 온도	1991.01.~2023.12.	북극해 전역
표층 클로로필 농도	1991.01.~2023.12.	북극해 전역

KOPRI 극지연구소

제 2 절 연구개발 의의

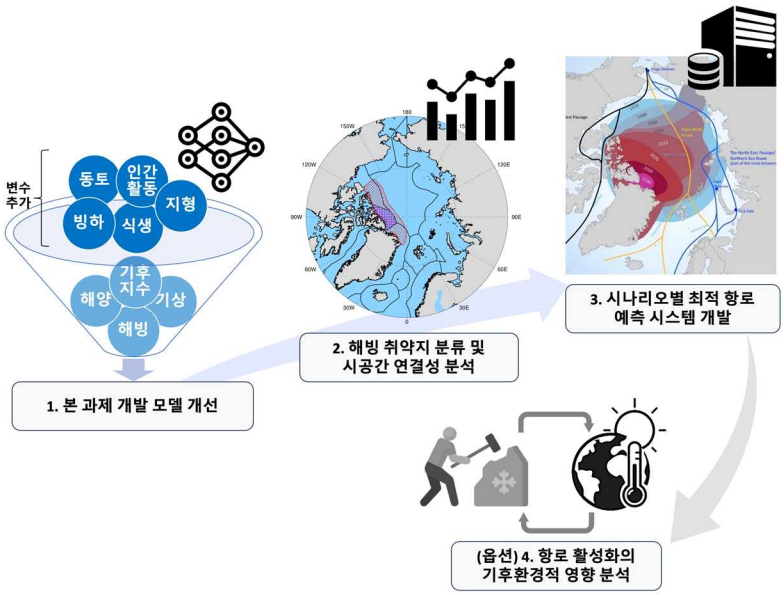
○ 본 연구개발의 의의

- 본 연구개발을 통해 원격탐사 자료를 활용하여 기존 해빙 산출물 3종(두께, 이동, 유형)의 시공간 해상도를 획기적으로 개선하였고, 기존에 관측되지 않았던 2종(굽힘 강도, 거칠기)의 새로운 물리적 특성 산출물을 최초로 개발하였으며, 시계열적 단절 및 관측이 어려운 3종(변형, 리드, 융빙호)을 개발하는 등 해빙, 해양 요소의 정량적 변화를 광역적으로 탐지할 수 있는 산출물의 개발 및 성능 개선을 이룸.
- 본 연구개발을 통해 분석 가능한 해빙 요소의 다양성을 증대시키고 분석 스케일의 정밀도를 향상시켜 빙권 변화의 복잡한 양상을 분석하고 이해하는데 필수인 데이터를 제공하였으며, 이를 바탕으로 해빙, 해양의 시공간 변화와 기후요소 간의 관계를 분석하고 기후인자에 미치는 영향을 모사하는 모델을 제시함.
- 해빙, 해양 요소 및 기후요소의 비선형 상관성 분석을 바탕으로 인공지능 모델을 개발하여 온난화를 대표하는 지표로서 정의한 북극 증폭 지수를 모사하는 인공지능 모델을 개발, 변수 간 인과 관계를 밝히고, 과거 40년간 북극 증폭 지수의 변화가 구별되는 세 시기 중 특히 증폭이 둔화된 마지막 시기에 대한 분석 결과로부터 북극 기후 조절 체계의 전이(regime shift)가 진행 중일 가능성을 진단함.

○ 본 연구개발의 한계

- 인공지능 기반 설명 가능한 모델링 방법론을 통해 북극 기후 요소 간 비선형적 상호작용을 규명하였으나, 제한된 모델 다양성으로 인한 인과관계 신뢰도 확보의 한계점이 존재하므로, 다중 모델 앙상블 기법 및 교차 검증을 통한 통계적 강건성 향상과 다각적 접근법의 도입이 요구됨.
- 극지 기후 및 온난화를 조절하는 요인을 종합적으로 논하기 위해서는 본 연구개발에서 다룬 해빙, 해양, 기상 요소와 기후지수뿐만 아니라 빙하, 동토, 식생, 지형, 담수 유입 (run off) 등의 육상 요소 또한 고려되어야 함.
- 기후의 자연적 변동성과 전 지구 및 북극권 인간 활동에 의한 인위적 변동성을 구분하고 각각의 기여도를 정량적으로 평가해야 함.

○ 향후 연구개발 전략



향후 연구개발 추진 전략

- 규명된 메커니즘을 기반으로 미래 북극 온난화 정도를 예측하는 인공지능 시스템을 개발, 다중 시나리오 기반의 정보 제공을 통해 정책결정자의 의사결정에 도움을 주고, 도래할 북극해 개발 시대에서 북극항로의 개발/활용에서 경제성과 안전을 확보할 수 있는 실용적 연구개발을 추진함.
- 추진 전략은 본 연구개발의 성과를 활용하여 다음과 같이 4단계(3 + 옵션1)로 구성됨.

1. 빙하, 동토, 식생, 지형 등 육상 요소와 인간활동 등 추가 인자의 편입과 모델 확장 및 고도화 (본 연구개발의 성과인 북극 증폭 지수 모델 활용)
2. 시공간적으로 상세화한 북극해 환경변화 분석 및 개선된 북극 증폭 지수 모델의 예측 결과로부터 해빙 취약 지역의 분류, 그들의 시공간적 연결성과 해빙 거동 반응성 평가 (본 연구개발의 성과인 개선/신규개발된 원격탐사 산출물 활용)
3. 다중 기후 예측 시나리오별 해빙/해양 환경 변화 예측을 통해 최적의 경제성과 안전성을 확보하는 항로를 계산하는 시스템 개발 구축 및 과거 항적 또는 상선의 테스트 드라이브를 통한 검증
4. (옵션) 항로 활성화 및 자원개발 등, 북극권 인간활동의 증가에 따른 해빙/해양 환경의 인위적 변화와 그로 인한 기후 피드백 메커니즘 및 한반도 기후변동에 미치는 영향 분석

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

○ 본 연구개발을 통해 확보한 위성 산출물 생산 기술들은 각각 기존 대비 다음과 같은 특장점을 바탕으로 높은 활용성을 가질 것으로 기대됨.

- 해빙 유형 산출
  - (기존) 수동마이크로파 관측 기반, 공간해상도 25 km, 시간해상도 1일, 3종 (다년빙/단년빙/해수) 분류, 또는 해빙 차트 기반, 공간해상도 수~수십 km, 시간해상도 1~2주일 (7~14일), 10여종 분류
  - (개발) 영상레이더(SAR) 관측 기반, 공간해상도 2 km (수동마이크로파 대비 1,250% 향상), 시간해상도 3일 (해빙 차트 대비 233% 향상), 5종 (다년빙/단년빙3종/해수) 분류 (수동마이크로파 대비 166% 향상)
  - (활용) 주변 해빙 환경의 고해상 최신 정보 파악이 요구되는 빙해역 선박 운항에 있어 항로 안내, 최적화 및 위험 회피에 필수 기반 자료 제공
  - (활용) 수동마이크로파 관측에서 융빙기에 다년빙이 단년빙으로 오판별 되어 발생하는 해빙 나이의 과소추정 문제를 보완
- 해빙 이동/변형 산출
  - (기존) 수동마이크로파 관측 기반, 공간해상도 25 km, 시간해상도 1일, 또는 영상레이더 기반, 공간해상도 10 km, 시간해상도 3일, 변형의 경우 2020년부터 제공
  - (개발) 영상레이더(SAR) 관측 기반, 공간해상도 2 km (동일 영상레이더 대비 500% 향상), 시간해상도 3일, 변형의 경우 2015년부터 생산 가능 (동일 영상레이더 대비 5년 앞선 시기)
  - (활용) 향상된 공간해상도로 regional scale의 변형 분석이 가능하여 해빙 유형 산출 결과와 결합하여 현재는 존재하지 않는 산출물인 리드(Lead) 정보 산출 및 이를 활용한 리드에서의 해양-대기 열/물질 교환 상세화를 통해 열역학 기반의 해빙 변화 메커니즘 및 수치모델 성능 개선
  - (활용) 높은 정확도로 기존 저해상도 수동마이크로파 관측에서 발생하는 이동 속도의 과소추정 문제를 해결할 수 있으며, 또한 바람/해류장과의 관계에서 항력(drag) 계수를 구함으로써 해빙의 macroscopic 거칠기 추정
- 해빙 두께 산출
  - (기존) 연중 결빙기 관측(약 6개월)만 유효, 두꺼운 해빙의 경우 레이더/레이저 고도계 기반, 공간해상도 25 km, 시간해상도 28일, 얇은 해빙의 경우 수동마이크

로파 관측 기반, 공간해상도 35 km, 시간해상도 1일

(개발) 연중 제외 전체 관측 유효, 수동마이크로파 관측 기반, 공간해상도 25 km, 시간해상도 1일 (고도계 대비 약 2,800% 향상), 전체 해빙 두께 (얇은~두꺼운) 관측 유효

(활용) 해빙 두께의 연중 관측 결과 생산을 통해 융빙기 해빙 부피의 산정 정확도 향상 및 두꺼운 해빙 관측의 시간해상도 대폭 증가와 해빙 이동장의 결합을 통해 해빙 두께 변화의 열역학적 과정과 동역학적 과정의 영향 분리

(활용) 해빙 생애주기 전체에 대한 수치모델 튜닝/자료동화 또는 계산 결과의 검증

- 해빙 강도 산출

(기존) 기존 산출물 없음.

(개발) 영상레이더 기반 및 재분석장 표층 기온 기반 해빙 굽힘강도 산출 모델 개발, 재분석장의 시공간 해상도와 동일

(활용) 해빙 취약성 분포 분석을 바탕으로 항로 개발 시스템에 활용

- 해빙 리드/융빙호 분포 산출

(기존) 리드 산출물 없음 (변형 산출물에서 간접 계산), 융빙호 산출물은 다중분광 기반 공간해상도 1.2 km, 시간해상도 1일

(개발) 레이저 고도계 기계학습 기반 리드 탐지 모델 개발, 고해상 다중분광 기반 융빙호 탐지 모델 개발

(활용) 리드/융빙호에서의 해양-대기 열/물질 교환 상세화를 통해 열역학 기반의 해빙 변화 메커니즘 및 수치모델 정밀도 개선

- 해빙 파편화 지수 산출

(기존) 기존 산출물 없음. 유사 개념의 유빙크기분포(floe size distribution) 산출 방법은 있으나, 적용 조건 제약이 큼

(개발) 수동마이크로파 기반, 공간해상도 25 km, 시간해상도 1일

(활용) 해빙이 녹는 속도 및 시점 예측에 있어 기존의 해빙 농도를 파편화 지수로 대체하여 활용

- 해빙 거칠기 산출

(기존) 현장/위성 레이저 관측, 시공간적 관측 범위의 제약이 큼

(개발) 수동마이크로파 관측 기반, 공간해상도 25~40 km, 시간해상도 2~3일

(활용) 시기적 결측 없는 해빙의 계절적 특성 분석 기반 활용

(활용) 과거 위성 데이터에의 적용 확장을 통해 장기 변화를 정밀하게 파악할 수 있는 자료 복원

KOPRI 극지연구소

- 해빙 표면온도 산출

  (기존) 광학(MODIS) 기반 산출물이 대표적이나 구름 등에 의한 결측 많음

  (개발) 인공지능을 이용한 재분석장 기상장 기반의 결측 없는 해빙 표면온도 산출

  (활용) 개발된 해빙 표면온도를 이용하여 북극권 전체의 결측 없는 복사강제력 산출 활용

- 북극권 복사강제력 산출

  (기존) 위성 원격탐사 기반으로는 주로 단파(알베도) 복사강제력 산출물로 제한

  (개발) 극지역의 극야 및 해빙 존재로 극지역 최적화된 복사강제력 산출을 위해 해빙 온도 기반의 장파 복사강제력 산출 추가

  (활용) 단파/장파 복사강제력 분리 구조를 통해, 해빙 지역의 순복사 에너지 유입량 변화를 연도별·계절별로 분석, 현재 기후 모델의 상단 대기 TOA 에너지 플럭스와 지표 에너지 불균형(BSRN 등) 사이의 차이를 해소할 수 있는 정교한 해빙 지역 총 복사강제력 제공

  (활용) 총 복사강제력과 기온 사이의 민감도 계수를 도출함으로써, 해빙 시스템이 가진 자기 증폭 특성(positive feedback loop) 정량화 및 지역적 민감도 해석

○ 기존 연구에서 도출된 북극 온난화의 지역성을 주도하는 요소 간의 상호작용 및 규명된 메커니즘과 더불어 육상 환경 요소(빙하, 동토, 식생) 및 인위적 강제력을 포함한 확장 시스템을 구축하여 해빙 취약성과 거동 반응의 시공간적 차별성을 더욱 정밀하게 규명하여 북극 항로 연구개발에 기초정보로써 활용

○ 상기 개별적 활용성 외에도 핵심 기후변수 생산을 통해 기후환경 예측과 활용에 사용될 수 있으며, “1. 향후 연구방향“에 제시한 차기 연구개발 전략이 그 예시임.

○ 다음과 같은 경제적 기대 가치와 수익 모델을 고려할 수 있음.

분야	기대 가치	수익 모델
해운/물류	운항 비용 절감, 사고 감소	항로 서비스, 위험 분석, 구독형 정보
에너지/자원	개발 비용 절감, 안전성 향상	구조물 설계, 위험 지도
기후/금융	ESG・금융 시장 연계 수익	복사강제력・기후위험 데이터 판매
정부/국제기구	안정적 장기 수익	정책 데이터, 위탁 사업
AI/데이터 산업	데이터 기반 플랫폼 수익	API, 기후 AI 모델

○ 본 연구개발 및 향후 연구개발은 다음과 같은 국가 정책 및 추진 전략에 부합함.

- 제1차 극지활동 진흥 기본계획 2025년도 시행계획과 맞물려 생산된 해빙 분류, 이동, 변형, 두께 산출 자료는 극지 항로 활용성과 안전성 확보에 필수적 기반자료로, 해운-물류 및 자율운항선박 산업과의 연계를 통해 항로 예측-해양환경 대응 시스템 성능을 개선하고, 기술이전과 실증사업으로 활용 가능함.
- 특히, 북극 증폭 지수를 활용한 다중 시나리오 기반 정책 결정 지원체계 구축이 가능하며, 이러한 내용은 정부의 기후안보 대응 역량 제고에 실질적 기여 가능함
- 본 성과는 국제 과학외교 및 글로벌 협정 대응에 필요한 기초자료로써 높은 전략적 가치를 지니며, 향후 극지 조약 체제 내 협상력 강화 및 극지 자원 확보 전략에 직간접적 영향 미칠 수 있을 것으로 기대됨
- 본 연구개발 성과들은 12대 국가전략기술 중 우주항공-해양, 인공지능, 첨단센서 기술 분야와 직접적 연계가 가능한 특성이 있으며, 특히 위성기반 SAR 해석 기술과 인공지능 기후모델은 정부가 추진 중인 전략기술-정책-산업 간 연계에 부합하는 대표적 사례로써 활용 가능함
- 극지정보 기반 항로예측서비스 및 극지데이터 분석 AI 스타트업 등 신산업 창출이 가능함
- 본 연구개발 산출물을 기반으로 북극항로 개척, 극지환경 변화 탐사, 위성영상 판독 등과 같은 특수목적의 특화 분야 교육을 위한 내용으로 개발될 수 있으며, 극지 기반 현장교육과 연계한 융합형 인재양성 체계 구축에 기여할 수 있고, 제5차 과학기술기본계획 지역혁신 거점 및 특화대학원 육성 전략과 부합하여 활용 가능함

○ 향후 본과제 개발 산출물의 엔드유저 공급을 위한 STAR 시스템의 활성화를 위해 API 제공 등의 UX 강화, 데이터톤 개최 등의 이벤트 연계 홍보, 신규 데이터 공급 알림 등 사용자 재방문 유도 등을 적극 추진함.

제 6 장 참고문헌

Chi, J. and Kim, H.-C., 2017. Prediction of arctic sea ice concentration using a fully data driven deep neural network, *Remote Sensing*, 9(12), 1305.

Chi, J. and Kim, H.-c., 2018. Sea ice type classification with optical remote sensing data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1239 – 1249.

Chi, J., & Kim, H. C. (2021). Retrieval of daily sea ice thickness from AMSR2 passive microwave data using ensemble convolutional neural networks. *GIScience & Remote Sensing*, 58(6), 812-830.

Chi, J., Kim, H.-c., Lee, S., and Crawford, M.M., 2019. Deep learning based retrieval algorithm for Arctic sea ice concentration from AMSR2 passive microwave and MODIS optical data, *Remote Sensing of Environment*, 231, 111204.

Choudhury, B.J., Schmugge, T.J., Chang, A., and Newton, R.W., 1979. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils, *Journal of Geophysical Research*, 84(C9), 5699 – 5706.

D'Sa, E.J. and Kim, H.-C., 2017. Surface gradients in dissolved organic matter absorption and fluorescence properties along the New Zealand sector of the Southern Ocean, *Frontiers in Marine Science*, 4, 21.

Han, D., Kim, Y.J., Im, J., Lee, S., Lee, Y., and Kim, H.-c., 2018. The estimation of Arctic air temperature in summer based on machine learning approaches using IABP buoy and AMSR2 satellite data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1261 – 1272.

Han, H. and Kim, H.-c., 2018. Evaluation of summer passive microwave sea ice concentrations in the Chukchi Sea based on KOMPSAT-5 SAR and numerical weather prediction data, *Remote Sensing of Environment*, 209, 343 – 362.

Han, H. and Lee, C.-K., 2018. Analysis of ice velocity variations of Nansen Ice Shelf, East Antarctica, from 2000 to 2017 using Landsat multispectral image matching, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1165 – 1178.

KOPRI 극지연구소

Han, H. and Lee, H., 2018. Glacial and tidal strain of landfast sea ice in Terra Nova Bay, East Antarctica, observed by interferometric SAR techniques, *Remote Sensing of Environment*, 209, 41 – 51.

Han, H., Hong, S.-H., Kim, H.-c., Chae, T.-B., and Choi, H.-J., 2017. A study of the feasibility of using KOMPSAT-5 SAR data to map sea ice in the Chukchi Sea in late summer, *Remote Sensing Letters*, 8(5), 468 – 477.

Han, H., Lee, S., Kim, J.-I., Kim, S.H., and Kim, H.-c., 2019. Changes in a giant iceberg created from the collapse of the Larsen C Ice Shelf, Antarctic Peninsula, derived from Sentinel-1 and CryoSat-2 data, *Remote Sensing*, 11(4), 404.

Hong, S.-H., Wdowinski, S., Amelung, F., Kim, H.-C., Won, J.-S., and Kim, S.-W., 2018. Using TanDEM-X pursuit monostatic observations with a large perpendicular baseline to extract glacial topography, *Remote Sensing*, 10(11), 1851.

Hyun, C.-U. and Kim, H.-c., 2017. A feasibility study of sea ice motion and deformation measurements using multi-sensor high-resolution optical satellite images, *Remote Sensing*, 9(9), 930.

Hyun, C.-U. and Kim, H.-c., 2018. Arctic sea ice motion measurement using time-series high-resolution optical satellite images and feature tracking techniques, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1215 – 1227.

Hyun, C.-U., Kim, J.-H., Han, H., and Kim, H.-c., 2019. Mosaicking opportunistically acquired very high-resolution helicopter-borne images over drifting sea ice using COTS sensors, *Sensors*, 19(5), 1251.

Inoue, J., Hori, M.E., Enomoto, T., and Kikuchi, T., 2011. Intercomparison of surface heat transfer near the Arctic marginal ice zone for multiple reanalyses: A case study of September 2009, *Sola*, 7, 57 – 60.

Kim, H., Park, J., Kim, H.-C., and Son, Y.B., 2017. Climatological variability of multisatellite-derived sea surface temperature, sea ice concentration, chlorophyll-a in the Arctic Ocean, *Korean Journal of Remote Sensing*, 33(6-1), 901 – 915.

KOPRI 극지연구소

Kim, H.-c. and Chae, T.-B., 2019. Status of Korean research activity on Arctic sea ice monitoring using KOMPSAT-series satellite. *The Journal of The Korean Earth Science Society*, 40(4), 329 – 339.

Kim, H.-c., Han, H., Hyun, C.-U., Chi, J., Son, Y.-S., and Lee, S., 2018. Research on analytical technique for satellite observation of the Arctic sea ice, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1283 – 1298.

Kim, H.-c., Hong, S.-H., Park, S.-E., and Lee, H., 2018. Editorial : Polar remote sensing in Korea, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1155 – 1163.

Kim, I., Hahm, D., Park, K., Lee, Y., Choi, J.O., Zhang, M., Chen, L., Kim, H.-C., and Lee, S., 2017. Characteristics of the horizontal and vertical distributions of dimethyl sulfide throughout the Amundsen Sea Polynya, *Science of the Total Environment*, 584, 154 – 163.

Kim, J. I., Hyun, C. U., Han, H., & Kim, H. C. (2021). Digital surface model generation for drifting Arctic sea ice with low-textured surfaces based on drone images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 172, 147-159.

Kim, J. M., Kim, H. C., Park, J. W., Park, J., Seo, M., & Lee, S. M. (2025). Advanced algorithm for continuous melt onset detection on Arctic sea ice. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.

Kim, J. M., Kim, S. W., Sohn, B. J., Kim, H. C., Lee, S. M., Kwon, Y. J., ... & Pnyushkov, A. V. (2023). Estimation of summer pan-Arctic ice draft from satellite passive microwave observations. *Remote Sensing of Environment*, 295, 113662.

Kim, J. M., Sohn, B. J., Lee, S. M., Shi, H., Kwon, Y. J., Kim, S. W., & Kim, H. C. (2022). The estimation of the total freeboard of Arctic sea ice in winter using passive microwave satellite measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 39(10), 1611-1627.

Kim, J.-I. and Kim, H.-c., 2018. Performance comparison of matching cost functions for high-quality sea-ice surface model generation, *Korean Journal of Remote Sensing*,

34(6-2), 1251 - 1260.

Kim, J.-I., Hyun, C.-U., Han, H., and Kim, H.-c., 2019. Evaluation of matching costs for high-quality sea-ice surface reconstruction from aerial images, *Remote Sensing*, 11(9), 1055.

Kim, M., Kim, H. C., Im, J., Lee, S., & Han, H. (2020). Object-based landfast sea ice detection over West Antarctica using time series ALOS PALSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111782.

Kim, S., Kim, D.-j., and Kim, H.-c., 2018. Progressive degradation of an ice rumple in the Thwaites Ice Shelf, Antarctica, as observed from high-resolution digital elevation models, *Remote Sensing*, 10(8), 1236.

Kim, S.H., Kim, D.-j., and Kim, H.-c., 2018. Grounding iine of Campbell Glacier in Ross Sea derived from high-resolution digital elevation model, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(3), 545 - 552.

Kim, Y. J., Kim, H. C., Han, D., Lee, S., & Im, J. (2020). Prediction of monthly Arctic sea ice concentrations using satellite and reanalysis data based on convolutional neural networks. *The Cryosphere*, 14(3), 1083-1104.

Kim, Y. J., Kim, H. C., Han, D., Stroeve, J., & Im, J. (2025). Long-term prediction of Arctic sea ice concentrations using deep learning: Effects of surface temperature, radiation, and wind conditions. *Remote Sensing of Environment*, 318, 114568.

Kim, Y., Kim, D.-j., Kwon, U.-j., and Kim, H.-C., 2018. A study on the radiometric correction of Sentinel-1 HV data for Arctic sea ice detection, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1273 - 1282.

Korosov, A.A. and Park, J.-W., 2016. Very high resolution classification of Sentinel-1A data using segmentation and texture analysis. In: *Proc. Living Planet Symposium 2016*, Prague, Czech Republic, May 9 - 13, p. 44.

Kwon, Y. J., Hong, S., Park, J. W., Kim, S. H., Kim, J. M., & Kim, H. C. (2021). Spatial and Temporal Variability of Minimum Brightness Temperature at the 6.925 GHz Band

KOPRI 극지연구소

of AMSR2 for the Arctic and Antarctic Oceans. *Remote Sensing*, 13(11), 2122.

Lee, S. and Kim, H.-c., 2018. HyperSAS data for polar ocean environments observation and ocean color validation, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1203 - 1213.

Lee, S., Im, J., Kim, J., Kim, M., Shin, M., Kim, H.-C., and Quackenbush, L., 2016. Arctic sea ice thickness estimation from CryoSat-2 satellite data using machine learning-based lead detection, *Remote Sensing*, 8, 698.

Lee, S., Kim, H.-c., and Im, J., 2018. Arctic lead detection using a waveform mixture algorithm from CryoSat-2 data, *The Cryosphere*, 12(5), 1665 - 1679.

Oh, M. and Kim, H.-c., 2018. Coupling detection in sea ice of Bering Sea and Chukchi Sea: Information entropy approach, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1229 - 1238.

Park, G., Kim, H.-C., Lee, T., and Son, Y.B., 2018. Tracing the drift ice using the particle tracking method in the Arctic Ocean, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1299 - 1310.

KOPRI
극지연구소

Park, J. E., Kim, H. C., & Cho, K. H. (2022). Variability of Near-Surface Salinity in the Nordic Seas Over the Past Three Decades (1991-2019). *Frontiers in Marine Science*, 9, 969159.

Park, J. W., Korosov, A. A., Babiker, M., Won, J. S., Hansen, M. W., & Kim, H. C. (2020). Classification of sea ice types in Sentinel-1 synthetic aperture radar images. *The Cryosphere*, 14(8), 2629-2645.

Park, K., Hahm, D., Choi, J.O., Xu, S., Kim, H.-C., and Lee, S., 2019. Spatiotemporal variation in summer net community production in the Amundsen Sea Polynya: A self-organizing map analysis approach, *Continental Shelf Research*, 184, 21 - 29.

Seo, M., & Kim, H. C. (2024). Arctic Greening Trends: Change Points in Satellite-Derived Normalized Difference Vegetation Indexes and Their Correlation with Climate Variables over the Last Two Decades. *Remote Sensing*, 16(7), 1160.

Seo, M., Kim, H. C., Seong, N. H., Sim, S., & Han, K. S. (2023). Variability of surface radiation budget over Arctic during two recent decades from perspective of CERES and ERA5 data. *Remote Sensing*, 15(3), 829.

Seo, M., Lee, E., Lee, K.-s., Choi, S., Jin, D., Seong, N.-h., Han, H.-g., Kim, H.-C., and Han, K.-s., 2018. Comparative analysis of radiative flux based on satellite over Arctic, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-2), 1193 – 1202.

Seong, N. H., Kim, H. C., Choi, S., Jin, D., Jung, D., Sim, S., ... & Han, K. S. (2022). Evaluation of Sea Ice Radiative Forcing According to Surface Albedo and Skin Temperature over the Arctic from 1982 – 2015. *Remote Sensing*, 14(11), 2512.

Shahrezaei, I. H., & Kim, H. C. (2024). Directional wave scattering distribution modes analysis and synthesis of random ocean media roughness for sar electromagnetic interactions using feature fusion in dynamic sea states: A survey. *IEEE Access*, 12, 44351-44382.

Shahrezaei, I. H., & Kim, H. C. (2025). Sea-Ice Surface Types Characterization and SAR Volume Backscattering Properties in Response to Sea States Interactions Using Structural Feature Fusion. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.

Shahrezaei, I.H. and Kim, H.-c., 2019. Resolutional analysis of multiplicative high-frequency speckle noise based on SAR spatial de-speckling filter implementation and selection, *Remote Sensing*, 11(9), 1041.

Son, Y.-S. and Kim, H.-c., 2018. ASTER-derived high-resolution ice surface temperature for the Arctic coast, *Remote Sensing*, 10(5), 662.

Son, Y.-S. and Kim, H.-c., 2018. Empirical ocean color algorithms and bio-optical properties of the western coastal waters of Svalbard, Arctic, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 139, 272 – 283.

Stagg, B.J. and Charalampopoulos, T.T., 1991. Surface-roughness effects on the determination of optical properties of materials by the reflection method, *Applied Optics*, 30, 4113 – 4118.

Timco, G.W. and O'Brien, S., 1994. Flexural strength equation for sea ice, *Cold Regions Science and Technology*, 22(3), 285 – 298.

Wang, J.R. and Choudhury, B.J., 1981. Remote sensing of soil moisture content, over bare field at 1.4 GHz frequency, *Journal of Geophysical Research*, 86(C6), 5277 – 5282.

Wegmuller, U. and Matzler, C., 1999. Rough bare soil reflectivity model, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3), 1391 – 1395.

Yoon, J. E., Park, J., & Kim, H. C. (2025). Spatial Regionalization of the Arctic Ocean Based on Ocean Physical Property. *Remote Sensing*, 17(6), 1065.

KOPRI
극지연구소

[별첨 1] 위탁연구과제 최종보고서 1

위탁연구 최종보고서

<table>
<tr><td colspan="3">본 과 제 명
(연구책임자)</td><td colspan="6">북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구 (김현철)</td></tr>
<tr><td rowspan="11">위
탁
과
제</td><td rowspan="2">과제명</td><td>국문</td><td colspan="6">위성관측을 통한 북극 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출 및 분석</td></tr>
<tr><td>영문</td><td colspan="6">Estimation and Analysis of Sea Ice changes caused Radiative Forcing over Arctic Using Satellite data</td></tr>
<tr><td rowspan="5">연구책임자</td><td>성명</td><td>한경수</td><td>과학기술인등록번호</td><td colspan="3">1012 8256</td></tr>
<tr><td>부서</td><td>공간정보시스템공학과</td><td>생년월일</td><td colspan="3">1969.03.17</td></tr>
<tr><td>직위/직급</td><td>교수</td><td>전공(학위)</td><td colspan="3">생태기후원격탐사(박사)</td></tr>
<tr><td>전화번호</td><td>051-629-6659</td><td>휴대폰</td><td colspan="3">010-6366-9583</td></tr>
<tr><td>FAX</td><td>051-629-6653</td><td>e-mail</td><td colspan="3">kyung-soo.han@pknu.ac.kr</td></tr>
<tr><td rowspan="3">협약 및
관리담당자</td><td>성명</td><td>서세화</td><td>전화</td><td colspan="3">051-629-6270</td></tr>
<tr><td>소속</td><td>부경대학교 산학협력단</td><td>E-mail</td><td colspan="3">sehwa0207@pknu.ac.kr</td></tr>
<tr><td>주소</td><td colspan="5">부산광역시 남구 용소로 45(부경대학교 대연캠퍼스) 본관 111호</td></tr>
<tr><td rowspan="10">연 구 기 간 /
연 구 비 /
참 여 연 구 원</td><td colspan="2">연구연차</td><td colspan="2">연구기간</td><td>연구비
(백만원)</td><td>참여연구원수</td></tr>
<tr><td colspan="2">총연구기간</td><td colspan="2">2020. 1. 1. ~2025. 12. 31</td><td>210백만원</td><td>16</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1단계</td><td>1차년도</td><td colspan="2">2020. 1. 1. ~2020. 12. 31</td><td>40백만원</td><td>8</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="2">2021. 1. 1. ~2021. 12. 31</td><td>40백만원</td><td>6</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="2">2022. 1. 1. ~2022. 12. 31</td><td>40백만원</td><td>8</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2단계</td><td>1차년도</td><td colspan="2">2023. 1. 1. ~2023. 12. 31</td><td>40백만원</td><td>10</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="2">2024. 1. 1. ~2024. 12. 31</td><td>25백만원</td><td>6</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="2">2025. 1. 1. ~2025. 12. 31</td><td>25백만원</td><td>8</td></tr>
</table>

본인은 위 연구과제를 수행함에 있어 귀소와의 제반협약사항을 준수하여 본 위탁연구를 성실히 수행하고자 별첨과 같이 연구계획서를 제출합니다.

2025. 04. 14.

연구책임자 : 한경수 (인)

위 연구책임자는 당 기관 소속직원으로서 연구를 효과적으로 완수할 수 있게 하기위하여 다음 사항을 성실히 이행하겠습니다.

1. 연구수행에 대한 종합적인 책임
2. 연구시설, 인력 및 행정의 우선적지원
3. 연구개발비의 관리, 사용 및 관리자 지정

2025 . 04. 14.

위탁연구기관명 : 부경대학교 산학협력단

위탁연구기관장 : 오정환

극지연구소장 귀하

극지연구소

위탁연구 최종보고서

<table>
<tr><td colspan="3">본 과 제 명
(연구책임자)</td><td colspan="6">북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구 (김현철)</td></tr>
<tr><td rowspan="10">위
탁
과
제</td><td rowspan="2">과제명</td><td>국문</td><td colspan="6">위성관측을 통한 북극 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출 및 분석</td></tr>
<tr><td>영문</td><td colspan="6">Estimation and Analysis of Sea Ice changes caused Radiative Forcing over Arctic Using Satellite data</td></tr>
<tr><td rowspan="5">연구책임자</td><td colspan="2">성명</td><td>한경수</td><td>과학기술인등록번호</td><td colspan="2">1012 8256</td></tr>
<tr><td colspan="2">부서</td><td>공간정보시스템공학과</td><td>생년월일</td><td colspan="2">1969.03.17</td></tr>
<tr><td colspan="2">직위/직급</td><td>교수</td><td>전공(학위)</td><td colspan="2">생태기후원격탐사(박사)</td></tr>
<tr><td colspan="2">전화번호</td><td>051-629-6659</td><td>휴대폰</td><td colspan="2">010-6366-9583</td></tr>
<tr><td colspan="2">FAX</td><td>051-629-6653</td><td>e-mail</td><td colspan="2">kyung-soo.han@pknu.ac.kr</td></tr>
<tr><td rowspan="3">협약 및
관리담당자</td><td>성명</td><td colspan="2">서세화</td><td>전화</td><td colspan="2">051-629-6270</td></tr>
<tr><td>소속</td><td colspan="2">부경대학교 산학협력단</td><td>E-mail</td><td colspan="2">sehwa0207@pknu.ac.kr</td></tr>
<tr><td>주소</td><td colspan="5">부산광역시 남구 용소로 45(부경대학교 대연캠퍼스) 본관 111호</td></tr>
<tr><td rowspan="9">연 구 기 간 /
연 구 비 /
참 여 연 구 원</td><td colspan="2">연구연차</td><td colspan="2">연구기간</td><td>연구비
(백만원)</td><td>참여연구원수</td></tr>
<tr><td colspan="2">총연구기간</td><td colspan="2">2020. 1. 1. ~2025. 12. 31</td><td>210백만원</td><td>16</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1단계</td><td>1차년도</td><td colspan="2">2020. 1. 1. ~2020. 12. 31</td><td>40백만원</td><td>8</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="2">2021. 1. 1. ~2021. 12. 31</td><td>40백만원</td><td>6</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="2">2022. 1. 1. ~2022. 12. 31</td><td>40백만원</td><td>8</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2단계</td><td>1차년도</td><td colspan="2">2023. 1. 1. ~2023. 12. 31</td><td>40백만원</td><td>10</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="2">2024. 1. 1. ~2024. 12. 31</td><td>25백만원</td><td>6</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="2">2025. 1. 1. ~2025. 12. 31</td><td>25백만원</td><td>8</td></tr>
</table>

본인은 위 연구과제를 수행함에 있어 귀소와의 제반협약사항을 준수하여 본 위탁연구를 성실히 수행하고자 별첨과 같이 연구계획서를 제출합니다.

2025. 04. 14.

연구책임자 : 한경수 (인)

위 연구책임자는 당 기관 소속직원으로서 연구를 효과적으로 완수할 수 있게 하기위하여 다음 사항을 성실히 이행하겠습니다.

1. 연구수행에 대한 종합적인 책임
2. 연구시설, 인력 및 행정의 우선적지원
3. 연구개발비의 관리, 사용 및 관리자 지정

2025 . 04. 14.

위탁연구기관명 : 부경대학교 산학협력단

위탁연구기관장 : 오정환 (인)

극지연구소장 귀하

Ⅰ. 연구 실적

1. 연구개발 목표 달성도 및 평가 착안점

가. 연구개발 최종 목표

○ 북극 지역에서 해빙 변화에 따른 복사강제력을 산출하고 변화특성을 분석

- 북극 지역에 최적화된 복사강제력 산출기술 확보
- 북극 지역의 표면 복사강제력 특성 분석 및 이를 활용한 북극 에너지 변화 분석
- 북극 지역에서 해빙과 개빙의 변화가 복사강제력에 미치는 영향력 분석
- 백야·극야에 따른 장·단파 복사 에너지의 영향력을 정량적으로 분석
- 북극 지역에서 구름 유무에 따른 복사강제력의 특성 분석

나. 연구개발목표 및 달성도

(계획서상에서 제시한 기준에 대해 구체화된 정량·정성적 결과 제시)

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1. 위성/재분석자료를 활용한 북극 복사강제력 산출	1-1	북극 지역의 복사강제력 산출 기준 제시	- 선진기관 및 선행 연구에서 수행된 위성기반 복사강제력 산출 조건 정리 - 북극 지역의 복사강제력 산출의 기준 제시	100%
	1-2	북극 복사강제력산출을 위한 자료 수집 및 전처리	- 충분한 기간의 자료 취득 - 극지방에 최적화된 projection으로 변환 - Quality control을 이용한 최적 자료 sampling	100%
	1-3	북극 지역의 복사강제력 산출	- 북극 지역에 최적화된 복사강제력 산출	100%
2. 관측자료를 바탕으로 Radiative Kernel 평가	2-1	Radiative Kernel 추가 확보 및 특성 비교	- Radiative Kernel 추가 자료 수집 - 각 모델별 시공간 차이 비교	- 3가지 이상 기후모델 자료 수집 - 분석결과 제시 (100%)
	2-2	관측자료와 Raditive Kernel 자료 평가	- 지표변화(Albedo, Surface Temperature)에 따른 커널 기반 TOA Flux 변화량 산출 - 관측기반 TOA radiation과 패턴 비교	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
3. 북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석	3-1	Albedo, Surface Temperature 기반 복사강제력 통합 및 분석	- 두가지 요인(Albedo, Surface Temperature) 통합하여 복사강제력 평가	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
	3-2	계절에 따른	- 월별 해빙 변화량에 따른 복사강제력	- 분석결과 제시

KOPRI 극지연구소

		주도적(Albedo, Surface Temperature) 요인 분석	특성 분석 - 계절에 따른 주도적 요인 파악	- 학술회의 발표 (100%)
	3-3	지역에 따른 복사강제력 특성 파악	- Warming에 대해 주도적 역할 하는 해역 경향성 파악	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
4. DNN 기반 해빙표면온도 산출	4-1	IST 산출을 위한 입력자료 선정	북극의 해빙표면온도와 밀접한 변수 선정 MODIS IST와의 변수별 상관관계 분석	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
	4-2	DNN기반 모델 구축	입력자료 및 hyperparameter 에 따른 모델 정확도 분석 Deep Neural Network (DNN)기반의 IST 산출 모델 구축	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
	4-3	타 위성 / In-situ 자료를 활용한 모델 평가	타 위성(MODIS IST)자료를 활용하여 DNN기반 IST 분포특성 분석 CREEL-Mass Balance Buoy 자료의 표면온도와 검증 수행	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
5. DNN 기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가	5-1	DNN 기반 IST를 바탕으로 복사강제력 산출	DNN기반 IST를 바탕으로 온도기반 복사강제력(Temperature-SIRF) 산출	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
	5-2	표면온도 자료에 따른 복사강제력 차이 분석	2차년도 연구결과(표면온도 자료로 ERA5 사용)와 당해연도 산출된 복사강제력 비교 및 평가	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
6. 복사강제력 기반 Feedback 평가	6-1	Net-SIRF를 활용한 Feedback 산출	- 복사강제력 기반의 Feedback 산출식 제시 - Net-SIRF 기반 Feedback 산출, 평가 - 선행연구의 접근방식과 본 연구의 결과 비교	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (10%)
7. AI기반 IST 원형 알고리즘 개발	7-1	IST 산출을 위한 입력자료 선정	- 북극의 해빙표면온도와 관련 있는 기장인자 List-up - 입력변수 상관성, 독립성 평가를 통한 입력자료 후보 선정	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
	7-2	IST 산출을 위한 위성기반 및 재분석 자료 수집 및 전처리	- 장기간 연구를 위한 충분한 기간의 자료 취득 및 projection 변환 - 최적의 입력자료 sampling을 위한 quality control	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
	7-3	AI기반 IST 알고리즘 구축(1)	- 선행연구를 바탕으로 북극 연구 및 시계열 Gap-filling에 활용된 AI 기반 알고리즘 구축(I)	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
8. AI기반 IST 알고리즘 평가	8-1	AI기반 IST 알고리즘 구축(II)	- 선행연구를 바탕으로 북극 연구 및 시계열 Gap-filling에 활용된 AI 기반 알고리즘 구축(II)	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)
	8-2	각 알고리즘에 따른 북극 지역의 IST 시공간 특성	- 북극권 지역을 중심으로 알고리즘에 따른 연구기간 동안의 IST 특성 분석 - 다양한 해역 / 계절 / 기상인자에	- 분석결과 제시 - 학술회의 발표 (100%)

		분석	따른 시·공간 특성 분석	
	8-3	현장자료 및 타 위성자료를 활용한 AI 기반의 IST 산출물 자료 검증/비교	- 타 위성자료 및 현장 관측자료와의 비교/검증을 통하여 AI 기반의 IST 산출물 정확도 제시 - 해역 및 계절에 따른 특징 분석 수행	-분석결과 제시 -학술화의 발표 (100%)
9. 복사강제력 기반 Feedback 평가	9-1	최종 선택된 AI 기반의 IST를 바탕으로 복사강제력 산출	- 최종 선택된 IST 산출물을 바탕으로 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출	- 분석결과 제시 - 10년이상 자료 - 학술회의 발표 (100%)
	9-2	1단계 연구결과(복사강제력)과 비교 및 특성 분석	- 1단계에서 제시한 복사강제력과의 비교 및 계절, 지역에 따른 특성 분석	- 분석결과 제시 - 10년이상 자료 - 학술회의 발표 (100%)
	9-3	복사강제력을 활용한 Feedback 평가	- 복사강제력을 활용하여 Feedback 산출 및 선행연구와 비교	- 분석결과 제시 - 10년이상 자료 - 학술회의 발표 (100%)

KOPRI 극지연구소

다. 연구수행 세부 내용 및 결과

□ 성과목표 1: 위성/재분석자료를 활용한 북극 복사강제력 산출

○ 세부목표 1-1: 북극 지역의 복사강제력 산출 기준 제시

연 구 내 용	연 구 결 과
- 선진기관 및 선행 연구에서 수행된 위성기반 복사강제력 산출 조건 정리 및 산출 기준 제시	- Cryosphere Radiative Forcing 관련 연구 동향 : Flanner et al., (2011)의 연구에서 1979년부터 2008년까지 북극을 포함한 북극권의 영역에서 빙권 변화에 의한 복사강제력 산출을 통해 빙권의 냉각효과 0.15~0.32 W/m2 감소 : Cao et al., (2015)의 연구에서 1982년부터 2009년까지 북극권에 대한 Sea Ice Radiative Forcing 연구를 수행 : CLARA-A1, ERA-intreim, MERRA surface albedo 자료를 활용하여 해빙지역의 shortwave radiative forcing 산출을 통해 해빙감소로 인한 0.20 ± 0.05 W/m2 증가 경향 도출 : Pistone et al., (2014)의 연구에서 위도 60도 이상인 북극 해역에 대해 CERES Plantery Albedo 자료를 활용하여 albedo-SIRF를 산출하여 북반구에서 해빙 감소로 인하여 SIRF 0.43 증가 확인 : 북위 48.5도 이상인 지역에 한하여 CERES EBAF 자료를 활용하여 1982년부터 2015년까지 북극 해역에 연간 연간 1.82 ± 0.07 W/m2 의 일사량이 증가하여 sea ice albedo의 변화 발생 - 복사강제력 산출 방법 : 위 연구에서 사용되는 단파 영역의 지표 복사강제력의 산출식은 다음과 같음 $$SSRF = R_s \times (a_1 - a_2)$$: R_s는 surface incoming solar radiation이며, a_1는 해당 지표의 변화가 일어나기 전의 알베도, a_2는 지표의 변화가 일어난 이후의 알베도 값을 의미 : 대부분의 연구에서 알베도 값은 월평균 자료를 사용 : Flanner et al.,(2011)은 radiative kernel을 활용하여 빙권에서의 눈과 얼음의 변화에 따른 알베도 변화가 복사강제력으로 어떻게 표현되는지 연구를 진행 $$CrRF(t,R) = \frac{1}{A(R)} \int_R S_x(t,r) \frac{\partial \alpha}{\partial S_x} \frac{\partial F}{\partial \alpha} dA(r)$$: $CrRF(t,R)$는 시간 t에 따른 해당 지역 R의 빙권 또는 눈에서의 알베도가 대기 상단에 영향을 미치는 radiative forcing

	: $A(R)$은 전체 지역을 의미하며, S_x는 해당 지역의 눈 또는 얼음 비율을 나타냄 : $\frac{\partial \alpha}{\partial S_x}$는 눈 또는 얼음 비율 변화에 따른 알베도 변화, $\frac{\partial F}{\partial \alpha}$는 지표면 알베도 변화에 따른 대기 상단의 flux를 의미

○ 세부목표 1-2: 북극 복사강제력 산출을 위한 자료 수집 및 전처리

<table>
<tr><th>연 구 내 용</th><th>연 구 결 과</th></tr>
<tr><td>- 충분한 기간의 자료 취득</td><td>- Albedo : EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF)
: 본 자료는 CLARA-A1-SAL Dataset (Riihelä et al. 2013)을 개선한 자료
: 자료의 정확도는 Greenland Summit 지역의 실측 자료와 비교한 결과, RMSE 0.044, Mean relative retrieval difference [%] -3.88로 나타남
CM SAF CLARA-A2-SAL
<table>
<tr><td>Sensor/Platform</td><td>AVHRR</td></tr>
<tr><td>Spatial resolution</td><td>0.25 degree</td></tr>
<tr><td>Spatial coverage</td><td>N: 90, S: -90, E: 180, W: -180</td></tr>
<tr><td>Temporal resolution</td><td>Monthly</td></tr>
<tr><td>Temporal coverage</td><td>1982~2015</td></tr>
</table>
- Skin Temperature의 정의 및 활용
:표면 에너지 플럭스의 변화에 즉각 반응하는 지표 최상층의 온도를 의미
: 기후 변화 감지 및 지표 에너지 균형 분석에 핵심적인 변수로 활용
ERA5 skin temperature
<table>
<tr><td>Sensor/Platform</td><td>AVHRR</td></tr>
<tr><td>Spatial resolution</td><td>0.25 degree</td></tr>
<tr><td>Spatial coverage</td><td>N: 90, S: -90, E: 180, W: -180</td></tr>
<tr><td>Temporal resolution</td><td>Monthly</td></tr>
<tr><td>Temporal coverage</td><td>1982~2015</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

KOPRI 극지연구소

- Sea Ice Concentration

: 해빙 농도는 단위가 없는 항이며, 얼음이 덮여있는 영역을 상대적인 양으로 설명

: 보편적으로 위성기반 해빙농도 자료는 해당 격자 안에 얼마나 해빙이 덮여있는지를 표출하며 농도는 전형적으로 % 단위

: 현재 다양한 passive microwave 센서들을 활용하여 생성된 자료가 활용중이며, NOAA Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature에서 제공하는 해빙농도 자료를 활용

표 142. NSIDC Sea Ice Concentration

Sensor/Platform	Multi Microwave sensors
Spatial resolution	0.25 degree
Spatial coverage	N: 90, S: -90, E: 180, W: -180
Temporal resolution	daily
Temporal coverage	1982~2015

- Radiative Kernel

: 복사 커널(Radiative Kernel은 복사 관련 상태 변수의 작은 섭동이 지구의 에너지 균형에 어떻게 영향을 미치는지 설명

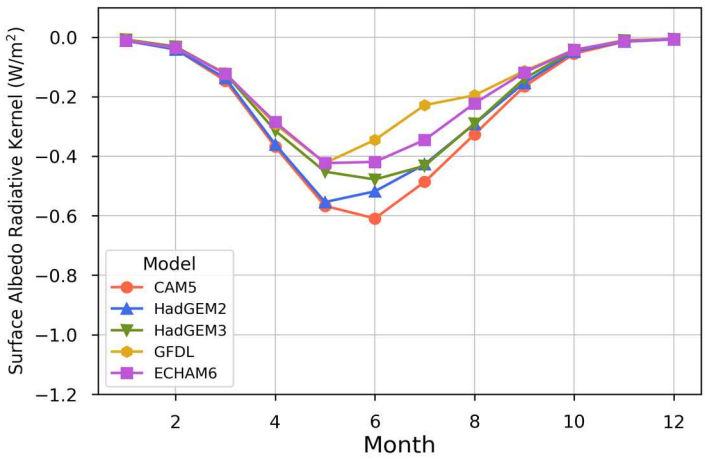
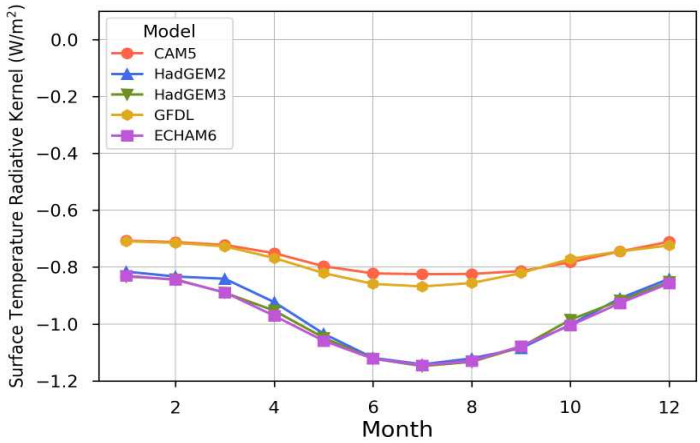
: GCM들에 따라 복사 커널을 계산하는 데 사용되는 대기 상태 기후 데이터의 기간과 종류는 매우 다양

: GCM에 따른 불확실성을 제거하고자 총 5가지의 GCM 기반의 복사 커널을 수집하였다: Community Atmosphere Model version 5 (CAM5) , Hadley Centre Global Environment Model version 2 (HadGEM2), Hadley Centre Global Environment Model version 3 (HadGEM3), Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), European Center and Hamburg model version 6 (ECHAM6)

: 본 연구에서는 all-sky 기준으로 surface albedo와 skin temperature 두 종류의 복사 커널을 사용

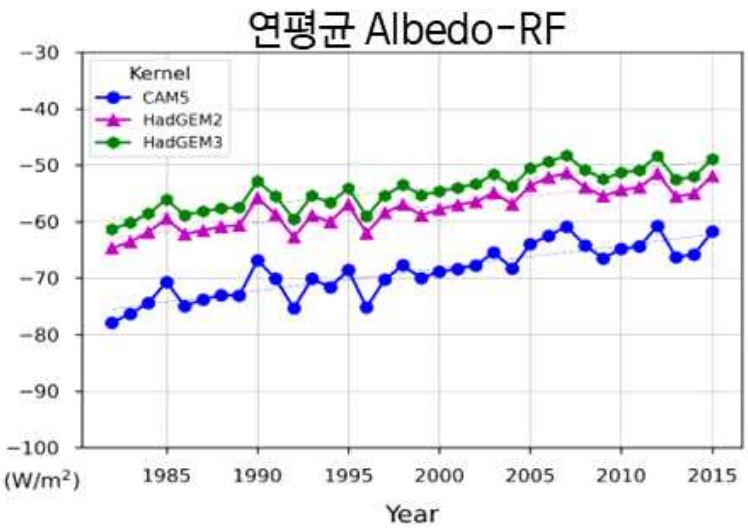
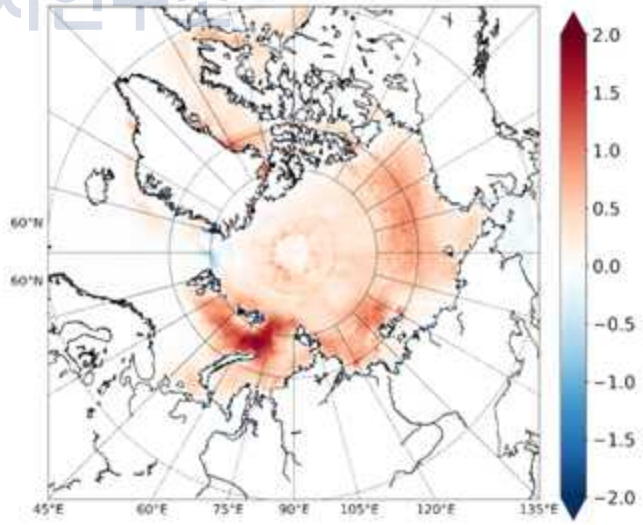
- Surface albedo Radiative Kernel

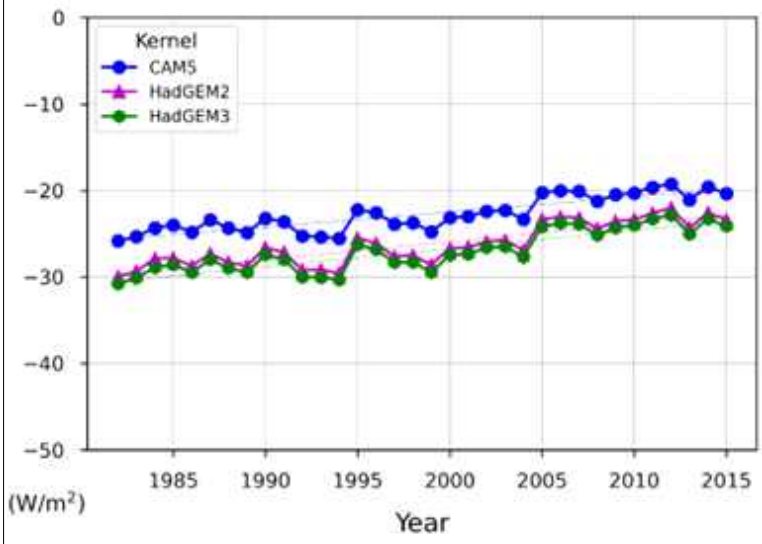
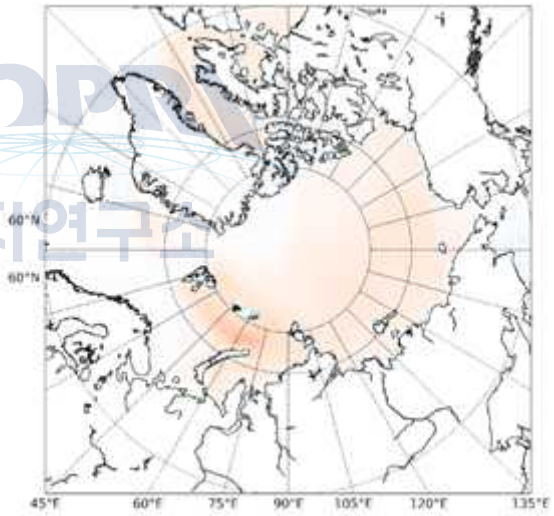
: surface albedo 복사 커널은 표면의 albedo가 1% 변화할 때, radiative flux에 미치는 에너지양 (W/m2)을 의미

	 GCM에 따른 surface albedo 복사 커널들의 월평균 시계열 분포 : 전체적으로 유사한 분포특성이 나타나지만, 5~6월에는 GCM에 따라 다른 특성 : CAM5 model은 여름철에 알베도의 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타나며, 반대로 GFDL는 상대적으로 albedo 영향이 다른 모델에 비해 낮게 나타남 - Surface Temperature Radiative kernel : surface temperature 복사 커널은 표면 온도가 1K 변화할 때,radiative flux에 미치는 에너지양 (W/m2)을 의미 : surface temperature 커널은 surface albedo 커널에 비해 전체적으로 더 큰 영향력을 가지지만, 계절별 변동성은 작게 나타남  GCM에 따른 surface temperature 복사 커널들의 월평균 시계열 분포
- 극지방에 최적화된 projection으로 변환 및 Quality control을 이용한 최적 자료 sampling	- Reprojection : 최소 거리법 혹은 Great Circle Distance를 이용한 기하 보정 및 remapping 수행 : 물리량의 손실이 적은 방식을 채택하여 수집된 위성/재분석 자료의 산출 조건에 적합한 시공간 해상도 일치

KOPRI 극지연구소

○ 세부목표 1-3: 북극 지역에 최적화된 복사강제력 산출

연 구 내 용	연 구 결 과
- 북극 지역에 최적화된 복사강제력 산출	 - 연평균 Albedo Radiative Forcing : 극야기간(10월~2월) 알베도 자료 부재, 본 연구에서 3월~9월 평균 진행 : CAM5 kernel의 경우, 상대적으로 albedo에 따른 북극의 냉각 효과 과대 추정 : kernel에 관계 없이 복사강제력 증가 경향으로 인한 냉각 효과 감소(약 0.4 W/m2/ year)  : 전반적인 해역에서 복사강제력 증가 경향, Barents 해 부근 Warming 심화 | | 바렌츠해 | 보퍼트해 | 척치해 | 베링해 | | --- | --- | --- | --- | --- | | 연간 변화량(W/m²) | +1.5 | +0.5 | +0.4 | -0.1 | : Greendland sea, Bering에서 복사강제력 감소 경향 - 연평균 Surface Temperature Radiative Forcing : 해빙 유무에 따라 IST 및 SST 적용

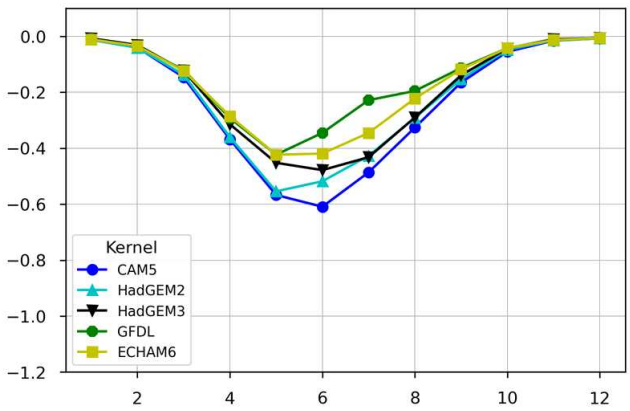
	: Albedo 복사강제력에 비해 상대적으로 낮게 산출 : CAM5 Kernel의 경우, 상대적으로 표면온도에 따른 북극의 냉각 효과 과소 추정  : Kernel에 관계 없이 복사강제력 증가 추세 (약 0.2 W/m2/ year)  : 전반적으로 모두 복사강제력 증가 경향, 바렌츠해 급격한 warming 발생 : 베링해에서 복사강제력 감소 경향 |	바렌츠해 | 보퍼트해 | 척치해 | 베링해 | | 연간 변화량(W/m²) | +0.7 | +0.3 | +0.3 | -0.1 |

□ 성과목표 2: 관측자료를 바탕으로 Radiative Kernel 평가

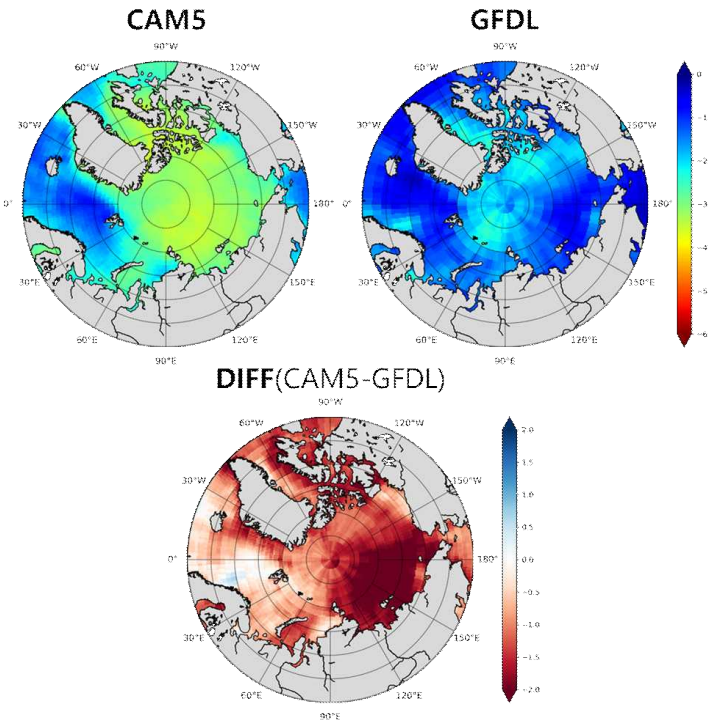
○ 세부목표 2-1: Radiative Kernel 추가 확보 및 특성 비교

연 구 내 용	연 구 결 과
Radiative Kernel 추가 자료 수집	1. 총 5개의 기후모델의 Radiative Kernel 자료 확보 - Surface Albedo radiative kernel: 표면의 albedo가 1%

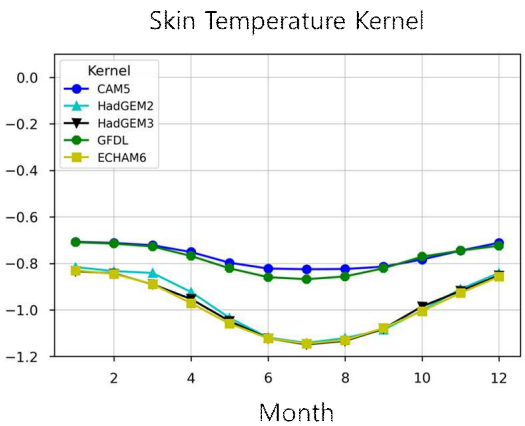
KOPRI 극지연구소

	변화할 때, radiative flux에 미치는 에너지양 (W/m2) - Surface temperature radiative kernel : 표면 온도가 1K 변화할 때, radiative flux에 미치는 에너지양 (W/m2) 1) CAM5 (Pendergrass et al., 2018) Spatial resolution : Lat 0.93˚, Lon 1.25˚ Temporal resolution : Monthly 2) HadGEM2 (Smith et al., 2018) Spatial resolution : Lat 1.24˚, Lon 1.87˚ Temporal resolution : Monthly 3) HadGEM2 (Smith et al., 2020) Spatial resolution : Lat 1.24˚, Lon 1.87˚ Temporal resolution : Monthly 4) ECHAM6 (Bjorn et al., 2013) Spatial resolution : Lat 1.87˚, Lon 1.87˚ Temporal resolution : Monthly 5) GFDL (Soden et al., 2008) Spatial resolution : Lat 2.0˚, Lon 2.5˚ Temporal resolution : Monthly
기후모델들의 시공간 차이 비교	1. Surface Albedo Kernel 1)북극권 Surface Albedo Kernel 월별 평균값 - 전체적인 경향은 유사하나 다른 월에 비해 5~7월 경 모델에 따라 차이 크게 발생 (CAM5 < HadGEM2 < HadGEM3 < ECHAM6 < GFDL 순) Surface Albedo Kernel  2) 공간적 분포 - 차이가 가장 크게 발생하는 모델 및 월(6월) 기준 : CAM5 모델이 전반적으로 모두 낮은 값을 산출하며, 특히 Laptev, EastSiberian, EastSiberian 해역에 차이 크게 발생 2. Skin Temperature Kernel 1) 북극권 Skin Temperature Kernel 월별 평균값

KOPRI 극지연구소

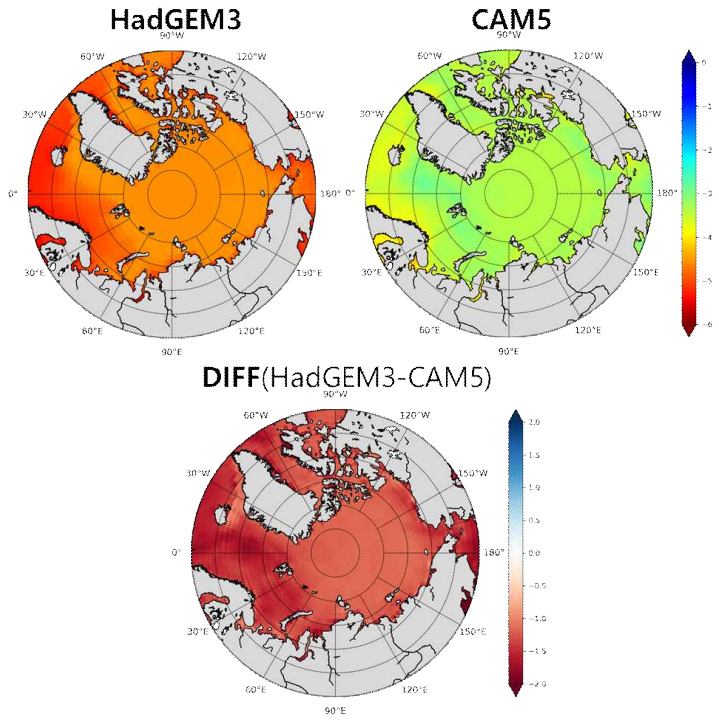


- Albedo Kernel에 비해 영향력은 크고, 계절에 따른 변동성 적음
- 모델에 따라 특징 나타남
  : CAM5, GFDL
  계절에 따른 변동성 상대적으로 적음
  : HadGEM2, HadGEM3, ECHAM6
  위 언급한 두 커널에 비해 온도 변화에 민감하게 반응, 여름철에 차이 크게 나타남



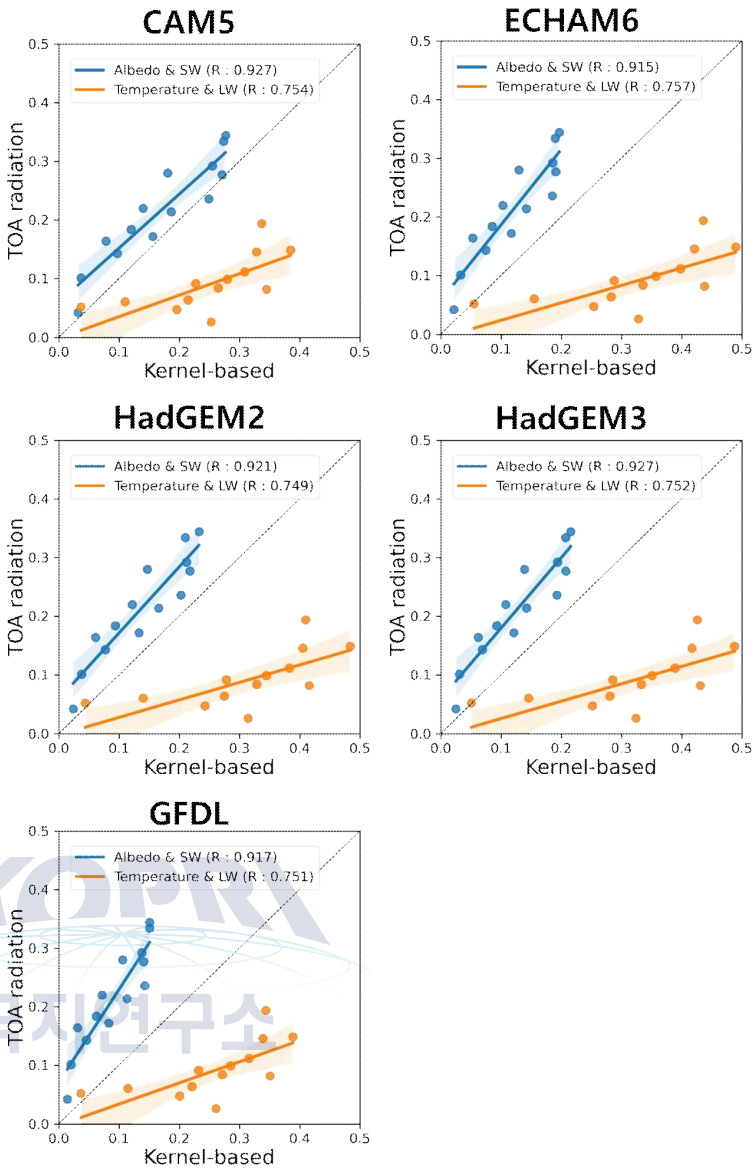
2) 공간적 분포

- 차이가 가장 크게 발생하는 모델 및 월(7월) 기준
  : HadGEM3 모델이 전반적으로 모두 낮은 값을 산출

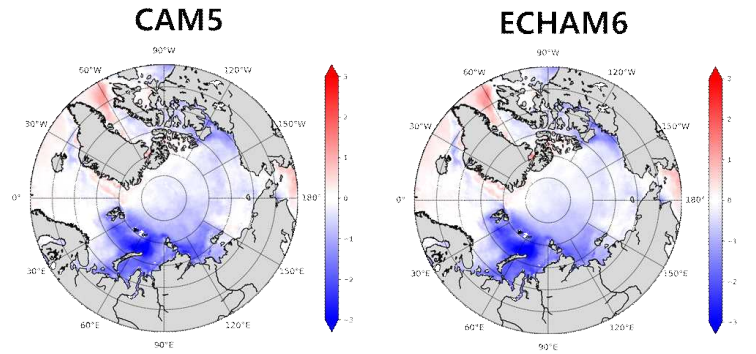
○ 세부목표 2-2: 관측자료와 Radiative Kernel 자료 평가

연 구 내 용	연 구 결 과
지표변화(Albedo, Surface Temperature)에 따른 커널 기반 TOA Flux 변화량 산출 관측기반 TOA radiation과 비교	1. Kernel 기반 TOA flux 변화량 및 TOA radiation 변화량 비교 1)1982년 대비 2000 ~ 2015년 연평균 변화량 - TOA radation : CERES TOA radation (Shortwave, Longwave) - Kernel-based : (1982년 대비 Albedo 변화량) * Albedo Kernel : (1982년 대비 Temperature 변화량) * Temperature Kernel 2) 변화량 산점도 - SW TOA radiatno & Kernel-based(Albedo) : 평균 R 0.92, 모델 간 미비한 차이 발생 : CAM5 R:0.927 / ECHAM6 R:0.915 HadGEM2 R.0.921 / HadGEM3 R:0.927 GFDL R: 0.917 - LW TOA radiatno & Kernel-based(Temperature) : 평균 R 0.75, 모델 간 미비한 차이 발생 : CAM5 R:0.754 / ECHAM6 R:0.757 HadGEM2 R.0.749 / HadGEM3 R:0.752 GFDL R: 0.751 3) Kernel-Based 연평균 변화량 Net(Albedo +

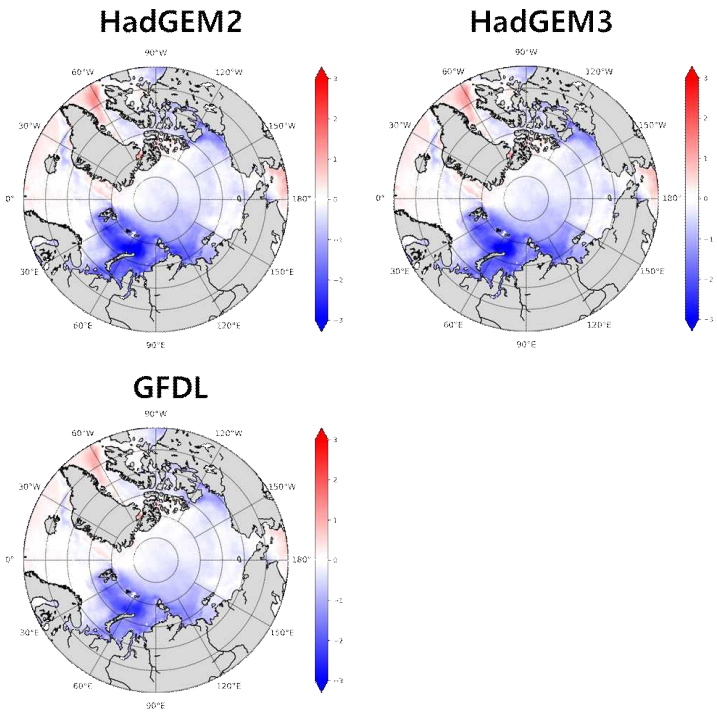


Temperautre) 공간적 분포

- 5가지 모델 모두 유사한 공간적 분포
  : Barents, Kara, Laptev 해역 음의 경향
  : Baffin 해역 양의 경향

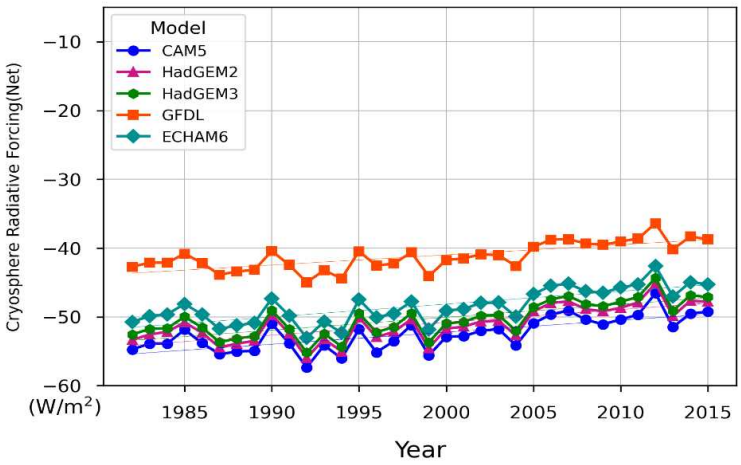


KOPRI 극지연구소

□ 성과목표 3: 북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석

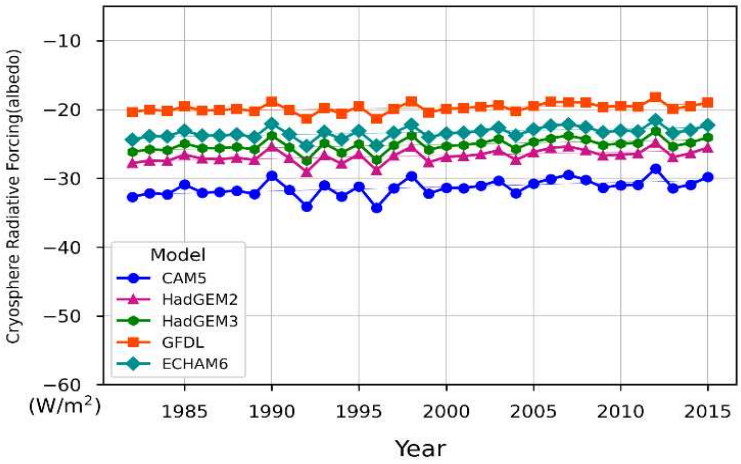
○ 세부목표 3-1: Albedo, Surface Temperature 기반 복사강제력 통합 및

연 구 내 용	연 구 결 과
두가지 요인(Albedo, Surface Temperature) 통합하여 복사강제력 평가	1. 연평균(1982 ~ 2015) 복사강제력 (CrRF, Cryosphere Radiative Forcing) 시계열 1) Net-CrRF - 기후모델에 따라 정량적 차이 존재하나, 전체적인 경향은 유사 : 0.18(±0.02) W/m^2/year 증가  : 기후모델 간 평균 11.29 W/m^2 차이 존재 2) Albedo-CrRF - 기후모델에 따라 정량적 차이 존재하나, 전체적인

경향은 유사

: 0.04(±0.01) W/m^2/year 증가

: 기후모델 간 평균 11.56 W/m^2 차이 존재



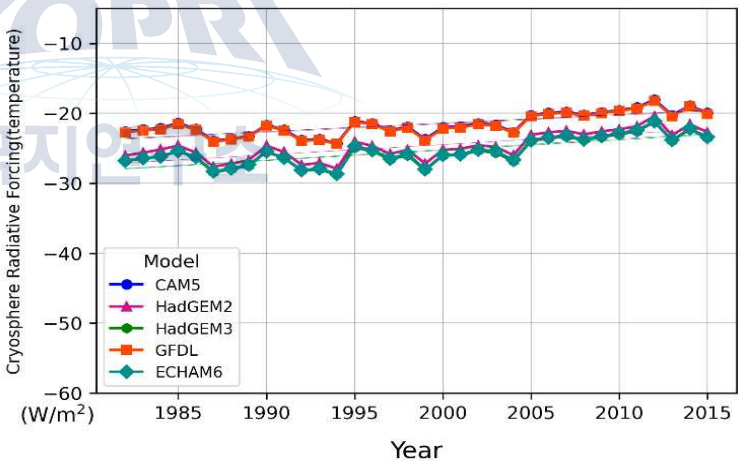
3) Temperature-CrRF

- 기후모델에 따라 정량적 차이 존재하나, 전체적인 경향은 유사

  : 0.14(±0.03) W/m^2/year 증가

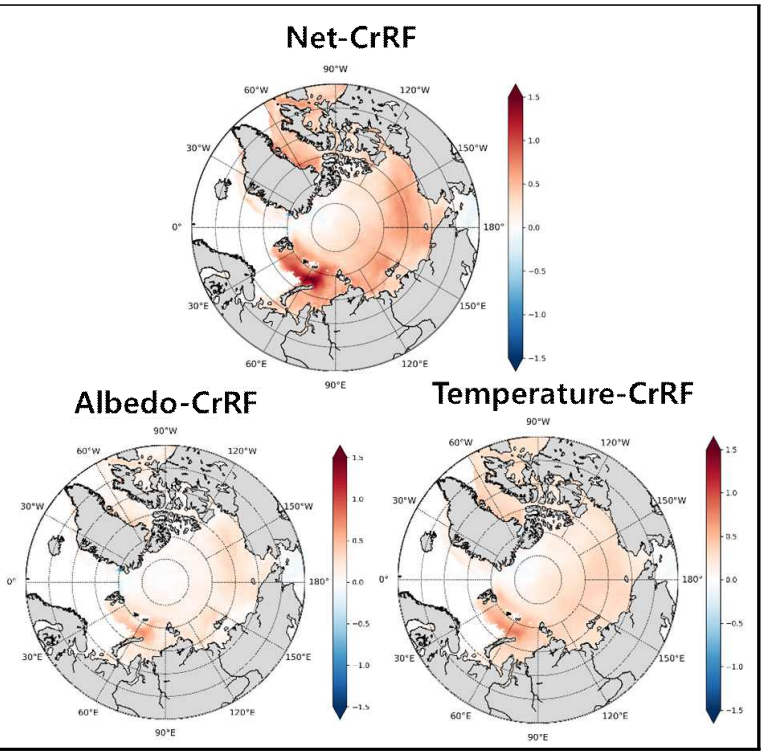
  : 기후모델 간 평균 3.94 W/m^2 차이 존재

- Albedo-CrRF에 비해 연간 변화량 높음

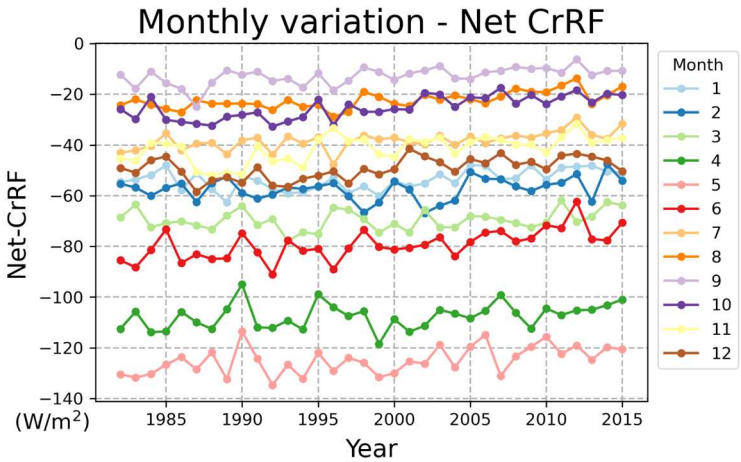


2. 연평균(1982 ~ 2015) 복사강제력 (CrRF, Cryosphere Radiative Forcing) 변화량 공간적 분포

- 각 모델의 Kernel 평균값 사용
- 대부분의 해역에서 증가 추세이며, 특히 Barents, Kara 해역에서 비교적 급격한 증가 경향 나타남

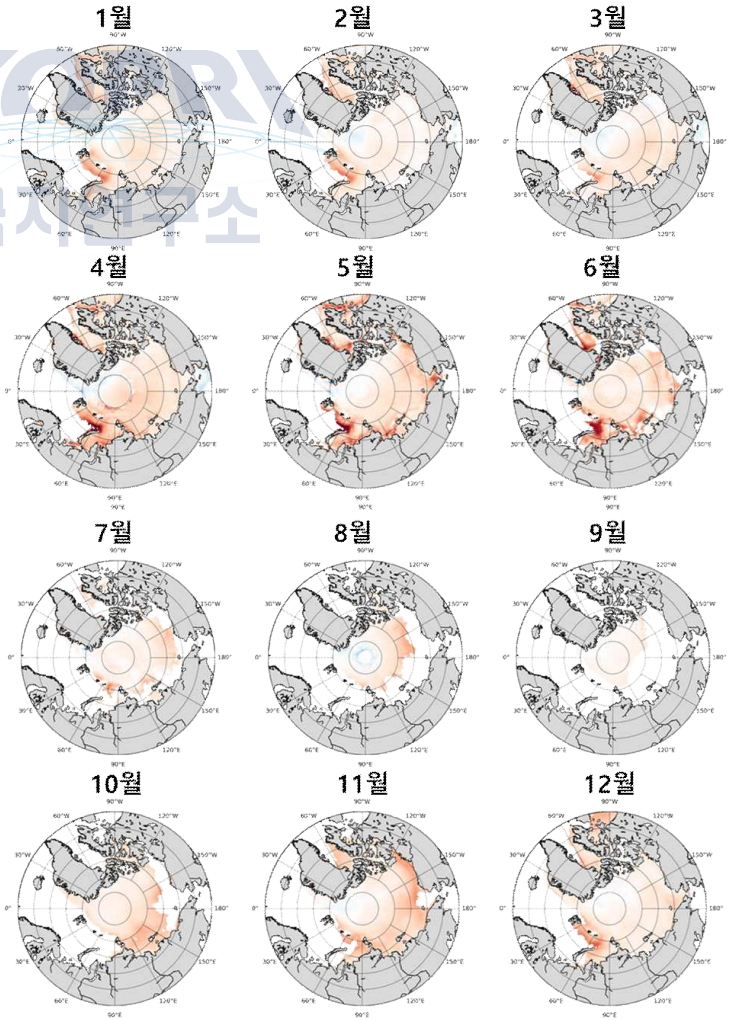


○ 세부목표 3-2: 계절에 따른 주도적(Albedo, Surface Temperature) 요인 분석

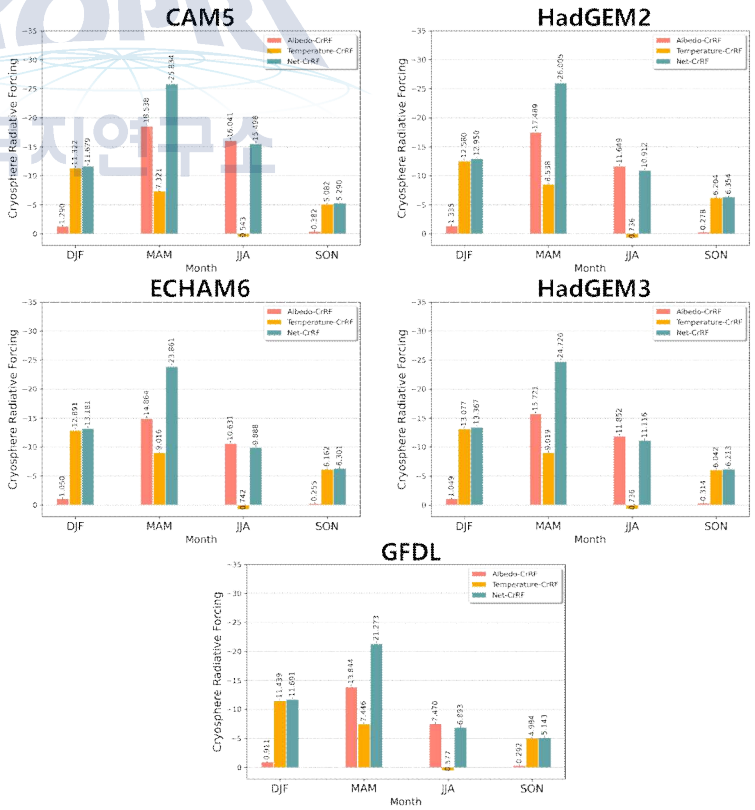
연 구 내 용	연 구 결 과
- 월별 해빙 변화량에 따른 복사강제력 특성 분석	1. 월별 복사강제력 시계열 분포(Net CrRF) - 기후모델 평균 Radiative Kernel 사용 - 월에 관계없이 모두 증가 추세 - 5월에 가장 영향력이 크며, 9월이 상대적으로 낮음  2. 기후모델에 따른 월별 복사강제력 변화량(Net CrRF) - 월에 따라 변화량이 가장 큰 기후모델 다름 : 1, 4~5, 9~10월 HadGEM2 : 2~3월 HadGEM3 : 6~8월 CAM5 : 11~12월 ECHAM6 - 전제적으로 6월에 가장 뚜렷한 증가추세가 보이며, 9월에 상대적으로 약한 증가추세 나타남

	CAM5	HadGEM2	HadGEM3	GFDL	ECHAM6	Model-Mean
1월	0.331	0.364	0.38	0.322	0.371	0.353
2월	0.214	0.251	0.254	0.22	0.253	0.238
3월	0.259	0.285	0.309	0.256	0.307	0.283
4월	0.424	0.488	0.487	0.417	0.5	0.464
5월	0.561	0.567	0.509	0.438	0.517	0.518
6월	0.691	0.532	0.538	0.363	0.487	0.522
7월	0.406	0.288	0.31	0.146	0.262	0.282
8월	0.433	0.299	0.295	0.239	0.238	0.301
9월	0.144	0.183	0.177	0.144	0.174	0.164
10월	0.445	0.561	0.526	0.423	0.559	0.503
11월	0.462	0.548	0.548	0.452	0.555	0.513
12월	0.34	0.39	0.4	0.351	0.395	0.375

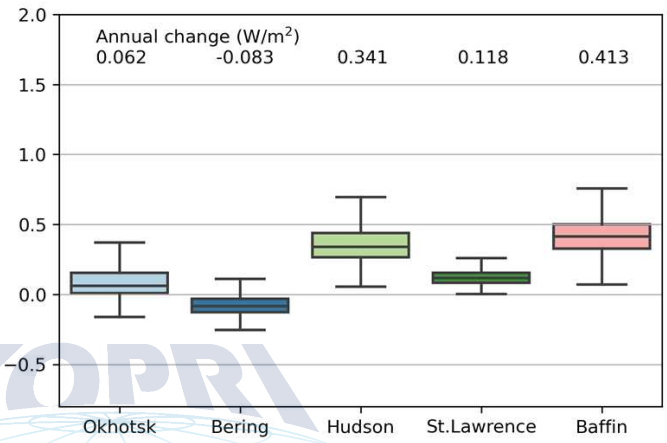
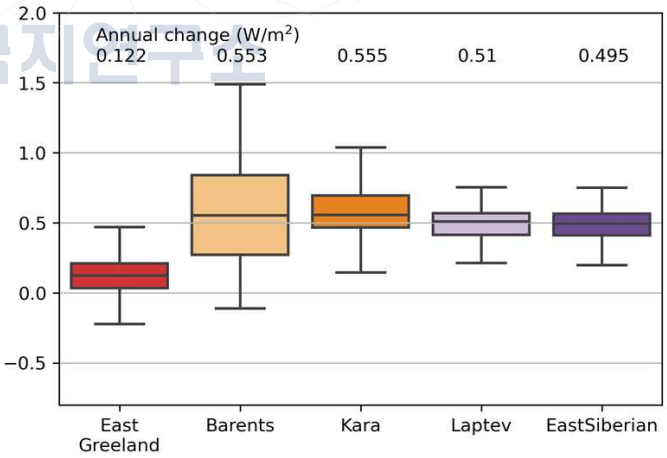
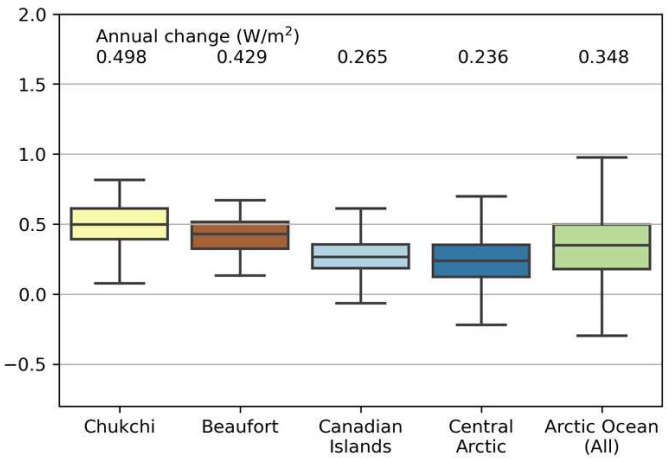
3. 월별 복사강제력 변화량 공간적 분포
- 기후모델 평균 Radiative Kernel 사용
- 월에 관계없이 대부분의 해역에서 증가 추세
  : 4~6월 Barents & Kara 해역에서 증가추세 강하게 나타남
  : 1~5월 East Greenland & 8월 북극 중앙해 일부지역에서 감소경향



KOPRI 극지연구소

- 계절에 따른 주도적 요인 파악	1. 기후모델에 따른 계절적 평균 복사강제력 1) 기후모델에 따라 정량적 차이는 발생하나, 전체적인 경향은 모두 유사 - Net-CrRF의 경우, MAM 기간에 가장 큰 영향력이 나타났으며, SON 기간에 가장 낮은 값 산출 - Albedo-CrRF의 경우, MAM 기간에 가장 큰 영향이 나타났으며, DJF & SON 기간에는 극야로 인하여 복사강제력 산출되지 않음 - Temperature-CrRF의 경우, DJF 기간에 가장 큰 영향을 미쳤으며, JJA 기간에 가장 낮게 산출 2) Temperature-CrRF JJA 기간 복사강제력 양수 - Temperature-CrRF 산출에 활용되는 자료의 특성으로 인하여 발생. - 해수면온도가 해빙표면온도보다 높게 산출됨 : 해빙표면온도 ERA5 자료 활용 ERA5의 경우, 해빙이 녹는시기에 해빙위에 발생하는 물로 인하여 해빙표면온도를 273K으로 추정 : 해수면온도 OISST 자료 활용 : 해빙이 존재하는 지역은 해빙농도와의 상관관계를 활용하여 산출, 해빙농도가 높은지역 271~272K 

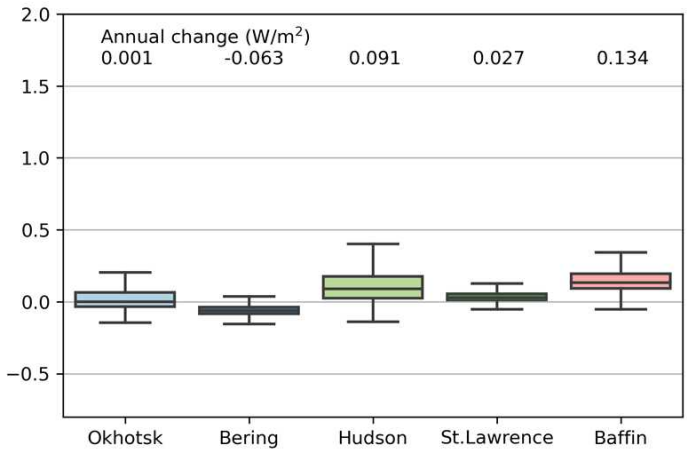
○ 세부목표 3-3: 지역에 따른 복사강제력 특성 파악

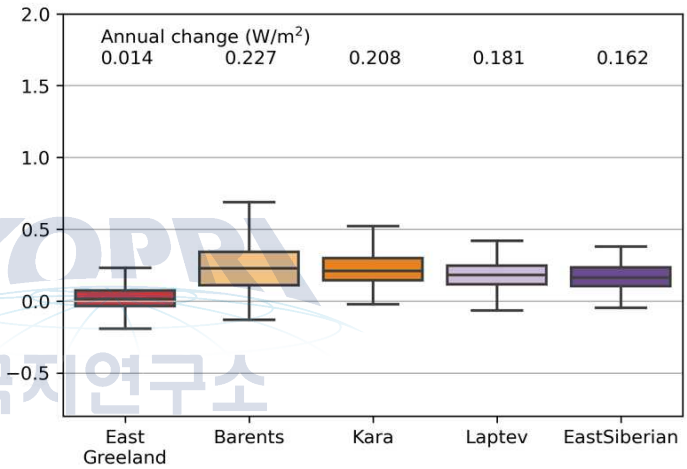
연 구 내 용	연 구 결 과
- Warming에 대해 주도적 역할 하는 해역 경향성 파악	1. 해역에 따른 복사강제력 연간 변화량 - 각 모델의 Kernel 평균값 사용 - Bering 해역에서 가장 낮은 변화량 : 타 지역에 비해 해빙농도가 낮아 복사강제력 자체가 낮게 산출됨 1) Net-CrRF - 북극 평균 변화량 0.348 - 최대 변화량 해역 Barents 0.553 - 최소 변화량 해역 Bering -0.083   

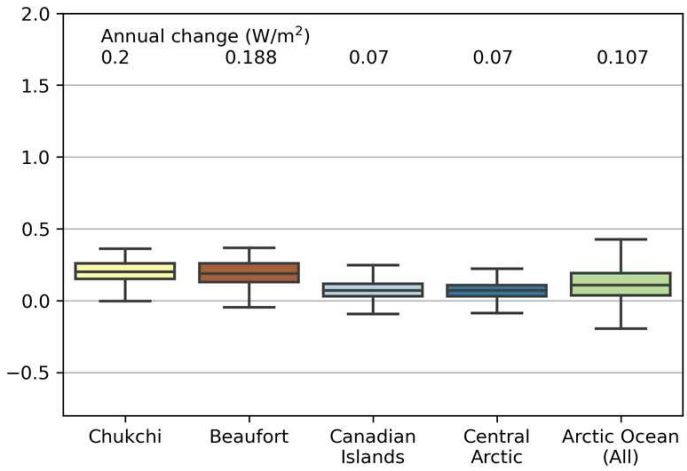
KOPRI 극지연구소

2) Albedo-CrRF

- 북극 평균 변화량 0.107
- 최대 변화량 해역 Barents 0.227
- 최소 변화량 해역 Bering -0.063



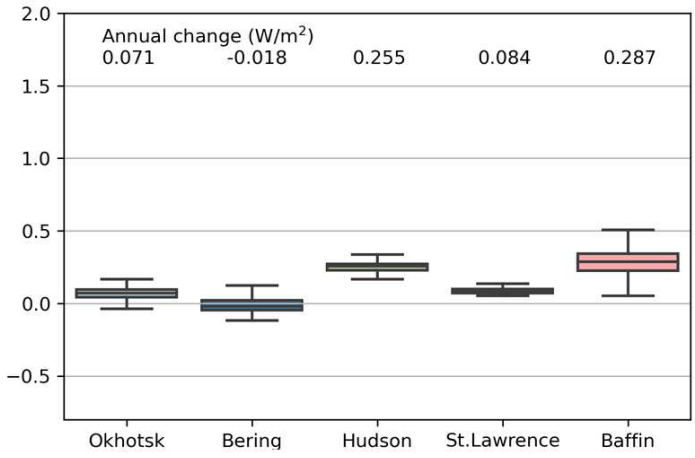


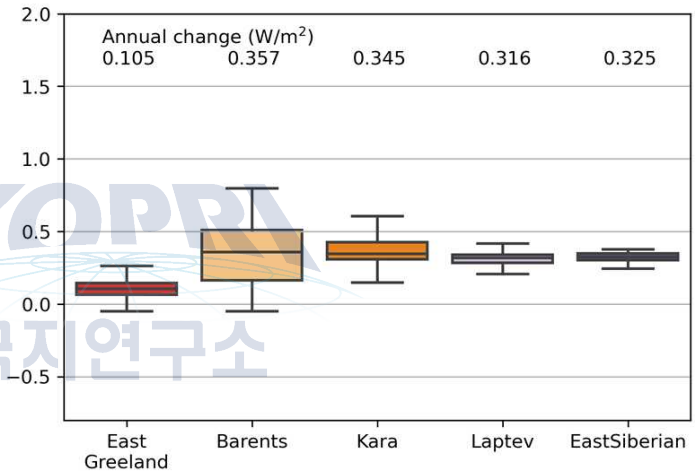


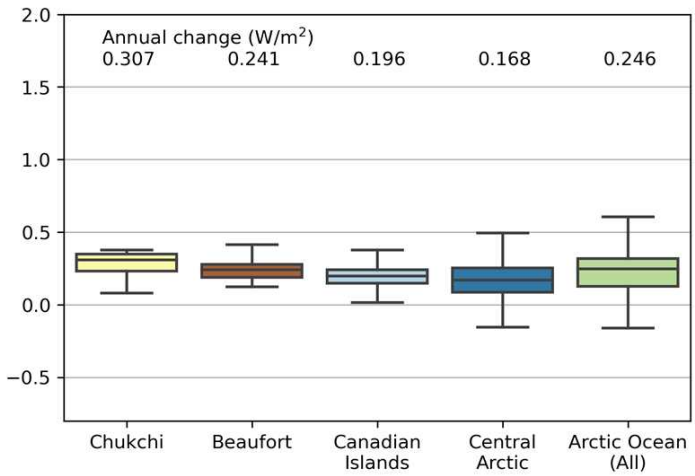
KOPRI 극지연구소

3) Temperature-CrRF

- Albedo-CrRF에 비해 급격한 변화양상 나타남
- 북극 평균 변화량 0.246
- 최대 변화량 해역 Barents 0.357
- 최소 변화량 해역 Bering -0.018



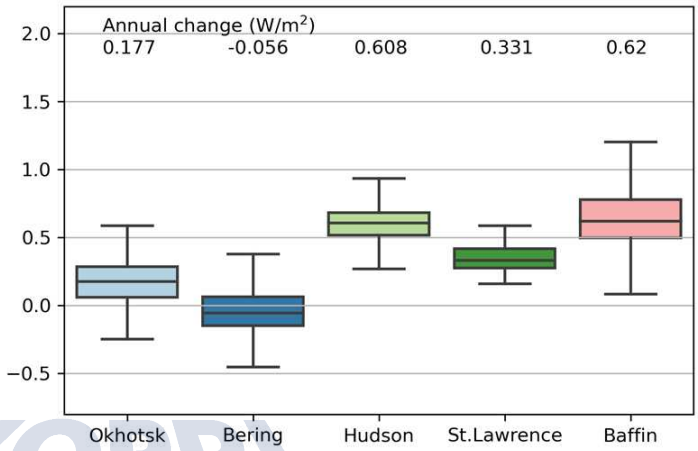


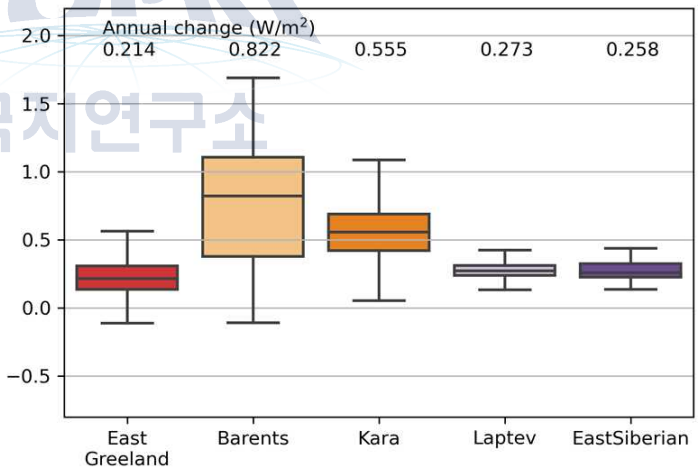


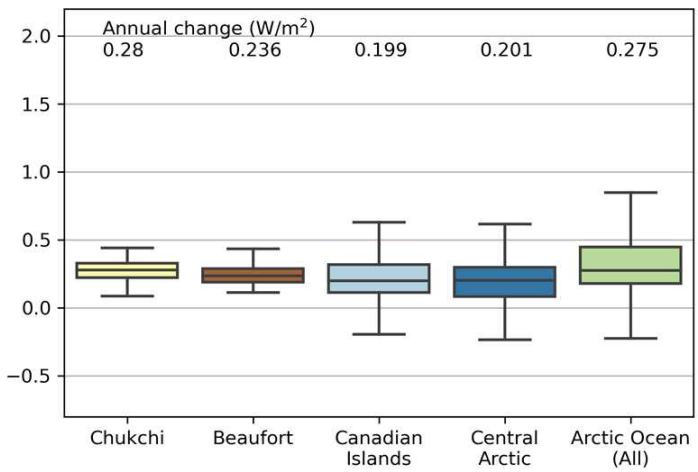
KOPRI 극지연구소

2. 해역에 따른 복사강제력 DJF 기간 평균 변화량
- 각 모델의 Kernel 평균값 사용
- Bering 해역에서 가장 낮은 변화량
: 타 지역에 비해 해빙농도가 낮아 복사강제력 자체가 낮게 산출됨

1) Net-CrRF
- 북극 평균 변화량 0.275
- 최대 변화량 해역 Barents 0.822
- 최소 변화량 해역 Bering -0.056



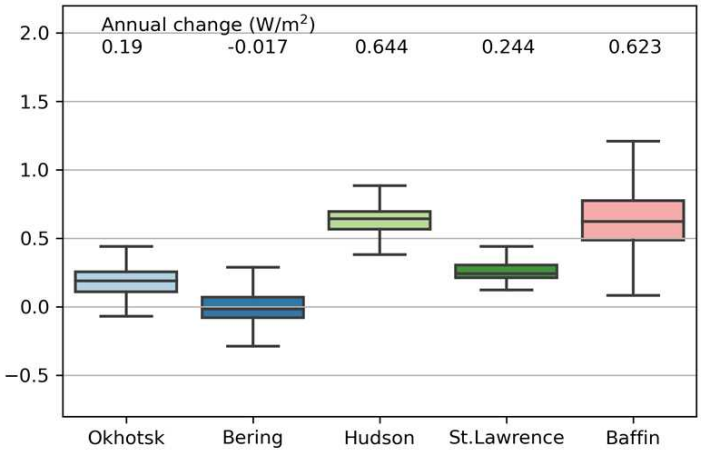


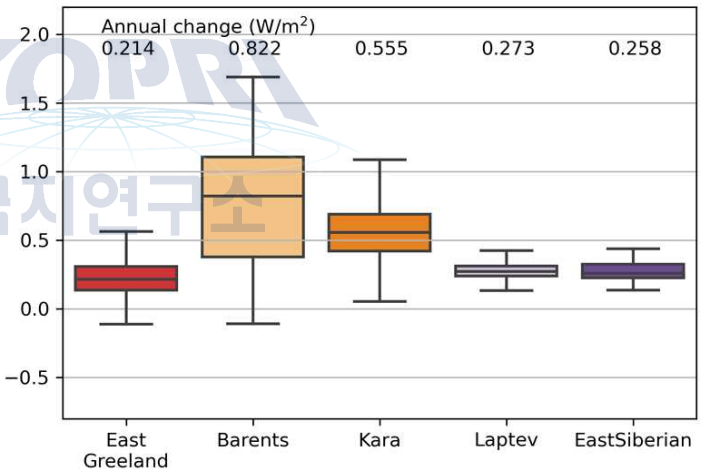


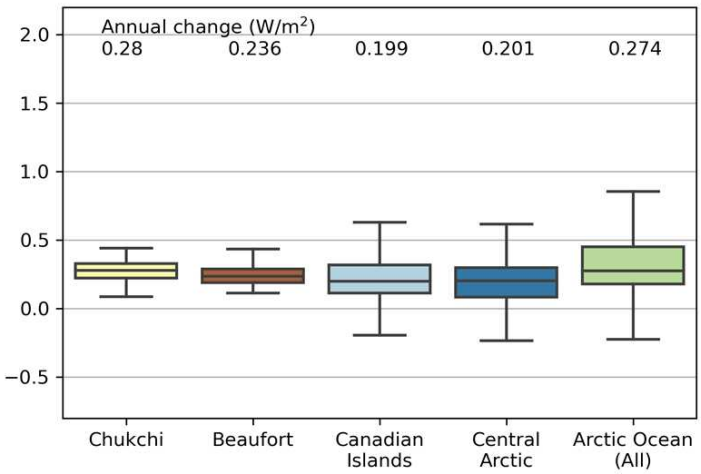
KOPRI 극지연구소

2) Albedo-CrRF
- Polar night으로 인하여 알베도 관련 산출물 없음

3) Temperature-CrRF
- 북극 평균 변화량 0.274
- 최대 변화량 해역 Barents 0.822
- 최소 변화량 해역 Bering -0.017



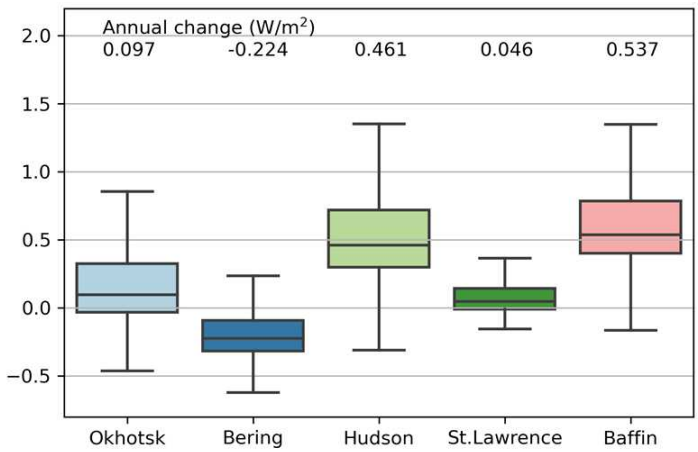


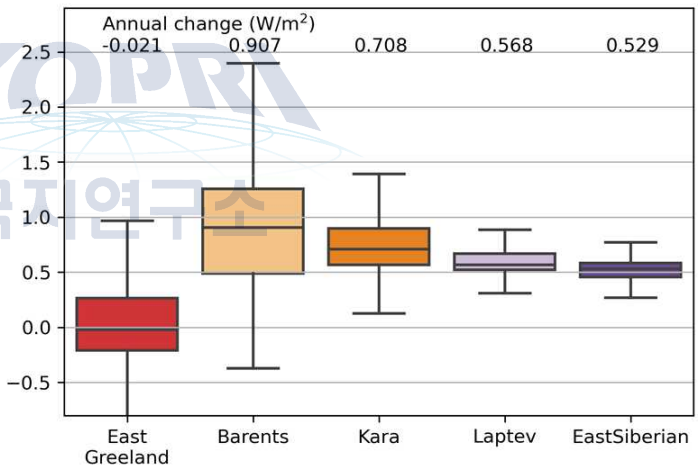


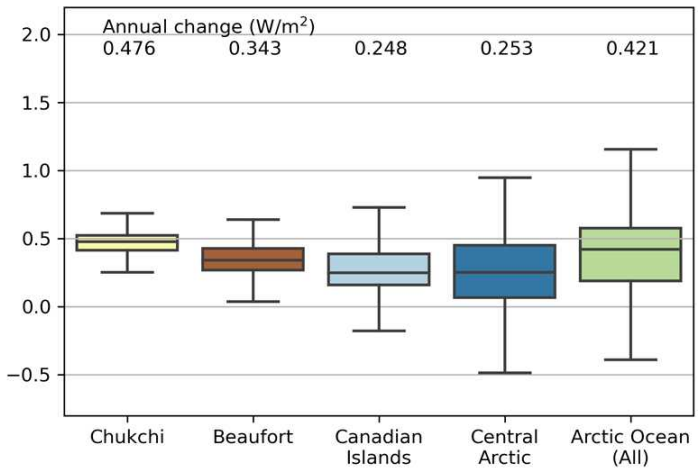
KOPRI 극지연구소

3. 해역에 따른 복사강제력 MAM 기간 평균 변화량
- 각 모델의 Kernel 평균값 사용
- Bering 해역에서 가장 낮은 변화량
- 지역 및 RF 종류에 따라 급격하게 변하는 지역 다름

1) Net-CrRF
- 북극 평균 변화량 0.421
- 최대 변화량 해역 Barents 0.907
- 최소 변화량 해역 Bering -0.224



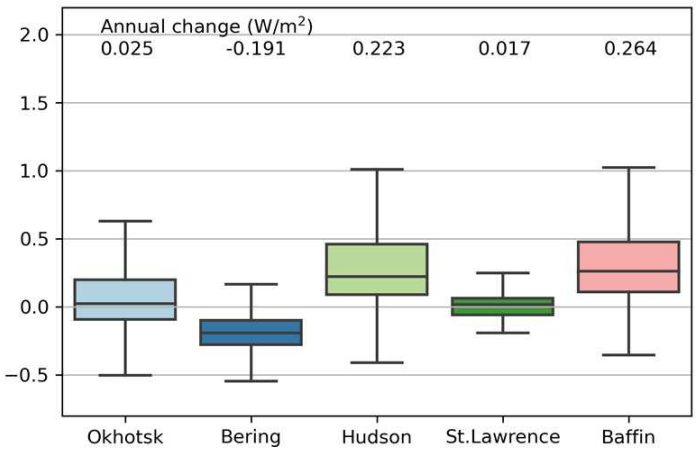


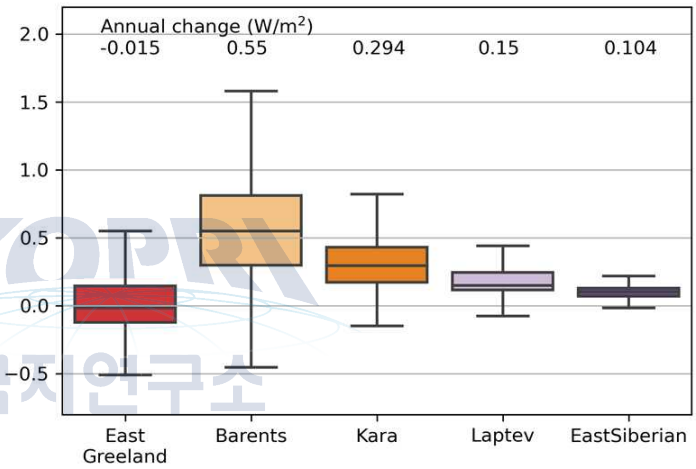


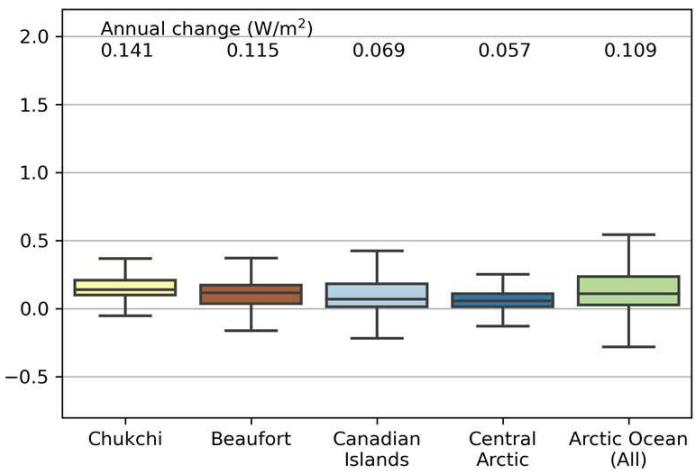
KOPRI 극지연구소

2) Albedo-CrRF

- 북극 평균 변화량 0.109
- 최대 변화량 해역 Barents 0.550
- 최소 변화량 해역 Bering -0.191



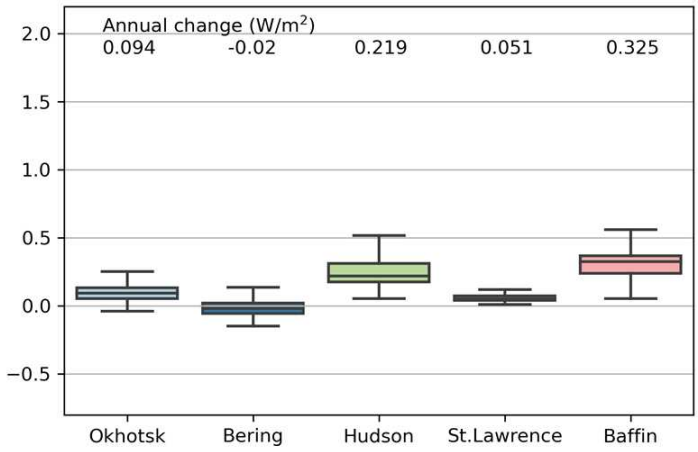


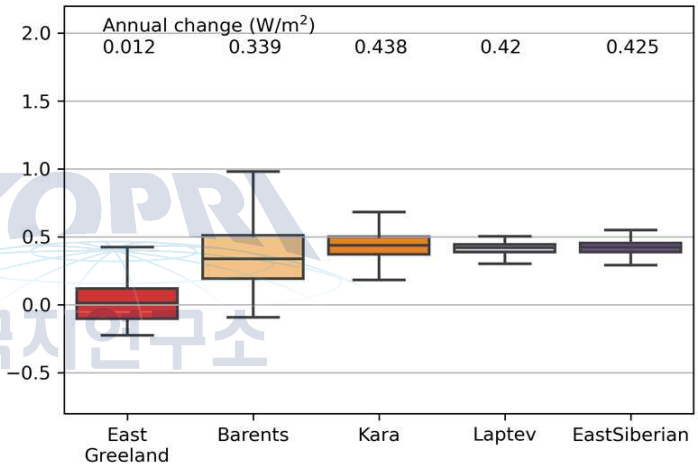


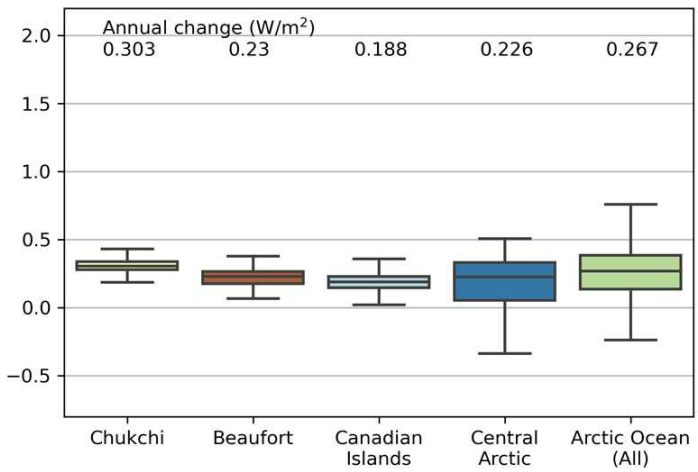
KOPRI 극지연구소

3) Temperature-CrRF

- Albedo-CrRF에 비해 급격한 변화양상 나타남
- 북극 평균 변화량 0.267
- 최대 변화량 해역 Barents 0.438
- 최소 변화량 해역 Bering -0.020



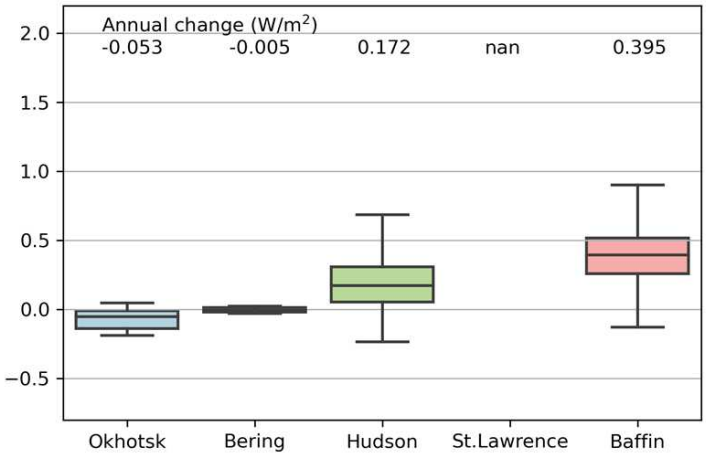


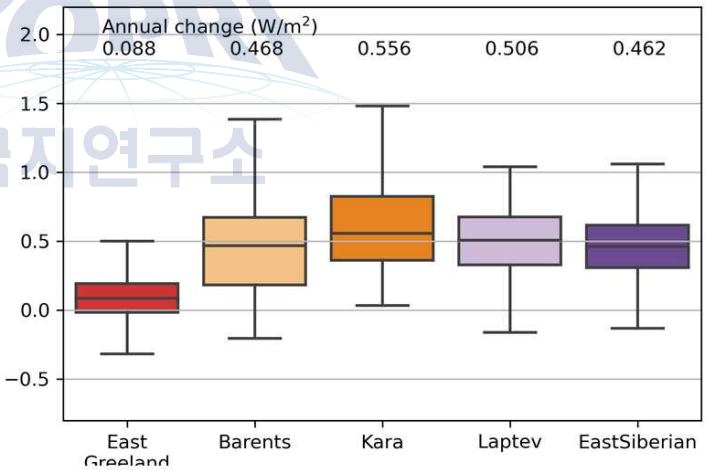


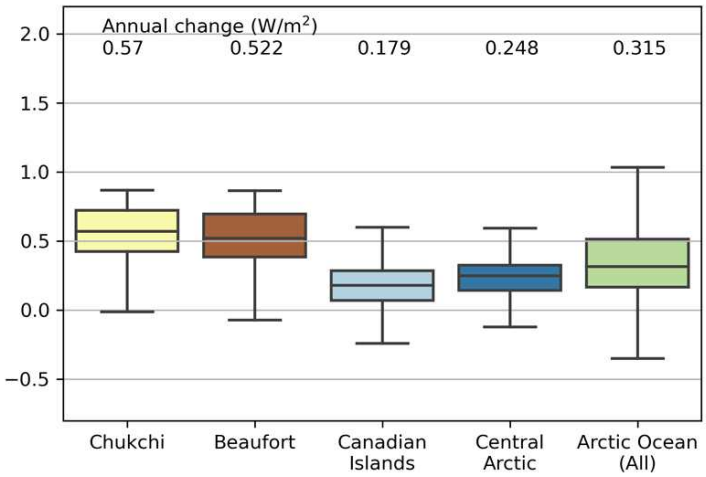
KOPRI 극지연구소

4. 해역에 따른 복사강제력 JJA 기간 평균 변화량
- 각 모델의 Kernel 평균값 사용
- Bering 해역에서 가장 낮은 변화량
- Kara 해역에서 가장 낮은 변화량

1) Net-CrRF
- 북극 평균 변화량 0.315
- 최대 변화량 해역 Barents 0.556
- 최소 변화량 해역 Bering -0.005



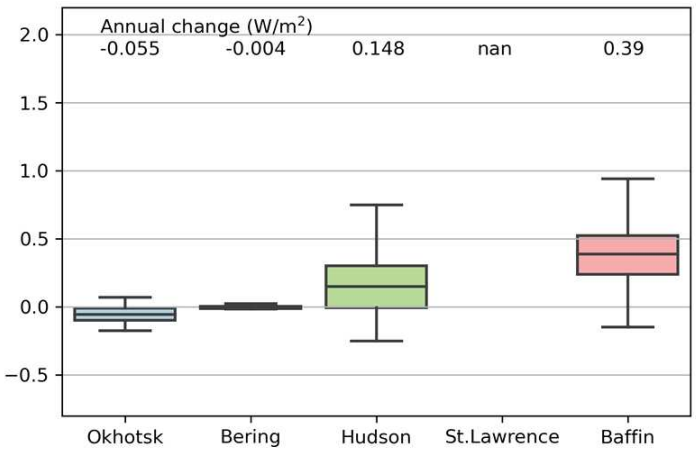


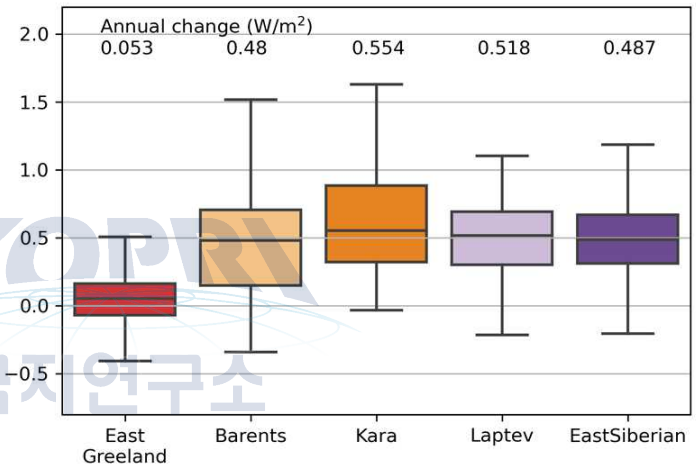


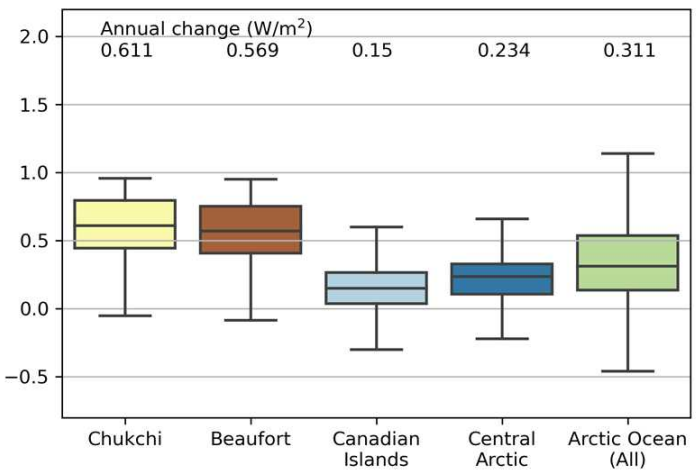
KOPRI 극지연구소

2) Albedo-CrRF

- 북극 평균 변화량 0.311
- 최대 변화량 해역 Barents 0.554
- 최소 변화량 해역 Bering -0.004





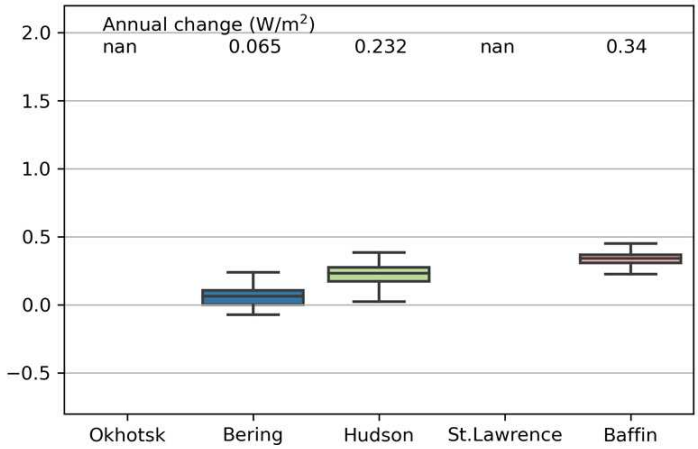


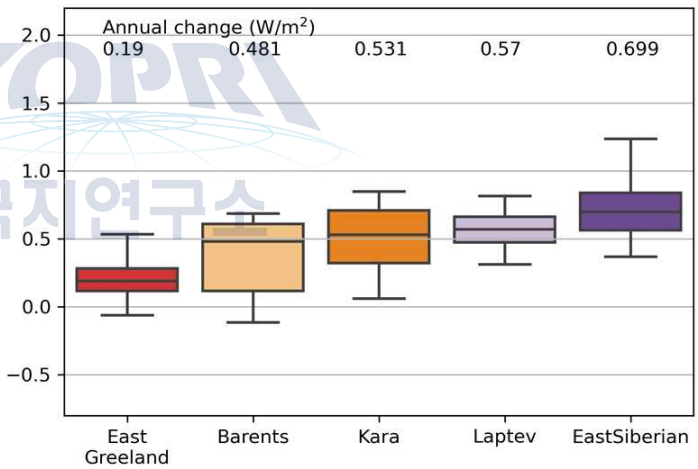
3) Temperature-CrRF

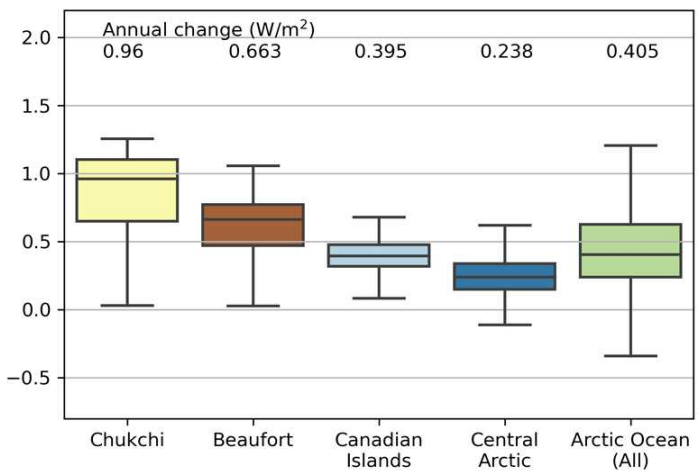
- 해역에 따른 유의미한 차이 없음

KOPRI 극지연구소

5. 해역에 따른 복사강제력 SON 기간 평균 변화량
- 각 모델의 Kernel 평균값 사용
 - Chukchi 해역에서 가장 높은 변화량
 - Bering 해역에서 가장 낮은 변화량
 1) Net-CrRF
  - 북극 평균 변화량 0.405
  - 최대 변화량 해역 Chuchi 0.96
  - 최소 변화량 해역 Bering 0.065





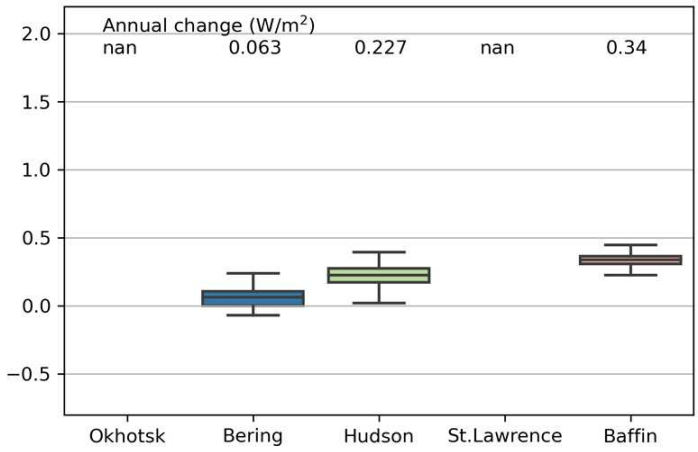


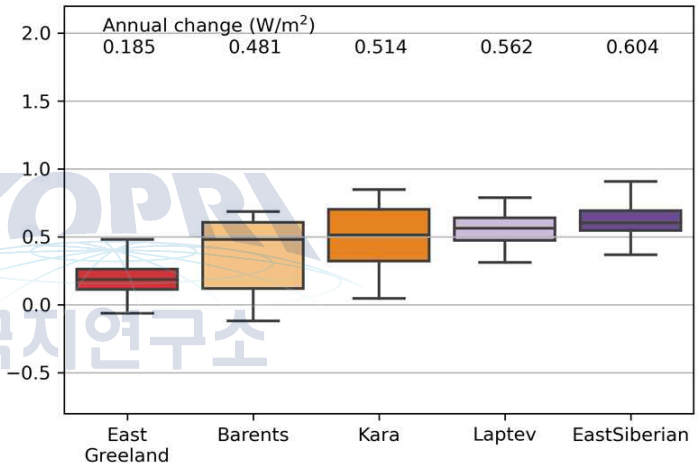
 2) Albedo-CrRF
  - 대부분 해역에서 Polar night로 인하여 알베도 관련 산출물 생성 X

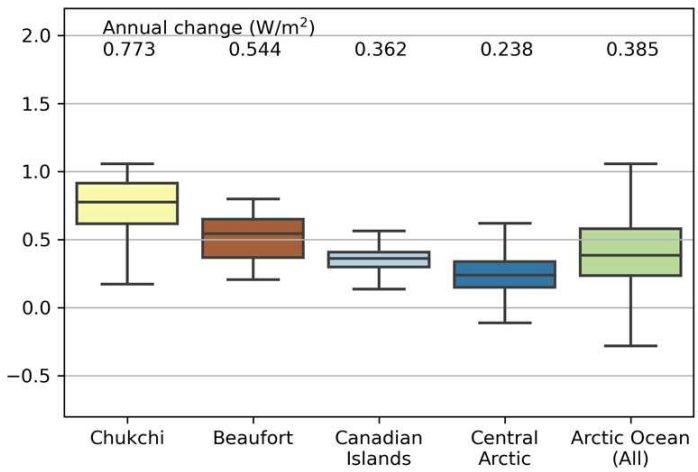
KOPRI 극지연구소

3) Temperature-CrRF

- Albedo-CrRF에 비해 급격한 변화양상 나타남
- 북극 평균 변화량 0.385
- 최대 변화량 해역 Chukchi 0.773
- 최소 변화량 해역 Bering 0.063



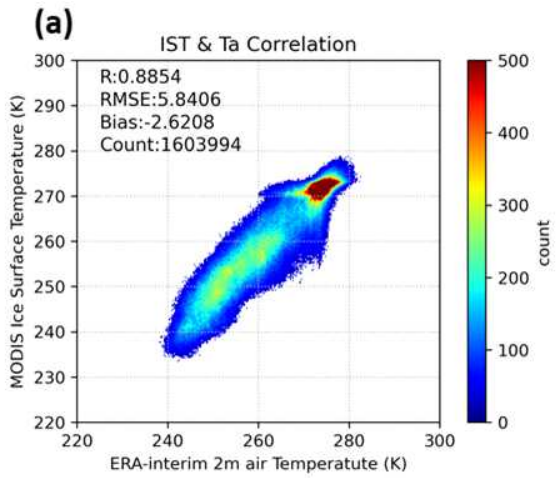




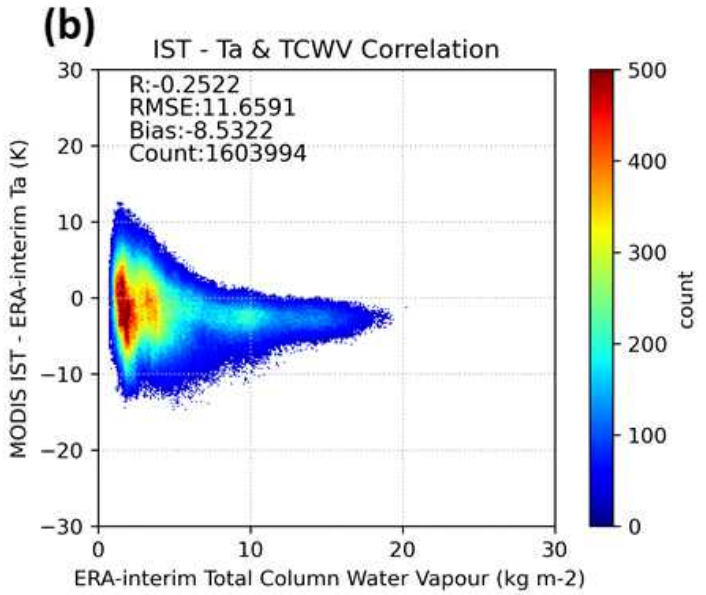
KOPRI 극지연구소

□ 성과목표 4: DNN기반 해빙표면온도 산출

○ 세부목표 4-1: IST 산출을 위한 입력자료 선정

연 구 내 용	연 구 결 과
입력자료 선정을 위한 문헌고찰	- Total Column Water Vapor (TCWV) : 북극의 경우 대기 중 수증기량(water vapor)와 표면 온도와 밀접한 상관관계 나타남 (Key et al., 1997) - 2m air temperature (Ta) & Sea Ice Concentration (SIC) : 기온 - IST - 해빙농도 (SIC)와 상관성 분석 수행 : 해빙농도에 따라 다른 변화양상을 보임 (A. Tetzlaffet al., 2013) - Solar Zentih Angle (SZA) : SZA에 따라 기온-IST 차이의 패턴 변화 발생 (Christopher A. et al.,2014) - Ta Climatology : 2001~ 2012년 그린란드 지역에서 Ta가 ~2 ℃/10년 증가함에 따라 IST가 ~2.51 ℃/10 년 증가 (Hall et al., 2013) : 대기 온도 변화 경향을 포함하고자 IST 예측 모델 입력변수에 Ta 기후치선정 : 1982년부터 2018년까지 37년치 ERA-Interim Ta DDNNly 자료를 평균하여 생성 - Latitude : 지표에 도달하는 태양에너지는 위도에 따라 상이하며 그에 따른 온도 차이가 뚜렷하게 관측됨 (Seo et al. 2020)
IST 예측 모델 구축을 위한 입력변수 평가	- IST & Ta 상관관계 : R = 0.8854, RMSE = 5.8406 으로 양의 상관관계  - IST & Ta & TCWV 상관관계 : TCWV 증가에 따라 Ta와 IST의 차이 감소

KOPRI 극지연구소

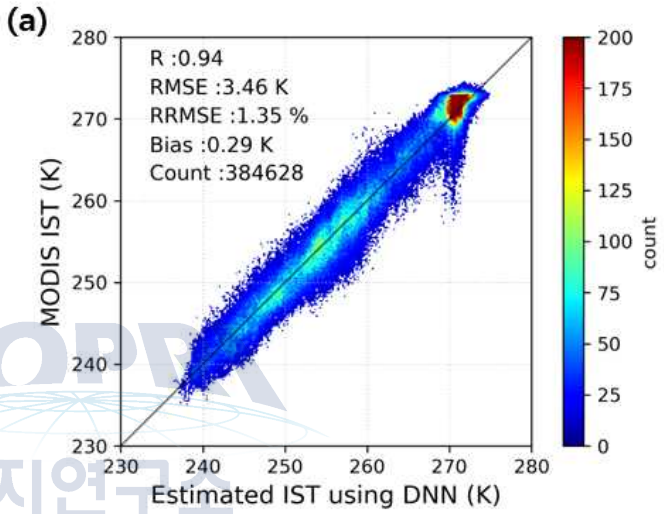
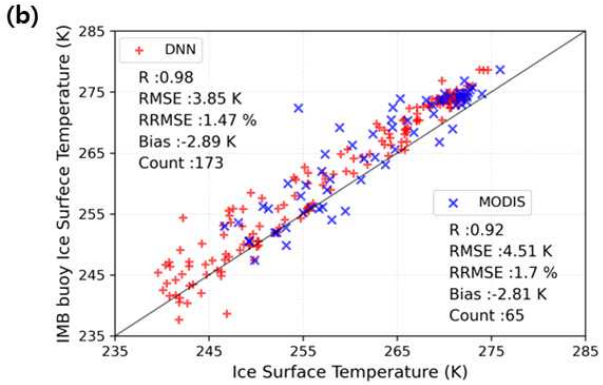
	 : TCWV의 증가는 대기와 해양 간의 열적 교환 증가

○ 세부목표 4-2: DNN기반 모델 구축

연 구 내 용	연 구 결 과
조건에 따른 IST 산출을 위한 Case 분류	- Ta를 활용한 Case 분류 : 계절적 특성보다 온도 범위 별 계수를 산출하는 것이 알고리즘의 유연성 향상에 영향(Key et al., 1997) : MODIS IST 산출 알고리즘 및 선행 연구의 분류 범위를 적용 - SIA(Sea Ice Age)를 활용한 Case 분류 : 역학 및 열역학적 변화를 나타내는 중요한 지표로 작용 (Korosovetal., 2018) : 다년빙 (Multi Year Ice, MYI)과 일년빙 (First Year Ice, FYI)로 분류 가능 : 다년빙은 일년빙에 비해 대기-해양의 변화에 탄력적 : 해빙과 관련된 많은 연구에서 다년빙과 일년빙을 구분하여 연구 진행 (Benjamin A. Lange et al., 2015, Stephen Marshall et al., 2019)
DNN 모델의 Hyperparameter 선정 입력자료에 따른 모델 정확도 비교	- 모델 구현 : Keras 2.8.0 (Colab) 사용 : Loss fuction - Mean Absolute Error (MAE) : optimizer - Adaptive moment estimation (Adam) : 과적합 방지를 위한 Earlystopping 적용 - 입력자료 정규화 : Keras MinMaxScaler를 사용하여 입력자료 정규화 수행 - Hyperparameter 선정 : scikit-learn GridSearchCv library 사용

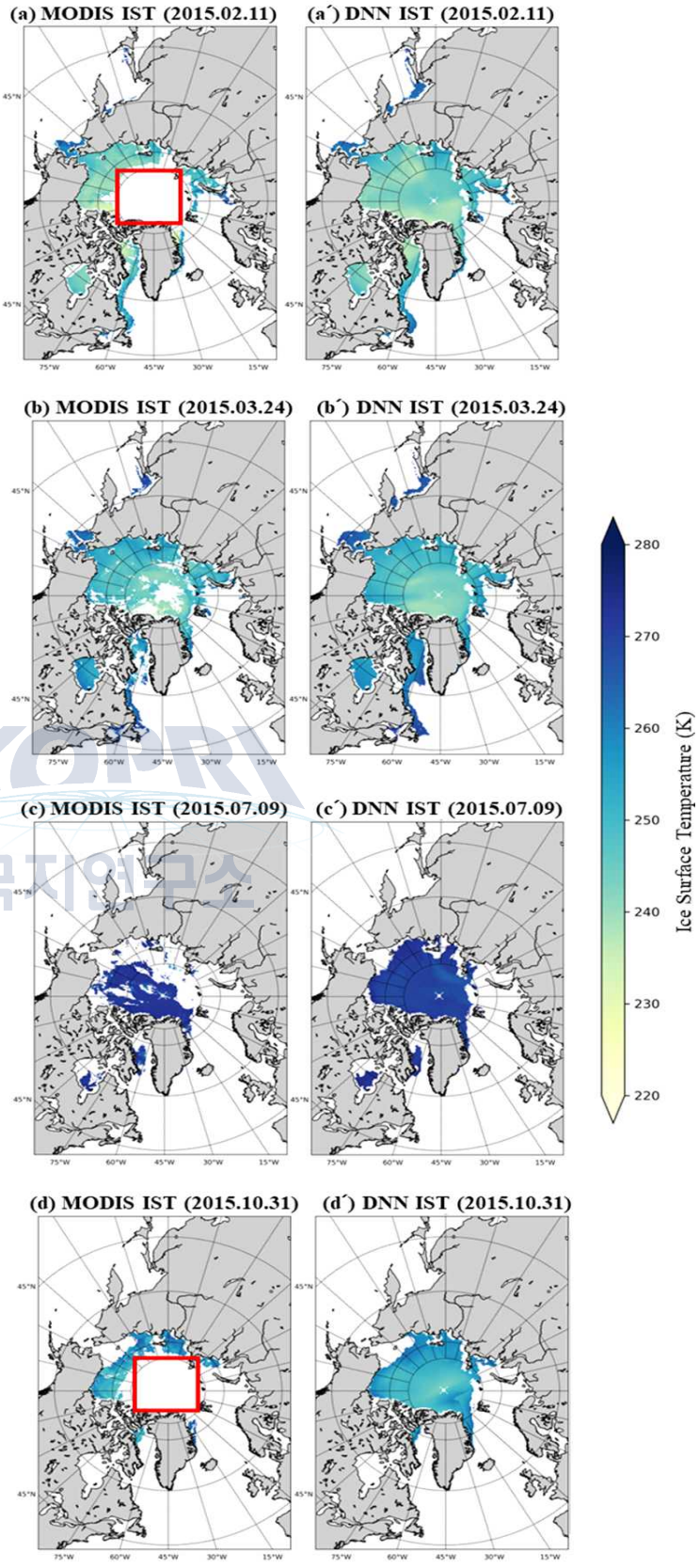
	Layer	Node	Batch size	Epoch
	3	(128,128,128)	32	100

○ 세부목표 4-3: 타 위성 / In-situ 자료를 활용한 모델 평가

연 구 내 용	연 구 결 과
MODIS 기반 IST 및 Buoy와 검증	- MODIS IST(MOD29E1D) 와 비교 : R 0.94, RMSE 3.46K, rRMSE 1.35% : rRMSE < 10% 이내 일 경우, 높은 정확도 (Li et al., 2013) : MODIS IST와 유사한 분포 특성 나타남  - IMB Buoy 자료와 검증 수행 : 본 연구결과(DNN)가 MODIS IST에 비해 높은 높은 정확도 산출 DNN(본 연구결과) R : 0.98, RMSE : 3.85K, rRMSE : 1.47% MODIS IST (MOD29E1) R : 0.92, RMSE : 4.51K, rRMSE : 1.7% 
MODIS IST와 분포특성 비교	- MODIS IST와 공간적 분포 비교 : 공간적으로 유사한 분포를 나타남

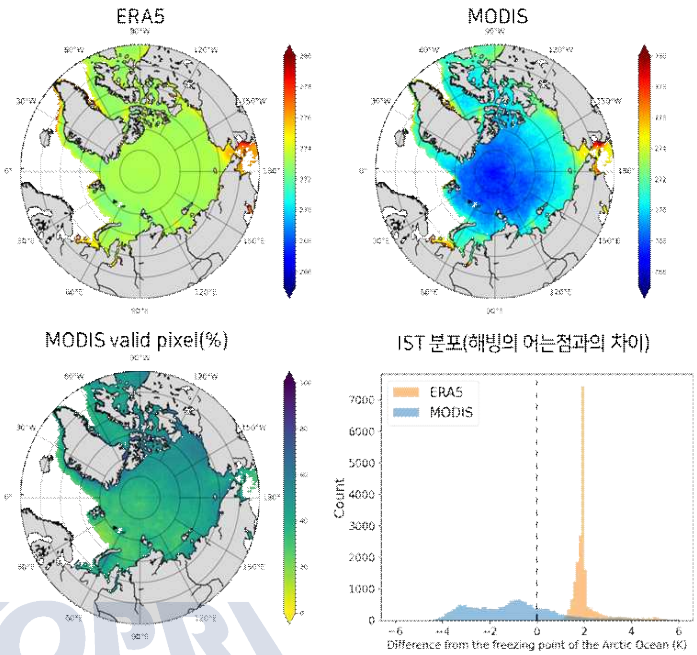
KOPRI 극지연구소

: 본 연구(DNN)의 연구결과는 MODIS 대비 Fill value 없이 모든 지역 산출 가능 확인

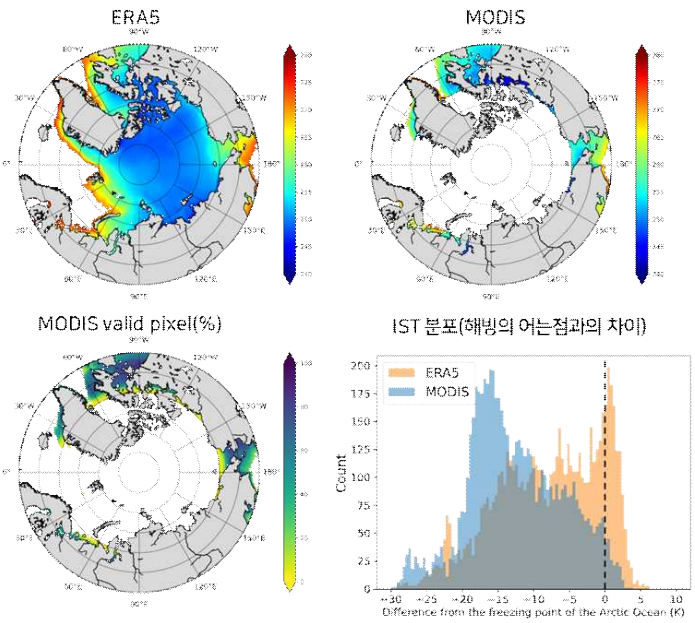
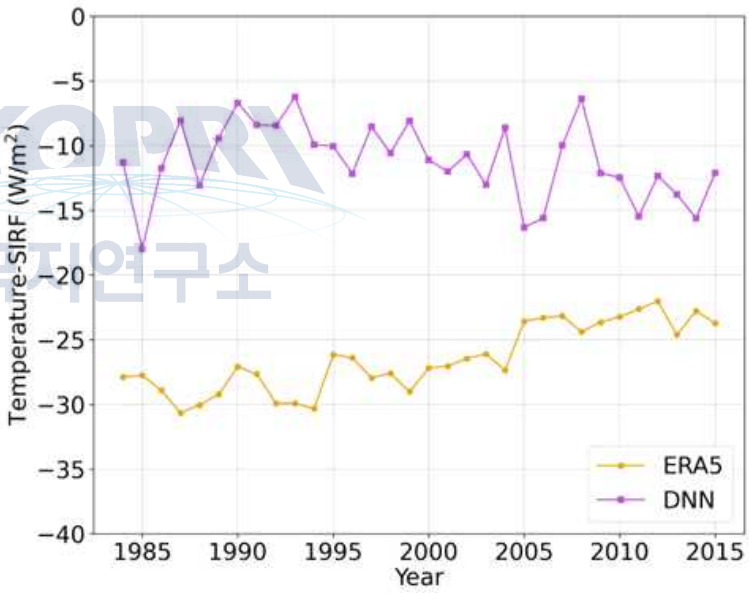


□ 성과목표 5: DNN기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가

○ 세부목표 5-1: DNN기반 IST를 바탕으로 복사강제력 산출

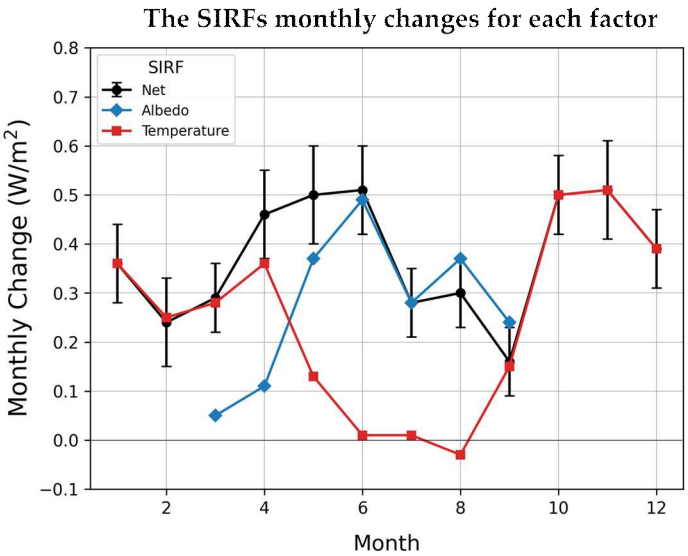
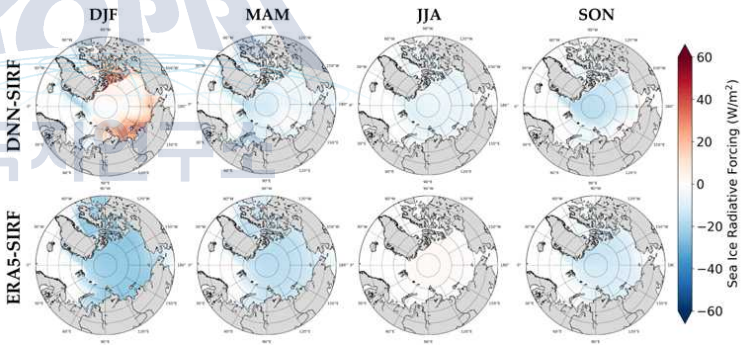
연 구 내 용	연 구 결 과
2차년도 복사강제력 산출에 사용한 표면온도와 MODIS IST 분포 비교	- 6월 평균(2000 – 2015) 표면온도 : 대부분의 지역에서 ERA5 가 높게 나타남 : ERA5의 경우, 해빙표면임에도 불구하고 대부분 영상 2도에 분포하고 있음  - 12월 평균(2000 – 2015) 표면온도 : 6월 대비, ERA5와 MODIS 유사한 분포 : ERA5가 상대적으로 높은 경향 : MODIS의 경우, 극야로 인하여 대부분 지역에서 관측 안됨 - 위성기반인 MODIS IST의 경우 missing value 다수 존재 - 재분석자료인 ERA5는 missing value 없이 전 영역에서 산출되고 있으나, MODIS IST와 다른 경향 --> 본 연구(DNN)의 IST 적용 시, Temperature-SIRF 값이 다른 경향 나타날 가능성 높음

KOPRI 극지연구소

<table>
<tr><td></td><td> 
</td></tr>
<tr><td>DNN기반 IST를 바탕으로 온도기반 복사강제력(Temperature-SIRF) 재산출</td><td>- DNN기반 IST를 바탕으로 Temperature-SIRF 산출 진행
 

: DNN IST를 활용한 Temperature SIRF는 1982년부터 2015년까지 큰 변동성을 보이며 감소 경향
: ERA5 sking Temperature 기반의 Temperature SIRF에서도 변동성을 보이나, 증가 경향
: DNN IST와 ERA5 skin temperature의 공간적 분포 및 ERA5 자료의 warm bias로 인한 큰 차이 발생</td></tr>
</table>

○ 세부목표 5-2: 표면온도(ERA5, DNN기반 IST) 자료에 따른 복사강제력 차이 분석

연 구 내 용	연 구 결 과
표면온도(ERA5, DNN기반 IST) 자료에 따른 복사강제력 차이 분석	- 현재 (ERA5 기반) SIRF 분포 특성 : 6월~8월 기간에 Temperature-SIRF 변화량이 0 또는 감소 추세 : 위 언급한 ERA5 특징 반영됨  - 표면온도에 따른 계절별 복사강제력의 분포 차이  : DNN SIRF에서 겨울철(DJF) 큰 차이 발생 : Kara, Barents, Laptev해에서 높은 양의 복사강제력의 분포 : Net SIRF의 경우 극야가 시작되는 SON과 극야기간의 DJF에서 Albedo의 영향이 거의 없기 때문에, ERA5 SIRF에서 큰 기여 : DNN SIRF의 경우 Net SIRF를 산출하게 되면 Arctic Ocean에서의 Sea Ice가 지구온난화에 미치는 영향을 과대평가할 가능성 존재

□ 성과목표 6: 복사강제력 기반 Feedback 산출 및 평가

○ 세부목표 6-1: Net-SIRF를 활용한 Feedback 산출

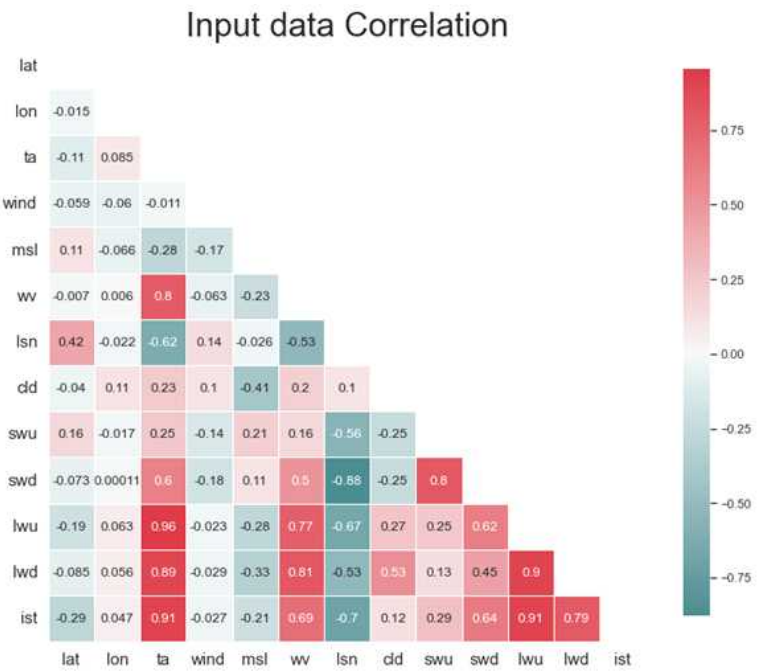
연 구 내 용	연 구 결 과
복사강제력 기반의 Feedback	- 현재 해빙표면에 따른 복사강제력을 활용한 Feedback

<table>
<tr><td>산출식 제시</td><td>(λ)은 Albedo에 대해서만 산출 중
(Flanner et al., 2011, Cao et al., 2015, Xiao et al., 2017)
- Feedback 산출식
$$\lambda = \frac{\triangle F}{\triangle T_s}$$
$\triangle F$: Feedback parameter
$\triangle T_s$: Surface Air Temperature의 변화량</td></tr>
<tr><td>선행연구(Albedo 기반 Feedback)의 접근방식과 본 연구(Albedo 및 Temperature)의 결과 비교</td><td>- 기존 선행연구(Albedo 기반) 연구결과
<table><tr><th>Unit (W/m²/C°)</th><th>Flanner (2011)</th><th>Cao (2015)</th><th>Chen (2016)</th><th>Xiao (2017)</th></tr><tr><td>Feedback</td><td>0.62 (0.33 – 1.07)</td><td>0.25</td><td>0.21 (±0.005)</td><td>0.18 (± 0.08)</td></tr><tr><td>Target</td><td>Snow & Sea ice</td><td>Sea ice</td><td>Snow</td><td>Snow</td></tr><tr><td>Study area</td><td>Northern Hemisphere</td><td>Northern Hemisphere</td><td>Snow-covered land mass in the Northern Hemisphere</td><td>North of 30°N</td></tr><tr><td>Study period</td><td>1979 – 2008</td><td>1982 – 2009 (March – September)</td><td>1982 – 2013</td><td>2003 – 2016</td></tr></table>
: 선행연구에서, 해빙지역의 표면변화에 따른 복사강제력을 활용한 Feedback은 Albedo에 대해서만 산출
: Feedback이란 표면에 대한 surface air temperature의 1도 상승에 따른 표면요소의 변화가 대기상단에 미치는 영향(복사강제력)을 정량화한 것
: sea ice albedo와 temperature를 모두 고려하여 적절한 지역을 선정
: 본 연구와 대비하여 해빙지역 기준 최대 3.59 W/m^2/K 차이 발생</td></tr>
</table>

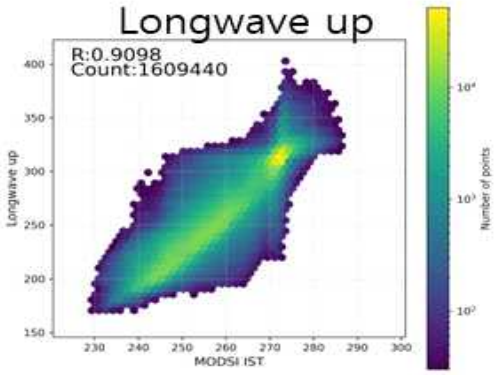
□ 성과목표 7: AI기반 IST 원형 알고리즘 개발

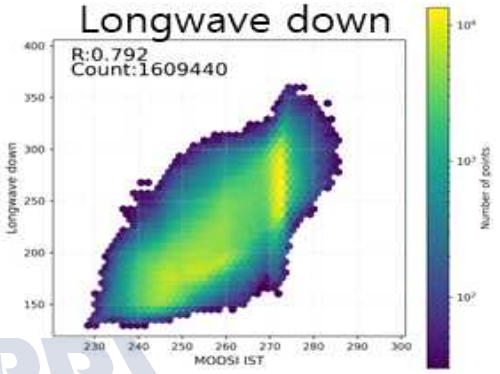
○ 세부목표 7-1: IST 산출을 위한 입력자료 선정

연 구 내 용	연 구 결 과
입력변수 선정을 위한 문헌 고찰 - 북극의 해빙표면온도와 관련 있는 기상인자 List-up	- Total Column Water Vapor (TCWV) : 북극의 경우 대기 중 수증기량(water vapor)와 표면온도와 밀접한 상관관계 나타남 (Key et al., 1997) - 2m air temperature (Ta) & Sea Ice Concentration (SIC) : 기온 – IST – 해빙농도 (SIC)와 상관성 분석 수행 : 해빙농도에 따라 다른 변화양상을 보임 (A. Tetzlaffet al., 2013) - Solar Zentih Angle (SZA) & Local Solar Noon angle (LSN) : SZA에 따라 기온-IST 차이의 패턴 변화 발생

	(Christopher A. et al.,2014) - Wind : 북극의 경우 IST와 wind vorticity를 입력변수로 하여 Sea Ice Extent 추정에 높은 정확도를 보임 (Kang et al., 2014) - Latitude : 지표에 도달하는 태양에너지는 위도에 따라 상이하며 그에 따른 온도 차이가 뚜렷하게 관측됨 (Seo et al. 2020) - Cloud fraction : 구름의 영향은 구름의 특성에 따라 달라져 해석하기 어렵지만 해빙 표면에 예상되는 구름의 온난화 효과와 연관성이 있음 (Comiso et al., 2017) - Sea Level Pressure (SLP), Mean Sea Level Pressure : SLP의 기울기 변화에 의해 유도되는 바람이 해빙의 재배분과 열의 유입에 영향을 미침 (Olga et al., 2013) - Upwelling and downwelling shortwave & longwave radiation : Surface energy budget은 대기와 해빙간 열교환을 제어하며 해빙 성장 및 융용, 증발, 대기 구조 및 안정성에 영향을 미침 (Bintanja & Krikken et, 2016)
변수 간 상관성, 독립성 평가를 통한 입력자료 후보 선정	 - 입력변수간 상관관계 분석

KOPRI 극지연구소



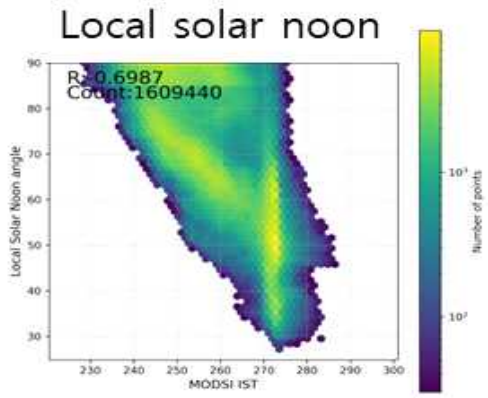


KOPRI
극지연구소

: Longwave Radiation flux는 온도와 직접적인 연관이 있는 입력자료

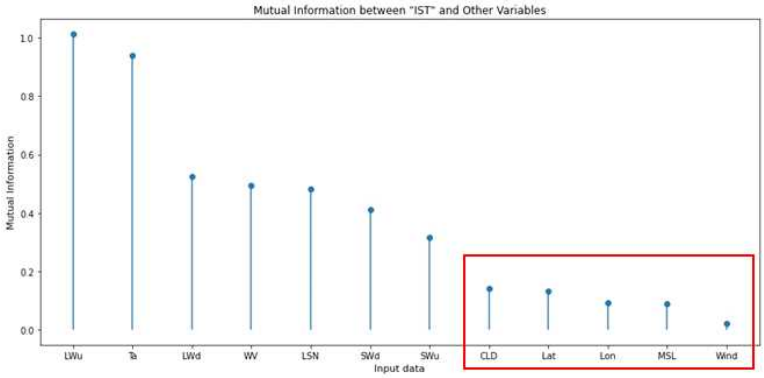
: Wang et al., (2001)에서 구름의 수직 분포에 따른 Longwave Radiation의 변화가 북극의 해빙표면에 상당한 영향을 미친다는 결과에 따라 Radiation, Cloud data 입력자료 선정

: up(0.91), down(0.79)로 큰 양의 상관성을 보임



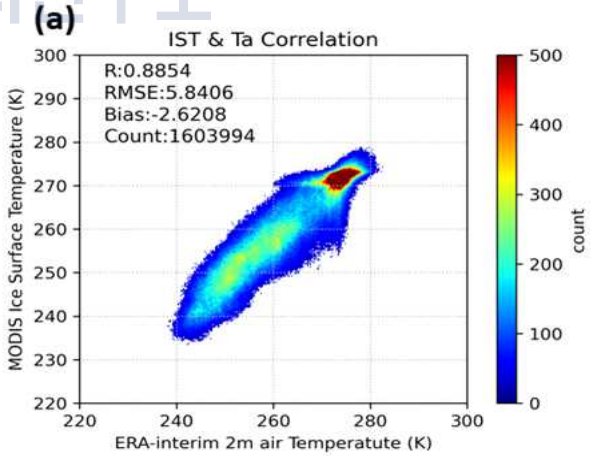
: Local Solar Noon angle은 지구중심-타겟-태양이 이루는 각도를 나타내며, 계절성을 대변

: 각도가 커질수록 들어오는 태양복사가 감소하므로 IST와 큰 음의 상관관계(-0.7)를 보임

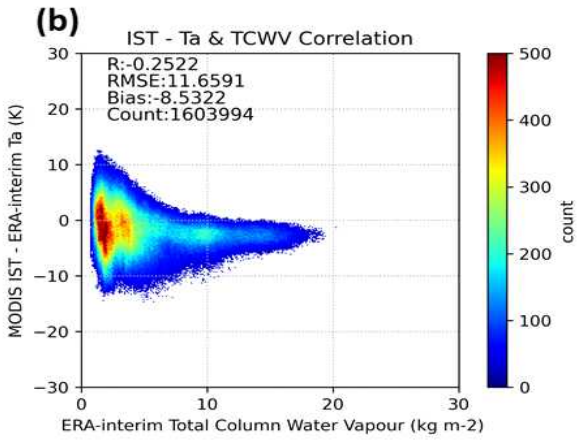


- 입력변수와 IST 간의 상호정보량 평가
  : 상호정보량 또한 상관관계를 측정하는 방법
  : 10m wind speed와 IST간의 상관성은 피어슨 상관계수(-0.027), 상호정보량(0.02)으로 낮음
  : Mean Sea Level pressure의 상관계수(-0.21), 상호정보량(0.07)
  : Cloud Fraction 상관계수(0.12), 상호정보량(0.11)

KOPRI 극지연구소



- IST & Ta 상관관계 (Sim et al., 2022)
  : R = 0.8854, RMSE = 5.8406 으로 양의 상관관계

	 - TCWV 증가에 따라 Ta와 IST의 차이 감소 (Sim et al., 2022) : TCWV의 증가는 대기와 해양 간의 열적 교환 증가

○ 세부목표 7-2: IST 산출을 위한 위성기반 및 재분석 자료 수집 및 전처리

연 구 내 용	연 구 결 과
위성자료 및 재분석 자료 수집	- Ice Surface Temperature Sensor/Platform : MODIS/Terra Spatial resolution : 4 km Spatial coverage : N: 90, S: -90, E: 180, W: -180 Temporal resolution : Daily Data period : 2000 to present - Sea Ice Concentration Sensor/Platform : AVHRR Spatial resolution : 0.25 degree Spatial coverage : N: 90, S: -90, E: 180, W: -180 Temporal resolution : Daily Data period : 1982 to present : SIC가 15% 이상인 지역을 해빙지역으로 간주 - Long/Shortwave Radiation & Cloud Fraction Sensor/Platform : CERES Spatial resolution : 1.00 degree Spatial coverage : N: 90, S: -90, E: 180, W: -180 Temporal resolution : Daily Data period : 2002 to present : Cloud Fraction은 High, Middle, Low, Total 4가지로 제공되며, Total Cloud Fraction 입력변수 활용

KOPRI 극지연구소

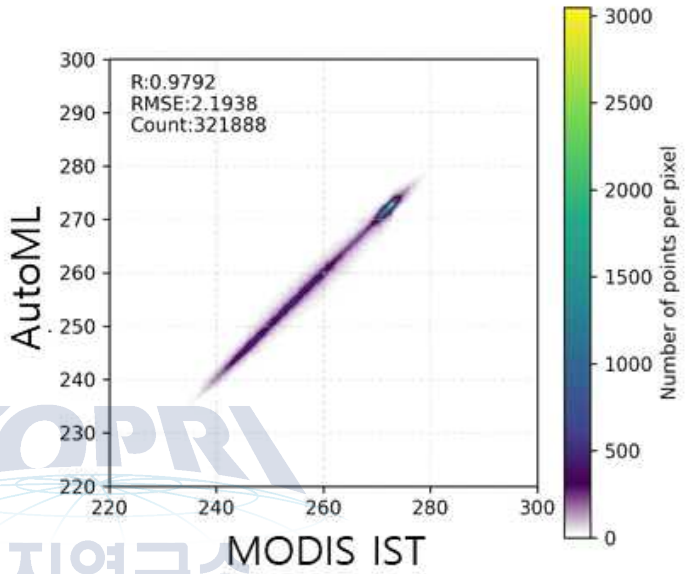
	- Air Temperature, 10m wind speed, Total Column Water Vapor, Mean Sea Level pressure Sensor/Platform : ERA5 Reanlaysis Spatial resolution : 0.25 degree Spatial coverage : N: 90, S: -90, E: 180, W: -180 Temporal resolution : Hourly Data period : 1940 to present : 10m wind speed data는 수직, 수평 성분의 속력으로 제공되며, 수직, 수평 속력의 합력을 구하여 변수 활용 - Sea Ice Age Sensor/Platform : AMSR-E, AVHRR Spatial resolution : 12.5 km Spatial coverage : N: 90, S: 29.7, E: 180, W: -180 Temporal resolution : 7 Day Data period : 1984 to 2022.12
Lambert azimuthal equal area 좌표계로 re-mapping	위성/재분석자료 모두 geographic projection 으로 구성 : 북극 지역을 관찰하기 어려움 - 위성자료를 EASE-2 grid로 변환

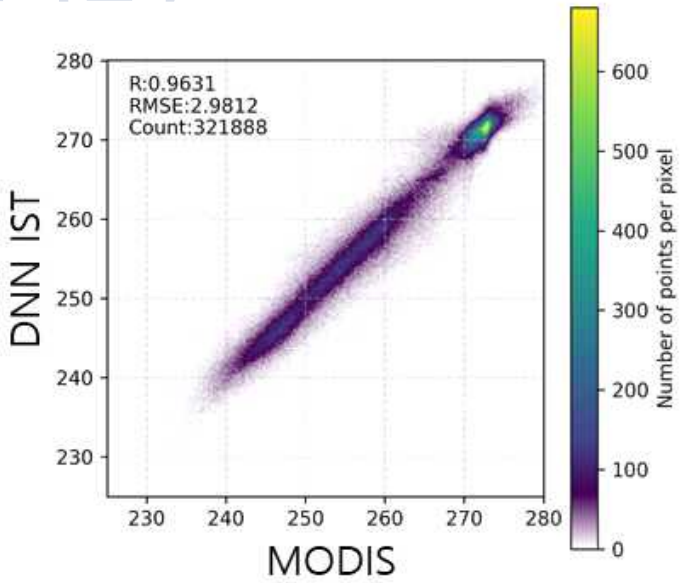
○ 세부목표 7-3: AI기반 IST 알고리즘 구축(1)

연 구 내 용	연 구 결 과
AutoML기반 IST 산출 및 DNN IST 정확도 비교	- AutoML기반 IST 입력변수 Satellite data: Radiation(SWU,SWD,LWU,LWD), MODIS IST, Sea Ice Concentration, Cloud Fraction Reanalysis data: air Temperature, Mean Sea Level Pressure, Total Column Water Vapor, Wind speed Auxiliary data: latitude, longitude, Local Solar Noon angle - DNN기반 IST 입력변수(1단계 연구결과 기준)

KOPRI 극지연구소

	Satellite data	MODIS IST
	Reanalysis data	air Temperature Total Column Water Vapor Ta background data(30 years mean data)
	Auxiliary data	latitude longitude Local Solar Noon angle Solar Zeinth Angle





KOPRI
극지연구소

- Training/Validation/Test ratio
: 6: 2: 2의 비율로 모델에서 작동
: Sic ≥ 15% 이상인 지역을 해빙지역으로 간주
- AutoML IST와 DNN 기반 IST 비교
: AutoML IST(R:0.98, RMSE:2.19K), DNN IST(R:0.96,

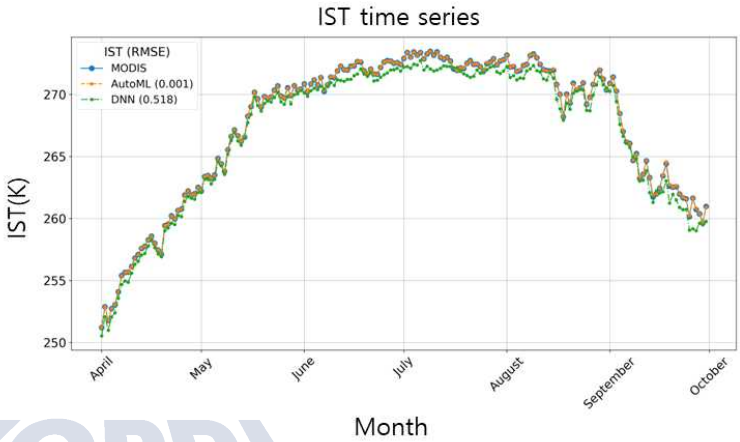
RMSE:2.98K)로 정확도가 높아짐

- 입력자료의 영향

: AutoML IST의 입력자료 중 Wind Speed, Cloud Fraction, Mean Sea Level Pressure와 같이 IST와 상관성이 낮은 변수가 입력자료로 사용되었지만 Radiation자료가 정확도 향상에 큰 영향

- AI Model 영향

: Scikit-learn AutoML은 수치적으로 구조화된 데이터에 특히 적합하며, 자동적으로 최적의 라이브러리 내의 모델과 하이퍼파라미터 튜닝을 수행



- MODIS IST가 존재하는 픽셀에 대해서 일평균 IST 시계열 그래프 (4월-9월)

: 4월-9월 기간에서 MODIS IST와의 차이는 AutoML IST(RMSE: 0.001), DNN IST(RMSE: 0.518)로 정확도 측면에서 AutoML이 좋은 성능을 보임

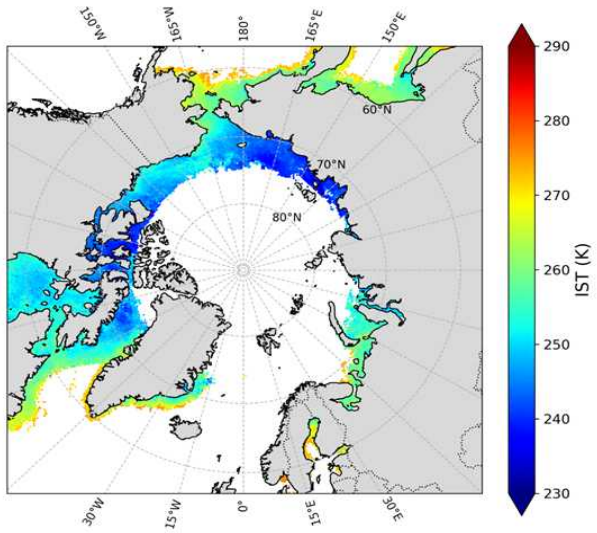
: 시계열 trend에서는 MODIS와 AutoML이 거의 유사한 경향을 보임

: DNN IST는 해빙이 본격적으로 녹기 시작하는 6월부터(270K 부근) 차이가 발생

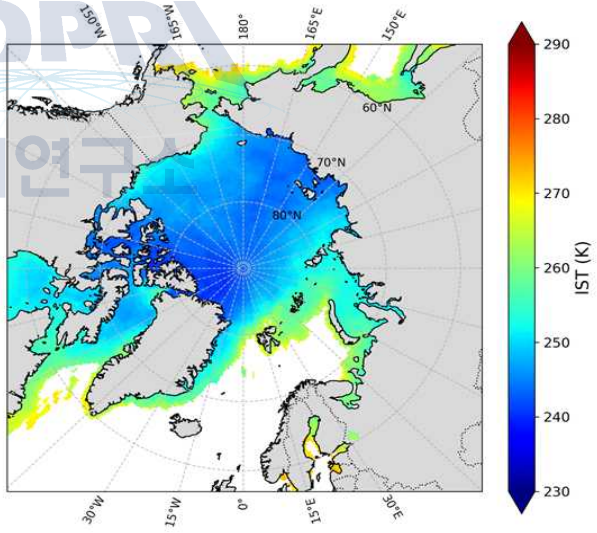
: AutoML IST는 270K 부근에서도 유사한 경향을 보임

- IST 정성적 비교

MODIS IST(K) 1월

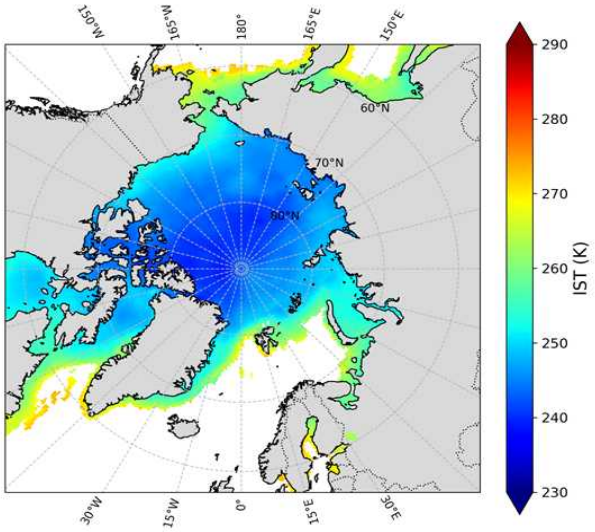


AutoML IST(K) 1월



KOPRI
극지연구소

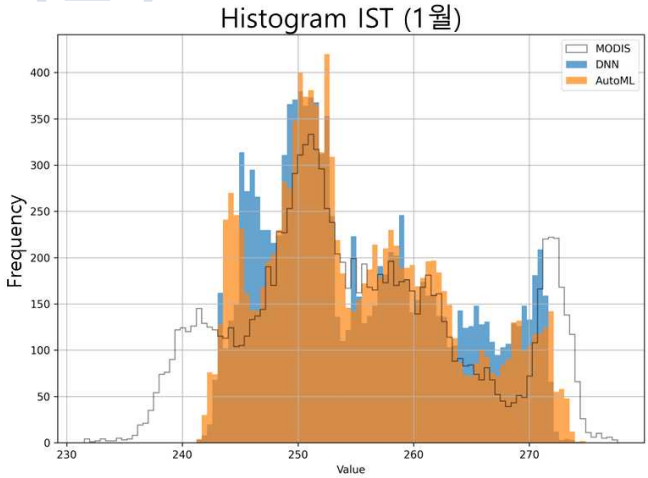
DNN IST(K) 1월



- 1월 IST 산출물 비교
: MODIS IST는 겨울철 극야기간에 Cloud 식별 문제로 인해 IST missing이 발생
: AutoML IST, DNN IST Gap-fill 확인
: DNN IST에 비해 AutoML IST가 1월의 북극 중앙의 온도가 높게 산출된 것이 확인

KOPRI 극지연구소

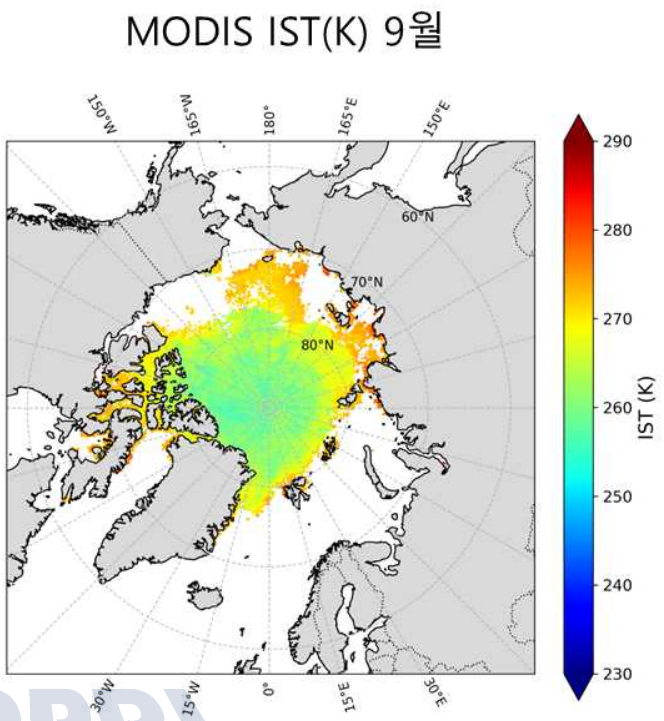
Histogram IST (1월)



- 1월 IST 산출물 Histogram
: MODIS와 비교하여 AutoML, DNN IST 모두가 극단적으로 높거나 낮은 값을 반영하지 못함
: 낮은 값을 따라가지 못하기 때문에 245K 부근에서 값이 쌓여있으나, 265K 부근에서는 DNN보다 성능

이 뛰어난 것을 확인

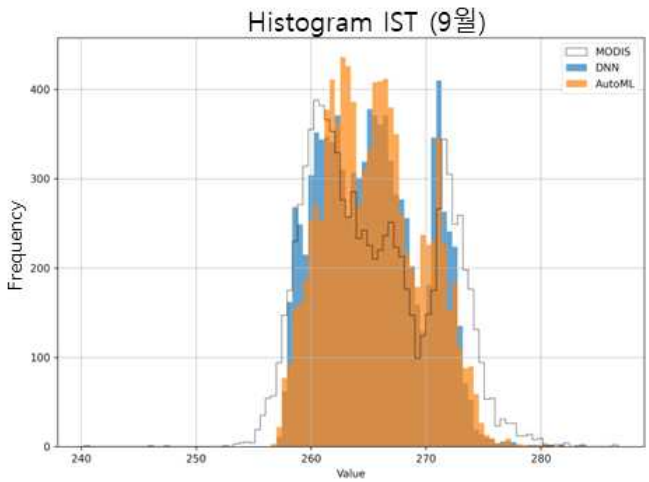
- 9월 IST 산출물 비교



KOPRI
극지연구소

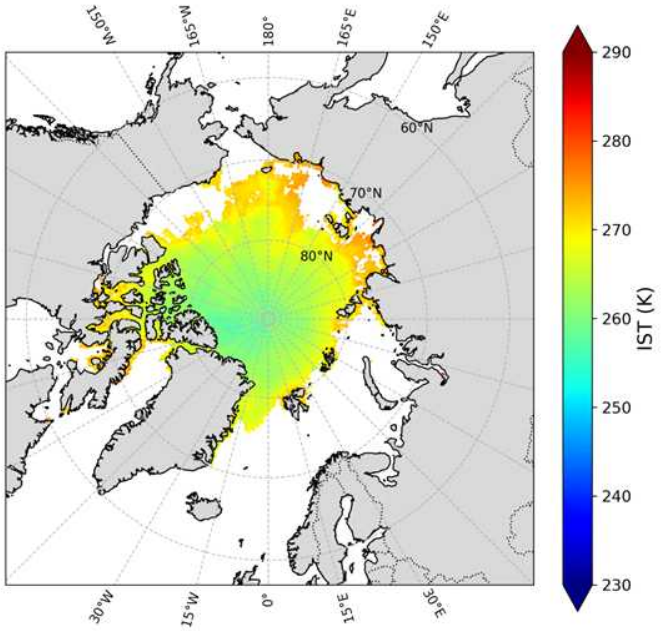
-

- 9월 IST 산출물 비교
: MODIS, AutoML, DNN 모두 비슷한 분포를 보임

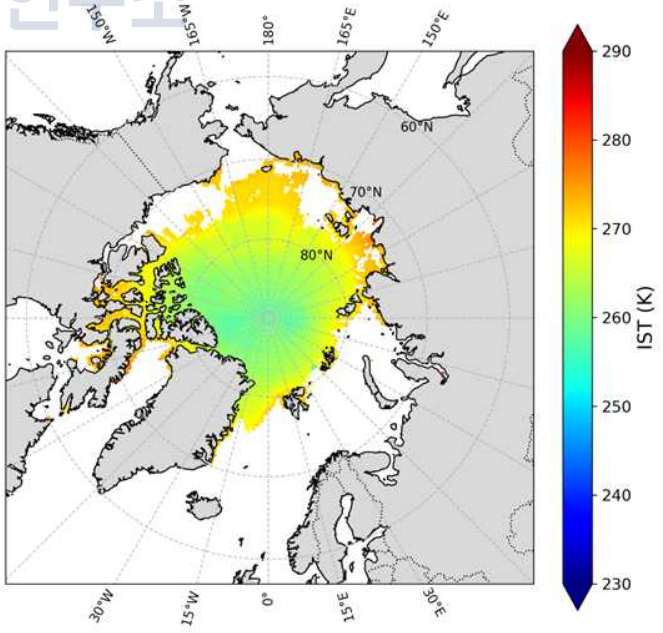


- 9월 IST 산출물 Histogram
: 1월의 IST 산출과 마찬가지로 양극단의 값을 제대로 따라가지 못함

AutoML IST(K) 9월



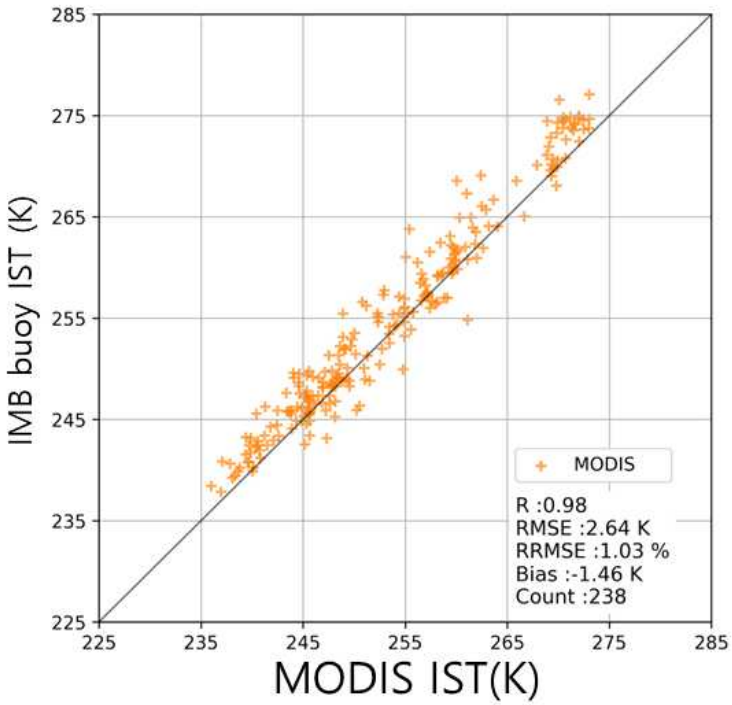
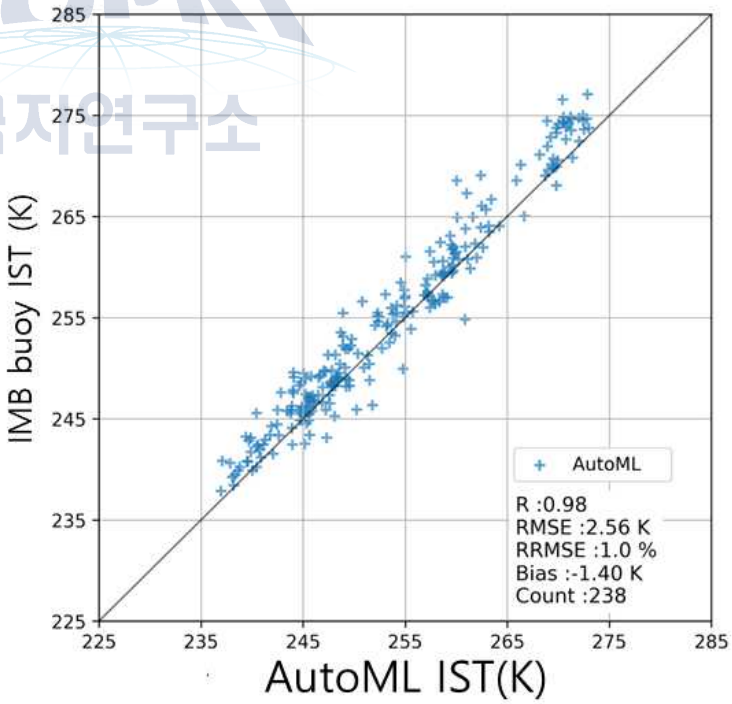
DNN IST(K) 9월



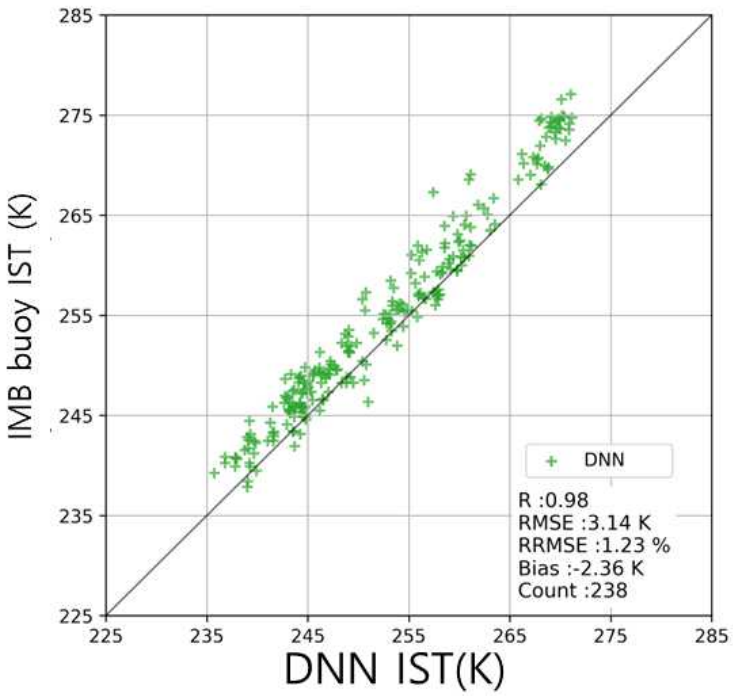
: AutoML, DNN IST 모두 9월에서 260K-270K 사이의 값으로 추정

: MODIS에 비해 AutoML, DNN에서 위쪽 부근에서 더

KOPRI 극지연구소

	많은 pixel에서 IST 산출이 된 결과로 분석
현장 관측 자료와 IST 정확도 비교	- IMB buoy Ice Surface Temperature(K)와 정확도 검증 수행(MODIS, AutoML, DNN)   - 정확도 비교

KOPRI 극지연구소

	 : 상관계수(R)는 MODIS, AutoML, DNN 동일 : RMSE에서는 AutoML(2.56K)> MODIS(2.64K) >DNN(3.14K)로 AutoML이 가장 정확도가 뛰어남 : 현장 관측자료인 buoy 자료 검증에서도 AutoML IST가 정확도가 가장 뛰어남

극지연구소

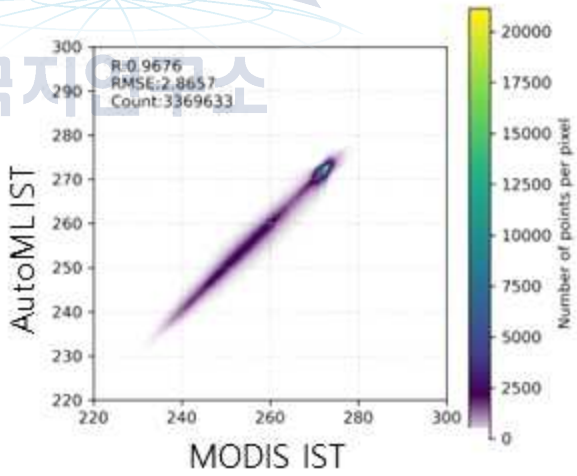
□ 성과목표 8: AI기반 IST 알고리즘 평가

○ 세부목표 8-1: AI기반 IST 알고리즘 구축(II)

연 구 내 용	연 구 결 과
- 선행연구를 바탕으로 북극 연구 및 시계열 Gap-filling에 활용된 AI 기반 알고리즘 구축(II)	- Passive Microwave Brightness Temperature 자료를 활용한 해빙표면 관련 변수 산출 : Xin et al., (2024)에서는 수직 편광 밝기온도 자료를 활용하여 극궤도 위성에서 산출한 IST를 target data로 활용하여 Inversion 연구 진행 : Emmihenna et al., (2022)에서는 Passive Microwave 자료를 활용하여 회귀분석을 통한 black sky albedo를 산출하는 연구 진행 - 선행 연구를 통해 해빙표면의 물리적 특성에 관련된 변수인 Ice Surface Temperature, Albedo 산출에 적용할 수 있다는 것을 확인 : Sea Ice Concentration의 Boostrap 알고리즘에서는 polarization ratio와 gradient ratio를 통해 채널간의 차이 및 비율을 통해 ice age, ice concentration을 산출

Variables	R
Local solar noon angle	-0.70
v22_v37	-0.42
h37_h91	-0.61
v19_h91	-0.55
pr37	0.55
grv22_19	0.62
h19_h37	-0.52
h19_v37	-0.61
v91	0.61
Outgoing longwave radiation	0.90

- 위의 입력변수를 활용하여 AI 기반 장기간 IST 산출 사용가능성 평가를 진행
- Training/Validation/Test ratio
  : 6: 2: 2의 비율로 모델에서 작동
  : Sic ≥ 15% 이상인 지역을 해빙지역으로 간주
- Target data는 MODIS IST이며, 10년의 기간을 train/validation/test data로 사용

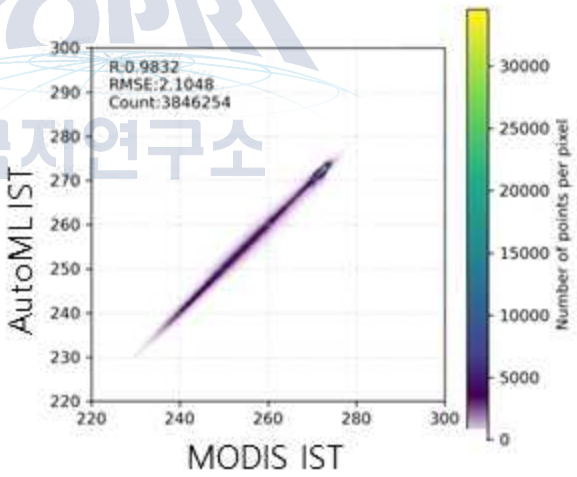


- Automated Machine Learning을 활용하여 IST를 산출한 결과 R(0.98), RMSE(2.19 K)로 장기간 산출에도 준수한 정확도로 IST 산출 가능성을 확인
- 1차년도 연구에서 사용한 입력변수
  AutoML기반 IST 입력변수(1차년도) 장기간 IST 산출 사용가능성 평가 진행

KOPRI 극지연구소

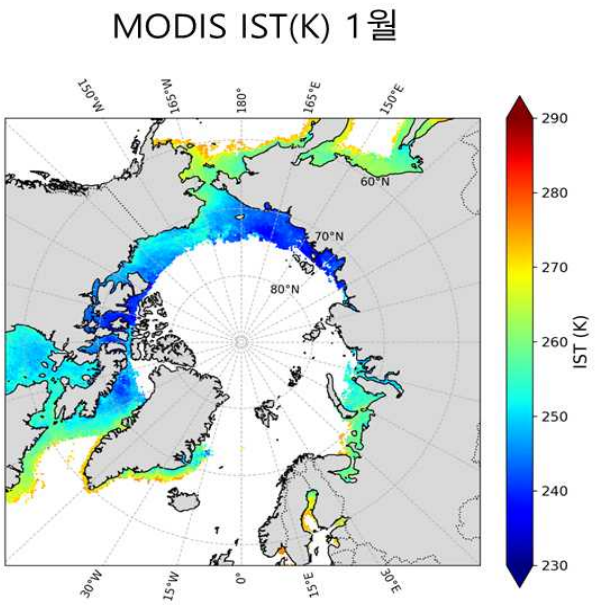
Satellite data	Radiation(SWU,SWD,LWU,LWD) MODIS IST Sea Ice Concentration Cloud Fraction
Reanalysis data	air Temperature Mean Sea Level Pressure Total Column Water Vapor Wind speed
Geometry data	latitude longitude Local Solar Noon angle

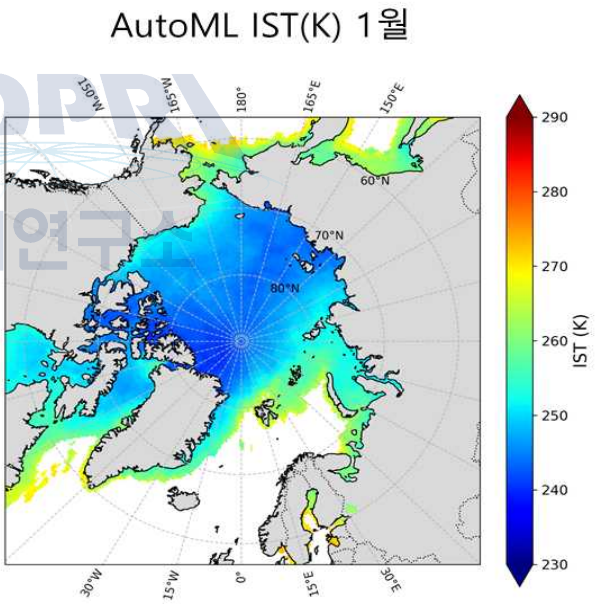
- 장기간으로 산출하기 위해서는 1988년부터 제공되는 자료가 필수
  : 기존 CERES Radation 자료는 2000년부터 제공
  : AVHRR Outgoing Lonwave Radiation자료 및 ERA5 Shortwave Surface donward 자료로 대체
  : Sea Ice Concentration 자료는 입력자료에서 제외
  : Cloud Fraction Wind speed는 IST와 상관성이 낮은 변수로 입력에서 제외



- 동일한 기간에 다른 입력변수의 조합으로 사용가능성을 평가한 결과
  : R(0.98), RMSE(2.10 K)로 target인 MODIS IST를 보다 정확하게 예측하는 것을 확인
- IST 정성적 비교 결과
-

KOPRI 극지연구소

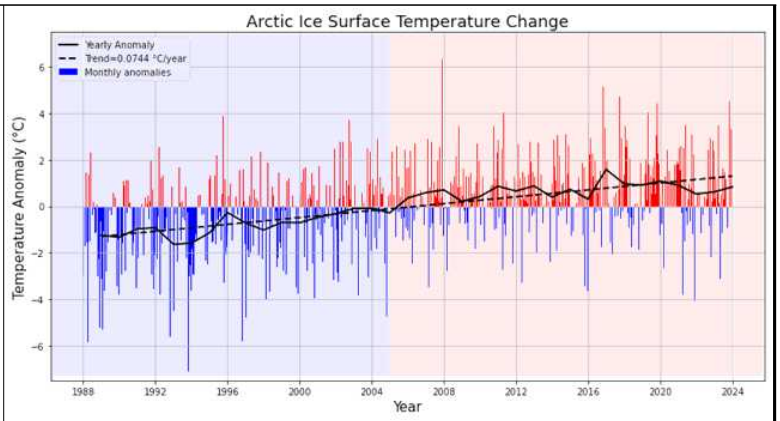


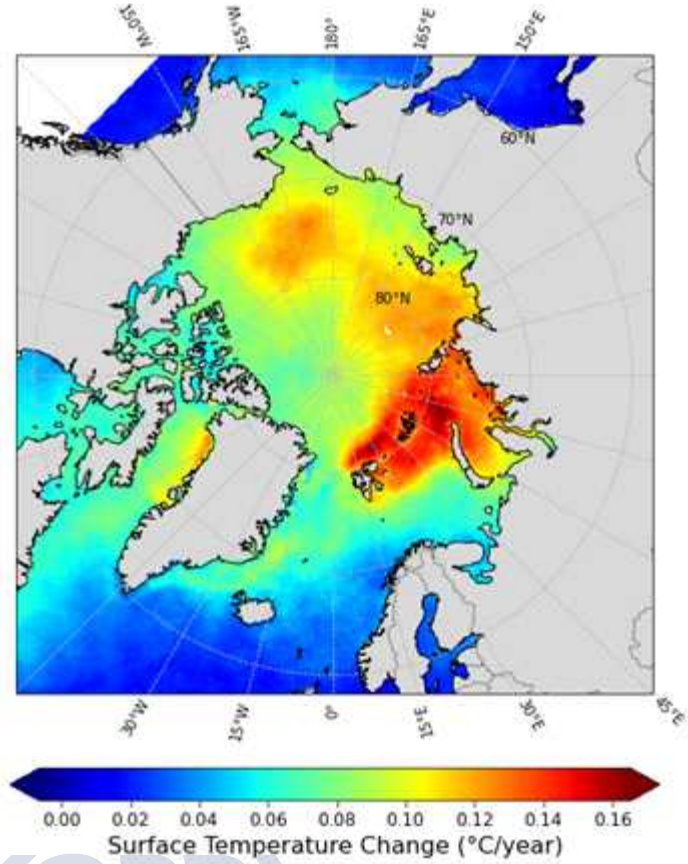


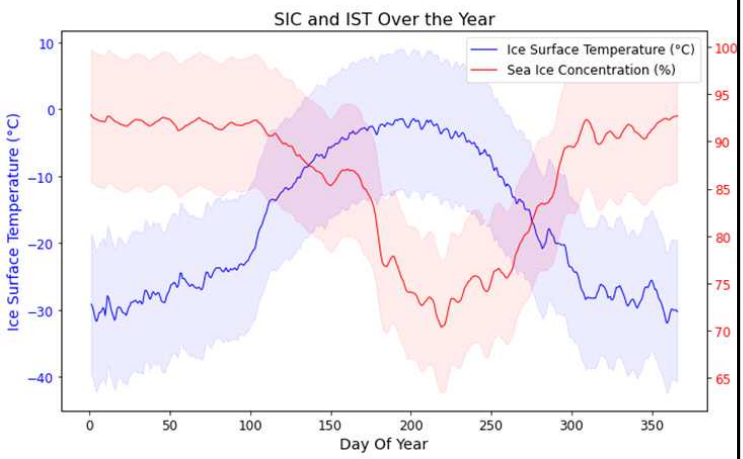
KOPRI 극지연구소

○ 세부목표 8-2: 알고리즘에 따른 북극 지역의 IST 시공간 특성 분석

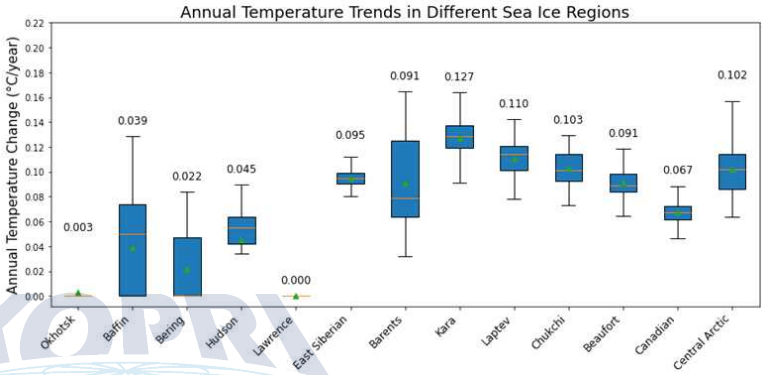
연 구 내 용	연 구 결 과

- 북극권 지역을 중심으로 알고리즘에 따른 연구기간 동안의 IST 특성 분석	 IST anomaly 분석 결과(1988-2023) : Yearly anomaly trend는 매년 0.0744 ℃ 증가하는 경향(36년 총 2.66℃ 증가) - 2004년 이후의 시점을 기준으로 Monthly anomaly 변동성이 반대 경향 : 2000년대 중반 이전에는 음의 anomaly를 주로 보이고 있었다면, 이후의 시기에는 양의 anomaly가 두드러지게 보이는 패턴 - 선행연구에서는 2005년, 2007년 기록적 해빙감소가 있었던 원인으로 구름 양 감소와 태양복사 증가로 설명 (Kay et al., 2008) - 또한 온난화가 진행되면서 해빙감소와 태양복사의 증가로 인해 사전 조절되었다고 설명하고 있으며, 해빙감소의 영향으로 Sea Ice – Albedo Feedback이 양의 피드백의 심화 (Comiso et al., 2008)

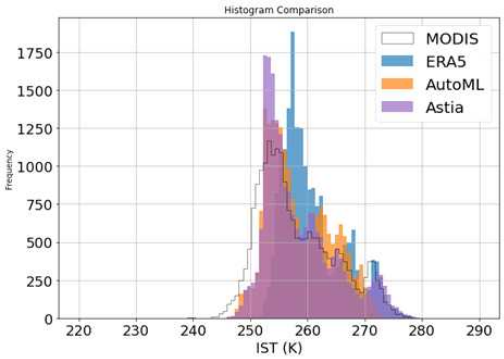
<table>
<tr>
<td></td>
<td> 

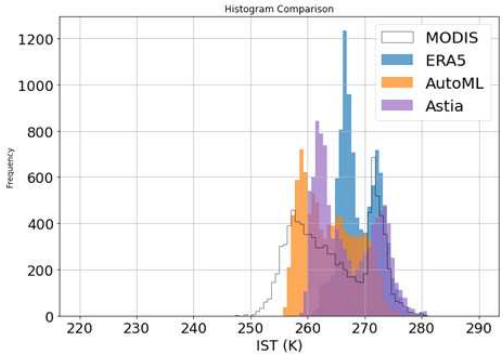
- Yearly IST Trend의 공간적 변화를 확인한 결과
- 현재 대부분 영역에서 증가하는 추세를 보이지만, 고위도 지역 북위 70도 이상에서 특히 36년 동안 큰 증가를 보이는 것을 확인
: 고위도 지역에서 36년 동안 약 5°C 증가
: Warming이 집중되는 지역은 위도 65도 이상의 해역에서 주로 발생
: Kara, Baremts, Laptev, Chukchi 해역은 북극 증폭이 1981-2010의 평균에 비해 온도 상승이 강하게 일어난 해역과 유사 (Michon scott, 2020)</td>
</tr>
<tr>
<td>- 다양한 해역 / 계절 / 기상인자에 따른 시·공간 특성 분석</td>
<td>- 계절에 따라 증가와 감소의 변화 패턴을 확인하기 위해 Day of Year에 따른 시계열 변화 확인
 

- 해빙이 녹기 시작하는 시점부터 다시 겨울철이 되기</td>
</tr>
</table>

	까지 증가와 감소 경향이 뚜렷하며, Sea Ice Concentration의 변화 경향과 대비되는 점을 보아 Seasonal Cycle이 뚜렷하게 관찰됨 - 또한 극야와 백야 시기에 가까워지는 때에 급격한 온도 변화가 발생 - 겨울철 온도 변동성이 여름철에 비해 높음 : 사이클론과 안티사이클론과 같은 대기 순환의 영향으로 겨울철 온도 변동성이 큰 이유에 대해 설명 (Nielsen-Englyst et al., 2023) - 계절에 따른 온도와 해빙농도의 변동성 차이를 확인하였으며, 이에 따라 대기 순환 패턴의 영향을 잘 반영 - 해역에 따른 IST 연간 변화 경향  : 1988-2023 36년에 걸쳐서 Baffin, Barents, Kara, Central Arctic에서 IST의 큰 증가가 있는 것을 확인 : 특히 Barents, Kara에서 큰 증가를 이루고 있는 것을 보아 Warming에 주도적인 역할을 하는 것으로 보임

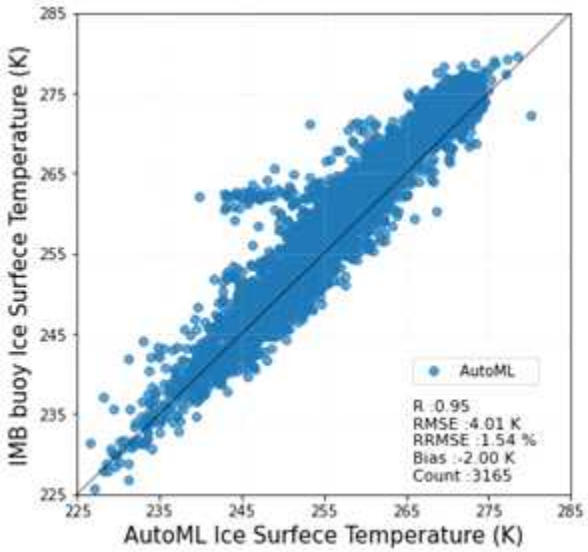
○ 세부목표 8-3: 현장자료 및 타 위성자료를 활용한 AI 기반 IST 산출물 자료 검증/비교

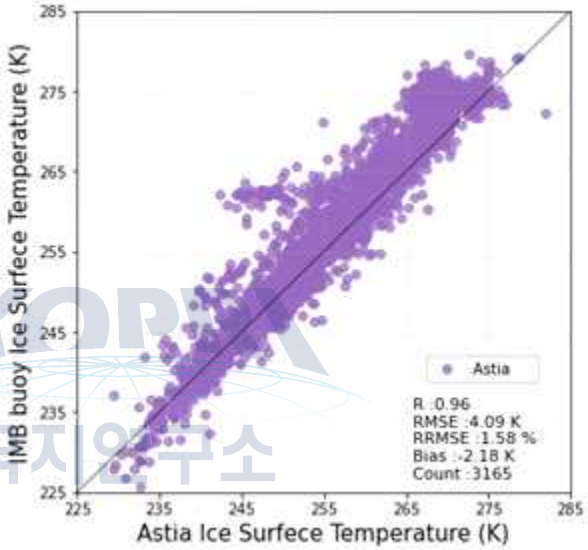
연 구 내 용	연 구 결 과
- 타 위성자료 및 현장 관측자료와의 비교/검증을 통하여 AI 기반의 IST 산출물 정확도 제시	 2012년 4월 IST (K) 분포

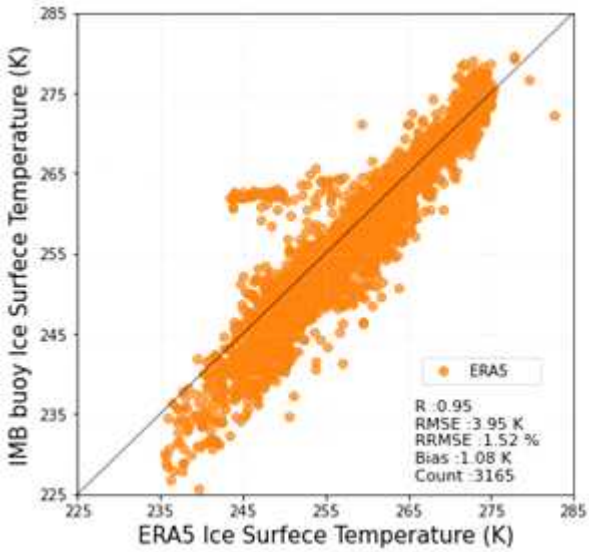


2015년 9월 IST (K) 분포

- AutoML 기반으로 산출한 IST와 다른 기관에서 제공하는 Reanalysis 및 Level 4 IST와 Inter-Comparison
- ERA5 Skin Temperature – 0.25 degree, Hourly, 1978 to present
- Copernicus Level 4 IST (ASTIA) - 0.05 degree, Daily, 1982 to 2022
- AutoML IST – 0.25 degree, Daily, 1988 to 2023
- 모든 자료는 Great Circle distance를 사용하여 0.25 degree로 remapping을 수행하였으며, Sea Ice Concentration이 15% 이상인 지역에서 비교를 수행
- 중첩 지역의 IST (K) 분포 비교
  : ERA5에서 MODIS IST에 비해 높은 값에 분포를 보이고 있으며, Astia에서는 2012년 4월에서는 어느정도 위성자료 분포와 일치하는 기간도 있으나, 2015년 9월 분포에서는 낮은 값의 분포에서 차이를 확인
  : AutoML IST에서는 MODIS를 target으로 예측을 진행하였기 때문에, 분포에서는 가장 유사한 것으로 보임
- Cold Regions Research and Engineering Labotory (CRREL) Ice Mass Balance Buoy
  : Sea Ice Concentration 15% 이상, Ice Type 고려 (Pancake, Unspecified 제외)
  : 2000부터 2016년의 기간 동안 일치하는 지점 사용







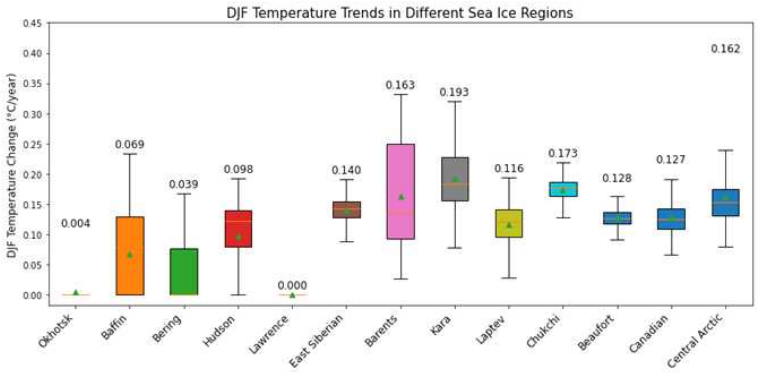
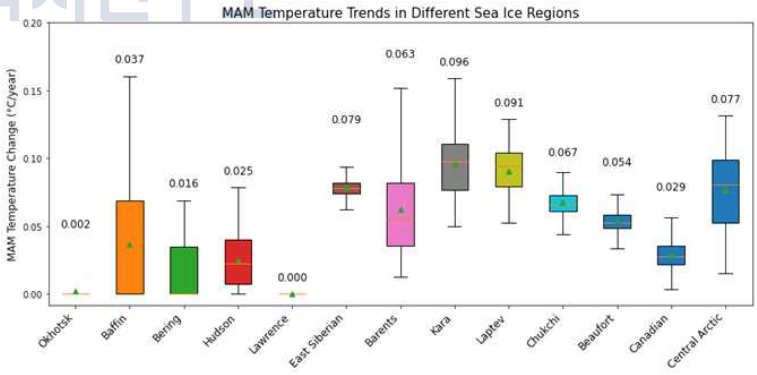
: MODIS IST QC자료를 활용한 검증 pixel 선정

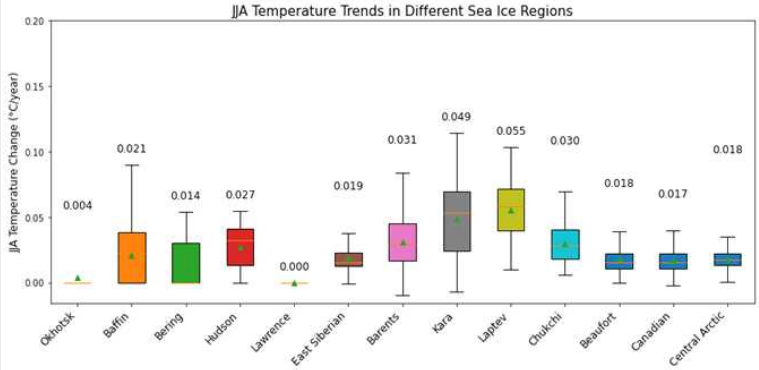
: AutoML IST R(0.95), RMSE(4.01 K), Bias(-2.00 K)

: Astia IST R(0.96), RMSE(4.09 K), Bias(-2.18 K)

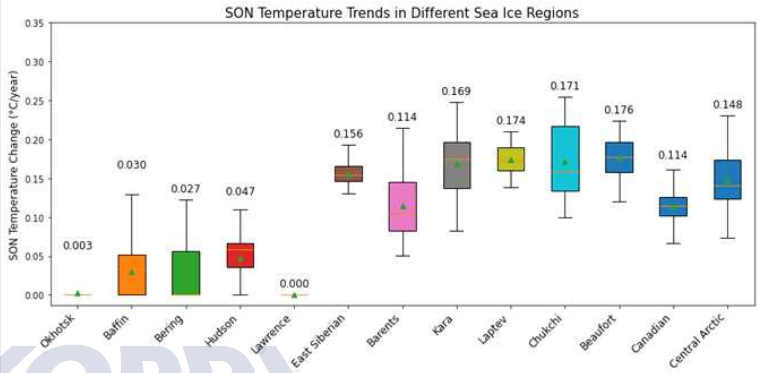
: ERA5 IST R(0.95), RMSE(3.95 K), Bias(1.08 K)

KOPRI 극지연구소

	: AutoML을 활용한 장기간 북극 해빙표면온도 산출을 통해 기관에서 제공하는 IST와 유사한 정확도의 장기간 결측없는 자료를 생산 : Astia IST와 비슷하게 위성자료를 기반으로 IST를 산출을 진행했기 때문에 cold bias를 보이며, ERA5에서는 Warm Bias를 보이고 있음
- 해역 및 계절에 따른 특징 분석 수행	- 해역에 따른 DJF 평균 온도 변화  - DJF 평균 온도 변화는 0.096 ℃ 증가하는 경향을 보이며, 연평균에 비해 0.022 높은 경향 - 고위도에 위치한 해역에서 연평균에 비해 높은 온도 증가 경향을 보임 - 해역에 따른 MAM 평균 온도 변화  - MAM 평균 온도 변화는 0.046 증가하는 경향을 보이며, 연평균에 비해 0.028 낮은 온도 변화를 보임 - Baffin, Barents, Kara, Central Arctic에서 큰 변동을 보이는데, 이것은 극야에서 벗어나 큰 온도 변화가 발생하기 때문에 발생한 변동성 - 해역에 따른 JJA 평균 온도 변화



- JJA 평균 온도 변화는 0.024 증가하는 경향을 보이며, 연평균에 비해 0.05 낮은 온도 변화를 보임
- 해역에 따른 SON 평균 온도 변화



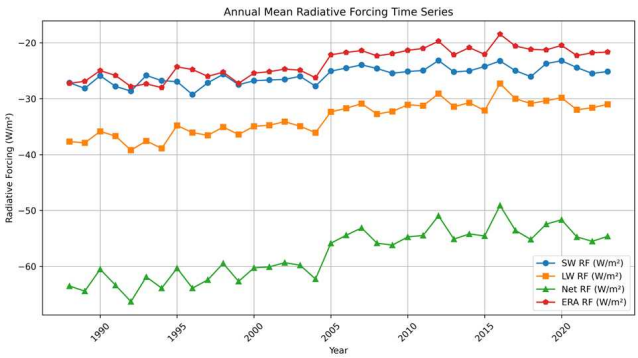
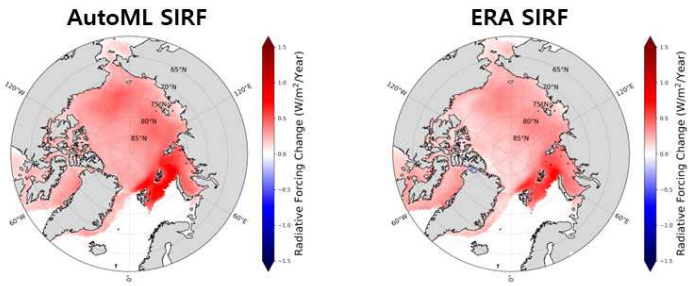
- SON 평균 온도 변화는 0.105 증가하는 경향을 보이며, 연평균에 비해 0.031 높은 변화를 보임
- Beaufort, Chukchi, Kara, Laptev등 고위도에 위치한 해역에서 온도 상승 경향이 큼

	DJF	MAM	JJA	SON
Okhotsk	0.004	0.002	0.004	0.003
Baffin	0.069	0.037	0.021	0.030
Bering	0.039	0.016	0.014	0.027
Hudson	0.098	0.025	0.027	0.047
East Siberian	**0.140**	0.079	0.019	**0.156**
Barents	**0.163**	0.063	0.031	**0.114**
Kara	**0.193**	0.096	0.049	**0.169**
Laptev	**0.116**	0.091	0.055	**0.174**
Chukchi	**0.173**	0.067	0.030	**0.171**
Beaufort	**0.128**	0.054	0.018	**0.176**
Canadian	**0.127**	0.029	0.017	**0.114**
Central Arctic	**0.162**	0.077	0.018	**0.148**

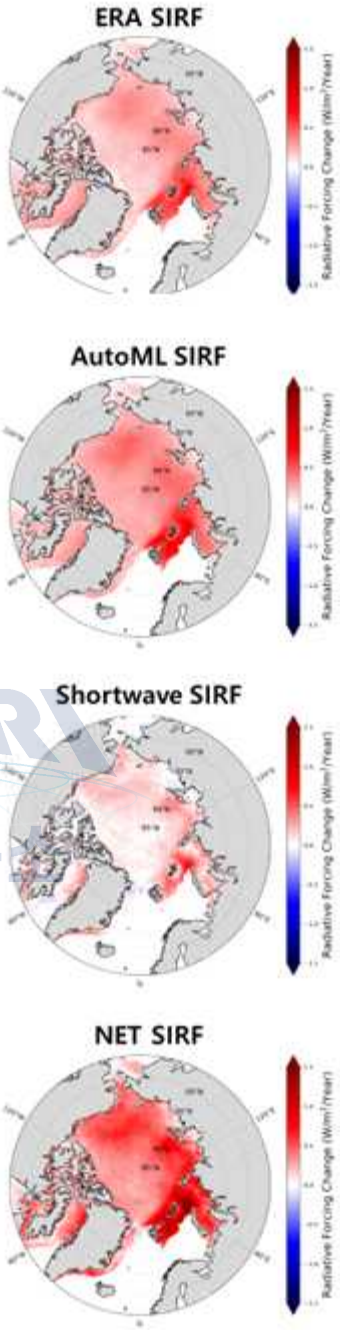
- 전체적으로 증가 추세를 보이지만, 겨울과 가을에 Warming이 집중된 패턴
- 봄, 여름의 영향은 거의 없음
- 북극 증폭 또한 여름에는 거의 없으며, 가을과 겨울철에 집중된 형태(Johannessen et al., 2016)
- 전체적으로 고위도 지역의 해역에서 Warming이 집중되어 있으며, Kara, Barents, Laptev, Chukchi 해역에서의 큰 온도 증가가 관찰됨

□ 성과목표 9: 복사강제력 기반 Feedback 평가

○ 세부목표 9-1: 최종 선택된 AI 기반의 IST를 바탕으로 복사강제력 산출

연 구 내 용	연 구 결 과
최종선택된 AI 기반의 IST를 바탕으로 복사강제력 산출	- 북극 해빙지역 복사강제력 산출의 시계열적 변화 분석  : 1단계 연구의 결과를 토대로, 5개의 GCM kernel의 평균값을 사용하여 복사강제력 산출 및 피드백 산출 진행 : ERA5 skin temperature를 사용한 복사강제력과 AutoML 기반의 복사강제력은 연평균에서 약 10 W/m2 차이 발생 : 연간 변화에서 유사한 변동성을 보이며, 비슷한 증가 경향을 확인 : 본 연구에서 산출한 Net SIRF는 1단계 연구와 비교하여 해빙지역에서의 표면변화에 따른 TOA flux에 미치는 영향을 보다 낮게 평가 --> 온난화에 미치는 영향 ↓ - 북극 해빙지역 복사강제력 변화 경향 확인  : 1988년부터 2023년까지 복사강제력 산출을 통한 연별 변화경향을 비교한 결과 : AutoML SIRF trend(0.28±0.16), ERA5 SIRF(0.23±0.13)으로 본 연구에서 산출한 IST 기반의 복사강제력에서 북극지역에서 평균적으로 더 높은 증가 경향을 확인 : 전반적인 해역에서 ERA SIRF에 비해 높은 trend 값

KOPRI 극지연구소

	이 분포되어 있는 것을 확인 - Net SIRF trend 분포 결과  : Shortwave RF, Longwave RF 모두 시베리아 인접해역(Kara, Laptev, Chukchi)에서 1.3 $Wm^{-2}yr^{-1}$ 이상강한 양의 추세가 집중 : Greenland 및 Barents에서도 뚜렷한 온난화 핫스팟이 존재 : 알래스카 연안·베링 해는 미미하거나 약한 음(-) 값 → 해빙 잔존 + 겨울 단파 입력량 적음 - ERA SIRF vs AutoML SIRF

KOPRI 극지연구소

: AutoML(IST 기반)**는 카라 라프테프 추코치 축에서 강도가 더 높음 → 얼음 상부 온도 변화(IST)의 직접 효과가 큼

: “표층(Skin) vs 상부 얼음(IST)” 온도 지표 선택이 SIRF 공간 패턴에 미치는 영향을 확인

- NET SIRF

: 전체 북극권 양의 RF 증폭

- 해역별 복사강제력 경향 분석

Region	Net RF Trend (W/m²/year)	Shortwave RF Trend (W/m²/year)	Longwave(IST) RF Trend (W/m²/year)	Longwave(Skin) RF Trend (W/m²/year)
Kara	0.70±0.30	0.25±0.16	0.46±0.17	0.41±0.12
Barents	0.69±0.44	0.25±0.16	0.45±0.30	0.38±0.22
Laptev	0.51±0.19	0.17±0.11	0.34±0.10	0.29±0.08
Chukchi	0.50±0.11	0.16±0.05	0.35±0.09	0.29±0.06
East Siberian	0.44±0.15	0.12±0.09	0.33±0.07	0.27±0.05
Beaufort	0.44±0.11	0.14±0.07	0.30±0.06	0.20±0.06
Central Arctic	0.39±0.16	0.08±0.07	0.32±0.10	0.22±0.10
Arctic Ocean (All)	0.38±0.26	0.10±0.12	0.28±0.16	0.23±0.13
Baffin	0.31±0.18	0.10±0.12	0.21±0.12	0.24±0.10
Canadian Islands	0.29±0.21	0.08±0.07	0.24±0.11	0.20±0.12
East Greendland	0.26±0.23	0.06±0.17	0.21±0.12	0.18±0.08
Hudson	0.17±0.17	0.04±0.13	0.14±0.06	0.19±0.08
Lawrence	0.10±0.08	0.06±0.05	0.05±0.04	0.11±0.03
Bering	0.08±0.11	-0.01±0.05	0.08±0.06	0.11±0.05
Okhotsk	-0.01±0.08	-0.01±0.06	-0.005±0.04	0.03±0.04

: Shortwave RF Trend의 경우 대부분의 해역에서 증가하는 경향

: 해빙이 줄어듦에 따라 알베도가 감소하며, 단파 흡수가 증가하는 메커니즘

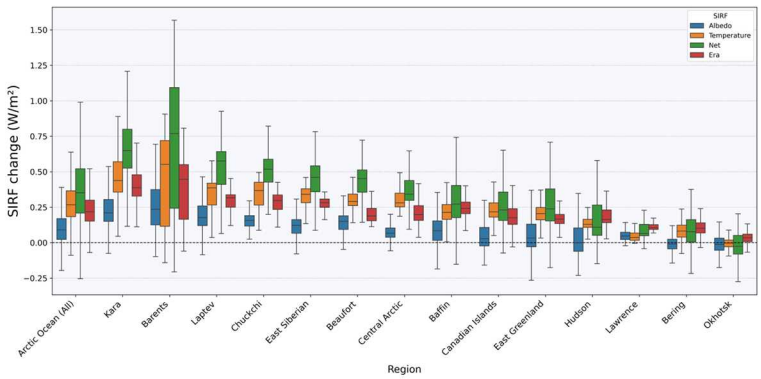
: Kara(0.25), Barents(0.25), Laptev(0.17) 1단계 연구에서 언급된 해역 동일하게 증가하는 경향

: Longwave RF의 경우 전체 해역에서 증가하는 경향

→ 해빙표면온도 증가 → 상향 장파 복사 증가

: Net RF의 경우에도 Kara와 Barents에서 큰 증가가 일어나고 있으며, 북대서양-시베리아 관문에서 겨울 해빙 감소로 인한 열수송의 결과로 해석

: Laptev(0.51), Chuckchi(0.50)에서 여름 해빙 급감으로 인한 단파 장파 동시 증폭으로 인한 결과

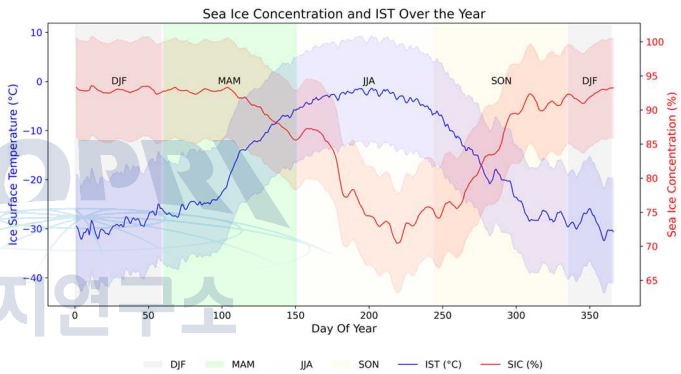
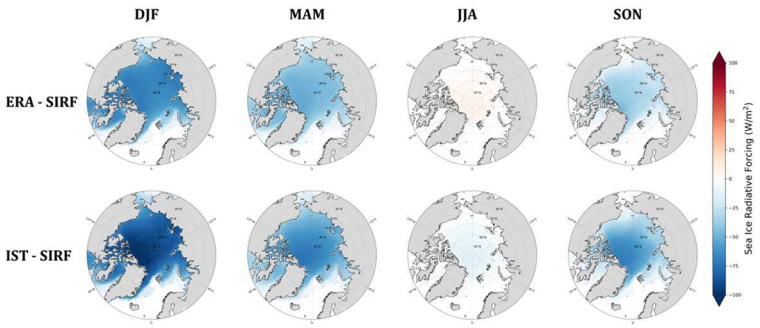


- 핫스팟 구역 (상위4개 지역)

Region	Net (μ)	IQR특징	지배 성분	관측
Kara	**0.70**	넓은 IQR → 연-변동 큼	Temperature > Albedo	Skin > IST (Δ≈0.01)
Barents	**0.69**	최대 whisker → 극값 빈번	Temperature ≫ Albedo	Skin > IST (Δ≈0.05)
Laptev	0.51	IQR 좁음 → 안정	Temperature ≈ Albedo	Skin < IST
Chukchi	0.50	IQR 좁음	Temperature ≈ Albedo	Skin < IST

	: Kara·Barents는 장파(IST + Skin)가 Net의 65% 내외, Laptev·Chukchi는 알베도 기여 ~40%

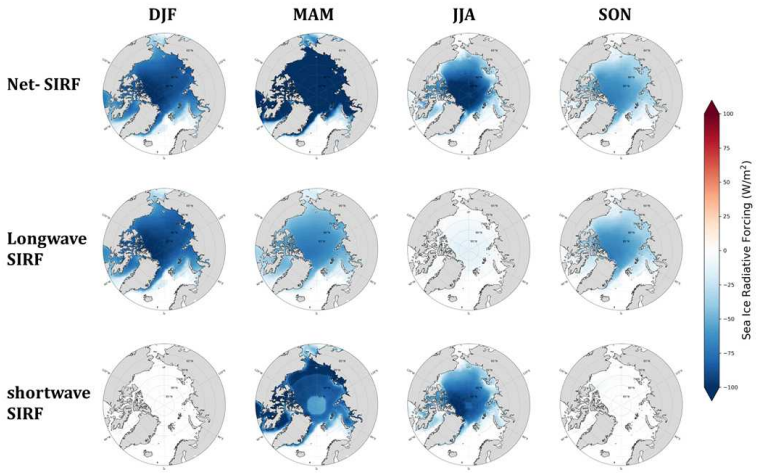
○ 세부목표 9-2: 1단계 연구결과(복사강제력)과 비교 및 특성 분석

연 구 내 용	연 구 결 과
1단계에서 제시한 복사강제력과의 비교 및 계절, 지역에 따른 특성 분석	- AutoML IST와 SIC의 계절성 평가 : IST와 SIC의 1988년부터 2023년까지 doy(day of year) 평균을 통한 변동성 평가 : 극야기간인 DJF 겨울철에는 변동성이 낮고 해빙농도가 높아지며, 극야가 끝나는 봄철에 급격히 증가하며 해빙농도도 감소 : JJA 여름철에 온다가 증가하며, 가을철 SON 극야가 시작되면서 급격한 온도 감소 확인 : 표면온도와 해빙간의 계절적 특성을 확인함에 따라, 본 연구에서 계절적 평가 진행  - ERA RF와 AutoML RF의 계절적 RF 분포 비교  : 연평균 시계열 변화 결과와 마찬가지로, 계절 평균에서도 ERA RF에 비해 AutoML RF에서 더 낮은 값으로 확인 → 온난화에 기여 : 특히 DJF에서 ERA RF(-40.19±6.89)에 비해 AutoML RF(-53.03±7.32)에서 -10 W/m2 이상 차이 발생 : Shortwave RF와 Longwave RF가 강한 MAM(-6.17 W/m2), Longwave RF의 기여도가 적은 JJA(-2.36 W/m2), SON(-11.17 W/m2) 차이 발생

KOPRI 극지연구소

- 본 연구에서 산출한 복사강제력 계절별 분포 비교

Season	Shortwave (W m⁻²)	Longwave (W m⁻²)	Net (W m⁻²)	ERA (W m⁻²)
DJF	−0.83 ± 0.48	−53.03 ± 7.07	−53.86 ± 7.32	−40.19 ± 6.89
MAM	−55.58 ± 7.99	−33.68 ± 4.32	−89.26 ± 11.18	−27.51 ± 4.91
JJA	−36.86 ± 9.11	−4.51 ± 1.64	−41.36 ± 9.77	2.15 ± 1.22
SON	−0.38 ± 0.52	−29.16 ± 6.34	−29.54 ± 6.64	−17.99 ± 5.57



- DJF 기간 특징
  : 극야기간으로 태양 고도가 낮아 단파 유입 거의 없음
  : 대기와 해빙 표면 온도 차로 인한 장파 복사 손실(-)이 매우 큼
  : 겨울철 해빙이 복사 균형에서 큰 냉각기 역할
- MAM 기간 특징
  : 봄철 태양복사 증가(SW ↑), 하지만 해빙표면에서 반사량이 증가하면서 복사 크게 증가(SW RF 크게 -)
  : 전체 계절 중 가장 낮은 약 -89 W/m2
  → 유입되는 빛은 많아졌으나 해빙이 반사+냉각을 극대화
- JJA 기간 특징
  : MAM에 비해 단파 복사강제력의 절대값 감소
  → 해빙 융해가 시작되면서 반사 감소
  : Longwave RF의 영향 거의 x
- SON 기간 특징
  : 극야기간으로 인한 태양고도가 낮아짐으로써, 단파 유입이 거의 사라짐
  : 장파의 영향력이 다시 증가
  → 해빙 결빙 시작
- 전체적으로 높은 해빙농도가 확인되는 지역(고위도 지역)에서 상대적으로 강한 반사 및 냉각이 확인

- 계절 및 warming에 주도적인 해역에 따른 변화 분석
  : Net SIRF yearly trend가 높은 상위 6개의 해역에

KOPRI 극지연구소

대한 계절적 분석 진행

- DJF(장파 냉각 지배) 분석 결과

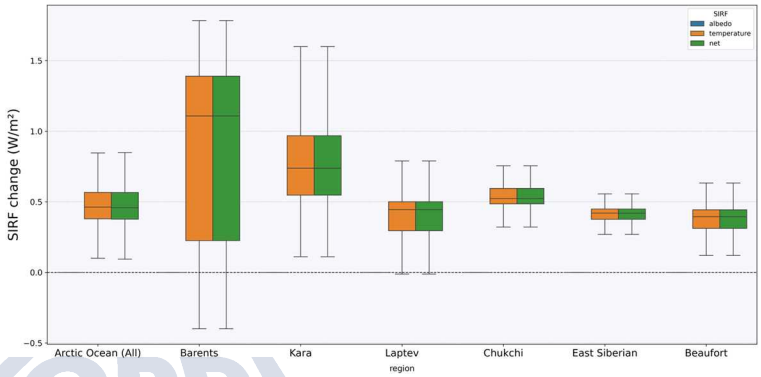
DJF Trend

Region	Net RF Trend (All/masking) (W/m²/year)	Shortwave RF Trend (All/masking) (W/m²/year)	Longwave(IST) RF Trend (All/masking) (W/m²/year)
Kara	0.77±0.28	-	0.77±0.28
Barents	0.88±0.60	-	0.88±0.60
Laptev	0.39±0.15	-	0.39±0.15
Chukchi	0.54±0.10	-	0.54±0.10
East Siberian	0.40±0.08	-	0.40±0.08
Beaufort	0.39±0.10	-	0.39±0.10
Arctic Ocean (All)	0.49±0.27	-	0.49±0.27

: 극야기간 태양복사 유입이 없으므로 shortwave RF 영향 x

: Barents 0.88±0.60, Kara 0.77±0.28 Wm^{-2}

→ 대서양·시베리아 관문이 가장 큼



- MAM(알베도 감소 전환기) 분석

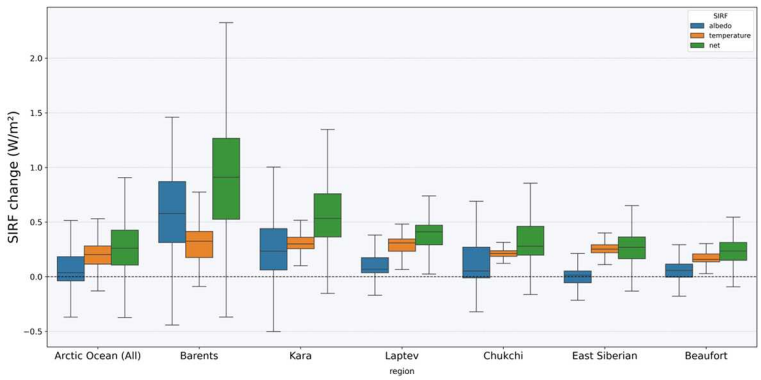
MAM Trend

Region	Net RF Trend (All/masking) (W/m²/year)	Shortwave RF Trend (All/masking) (W/m²/year)	Longwave(IST) RF Trend (All/masking) (W/m²/year)
Kara	0.61±0.43	0.29±0.34	0.32±0.12
Barents	0.91±0.52	0.60±0.36	0.31±0.19
Laptev	0.39±0.27	0.11±0.22	0.28±0.09
Chukchi	0.36±0.26	0.15±0.25	0.21±0.04
East Siberian	0.26±0.19	0.00±0.15	0.25±0.07
Beaufort	0.24±0.19	0.07±0.16	0.17±0.0
Arctic Ocean (All)	0.31±0.37	0.11±0.29	0.20±0.13

: 극야기간이 끝나면서 shortwave RF 증가하는 시기

: Kara 0.29±0.34, Barents 0.60±0.36, Arctic Ocean 전체 0.11±0.29 Wm^{-2}

: Longwave RF 기여도 여전히 존재(0.20 - 0.32 $W m^{-2}$)



: 파랑(알베도)·주황(온도) 모두 기여, Barents whisker 길어 극단 사건 많음

KOPRI 극지연구소

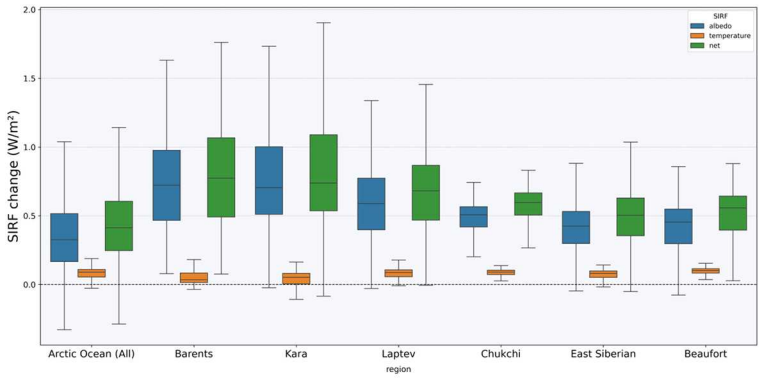
- JJA(단파흡수 최대) 분석 결과

JJA Trend

Region	Net RF Trend (All/masking) (W/m²/year)	Shortwave RF Trend (All/masking) (W/m²/year)	Longwave(IST) RF Trend (All/masking) (W/m²/year)
Kara	0.83±0.47	0.79±0.43	0.04±0.06
Barents	0.80±0.42	0.76±0.38	0.05±0.05
Laptev	0.68±0.31	0.59±0.30	0.08±0.03
Chukchi	0.58±0.12	0.49±0.11	0.09±0.03
East Siberian	0.51±0.29	0.44±0.26	0.08±0.03
Beaufort	0.51±0.18	0.41±0.18	0.09±0.03
Arctic Ocean (All)	0.45±0.32	0.37±0.31	0.08±0.04

: Shortwave RF 가장 높음(Kara 0.79±0.43, Barents 0.76±0.38 Wm^{-2})

: 대부분 0.04-0.09 Wm^{-2}으로 분포하며, Longwave RF의 효과 최소 시기



: Shortwave(Albedo)의 box plot(파란색)이 가장 큼

→ 해빙 융해 및 낮은 알베도 해수면이 단파 흡수 주도

- SON(재결빙 직전 장파 강화시기) 분석 결과

SON Trend

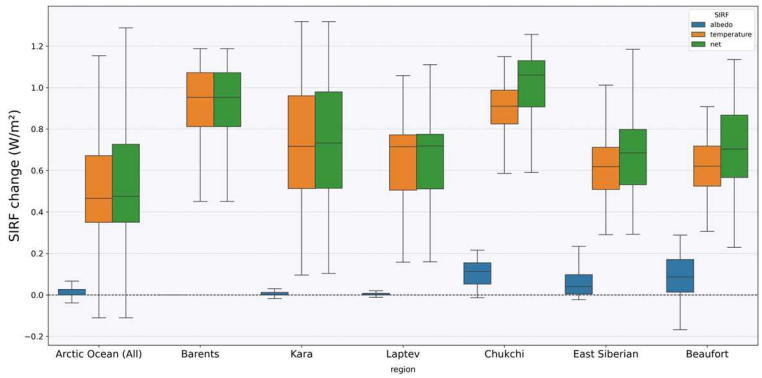
Region	Net RF Trend (All/masking) (W/m²/year)	Shortwave RF Trend (All/masking) (W/m²/year)	Longwave(IST) RF Trend (All/masking) (W/m²/year)
Kara	0.74±0.30	0.01±.001	0.73±0.30
Barents	0.87±0.29	-	0.87±0.29
Laptev	0.65±0.16	0.01±0.01	0.65±0.16
Chukchi	0.97±0.24	0.10±0.06	0.87±0.19
East Siberian	0.67±0.18	0.06±0.06	0.62±0.14
Beaufort	0.71±0.20	0.09±0.09	0.62±0.13
Arctic Ocean (All)	0.55±0.25	0.03±0.06	0.52±0.22

: Longwave RF 재증가(Chukchi 0.87±0.19, Barents 0.87±0.29 Wm^{-2})

: Shortwave RF 대부분 0 (단파 고도 낮음)

: Net RF Chukchi 0.97±0.24, Kara 0.74±0.30 Wm^{-2} → 해수면 열 방출 억제, 재결빙 지연

KOPRI 극지연구소



: 주황(Longwave RF)·초록(Net RF) 상자 우세, 파랑(Shortwave RF) 작음 → 장파 냉각 감소가 Net 상승 주도

- Barents sea : 연중 지속적인 Net RF 상승 해역
: 4계절 모두 0.8 W/m² 전후 → 북극 전역에서 유일하게 연중 고에너지 수렴
: 대서양 워터 인트루전 (Atlantic Water Intrusion): 따뜻한 해수가 바닥부터 혼합 → 해빙 저하 + 온도 상승 유도
: 높은 구름 빈도: 구름은 장파 복사 ↑, 야간 온난화 효과
: 해빙이 일찍 녹고 늦게 형성 → 개방수 기간 가장 김
: 관측·모델에서 구름·해수 온도·수증기 인자 민감도 분석 우선순위
: 장파 복사 피드백을 검증하는 시험 지역으로 적합

-Kara sea : 복합 피드백이 가장 강한 구역
: 봄·여름에는 알베도 기여 우세, 겨울에는 장파 복사 기여 절대적
: 사계절 내내 강한 RF → Kara는 복사 피드백의 '교차점'
: 알베도 + 장파 복사 + 구름의 다중 결합 피드백을 이해하는 핵심 구역

-Chukchi sea : 가을 열저장 피크와 재결빙 지연 중심지
: 가을까지 해수면 노출 유지 → 해양이 여름 동안 흡수한 열을 저장
: 재결빙 지연 → 더 늦은 시기까지 해수면 열 방출 지속
: Chukchi는 열 저장 능력이 강해 에너지 잉여가 다음 계절까지 넘어감

KOPRI 극지연구소

	: 해빙 재결빙 예측을 위한 열적 경계 조건 설정 시 가장 우선적으로 고려할 구역

○ 세부목표 9-3: 복사강제력을 활용한 Feedback 평가

연 구 내 용	연 구 결 과
복사강제력을 활용하여 Feedback 산출 및 선행연구와 비교	- 선행연구 Shortwave RF Feedback 산출 결과 <table><tr><th>Unit (W/m²/C°)</th><th>Flanner (2011)</th><th>Cao (2015)</th><th>Chen (2016)</th><th>Xiao (2017)</th></tr><tr><td>Feedback</td><td>0.62 (0.33 – 1.07)</td><td>0.25</td><td>0.21 (±0.005)</td><td>0.18 (± 0.08)</td></tr><tr><td>Target</td><td>Snow & Sea ice</td><td>Sea ice</td><td>Snow</td><td>Snow</td></tr><tr><td>Study area</td><td>Northern Hemisphere</td><td>Northern Hemisphere</td><td>Snow-covered land mass in the Northern Hemisphere</td><td>North of 30°N</td></tr><tr><td>Study period</td><td>1979 – 2008</td><td>1982 – 2009 (March – September)</td><td>1982 – 2013</td><td>2003 – 2016</td></tr></table> : 연구에 따라 대상지역/기간 상이 : Surface Air Temperature의 1도 상승에 따른 표면요소(온도/알베도) 변화에 의한 복사강제력 변화 - 1단계 연구 결과 <table><tr><th>Unit (W/m2/C°)</th><th>Albedo</th><th>Temperature</th><th>Net</th></tr><tr><td>Arctic Circle</td><td>0.74 ± 1.04</td><td>1.42 ± 1.46</td><td>2.18 ± 2.34</td></tr><tr><td>Sea ice area</td><td>1.31 ± 1.08</td><td>2.49 ± 1.04</td><td>3.84 ± 1.81</td></tr></table> : ERA5 Skin Temperature를 활용한 Longwave Sea Ice Radiative Forcing을 산출하여, 기존 Albedo기반의 Shortwave Radiative Forcing에 더하여 Net Radiative Forcing을 제시 : 선행연구와 비교하여 해빙 기준 최대 3.59 W/m²/℃ 차이 발생 : 10배이상 차이 존재 → 실제 해빙의 역할에 대해 과소 평가 경향 존재 - 2단계 연구 Feedback 산출 결과 <table><tr><th>Unit (W/m2/C°)</th><th>Net</th><th>Albedo</th><th>Ice surface Temperature</th><th>Skin Temperature</th></tr><tr><td>Sea Ice Area</td><td>4.17±2.26</td><td>1.04±1.10</td><td>3.19±1.56</td><td>2.57±0.93</td></tr></table> : 2단계 연구를 통한 Longwave RF Feedback 산출 결과 ERA5 skin temperature Feedback에 비해 2단계 AutoML IST 기반의 Feedbackd이 더 큰 복사방출 : AI 모델 기반 IST 산출로 Skin temperature 보다 표

KOPRI 극지연구소

	면 물리 특성을 더 정확히 반영 → ERA5의 경우 수증기, 구름을 포함한 복합표면온도 : Net의 경우 기온 1°C 상승 → 복사강제력(Net RF)이 4.17 W/m^2 증가 : 이것은 단순히 기온만 오르는 것이 아니라, 추가적인 에너지가 시스템으로 더 들어오게 되는 효과 : 더 큰 온도 상승으로 이어지는 positive Feedback - 에너지 시스템이 불안정해진다는 신호 : 높은 피드백은 시스템이 스스로 조절(완충)하지 못하고 방향을 지속적으로 강화하는 구조 : 북극은 특히 알베도 감소, 해빙 융해, 수증기 증가, 구름 변화 등이 서로 연쇄적으로 작용해서 강한 피드백을 유발

KOPRI
극지연구소

라. 평가의 착안점

(세부목표 제시와 함께 세부연구목표별 가중치를 기재)

년도		성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1 단계	1차년도 (2020)	위성/ 재분석자료를 활용한 북극 복사강제력 산출	북극 지역의 복사강제력의 산출 기준 제시	30	- 3개 이상의 기관 조사
			북극 복사강제력 산출을 위한 자료 수집 및 전처리	25	- 다양한 변수 수집 - QC 자료사용
			북극 지역의 복사강제력 산출	45	- 10년 이상의 자료 생성 - 학술회의 발표
	2차년도 (2021)	관측자료를 바탕으로 Radiative Kernel 평가	Radiative Kernel 추가 확보 및 특성 비교	10	- 3개 이상의 Radiative Kernel 자료 확보
			관측자료와 Raditive Kernel 자료 평가	10	- 정량적인 score
		북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석	Albedo, Surface Temperature 기반 복사강제력 통합 및 분석	30	- 10년 이상의 자료 생성 - 학술대회 발표 - 정량적인 score
			계절에 따른 주도적(Albedo, Surface Temperature) 요인 분석	25	
			지역에 따른 복사강제력 특성 파악	25	
	3차년도 (2022)	DNN기반 해빙표면온도 산출	IST 산출을 위한 입력자료 선정	20	- 선행연구 활용 여부 조사
			DNN기반 모델 구축	30	- 정량적인 score - 학술대회 발표
			타 위성 / In-situ 자료를 활용한 모델 평가	20	
		DNN기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가	DNN기반 IST를 바탕으로 복사강제력 산출	10	- 정량적인 score - 10년 이상의 자료
			표면온도(ERA5, DNN기반 IST) 자료에 따른 복사강제력 차이 분석	20	- 정량적인 score - 10년 이상의 자료
2 단계	1차년도 (2023)	위성/ 재분석자료를 활용한	북극 해빙표면온도 산출을 위한 기상인자 수집	30	- 결측 없는 자료

KOPRI 극지연구소

		북극 해빙표면온도 산출을 위한 자료 수집 및 전처리	북극 해빙표면온도 산출을 위한 자료 수집 및 전처리	25	- 다양한 변수 수집 - QC 자료사용
			AI기반 해빙표면온도 산출	45	- 학술회의 발표
	2차년도 (2024)	AI기반 장기간 해빙표면온도 산출	AI 기반 IST 알고리즘 구축	30	- 장기간 산출 안정성
			산출 정확도 및 Validation을 통한 정확도 제시	35	- 타기관 자료를 통한 비교 및 검증 - 학술회의 발표
			북극 지역의 IST 시공간 특성 분석	35	- 학술회의 발표
	3차년도 (2025)	복사강제력 기반 Feedback 평가	최종 복사강제력 산출 및 비교	40	- 1단계 연구 비교 결과 - 30년 이상 자료 생성
			계절적 지역적 평가 진행	30	- 주도적 해역 분석 - 계절적 평가 결과
			해빙 표면 변화에 따른 Feedback 산출 및 평가	30	- 선행연구와 정량적 비교 - 학술회의 발표

2. 목표달성을 위한 연구수행 방법

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
위성/ 재분석자료를 활용한 북극 복사강제력 산출	북극 지역의 복사강제력의 산출 기준 제시	지표 관련 복사강제력 산출 연구 동향 파악	- 지표 관련하여 다양한 복사강제력 산출기법 존재 (SSRF, CRF, CrRF 등) - 해빙의 영향에 따른 복사강제력 산출 기법 제시 - 장파 영역에 대한 복사강제력 산출 기법 제시
	북극 복사강제력 산출을 위한 자료 수집 및 전처리	위성/재분석자료/radiative kernel 자료	위성기반 - SIC, SST, Surface Albedo 재분석자료 - IST Radiative kernel - CAM5 (Pendergrass et al. (2018) - HadGEM2 Smith et al.(2018) - HadGEM3 Smith et al.(2020)
		Re-mapping (Nearest Neighbor 방법)	geographic projection인 자료를 nearest neighbor 방법을 사용하여 EASE-2

			grid 변환
	북극 지역의 복사강제력 산출	단파 영역 복사강제력 산출	- surface albedo kernel 및 Albedo 적용하여 해빙에 따른 지표의 복사강제력 산출 - 연평균 및 월평균 복사강제력 시공간적 비교 분석
		장파 영역 복사강제력 산출	- surface temperature kernel 및 SST, IST 적용하여 해빙에 따른 지표의 복사강제력 산출 - 연평균 및 월평균 복사강제력 시공간적 비교 분석
관측자료를 바탕으로 Radiative Kernel 평가	Radiative Kernel 추가 확보 및 특성 비교	자료 확보 및 차이 분석	- 총 5개의 기후모델의 Radiative Kernel 자료 확보 (CAM5, ECHAM6, HadGEM2, HadGEM3, GFLD) - Kernel(Albedo & Tempearture)에 따른 모델별 특징 비교 : 공간 및 월에 따른 특징 분석
	관측자료와 Raditive Kernel 자료 평가	경향 및 상관관계 분석	- Kernel을 이용하여 표면변화에 따른 TOA Flux의 변화량 산출 - CERES TOA radation 자료 확보 - 두 자료간 상관관계 분석 : 정량적인 값의 차이는 어느정도 발생하나 기후모델에 따른 경향의 차이는 존재하지 않음
북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석	Albedo, Surface Temperature 기반 복사강제력 통합 및 분석	복사강제력 산출 및 시계열 및 공간적분포 분석	- 연평균(1982 ~ 2015) 복사강제력 (SIRF, Cryosphere Radiative Forcing) 산출 및 시계열 분석 - 연평균(1982 ~ 2015) 복사강제력 (SIRF, Cryosphere Radiative Forcing) 변화량 공간적 분포 파악
	계절에 따른 주도적(Albedo, Surface Temperature) 요인 분석	시계열 및 공간적분포 분석	- 월별 복사강제력 시계열 분포(Net SIRF) 비교 - 기후모델에 따른 월별 복사강제력 변화량(Net SIRF) 산출 - 월별 복사강제력 변화량 공간적 분포 분석 - 기후모델에 따른 계절적

KOPRI 극지연구소

			평균 복사강제력 산출
	지역에 따른 복사강제력 특성 파악	시계열 및 공간적분포 분석	- 해역에 따른 복사강제력 연간 변화량 분석 - 해역에 따른 계절별 평균 변화량 분석
DNN기반 해빙표면온도 산출	IST 산출을 위한 입력자료 선정	문헌 조사 및 자료 확보	- Total Column Water Vapor (TCWV), ERA5 - 2m air temperature (Ta), ERA5 - Sea Ice Concentration (SIC), OISST_v2 - Solar Zentih Angle (SZA) - Ta Climatology - Latitude - Ice Surface Temperature (IST), MODIS
	DNN기반 모델 구축	딥러닝 모델 구현	- Keras 2.8.0 (Colab) 활용 : Loss function MAE : optimizer - Adam : Earlystopping 적용 : Keras MinMaxScaler를 사용하여 입력자료 정규화 : Hyperparameter 선정 scikit-learn의 GridSearchCv library 활용
	타 위성 / In-situ 자료를 활용한 모델 평가	경향 및 분포특성 분석	- MODIS IST (MOD29E1D) 자료와 IMB Buoy 자료를 활용하여 검증 및 분포 특성 비교
DNN기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가	DNN기반 IST를 바탕으로 복사강제력 산출	복사강제력 산출	- 기존 ERA5 Skin Temperature 대신 본 연구에서 개발한 DNN기반 IST를 적용하여 Temperature-SIRF 계산
	표면온도(ERA5, DNN기반 IST) 자료에 따른 복사강제력 차이 분석	시계열 및 공간적 분포 분석	- 표면온도 자료에 따른 연평균, 월별 SIRF 변화량 시계열 분석 - 계절별 SIRF 분포특성 분석
위성/ 재분석자료를 활용한 북극	북극 해빙표면온도 산출을 위한	북극 해빙의 범위, 이동에 관한 연구 및 IST 산출 연구 동향 파악	Radaition, air Temperature와 같은 열과 관련된 인자, pressure, wind, water vapor와 같은 열 교환에 관련된

KOPRI 극지연구소

해빙표면 온도 산출	기상인자 수집		변수 수집
	북극 해빙표면온도 산출을 위한 자료 수집 및 전처리	위성/재분석자료	위성기반 - IST, SIC, SIA, Radiation, Cloud 재분석자료 - Era5(Ta, wind, TCWV, MSL)
		Re-mapping (Nearest Neighbor 방법)	geographic projection인 자료를 nearest neighbor 방법을 사용하여 EASE-2 grid 변환
	AI기반 해빙표면온도 산출	AI 모델 선정 - AutoML	AutoML - 자체적으로 최적의 알고리즘 탐색 및 하이퍼 파라미터 튜닝
		AI 기반 해빙표면온도산출 및 검증	MODIS IST & Buoy 검증 및 타 기관 IST와 비교
AI 기반 장기간 해빙표면온도 산출	AI기반 장기간 IST 산출 알고리즘 구축	AutoML 기반 장기간 산출 test	10년 이상의 모델을 생성했음에도 Target과 유사한 결과를 보기 위해 통계적 기법 활용
		다양한 입력자료 조합 test	Passive Microwave 자료 조합 및 해빙-대기에 관련된 변수 조합을 test
	산출 정확도 및 Validation을 통한 정확도 제시	타 기관의 IST 자료와 함께 장기간 IST의 분포 비교 및 Buoy 자료를 통한 정확도 비교 및 평가 진행	ERA5 skin temperature, Copernicus Level 4 IST, AutoML IST를 히스토그램 분석을 통해 정성적인 분포 비교 및 Buoy 자료와 일치하는 지점 매칭을 통한 통계 기반의 정량적 평가 수행
	북극 지역의 IST 시공간 특성 분석	월별 Anomaly Trend 및 계절별 해역별 정량적 정성적 분석 수행	월별 장기간 Anomaly 자료 생성 및 NSIDC에서 제공하는 Sea_mask를 사용하여 해역 구분과 계절별 평균 자료를 기반으로 분석 수행
AI기반 해빙표면온도를 활용한 복사강제력 산출 및 Feedback 평가	북극 해빙표면(온도+알베도) 변화에 따른 복사강제력 산출	Radiative Kernel을 활용한 장기간 Shortwave/Longwave Radiative Forcing 산출	월별 Radiative Kernel 평균(5개의 GCM)을 통한 월평균/연평균 복사강제력 산출 및 시계열/매핑 분석을 통한 1단계 연구결과 비교
	해역 및 계절에 따른 복사강제력 분석	계절 및 해역에 따른 복사강제력 특징 및 주도적인 해역과 계절 탐색	- NSIDC에서 제공하는 해역 구분에 따른 연별 변화 경향 파악 - 계절 및 해역에 따라 복사강제력의 변화경향

			분석을 통해 기존 1단계 Longwave Radiative Forcing과 비교
	복사강제력과 대기온도 변화에 따른 Feedback 평가	Shorwave RF, Longwave RF, Net RF 3가지 복사강제력을 활용한 Feedback 산출 및 선행연구와 비교	선행연구를 기반으로 Albedo & Temperature 모두 고려 가능한 적절한 연구 지역을 선정하여 Surface Air Temperature의 1도 상승에 따른 표면요소 변화에 의한 복사강제력의 변화 정량화

※ 연구범위에 따라 적용한 이론적·실험적 접근방법 또는 기법·원리 등을 기재하고 그 구체적인 내용을 기술함

KOPRI 극지연구소

3. 연구성과(정량적 성과)

□ 계획 대비 실적

(계획(건수)/대비(건수))

구분		계획					
논문		국외			국내		
		SCI	기타	소계	SCI	기타	소계
		1/1	/	1/1	/	2/2	/
Proceeding		국외			국내		
		1/1			2/2		
단행본(저서)		/					
특허		국외			국내		
	출원	/			/		
	등록	/			/		
기술실시계약		/					
세미나개최		/					
인터넷사이트 개설		/					
기타사항		/					

KOPRI 극지연구소

4. 연구비 집행실적

(작성기준일: 2025.04.14)

(단위 : 천원)

비목	세목		예산금액	사용금액	잔액	집행률(%)
직접비	인건비	미지급				
		지급	13,776	13,776	0	100
	인건비소계		13,776	13,776	0	100
	연구시설·장비비					
	연구재료비					
	연구활동비		4,437	4,437	0	100
	연구수당		3,000	3,000	0	100
	연구비소계		7,437	7,437	0	100
간접비			3,787	3,787	0	100
연구비 총액			25,000	25,000	0	100

주) 연구비 집행실적은 연말기준 추정 사용금액을 기재하며, 작성기준일은 최종보고서 제출시점을 기록함

5. 연구수행에 따른 문제점 및 개선방향

- 해당 사항 없음

6. 주요 연구변경 사항

- 해당 사항 없음

Ⅱ. 성과 활용 계획

1. 성과 활용 계획

1. Net RF = SW + LW 기반의 구조를 통해, 해빙 지역의 순복사 에너지 유입량 변화를 연도별·계절별로 분석
2. AI 기반 Gap-Filled IST와 Net Radiative Forcing 결과를 활용하여, 해빙 융해 및 재결빙 시나리오에 반영 가능한 정확한 에너지 수지 항목을 산출
3. 현재 기후 모델의 상단 대기 TOA 에너지 플럭스와 지표 에너지 불균형(BSRN 등) 사이의 차이를 해소할 수 있는 정교한 해빙 지역 Net RF 값을 제공
4. AI 기반 IST를 이용해 Net RF와 기온(ERA5 Air Temp) 사이의 민감도 계수(4.17 ± 2.26 $W/m^2/°C$)를 도출함으로써, 해빙 시스템이 가진 자기 증폭 특성(Positive Feedback Loop) 정량화 및 지역적 민감도 해석
5. 본 연구에서 사용한 AI Gap-Filling IST 모델과 Net RF 산출 체계를 바탕으로, 극지 표면 에너지 수지 실시간 추정 알고리즘 개발 가능

2. 기타사항

- 해당 사항 없음

[별첨 2] 위탁연구과제 최종보고서 2

위탁연구 최종보고서

<table>
<tr><td colspan="3">본 과 제 명
(연구책임자)</td><td colspan="6">북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구 (김현철)</td></tr>
<tr><td rowspan="8">위탁과제</td><td rowspan="2">과제명</td><td>국문</td><td colspan="6">마이크로파 위성을 이용한 북극 해빙 거칠기와 해빙두께 변화 연구</td></tr>
<tr><td>영문</td><td colspan="6">A study on variation of the Arctic sea-ice surface roughness and thickness using microwave satellite observations</td></tr>
<tr><td rowspan="5">연구책임자</td><td>성명</td><td>홍성욱</td><td>과학기술인등록번호</td><td colspan="2">1065-6840</td></tr>
<tr><td>부서</td><td>세종대학교</td><td>생년월일</td><td colspan="2">710826</td></tr>
<tr><td>직위/직급</td><td>교수/부교수</td><td>전공(학위)</td><td colspan="2">대기과학(박사)</td></tr>
<tr><td>전화번호</td><td>02-6935-2430</td><td>휴대폰</td><td colspan="2">010-5293-7198</td></tr>
<tr><td>FAX</td><td>02-3408-4320</td><td>e-mail</td><td colspan="2">sesttiya@sejong.ac.kr</td></tr>
<tr><td rowspan="3">협약 및
관리담당자</td><td>성명</td><td>고서영</td><td>전화</td><td colspan="2">02-3408-3419</td></tr>
<tr><td>소속</td><td>세종대학교 산학협력단</td><td>E-Mail</td><td colspan="2">syko@sejong.ac.kr</td></tr>
<tr><td>주소</td><td colspan="4">(05006) 서울특별시 광진구 능동로 209. 217호</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="9">연 구 기 간 /
연 구 비 /
참 여 연 구 원</td><td>연구연차</td><td colspan="2">연구기간</td><td>연구비
(백만원)</td><td>참여연구원수</td></tr>
<tr><td colspan="2">총연구기간</td><td colspan="2">2020. 1. 1 ~2025. 12. 31</td><td>210</td><td>46</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1단계</td><td>1차년도</td><td colspan="2">2020. 1. 1 ~2020. 12. 31</td><td>40</td><td>7</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="2">2021. 1. 1 ~2021. 12. 31</td><td>40</td><td>9</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="2">2022. 1. 1 ~2022. 12. 31</td><td>40</td><td>9</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2단계</td><td>1차년도</td><td colspan="2">2023. 1. 1 ~2023. 12. 31</td><td>40</td><td>9</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="2">2024. 1. 1 ~2024. 12. 31</td><td>25</td><td>7</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="2">2025. 1. 1 ~2025. 12. 31</td><td>25</td><td>5</td></tr>
</table>

본인은 위 연구과제를 수행함에 있어 귀소와의 제반협약사항을 준수하여 본 위탁연구를 성실히 수행하고자 별첨과 같이 연구계획서를 제출합니다.

2025. 04. 16.

연구책임자 : 홍성욱 (서명)

위 연구책임자는 당 기관 소속직원으로서 연구를 효과적으로 완수할 수 있게 하기위하여 다음 사항을 성실히 이행하겠습니다.

1. 연구수행에 대한 종합적인 책임
2. 연구시설, 인력 및 행정의 우선적지원
3. 연구개발비의 관리, 사용 및 관리자 지정

2025. 04. 16.

위탁연구기관명 : 세종대학교 산학협력단

위탁연구기관장 : 권현한 (인)

극지연구소장 귀하

Ⅰ. 연구 실적

1. 연구개발 목표 달성도 및 평가 착안점

연구개발목표 및 평가의 착안점은 전년도에 기 제출한「연차실적·계획서」상의 내용을 토대로 계량화하여 개조식으로 작성함

가. 연구개발 최종 목표

수동형 마이크로파 위성 자료와 인공지능 기법을 이용한 북극해빙의 농도 예측 연구

나. 연구개발목표 및 달성도

(계획서상에서 제시한 기준에 대해 구체화된 정량·정성적 결과 제시)

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1. 해빙 거칠기 변화 연구	1-1	마이크로파 위성을 이용한 북극 해빙 거칠기 알고리즘 개선	- 해빙 영역 판단 자료 변경을 통한 여름철 해빙 거칠기 자료 산출	- 알고리즘 개선 여부 (100%)
	1-2	북극 해빙 거칠기 시계열 변화 확인	- 해빙 두께에 따른 시계열 패턴 변화 차이 분석	- 분석결과 제시 (100%)
2. 해빙 거칠기 및 두께 변화 연구	2-1	마이크로파 위성을 이용한 해빙 거칠기 변동성 분석	- EOF 분석을 통한 해빙 거칠기 공간 변동성 분석 - PCA 분석을 통한 해빙 거칠기와의 유효 상관성 기후 변수 탐색	- 분석결과 제시 (100%)
	2-2	거칠기 기반 해빙 두께 변동성 분석	- 거칠기-두께 변환식 기반의 해빙 두께 산출물을 통한 해빙 두께 시계열 패턴 변화 분석	- 분석결과 제시 (100%)

극지연구소

3. 해빙두께 변화연구 및 장기간 위성자료 산출물 생성	3-1	해빙 두께 변동성 분석	- EOF 분석을 통한 해빙 두께 공간 패턴 변화 분석	- 분석결과 제시 (100%)
	3-2	딥러닝을 이용한 밝기온도 및 해빙 표면 온도 자료 생성	- 장기 데이터 확보를 위해 딥러닝 기법을 이용한 L-band 위성 자료 생성 - 생성된 가상의 L-band 위성 자료의 정확도 제시	- 분석결과 제시 (100%)
4. 북극 해빙 거칠기 생성 연구	4-1	위성 밝기온도 자료 수집 및 해빙 거칠기 산출물 생성	- SMAP L-band 해빙 거칠기 일자료 산출 - 수동형 마이크로파 위성 밝기온도 자료 수집	- 산출물 제시 (100%)
	4-2	딥러닝 기법을 이용한 해빙 거칠기 생성 모델 개발	- 과거 해빙 거칠기 생성 모델 개발	- 생성 모델 제시 (100%)
	4-3	모델 생성된 가상의 해빙 거칠기 결과 제시	- 가상의 과거 해빙 거칠기 생성 결과 제시 - 가상의 해빙 거칠기 생성물과 원자료 간의 일관성 분석	- 분석 결과 제시 (100%)
5. 북극 해빙 거칠기 예측 연구	5-1	딥러닝 기법을 이용한 미래 해빙 거칠기 예측 모델 개발	- 과거 해빙 거칠기 생성 모델 개발 - 미래 해빙 거칠기 예측 모델 개발	- 생성 모델 제시 - 예측 모델 제시 (100%)
	5-2	예측 모델을 이용한 해빙 거칠기 산출물 결과 제시	- 과거 해빙 거칠기 결과 제시 - 미래 해빙 거칠기 결과 제시	- 분석결과 제시 (100%)

KOPRI 극지연구소

6. 북극 해빙 농도 예측 연구	6-1	수동형 마이크로파 위성 해빙 농도 자료 수집	- 해빙 농도 예측 모델 개발을 위한 해빙 농도 산출물 자료 수집	- 자료 수집 완료 (100%)
	6-2	딥러닝 기법을 이용한 미래 해빙 농도 예측 모델 개발	- 미래 해빙 농도 예측 모델 개발 - 머신러닝 기반 변수 중요도 분석을 활용한 예측 모델 성능 개선	- 예측 모델 제시 (100%)
	6-3	예측 모델을 이용한 해빙 농도 예측 결과 제시	- 1년 예측된 해빙 농도 결과의 정성적, 정량적 결과 제시	- 분석결과 제시 (100%)

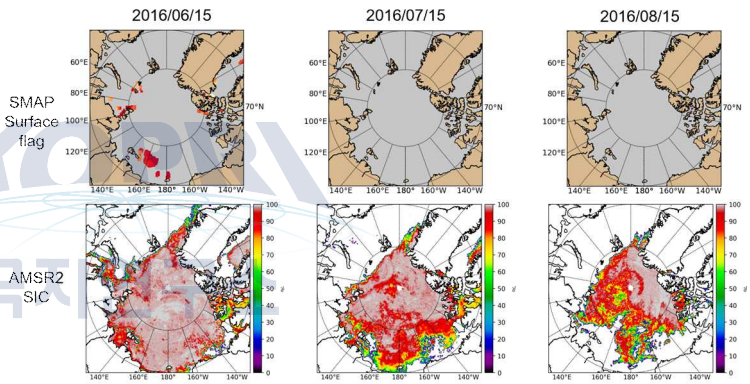
KOPRI 극지연구소

다. 연구수행 세부 내용 및 결과

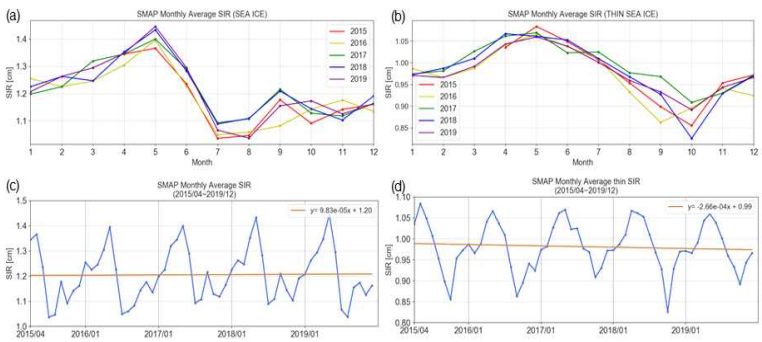
연구내용란에는 연구수행과정에서 실제 적용하고 시도하였던 연구수행 방법상의 구체적인 내용들을 기재하고, 그 결과로 나타난 실험적 결과치, Performance(양적・질적), 시작품・시제품 제작내용 등을 구체적으로 연구결과란에 기술

□ 성과목표 1:

○ 세부목표 1-1:

연 구 내 용	연 구 결 과
- 기존 해빙 거칠기 알고리즘은 해빙 영역 설정에 SMAP surface_flag와 Cryosat-2의 해빙 두께 자료를 사용함. - 여름철 (5~9월) 미제공되는 해당 자료들의 한계가 해빙 거칠기 산출 알고리즘에도 반영되는 문제가 발생함. - 이러한 문제를 해결하고자 영역 설정 자료를 AMSR2의 해빙 농도 자료로 변경함. - AMSR-2 해빙 농도 자료에서 15% 이상인 영역을 해빙으로 판단함 (Meier et al., 2019).	- 연중 결손 없이 제공되는 AMSR-2 해빙 농도 자료를 사용함으로써, 여름철을 포함한 모든 시기에 안정적인 해빙 거칠기 자료 셋을 구축함. - 아래 그림은 개선 전후 해빙 거칠기 알고리즘에 적용된 여름철 해빙 영역 판단 일자료 예시임. ((위) SMAP surface flag, (아래) AMSR-2 해빙 농도) 

○ 세부목표 1-2:

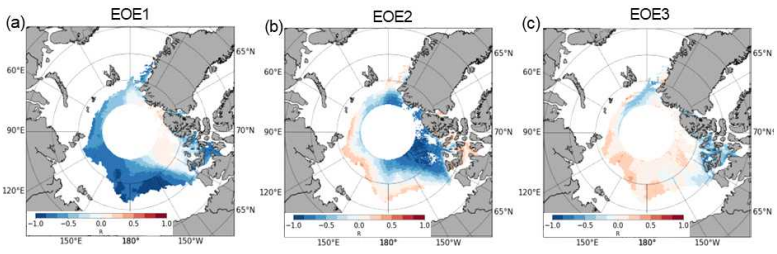
연 구 내 용	연 구 결 과
- 개선된 알고리즘을 사용하여 2015년 4월부터 2019년 12월까지의 해빙 거칠기를 산출함. - 해빙 거칠기의 월별 변화 패턴 및 시계열적 변화 추세를 분석함. - 분석 영역은 전체 해빙과 0.5m 이하의 얇은 해빙으로 나누어 진행함.	- 아래 그림은 전체 해빙 영역 (a, c)과 0.5 m 이하 얇은 해빙 영역 (b, d)에서의 해빙 거칠기 월별 변화 추세 결과 그래프임. 

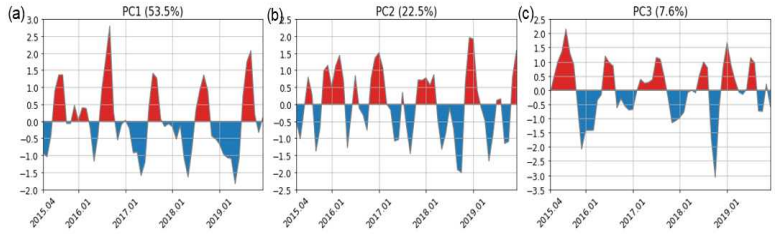
	- 전체 해빙과 얇은 해빙에서의 거칠기가 겨울에는 증가하고 여름에는 감소하는 패턴을 보임. - 해빙 거칠기는 해빙이 녹는 정도에 영향을 받기 때문에 해빙 영역 패턴과 강한 상관이 있음. - 전체 해빙 영역의 거칠기는 7, 8월에 최소가 되는데, 이 때는 태양에너지와 해수면 온도가 최대가 되는 시기이기 때문에 급격히 해빙이 녹게 되므로 표면의 거칠기 역시 짧은 기간 안에 급격히 감소하는 것으로 보임. - 얇은 해빙은 9, 10월에 거칠기가 최소가 되는데, 이 시기는 해빙 면적이 최소가 되는 시기로 얇은 해빙은 대부분 녹아 사라지고, 남아있는 해빙의 표면마저 녹아서 매끄럽게 되어 거칠기가 감소한 것으로 보임. - 시계열 변화 추세의 관점에서 얇은 해빙 거칠기의 감소 추세는 얇은 해빙 면적 지속적으로 더 많이 사라지고 있는 것으로 이해할 수 있으며, 전체 해빙 거칠기의 증가 추세는 해빙이 동결되면서 표면이 거칠어진다기보다는 얇은 해빙이 빠르게 녹아 사라지면서 상대적으로 두꺼운 해빙만 남아 오히려 거칠기가 증가되는 것으로 해석됨.

□ 성과목표 2:

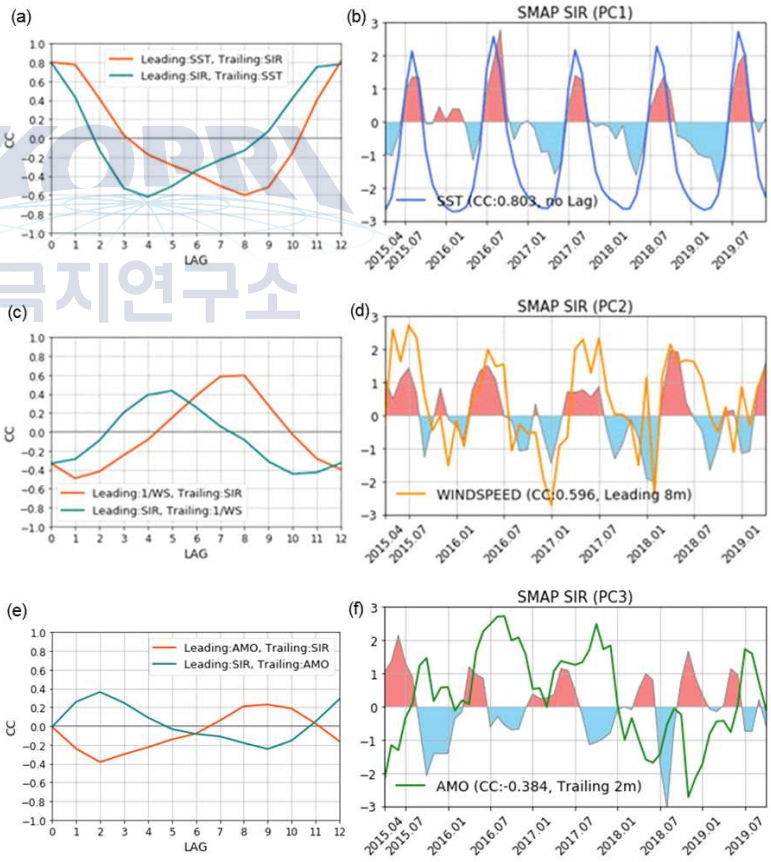
○ 세부목표 2-1:

KOPRI 극지연구소

연 구 내 용	연 구 결 과
- 해빙 거칠기의 시공간 변동성 확인을 위해 EOF (Empirical Orthogonal Function) 분석을 실시함. - EOF 분석은 시간에 따라 변화하는 연속적인 고차원의 공간 자료로부터 여러 개의 독립적인 성분을 분산이 큰 순서로 추출하는 방법으로 시공간 변동성을 동시에 제시할 수 있음. - 분석 자료로 2015년 4월부터 2019년 12월의 일일 SMAP 해빙 거칠기 산출물을 월평균하여 사용함. - 해빙 거칠기 주성분 상위 3개에 대하여 1달 간격의 TCLL (Time Lagged Cross Correlation) 분석을 진행해 상관성을 가지는 기후변수를 찾고, 이들간의 선후행 관계를 추론함.	- EOF 분석 결과, 3개 모드로 해빙 거칠기 변동성 83.2%를 설명할 수 있으며, 모드 1~3은 각각 해빙 거칠기의 53.5%, 22/5%, 7.6%를 설명함. - 아래 그림은 3개의 모드에 대한 결과임.  - 첫 번째 모드에서 보퍼트 해와 러시아 근방 해역에서 음의 상관성을 확인함. - 두 번째 모드에서 해빙 내부와 경계면에서 음의 상관성을 확인함. - 세 번째 모드는 첫 번째 모드와 반대되는 패턴을 보이며, 프람 해협을 통해 따뜻한 해수가 북극 해 중앙으로 유입되는 현상과 비슷한 공간 패턴을 나타남. - 아래는 EOF 분석을 통해 산출된 상위 3개의 해빙 거칠기 주성분임.

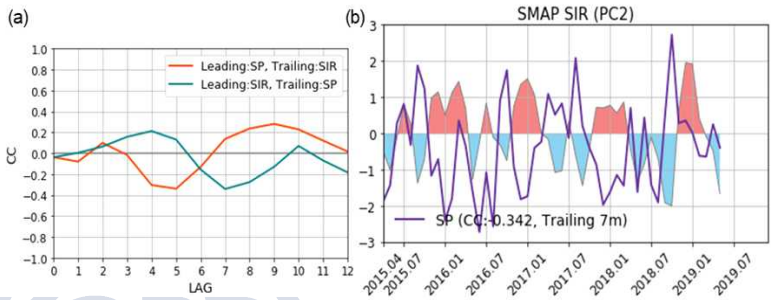


- 첫 번째 주성분은 계절 변동성이 뚜렷하게 확인되며, 전 기간에 걸쳐 거의 일정한 강도로 진동함.
- 두 번째 주성분에서도 계절 주기를 확인할 수 있으며, 시간이 지날수록 점차 강해지는 진동 패턴을 보임.
- 세 번째 주성분은 전반적으로 약한 변동성을 보이며, 앞의 두 주성분에 비해 불규칙한 패턴이 나타남.
- TCLL을 통해 상위 3개의 주성분과 상관성을 갖는 기후 변수를 탐색함.
- 아래 그림은 해빙 거칠기 주성분과 기후 변수 사이의 TLCC (a, c, e) 및 시계열 중첩 결과 (b, d, f)임.

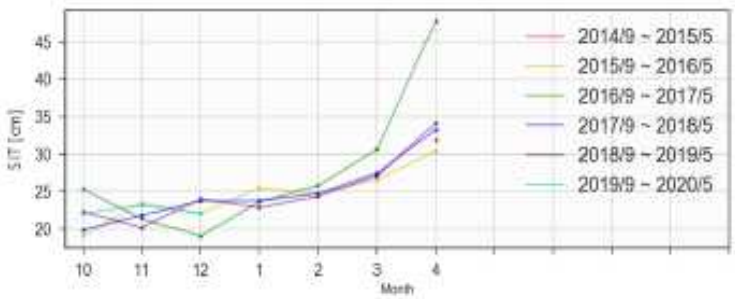


- 첫 번째 주성분은 해빙 변동 주기에 계절적 영향 미치는 대표적인 기후 변수인 해수면 온도와 비교를 실시함.
- 시차가 없을 때 Pearson CC가 0.803로 최대가 되었으며, 첫 번째 주성분과 해수면 온도를 중첩한 결과 매우 유사한 시계열 패턴을 보임.
- 두 번째 주성분은 풍속의 역수를 취한 값과 높은 상관

KOPRI 극지연구소

	성을 보이며, 풍속의 역수가 해빙 거칠기보다 8달 선행될 때 Pearson CC가 0.596으로 최대가 됨. - 세 번째 주성분은 AMO index와의 비교에서 유사한 패턴을 확인했으며, TCLL을 통해 AMO가 2달 선행할 때 Pearson CC의 상관성이 -0.384로 최대가 됨. - AMO index는 북대서양 해수면 온도를 기반으로 계산되므로, 세 번째 모드의 공간 패턴에서 나타난 북대서양 해류 유입과도 연관되는 결과임. - 추가로, 두 번째 모드의 공간패턴과 유사한 AO index와 주성분 분석을 시도하였으나 상관성을 찾지 못했으며, AO index 산출의 기반이 되는 대기압과의 상관성을 확인함. - 아래 그림은 해빙 거칠기 세 번째 주성분과 대기압 사이의 TLCC (a) 및 시계열 중첩 결과 (b)임. 

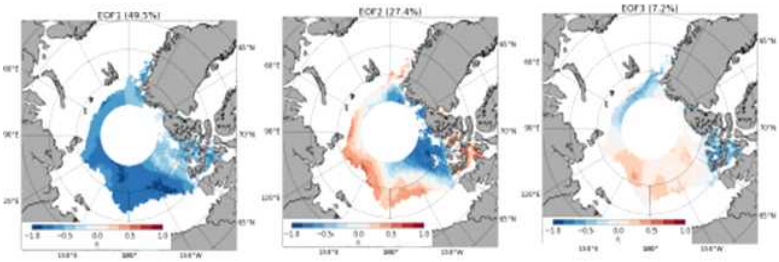
○ 세부목표 2-2:

연 구 내 용	연 구 결 과
- 사전 연구의 SMAP 해빙 거칠기와 SMOS 해빙 두께 변환관계식을 통해 산출된 0.5m 이하 얇은 해빙 두께 자료를 사용함. - 해당 변환식은 겨울철 자료를 기반으로 되므로, 겨울철에 한해 해빙 두께의 월별, 연도별 패턴 분석을 시도함. - 분석 기간은 해빙 거칠기 변동성과 동일한 2015년 4월부터 2019년 12월로 설정함.	- 아래는 겨울철 (10~4월) 기간에 대한 얇은 해빙 두께의 시계열 변화 그래프임.  - 10월에서 4월로 갈수록 해빙이 점차 두꺼워지며, 이는 전체 해빙의 변동성과도 일치하는 결과임. - 2016년 2월부터 4월의 추세는 다른 해에 비해 더 높게 나타나는데, 이는 2016년에 발생한 강한 엘니뇨의 영향으로 보임.

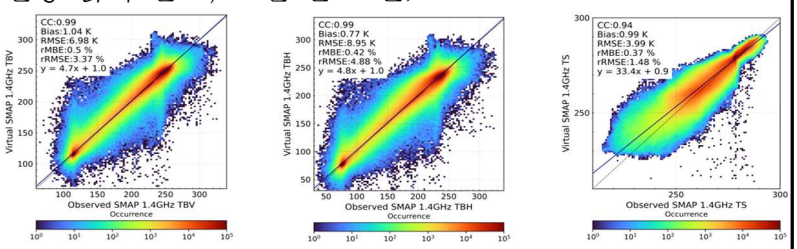
KOPRI 극지연구소

□ 성과목표 3:

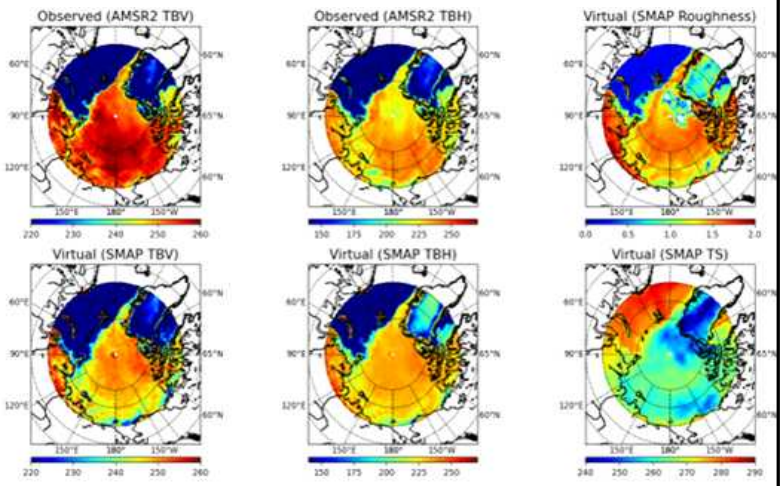
○ 세부목표 3-1:

연 구 내 용	연 구 결 과
- 해빙 거칠기 기반 해빙 두께 산출물에 대하여 EOF 분석을 실시함.	- 아래 그림은 EOF로 분석한 해빙 두께의 공간 변동성 분포임.  - 3개의 모드로 약 84.1%를 설명할 수 있으며, 모드 1~3은 각각 49.5%, 27.4%, 7.2%를 설명함. - 첫 번째 모드의 경우 모든 영역에서 해빙 두께의 감소 패턴을 확인하였음. - 나머지 두 개 모드에 대해서는 해빙 거칠기와 유사한 공간패턴을 확인함.

○ 세부목표 3-2:

연 구 내 용	연 구 결 과
- CGAN (Conditional Generative Adversarial Network) 기법을 통해 가상의 SMAP 위성 자료를 생성하여 SMAP 위성이 운용되지 않던 기간에 대해서도 자료를 확보함. - L-band (1.4GHz)에 해당하는 SMAP 위성의 편광 밝기온도와 상대적으로 높은 상관성을 보이는 AMSR2의 6.9GHz 수직 및 수평 편광 밝기온도를 모델의 입력 자료로 사용하였음. - 모델의 타겟 변수는 SMAP의 수평 및 수직 편광 밝기온도와 표면온도 자료임. - 모델 결과물은 AMSR2 위성 자료 수집이 가능한 2012년 7월부터 현재까지 생성 가능함.	- CGAN으로 생성된 모델은 rMBE (Relative Mean Bias Error)가 1.29%, rRMSE (Relative RMSE)가 3.24%로 매우 우수한 성능을 보임. - 모델 출력 변수들은 Pearson CC가 0.97, bias가 0.93K, RMSE가 6.64 K로 높은 정확도를 가짐. - 아래 그림은 2012년 11월 22일의 AMSR2 6.9 GHz 수직, 수평 편광 밝기온도 원자료와 가상의 SMAP 수직, 수평 편광 밝기온도, 표면온도 및 거칠기 결과임. - 아래 그림은 2019년 1월 1일부터 12월 31일까지의 SMAP 위성 원자료 평균과 모델로 생성된 가상의 SMAP 위성 자료 평균의 산포도임. (좌측부터 수직 편광, 수평 편광 밝기 온도, 표면 온도 순) 

KOPRI 극지연구소

	- 아래 그림은 SMAP 미운용 기간인 2012년 11월 22일의 모델 입출력 결과임. 

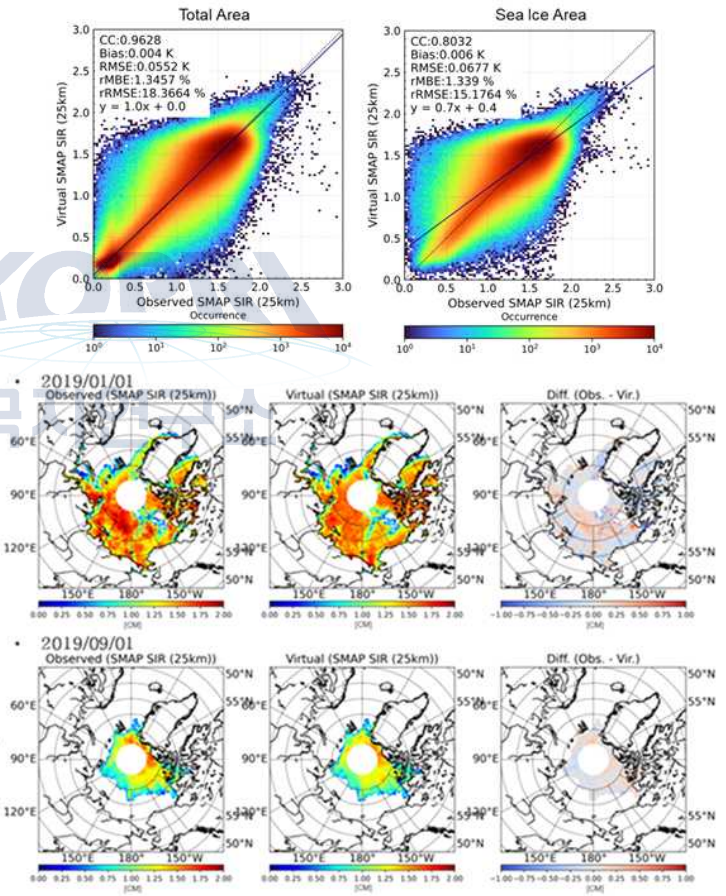
□ 성과목표 4:

○ 세부목표 4-1:

연 구 내 용	연 구 결 과
- 앞서 진행했던 딥러닝 모델을 사용하여 AMSR2 자료에서 SMAP 자료를 생성하는 경우, 최대 2017년 7월까지의 과거로 자료 확장이 가능하나, 해당 기간을 늘리고자 모델 개선을 수행함. - SMAP L-band 편광 밝기온도와 표면 온도 자료 (SPL3SMP_E)를 거칠기 식 (Hong et al., 2014)에 적용하여 해빙 거칠기 일자료를 산출함. - SMAP 해빙 거칠기 생성 모델 학습에 적절한 수동형 마이크로파 위성 밝기온도 자료로 DMSP-F17 위성의 SSMIS 19.3 GHz 수평 및 수직 편광 밝기온도 자료를 선정함. - 해당 자료는 1. 모델 출력 결과인 SMAP SIR보다 긴 관측 기간, 2. 딥러닝 학습 위해 SMAP 관측 시기와의 겹침 여부, 3. L-band (1.4 GHz) 밝기온도와의 높은 상관성을 기반으로 선정됨. - 해빙 영역에 대해 1.4 GHz와 19 GHz의 연평균 편광 밝기온도 차이는 수직에서 약 15 Kelvin, 수평에서 약 5 Kelvin임.	- 2015년 4월부터 2019년 12월까지의 SMAP 해빙 거칠기 일자료 산출함. - 참고로, SPL3SMP_E 자료의 SMAP 표면온도 자료는 version 4까지만 제공되므로 현재는 획득 어려움. - 2006년부터 2022년까지의 DMSP-F17/SSMIS 19.3 GHz 편광 밝기온도 자료 수집 (NSIDC-0001). - 해빙 영역 판단 위해 DMSP 위성 기반 해빙 농도 자료 수집 (NSIDC-0051).

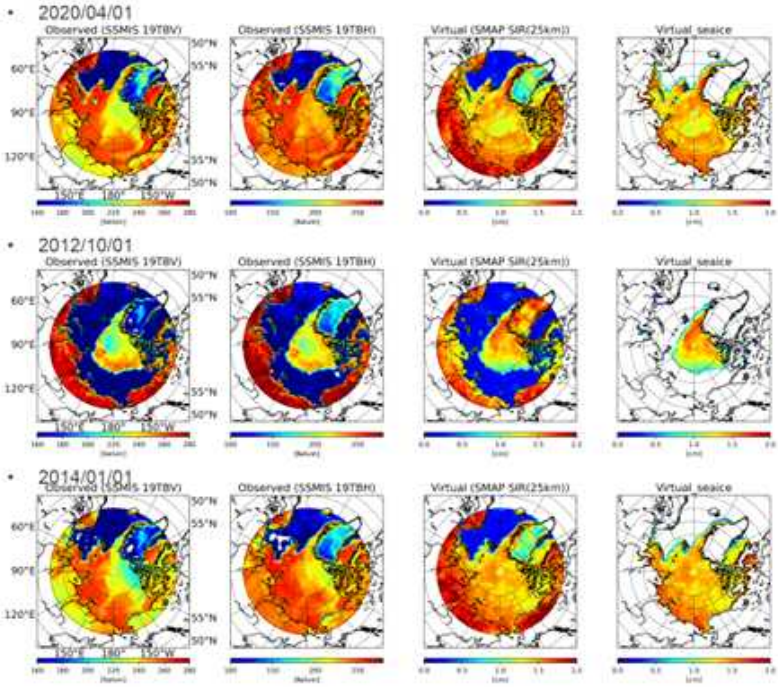
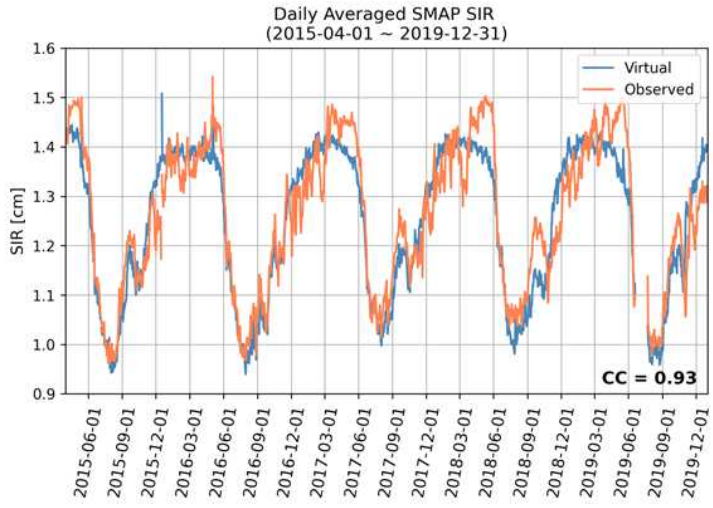
KOPRI 극지연구소

○ 세부목표 4-2:

연 구 내 용	연 구 결 과
- 장기간 L-band 해빙 거칠기 변동성 분석을 위해 딥러닝 기법을 사용하여 SMAP이 운용되지 않는 2015년 4월 이전의 기간에 대해 원자료 수준의 SMAP 해빙 거칠기를 생성하는 모델을 개발함. - 적대적 생성 신경망을 기반으로 하는 Data-to-Data (D2D) 모델 사용함. - 해당 모델은 입출력 자료가 쌍을 이루어 학습하므로 입력 자료만으로 새로운 도메인의 자료 생성이 가능함. - D2D는 모델 구조의 전후에 정규화 및 비정규화 단계를 추가한 것으로 해당 과정을 통해 실제 위성자료와 유사한 값으로 생성이 가능함. - 입력 자료로 DMSP-F17/SSMIS 19.3 GHz 수평 및 수직 편광 밝기온도를, 출력 자료로 SMAP 해빙 거칠기를 사용함. - 학습 영역은 위도 65도 이상의 북극 영역으로, 해빙 영역만으로 학습된 모델의 결과보다 육지와 바다까지 포함한 영역으로 학습 후 해빙 영역을 후처리 진행했을 때의 결과에서 더 좋은 성능을 보였음. (연평균 CC: 0.02, bias: 0.05 cm, RMSE: 0.003cm 개선) - 학습과 검증, 테스트 셋은 각각 2015-2017년과 2018년, 2019년의 일자료로 구성함.	- 모델 테스트 셋의 통계 수치는 다음과 같음. - 육지와 바다, 해빙을 모두 포함한 전체 영역에서의 통계수치는 CC: 0.9628, bias: 0.004 cm, RMSE: 0.0552 cm이며, relative mean bias가 1.3457 %, relative RMSE가 18.3%로 모델이 매우 우수한 성능 보임. - 해빙 영역에서의 통계수치는 CC: 0.8032, bias: 0.006 cm, RMSE: 0.0677 cm이며, relative mean bias가 1.339 %, relative RMSE가 15.176 %로 모델이 매우 우수한 성능 보임. - 테스트 셋 전체의 산포도 ((좌) 전체 영역, (우) 해빙 영역)) 및 해빙 영역에 대한 결과 예시는 아래와 같음. 

○ 세부목표 4-3:

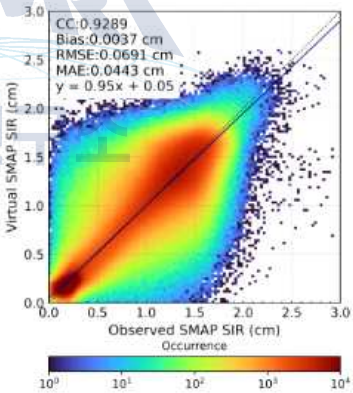
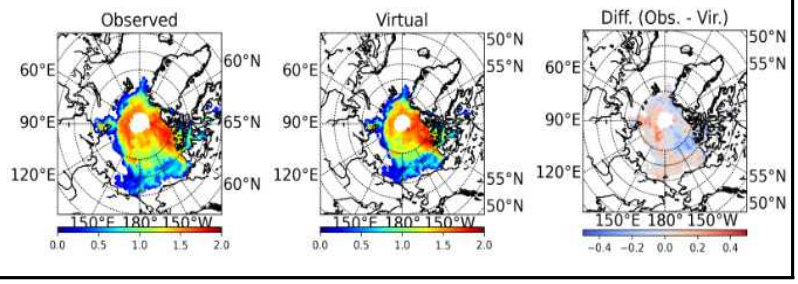
연 구 내 용	연 구 결 과
- 개발된 모델은 입력 자료로 DMSP-F17/SSMIS 19.3 GHz를 넣어 SMAP 해빙 거칠기를 출력하므로, DMSP-F17이 제공되는 2006년 12월	- DMSP F17 자료를 기반으로 SMAP 운용 시작일 이전인 2008년 1월 1일부터 인 2015년 12월 31일까지의 과거 기간에 대해 SMAP SIR 생성함. - 아래는 SMAP 미운용 기간에서의 모델 생성된 해빙 거

14일부터의 SMAP 해빙 거칠기 생성이 가능함.	칠기 자료 예시임. - 좌측부터 원자료 SSMIS 수직 편광 밝기온도와 SSMIS 수평 편광 밝기온도, 모델 생성된 SMAP 거칠기, 모델 생성된 SMAP 해빙 거칠기 순임. 
- 그러나 해빙 영역 판단에 사용되는 DMSP-F17 해빙 농도 자료는 2008년부터 제공되므로 실질적으로는 2008년부터의 SMAP 해빙 거칠기 생성이 가능함. - 가상의 SMAP 해빙 거칠기 생성물과 원자료 SMAP 해빙 거칠기 간의 일관성을 시도하였음.	- SMAP은 북위 87도 이상 영역은 결측 값으로 제공되지 않지만, 모델 생성된 SMAP 해빙 거칠기는 SSMIS 자료를 기반으로 하므로 pole hole 채워지는 효과가 있음. - 또한 SMAP 위성의 미운용 기간에 대해 산출물 획득이 가능하며, 이는 가장 오래된 L-band 수동형 마이크로파 위성인 SMOS보다 더 이전의 L-band 산출물 획득이 가능함을 시사함. - DMSP 위성들 간의 연계성을 통해 최대 1987년까지의 과거 SMAP 해빙 거칠기 자료 생성이 가능할 것으로 예상됨. - 모델 생성된 가상의 SMAP 해빙 거칠기와 SMAP 위성 원자료 기반 해빙 거칠기를 동일 기간에 대해 비교함. 

	- 원자료 SMAP 해빙 거칠기를 확보할 수 있는 2015년 4월부터 2019년 12월에 대해 수행했고, 그 결과는 위의 그래프임. - 두 자료의 일평균 해빙 거칠기 비교 결과, CC가 0.93으로 매우 유사하게 나타남. - 시계열 그래프 분석에서도 거의 일치하는 수준의 패턴을 확인함. - 해빙이 녹으면서 영역이 빠르게 변화하는 3~6월 기간에서 약 0.1 cm의 오차 발생했으나 그 외의 시기에는 거의 동일함. - 보다 장기간의 SMAP 해빙 거칠기 시계열 자료를 사용하여 해빙 거칠기의 장기 변동성 분석을 진행할 수 있음.

□ 성과목표 5:

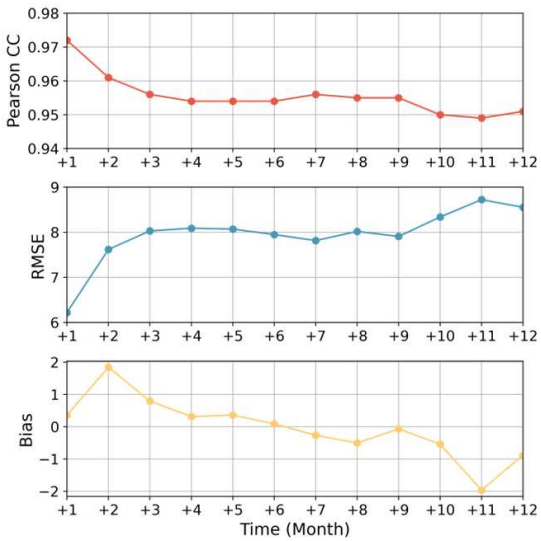
○ 세부목표 5-1:

연 구 내 용	연 구 결 과
- 1차년도에 개발한 SMAP 위성 자료 기반 L-band 해빙 거칠기 생성 모델을 개선하여 더 과거 기간으로의 자료 확장을 시도함. - 1차년도와 동일하게 Conditional GAN 기반의 Data-to-Data (D2D) 모델을 사용하였고, resnet-9 기반의 생성자와 patch-GAN 기반의 판별자 구조를 사용함. - D2D는 모델 구조 전후에 정규화 및 비정규화 단계를 추가한 것으로 해당 과정을 통해 모델이 실제 위성 자료 값을 생성해낼 수 있음. - 입력 자료로 DMSP-F 시리즈 위성 센서들 간 검보정을 하여 제공하는 NASA NSIDC DAAC NSIDC-0630 자료의 19.3 GHz 일일 편광 밝기온도를 사용함. - 출력 자료로 SMAP 1.4 GHz 편광 밝기온도 기반의 일일 해빙 거칠기를 사용함. - 학습은 위도 65도 이상의 바다를 포함하는 북극 영역이고, 학습 후 NOAA CDR-g02202 해빙 농도 자료를 사용하여 해빙 영역을 후처리함. - 학습과 검증, 테스트 셋은 각각	- 생성된 모델의 테스트 셋 통계 수치는 다음과 같음. - CC: 0.9289, bias: 0.0037 cm, RMSE: 0.0691 cm, MAE: 0.0443 cm (북위 65도 이상, 해빙 영역).  - 개발된 모델의 가상의 해빙 거칠기 생성물과 SMAP L-band 편광 밝기온도 원자료로 산출한 해빙 거칠기 산출물 결과가 정성적으로 매우 유사함을 확인함. - 가상의 해빙 거칠기는 정량적 측면에서 오차가 발생하긴 하나, 거칠기 강도 패턴은 거의 원자료와 동일한 수준임. - 아래 그림은 2021년 9월 1일의 해빙 거칠기 생성 결과 예시임. 

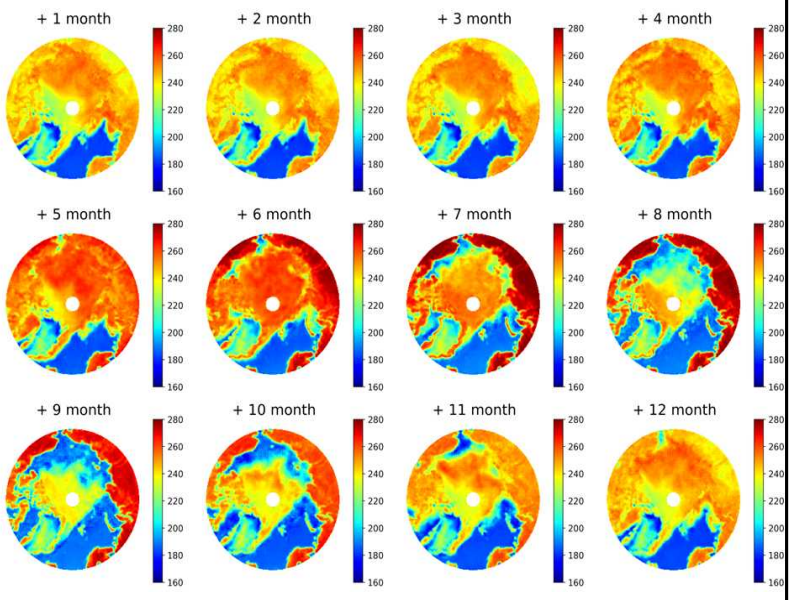
2015년 7월부터 2022년 6월, 2020년 7월부터 2021년 6월, 2021년 7월부터 2022년 6월까지로 구성함.

- 월평균 해빙 거칠기의 일 년 예측 모델을 개발함.
- 해빙 거칠기는 두께에 영향을 받기 때문에 겨울철 두꺼운 해빙에서의 거칠기는 학습 성능 저하에 영향을 줄 가능성이 있음.
- 따라서 해빙 거칠기를 직접 예측하지 않고, 앞서 개발된 해빙 거칠기 생성 모델의 입력 자료인 19.3 GHz 수직 및 수평 편광 밝기온도를 각각 예측한 후, 생성 모델에 적용하는 방식으로 해빙 거칠기를 예측하였음.
- 19.3 GHz 편광 밝기온도의 12달 예측 모델 개발은 수직과 수평을 나눠서 진행하였으며, resnet-6 기반의 생성자와 patch-GAN 기반의 판별자를 사용한 D2D 모델을 사용함.
- 모델 예측된 자료는 거칠기 생성 모델의 입력 자료로 사용되어야 하므로 생성 모델과 동일한 NASA NSIDC DAAC NSIDC-0630 자료의 19.3 GHz 편광 밝기온도를 월평균하여 입출력 자료 쌍으로 사용함.
- 입출력 자료는 각각 연속된 12개 시간대의 편광 밝기온도 자료를 중첩하였으며, 예측하고자 하는 달의 이전 12달을 입력으로 사용함. (예1. 입력이 1988년 1월 ~ 1988년 12월일 때, 출력은 1989년 1월 ~ 1989년 12월)
- 예측 직전 달부터 과거 12달을 중첩하여 학습했을 때 모델의 예측 성능이 가장 우수하였음.
- 학습과 검증, 테스트 셋은 각각 1988년 1월부터 2022년 8월, 2020년 10월부터 2023년 8월, 2021년 10월부터 2024년 8월의 기간 내에서 구성됨.

- 편광 밝기온도 예측 모델의 테스트 셋 통계 수치는 다음과 같음 (하단 그래프).
- 수직 편광: Pearson CC: 0.949 ~ 0.972, bias: -1.967 ~ 1.848, RMSE: 6.221 ~ 8.722
- 수평 편광: Pearson CC: 0.958 ~ 0.975, bias: -3.002 ~ 2.325, RMSE: 10.101 ~ 13.134

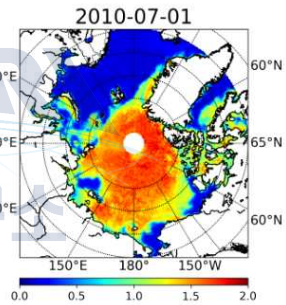


- 모델은 1달 후부터 12달 후로 예측 시간이 멀어질수록 통계 수치가 감소하나 그 차이가 크진 않음.
- 입력 시점에 무관하게 변동성이 적은 겨울철의 예측 결과가 여름철보다 우수함.
- 두꺼운 해빙과 육지 영역에서의 밝기온도 값은 원자료와 거의 유사하며, 주로 변동성 예측이 어려운 해빙 가장자리 영역에서 오차가 발생함.
- 아래 그림은 예측 모델 예시로 2022년 1월~12월을 입력으로 넣어 2023년 12달을 예측한 결과임.



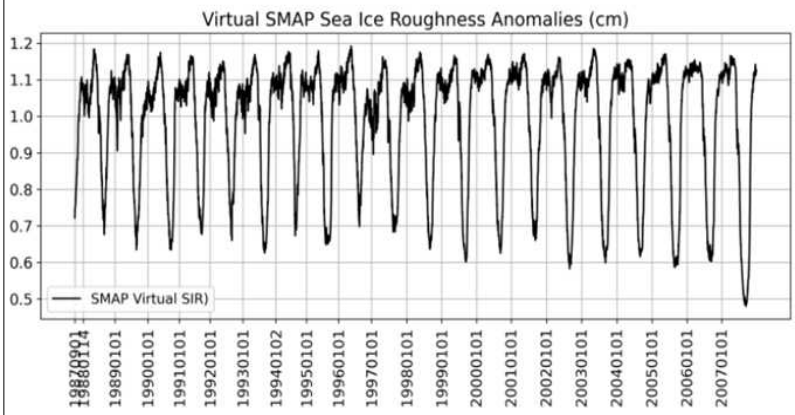
- 2차원 자료 기반의 D2D 모델 외에 1차원 시계열 예측 모델인 Seasonal ARIMA, ETS 및 LightGBM, Xgboost와 같은 기계학습 기반의 학습 모델들도 시도하였으나, 주변 픽셀들의 관계 학습의 어려움으로 인해 해빙이 녹고 어는 변화가 큰 영역 예측에서 취약한 결과를 보였음.	

○ 세부목표 5-2:

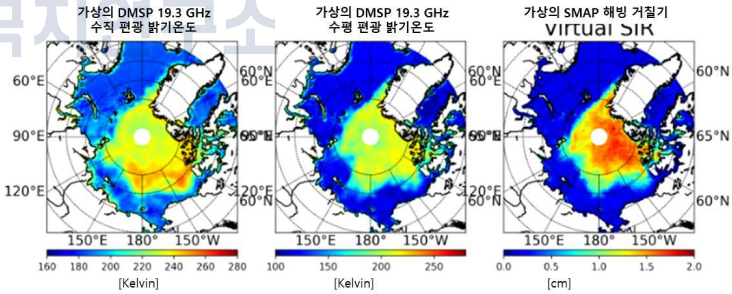
연 구 내 용	연 구 결 과
- 1차년도 모델은 DMSP-F17 위성의 SSMIS 19.3 GHz 편광 밝기온도를 기반으로 생성되었기 때문에 최대 2008년 1월 1일까지의 과거 기간까지로 만 확장이 가능했었음. - 개선된 모델은 DMSP-F 시리즈의 센서 간 검보정 후 제공되는 NASA NSIDC DAAC의 NSIDC-0630 자료를 학습에 사용함으로써 최대 1980년대까지의 과거 기간으로 확장 가능함. - 개발된 모델을 통해 최대 12달까지 예측된 해빙 거칠기를 생성함. - 해빙 거칠기 예측 결과의 정확도를 확인함.	- DMSP-F 시리즈 위성 자료를 사용함으로써 SMAP 위성이 발사되기 약 28년 전인 1987년 9월부터의 해빙 거칠기 산출물을 획득함. - 아래 그림은 SMAP 미운용 기간인 2010년 7월 1일 거칠기 생성 예시임. (0에 가까운 값은 바다 영역)  - 겨울철, 1m 이상의 두꺼운 해빙 영역에서 비정상적인 값의 해빙 거칠기가 생성되는 문제를 확인함. - 해빙 거칠기 산출식은 해빙 표면 온도가 편광 밝기 온도보다 높은 조건에서만 사용 가능함. - L-band 밝기 온도는 대개 1 m 두께 이하의 해빙에서 포화상태에 도달하게 되고 그 이상의 두께 영역에서는 표면 온도만 지속적으로 감소하게 되는데, 특히 겨울철 두꺼운 해빙에서 이러한 현상이 확인됨. - 따라서 해빙 거칠기 산출식 조건을 만족하지 못하게 되어 10월에서 4월의 두께 1m 이상의 해빙 영역에서는 거칠기 계산이 물리적으로 불가능함. - 아래의 그림은 1987년 9월부터 2008년 1월까지 생성한 과거 해빙 거칠기 일평균 그래프로, 3월경에 최대가 되고 9월경에 최소가 되는 연간 변화 패턴이 일정하게 나타나는 것을 확인함. - 시간이 지남에 따라 여름철 최소 해빙 거칠기 값이 급격히 낮아지는 추세를 보이는데, 이는 두꺼운 해빙이 감소함에 따라 상대적으로 덜 거친 얇은 해빙 영역의 비중이

KOPRI 극지연구소

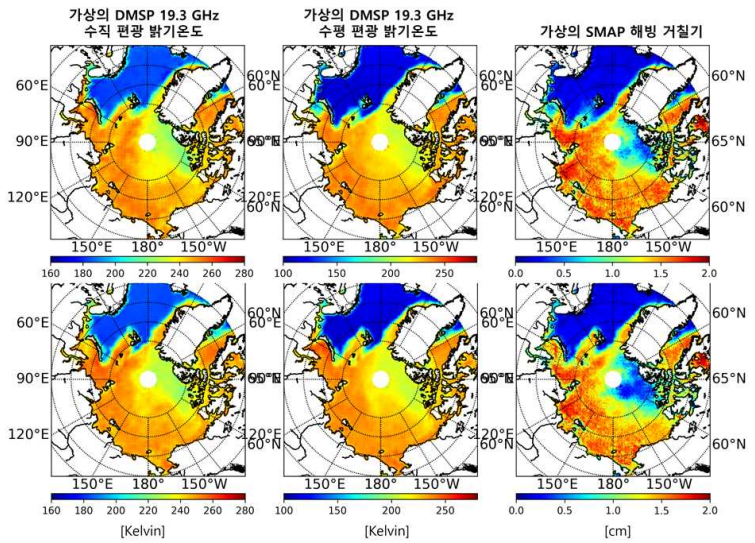
증가한 결과로 해석됨.
- 확보된 해빙 거칠기 자료를 통해 장기간의 해빙 변동성 분석 연구로 확장 가능함.



- 편광 밝기온도 원자료를 입력으로 사용한 해빙 거칠기 생성 모델 결과와 편광 밝기온도 예측 값을 입력으로 사용한 생성 모델의 결과는 CC가 0.92로 높은 상관성을 보였음.
- 아래 그림은 예측된 편광 밝기온도와 이를 입력으로 사용하여 생성한 가상의 거칠기 결과 예시임. (9달 후 예측된 2022년 9월 결과)



- 동일한 달을 예측 모델로 생성하더라도 해당 달의 예측 시점이 더 가까운 시간대에 위치할수록 정확도 높아지며, 이는 앞서 확인한 통계수치 결과에서도 확인할 수 있음. (예. 1달 후 2020년 1월 예측 결과가 5달 후 1월 예측 결과보다 우수함)
- 하단의 그림은 모두 2022년 1월 사례로, (위) 4달 후 예측, (아래) 1달 후 예측된 결과임. 두 결과가 거의 유사하며, 그린란드 부근의 두꺼운 해빙에서 거칠기가 유효하지 않은 값으로 생성됨을 확인함.
- 해빙 거칠기 예측 생성물은 겨울철 두꺼운 해빙에서 유효하지 않으므로 해빙 두께를 통해 영역 마스킹을 실시해야 하나, 미래의 해빙 두께 정보는 수집할 수 없으므로 유효 범위 설정에 어려움이 있음.

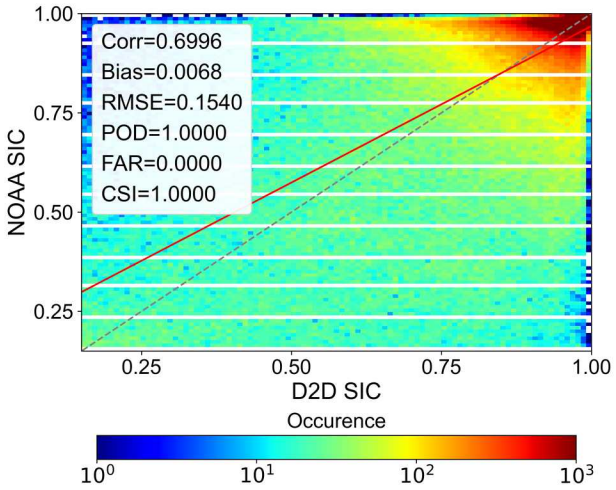
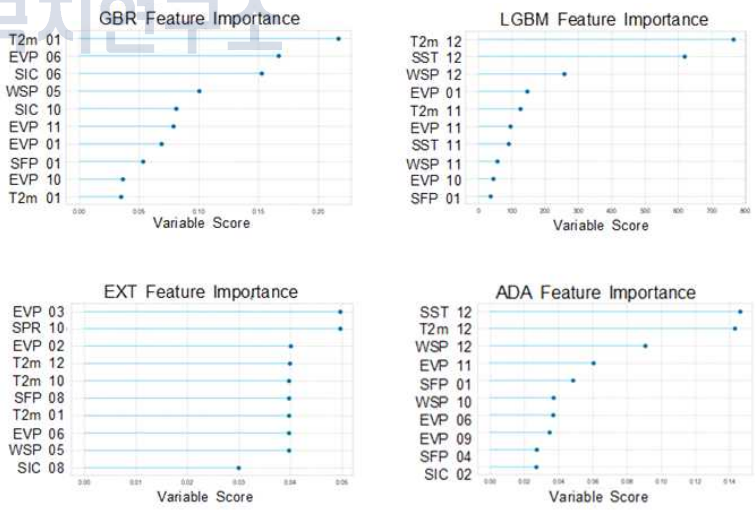
□ 성과목표 6:

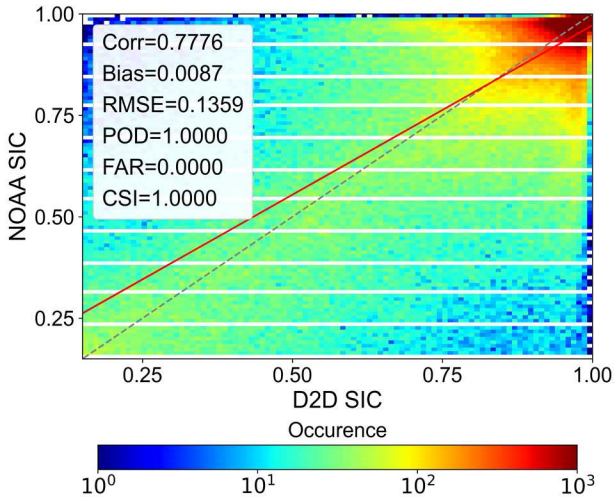
○ 세부목표 6-1:

연 구 내 용	연 구 결 과
- 1년 단위의 해빙 농도 예측 모델 개발을 위해 월평균 해빙 농도 자료와 기상 자료들을 학습 자료로 활용함. - 최대한 많은 학습 자료 셋을 확보하기 위하여 장기간 관측 중인 DMSP 시리즈의 해빙 농도 자료를 학습 자료로 선정함. - DMSP 해빙 농도 산출물(G02202)은 NASA NSIDC에서 제공되며, DMSP 위성 시리즈의 SSMR, SSM/I, SSMIS 센서 간 검보정을 거친 일관성이 확보된 자료임. - 해당 해빙 농도 산출물은 25km의 공간해상도로 1979년 1월부터 현재까지 제공되고 있음. - 해빙 예측 모델의 정확성 향상을 위해 ERA5에서 제공하는 2m temperature, sea surface temperature 등의 해빙과 관련된 기상 변수 자료들을 추가 입력 변수로 고려하여 수집함. - 해당 기상 자료들은 월평균된 12km의 공간해상도의 자료를 제공함.	- 1979년 1월부터 2018년 12월까지의 DMSP 월평균 해빙 농도 자료를 수집함. - 1979년 1월부터 2018년 12월까지의 ERA5 월평균 기상 변수 자료들을 수집함. - 수집된 기상 변수 자료: 2m dewpoint temperature, 2m temperature, sea surface temperature, surface pressure, 10m u-component of wind, 10m v-component of wind, 10m wind, evaporation, sea-ice cover.

KOPRI 극지연구소

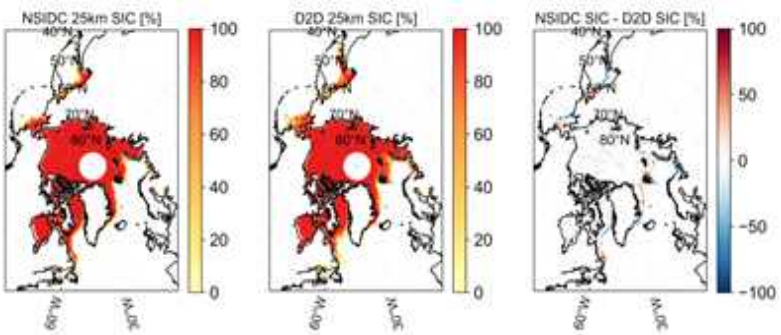
○ 세부목표 6-2:

연 구 내 용	연 구 결 과
- 딥러닝 기법을 사용하여 과거 해빙 농도 자료를 기반으로 1년 단위의 해빙 농도를 예측하는 모델을 개발함. - Conditional GAN 기반의 Data-to-Data (D2D) 모델을 사용함. - D2D는 모델의 입력 단계 전과 출력 단계 후에 각각 정규화 및 비정규화 과정을 추가함으로써, 실제 해빙 농도 범위의 값을 생성할 수 있도록 설계된 딥러닝 모델 구조임. - U-net 기반의 생성자와 70x70 patchGAN 기반의 판별자 구조를 사용함. - 예측 모델의 입출력 자료는 쌍을 이루어 구성되며, 입력으로는 연속된 12개월의 월평균 해빙 농도 자료가, 출력으로는 입력 자료의 마지막 달 이후 12개월 동안의 월평균 해빙 농도 자료가 사용됨. - 학습 영역은 해빙 영역만을 포함하는 위도 50도부터 위도 87도까지의 북극 영역임. - 위도 87도는 pole hole이 가장 큰 센서인 SMMR의 최대 관측 위도를 기준으로 설정됨. - 해빙 영역은 '해빙 농도 > 15%'를 기준으로 판단했으며, 15% 미만인 영역은 바다로 간주하여 마스킹 처리됨. - 예측 모델의 모든 입출력 자료는 해빙 농도 자료를 기준으로 25 km의 공간해상도로 보간됨. - 학습과 검증, 테스트 셋은 각각 1979년 1월부터 2018년 12월, 2019년 1월부터 2021년 12월, 2022년 1월부터 2022년 12월까지로 구성함. - 추가로, D2D 모델 기반 해빙 농도 1년 예측 모델의 성능 개선을 시도함.	- D2D 기반의 해빙 농도 1년 예측 모델의 테스트 셋 통계 수치는 다음과 같음. (해빙 농도 > 15% 영역) - CC: 0.6996, bias: 0.0068, RMSE: 0.1540, POD: 1.0000, FAR: 0.0000, CSI: 1.0000.  - 예측 모델 성능 개선을 위한 추가 입력 변수 선정 미래 해빙 농도에 대한 머신러닝 기반의 ERA5 기상 변수 중요도 결과는 다음과 같음.  - 최종적으로 2m temperature, sea surface temperature, surface pressure, 0m wind, evaporation 자료가 추가 입력 변수로 선정됨. - 4가지의 머신러닝 모델의 변수 중요도 그래프를 기반으로 순위 차이를 고려하되, 중요도가 일정 수준 이상인 모든 변수들을 최종 입력 변수로 채택됨. - 개선된 해빙 농도 1년 예측 모델의 테스트 셋 통계 수치는 다음과 같음 (해빙 농도 > 15% 영역).

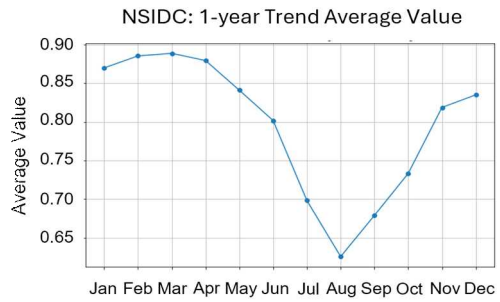
- 2m temperature, sea surface temperature 등의 해빙 형성 및 변동에 직간접적인 영향을 주는 1차 기상 자료를 예측 모델의 추가 입력 변수로 고려됨. - 다양한 머신러닝 모델을 기반으로 변수 중요도를 분석하여, 추가 입력 변수로 사용할 기상 자료를 선정하였음. - 변수 중요도 계산에는 트리 구조 기반 머신러닝 모델 (Gradient Boosting Regressor (GBR), Light Gradient Boosting Machine (LGBM), Extra Tree Decision (EXT), Adaptive Boost (ADA))이 사용되었으며, 각 머신러닝 모델은 pycaret 패키지를 통해 구현됨. - 최적의 변수 중요도 계산을 위한 머신러닝 학습의 입출력 자료는 예측 모델 모델의 입출력 자료와 동일한 기간의 월평균 자료로 구성됨.	- CC: 0.7776, bias: 0.0087, RMSE: 0.1359, POD: 1.0000, FAR: 0.0000, CSI: 1.0000 - 모델 개선 후 Bias는 약간 증가했지만 CC는 약 11.15% 향상되었고, RMSE는 약 11.75% 감소하여 성능이 개선되었음. 

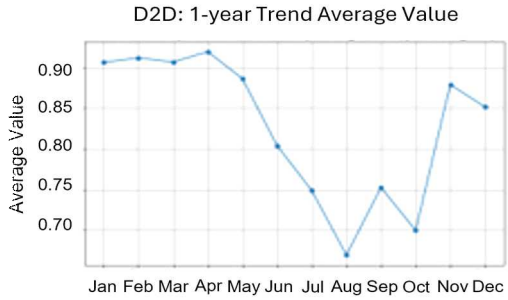
KOPRI 극지연구소

○ 세부목표 6-3:

연 구 내 용	연 구 결 과
- 개발된 D2D 기반의 해빙 농도 1년 예측 모델을 테스트 셋 기간에 대하여 정량적, 정성적 통계 분석을 수행함. - 시계열 분석을 통해 월별 예측 정확도를 제시함.	- D2D 기반의 해빙 농도 1년 예측 모델로 예측된 가상의 해빙 농도 생성 결과가 NSIDC 월평균 해빙 농도 원자료와 정성적으로 매우 유사함을 확인함. - 가상의 해빙 농도는 정량적 측면에서 0.87%의 오차와 13.59%의 RMSE가 발생하긴 하나, 해빙 농도 패턴은 거의 원자료와 동일한 수준임. - 아래 그림은 2022년 1월부터 12월까지의 입력데이터 중 세 번째 입력 변수에 해당하는 2022년 3월의 월평균 해빙 농도 예측 결과 예시임. 

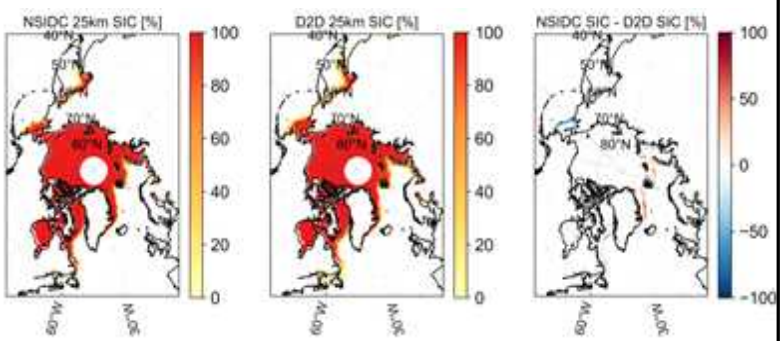
- 아래 그림은 2022년 월평균 해빙 농도 생성 결과와 NSIDC 월평균 해빙 농도 자료의 시계열 그래프임.



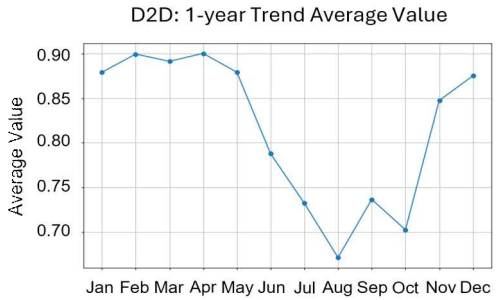


- D2D 모델은 전반적인 계절 패턴은 재현하였지만, 8월~9월의 여름철 극저점 패턴을 정확히 모사하지 못함.
- 모델 입력 변수의 한계, 학습 데이터의 정규화, 계절 전환기의 예측 민감도 저하 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석됨.

- ERA5 기상 자료를 추가하여 개선된 모델로 예측된 가상의 해빙 농도 생성 결과가 NSIDC 월평균 해빙 농도 원자료와 정성적으로 매우 유사하며, 이전 모델에 비해 향상된 결과를 보임.
- 개선된 가상의 해빙 농도는 정량적 측면에서 기존 예측 모델보다 육지 주변 해빙 농도 패턴이 더 구체적으로 구현되었으며, 특히 그린란드 동해안 및 보퍼트 해 등 육지 인접 해역에서 해빙의 공간 분포와 농도 패턴이 더 세밀하게 반영됨.
- 아래 그림은 개선된 2022년 3월의 월평균 해빙 농도 생성 결과 예시임.



- 기존 해빙 농도 예측 모델보다 해빙 농도 패턴을 NSIDC 원자료 값에 더 가깝게 재현하며, 특히 해안 인근 해역에서 정량적 오차가 감소하고 해빙 경계 표현이 더욱 정밀해짐.

	- 아래 그림은 개선된 2022년 월평균 해빙 농도 생성 결과와 NSIDC 월평균 해빙 농도 자료의 시계열 그래프임.  - 여름철 저해빙기 (7-9월) 이후의 해빙 농도 회복 추세를 개선 전보다 정확히 재현하여, 계절 변화에 대한 민감도와 예측 안정성이 향상됨. - 특히, 11월에서 12월로 이어지는 데이터의 추세선이 원 자료 값과 동일한 패턴으로 변화됨.

KOPRI
극지연구소

라. 평가의 착안점

(세부목표 제시와 함께 세부연구목표별 가중치를 기재)

년도		성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1 단계	1차년도 (2020)	해빙거칠기 변화 연구	○ 마이크로파 위성을 이용한 북극 해빙 거칠기 알고리즘 개선	50	1. 알고리즘 개선 여부 2. 해빙 거칠기 시계열 변화 분석
			○ 북극 해빙 거칠기 시계열 변화 확인	50	
	2차년도 (2021)	해빙 거칠기 및 두께 변화 연구	○ 마이크로파 위성을 이용한 해빙 거칠기 변동성 분석	60	1. EOF 분석을 통한 해빙 거칠기 공간 패턴 변화 분석 2. PCA 분석을 통한 해빙 거칠기와 유효 상관성 기후 변수 탐색 3. 해빙 두께 시공간 변화 분석
			○ 거칠기 기반 해빙 두께 변동성 분석	40	
	3차년도 (2022)	해빙두께 변화연구 및 장기간 위성자료 산출물 생성	○ 해빙 두께 변동성 분석	40	1. EOF 분석을 통한 해빙 두께 공간 패턴 변화 분석 2. 딥러닝을 이용한 L-band 위성 밝기온도 자료 생성 3. 생성된 가상의 밝기온도의 정확도 제시
			○ 딥러닝을 이용한 밝기온도 및 해빙 표면 온도 자료 생성	60	
2 단계	1차년도 (2023)	북극 해빙 거칠기 생성 연구	○ 위성 밝기온도 자료 수집 및 해빙 거칠기 산출물 생성	20	1. 과거 해빙 거칠기 생성 모델 개발 2. 개발된 생성 모델의 정량적 정확도 제시 3. 가상의 해빙 거칠기 생성물과 원자료 간의 일관성 4. 연구 결과의 확장성
			○ 딥러닝 기법을 이용한 해빙 거칠기 생성 모델 개발	40	
			○ 모델 생성된 가상의 해빙 거칠기 결과 제시	40	
	2차년도 (2024)	북극 해빙 거칠기 예측 연구	○ 딥러닝 기법을 이용한 미래 해빙 거칠기 예측 모델 개발	50	1. 해빙 거칠기 미래 예측 모델 개발 2. 개발된 예측 모델의 정량적 정확도 제시 3. 연구 결과의 확장성
			○ 예측 모델을 이용한 해빙 거칠기 산출물 결과 제시	50	
	3차년도 (2025)	북극 해빙 농도 예측 연구	○ 수동형 마이크로파 위성 해빙 농도 자료 수집	20	1. 해빙 농도 예측 모델 개발 2. 개발된 예측 모델의 정량적 정확도 제시
			○ 해빙 농도 예측 모델 개발	40	
			○ 예측 모델을 이용한 해빙 농도 예측 결과 제시	40	

2. 목표달성을 위한 연구수행 방법

○ 연구수행 방법 1-1:

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
해빙 거칠기 변화 연구	마이크로파위성을 이용한 북극 해빙 거칠기 알고리즘 개선	1. 인공위성 자료 처리	AMSR-2 해빙농도 자료를 활용하여 전 계절에 적용 가능한 해빙 거칠기 알고리즘으로 개선
	마이크로파위성을 이용한 북극 해빙 거칠기 시계열 변화 확인	2. 정성적 통계적 분석	전 계절 해빙 거칠기의 계열적 변화 추세를 확인하고 월별 연도별 패턴을 분석

○ 연구수행 방법 1-2:

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
해빙 거칠기 변화 연구	마이크로파 위성을 이용한 해빙 거칠기 변동성 분석	1. 인공위성 자료처리 기술	타 위성 자료 간의 시공간해상도 일치 및 재처리
		2. 정성적, 정량적 통계적 분석	EOF, PCA 분석 이용한 해빙 거칠기 변동성에 영향을 주는 주요 기후변수 및 시공간 변화 경향 분석 기술
해빙 두께 변화 연구	거칠기 기반 해빙 두께 변동성 분석	3. 인공위성 자료처리 기술	서로 다른 시공간해상도 자료들 일치 및 시간해상도 변경

○ 연구수행 방법 1-3:

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
해빙 두께 변화 연구	북극 해빙 두께 변동성 분석	1. 정성적, 정량적 통계적 분석	수동형 L-band 마이크로파 위성인 SMAP을 이용해 해빙 거칠기 기반 해빙 두께를 산출하고 이에 대한 EOF 분석 수행
장기간 위성자료 산출물 생성	딥러닝을 이용한 밝기온도 및 해빙 표면 온도 장기 자료 생성	2. 딥러닝 모델 활용 기술	CGAN 기법을 통해 SMAP 위성이 제공되지 않는 기간에 대한 수직, 수평 편광 밝기온도, 표면온도 및 거칠기 장기 자료 확보

○ 연구수행 방법 2-1:

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적 · 실험적 접근방법)	구체적인 내용
북극 해빙 거칠기 예측 연구	위성 밝기온도 자료 수집 및 해빙 거칠기 산출물 생성	1. 인공위성 자료 처리	타 위성 자료 간의 시공간해상도 일치 및 재처리
		2. 해빙 거칠기 산출	L-band 위성 기반의 해빙 거칠기 산출
	딥러닝 기법을 이용한 해빙 거칠기 예측 모델 개발	3. 인공지능 기법을 통한 가상의 위성 산출물 생성	적대적 생성 신경망을 기반으로 타 위성 자료를 통해 SMAP 위성 미운용 기간에 대해 원자료 수준의 해빙 거칠기 자료 생성
	모델 생성된 가상의 해빙 거칠기 결과 제시	4. 정량적 통계 분석	개발된 모델 기반의 가상의 과거 SMAP 거칠기 자료 확보하고, 원자료와의 일평균 시계열 변화 비교 수행

○ 연구수행 방법 2-2:

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적 · 실험적 접근방법)	구체적인 내용
북극 해빙 거칠기 예측 연구	딥러닝 기법을 이용한 미래 해빙 거칠기 예측 모델 개발	1. 인공위성 자료 처리	타 위성 자료 간의 시공간해상도 일치 및 재처리
		2. 인공지능 기법 사용	문제 해결을 위한 다양한 인공지능과 기계학습 시도 적대적 신경망 기반의 딥러닝 모델을 사용하여 위성 미운용 기간의 해빙 거칠기 산출물을 높은 정확도로 생성
	예측 모델을 이용한 해빙 거칠기 산출물 결과 제시	3. 정량적 통계 분석	개발된 모델의 정량적 성능 평가 및 과서 산출물의 일평균 시계열 시각화 수행

KOPRI 극지연구소

○ 연구수행 방법 2-3:

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적・실험적 접근방법)	구체적인 내용
북극 해빙 농도 예측 연구	수동형 마이크로파 위성 해빙 농도 자료 수집	1. 자료처리 기술	NSIDC 제공 월평균 해빙 농도 자료와 ECMWF 제공 ERA5 재분석 기후 변수 자료 수집 및 위성과 재분석 자료간의 시공간해상도 일치 처리
	해빙 농도 예측 모델 개발	2. 딥러닝 모델 활용 기술 3. 머신러닝 모델 활용 기술	D2D 딥러닝 모델을 사용하여 해빙 농도 1년 예측 모델을 개발하고, 다양한 머신러닝 기반의 입력 변수 간 중요도를 분석하여 최적의 입력 변수를 조합
	예측 모델을 이용한 해빙 농도 예측 결과 제시	4. 정성적, 정량적 통계 분석	원자료와 비교하여 개발된 예측 모델의 정성적 성능 비교 및 월별 예측 정확도 제시

※ 연구범위에 따라 적용한 이론적・실험적 접근방법 또는 기법・원리 등을 기재하고 그 구체적인 내용을 기술함

KOPRI 극지연구소

3. 연구성과(정량적 성과)

□ 계획 대비 실적

(계획(건수)/대비(건수))

구분		계획					
논문		국외			국내		
		SCI	기타	소계	SCI	기타	소계
		2/3	/	/	/	/	/
Proceeding		국외			국내		
		/			/		
단행본(저서)		/					
특허		국외			국내		
	출원	/			/		
	등록	/			/		
기술실시계약		/					
세미나개최		/					
인터넷사이트 개설		/					
기타사항		/					

KOPRI 극지연구소

4. 연구비 집행실적

(작성기준일: 2025. 04. 16)

(단위 : 천원)

비목	세목		예산금액	사용금액	잔액	집행률(%)
직접비	인건비	미지급	(9,600,000)			
		지급	17,200,000	17,200,000	0	100
	인건비소계		17,200,000	17,200,000	0	100
	연구시설·장비비					
	연구재료비					
	연구활동비		3,238,727	3,238,727	0	100
	연구수당					
	연구비소계		3,238,727	3,238,727	0	100
간접비			4,561,273	4,561,273	0	100
연구비 총액			25,000,000	25,000,000	0	100

주) 연구비 집행실적은 연말기준 추정 사용금액을 기재하며, 작성기준일은 최종보고서 제출시점을 기록함

5. 연구수행에 따른 문제점 및 개선방향

당초계획보다 진도상의 미흡한 부분에 대한 원인과 대책을 중심으로 개조식으로 기술

문제점 또는 원인	개선방향 또는 대책
없음	-

6. 주요 연구변경 사항

없음

KOPRI
극지연구소

Ⅱ. 성과 활용 계획

1. 성과 활용 계획

○ 성과 개요

본 연구에서는 북극 해빙의 시공간적 변동성을 정량적으로 이해하고 장기적인 기후변화 예측 및 자원 탐사 활용을 위한 딥러닝 기반 생성 및 예측 모델을 개발하였다. 주요 성과는 다음과 같다.

- 기존에 여름철에 적용이 어려웠던 해빙 거칠기 알고리즘을 개선하여, 전 계절에 걸쳐 안정적인 해빙 거칠기 산출이 가능하도록 하였음.
- EOF, PCA, TLCC 분석을 통해 해빙 거칠기의 주요 시공간 변동을 분석하고 해수면 온도, 풍속, AMO index와 같은 주요 기후 변수와의 상관관계를 도출하였음.
- D2D (Conditional GAN 기반) 딥러닝 모델을 활용하여, SMAP 위성 운용 이전 시기인 1987년까지 확장된 L-band 해빙 거칠기 자료를 생성함.
- D2D 기반의 예측 모델을 통해 월평균 L-band 해빙 거칠기와 월평균 해빙 농도의 12개월 예측 모델을 구축하고, 머신러닝 기반의 입력 변수 중요도 분석을 통해 예측 성능을 개선하였음.

○ 활용 가능성 및 파급 효과

본 성과는 북극 해빙의 계절적 특성 및 장기 변화를 정밀하게 파악할 수 있는 기반을 제공한다. 특히, L-band 기반의 장기 해빙 거칠기 자료는 SMAP 위성 이전 시점까지 확장 가능하여 기후 변화 연구 및 위성 시계열 보완에 필수적인 역할을 수행할 수 있다. 해빙 거칠기 및 농도 예측 모델 자료는 북극항로 개방성 평가, 극지 자원 접근성 분석, 기후모델 보완 등에 활용될 수 있으며, 물류 최적화, 항로 안전 확보 등 민간 산업에도 높은 파급력을 지닌다. 또한, 해수면 온도, 풍속, AMO 지수 등과의 연계 분석을 통해 해빙 변화와 기후 요인 간의 인과관계 해석에도 기여함으로써, 극지 기후위기 대응과 글로벌 협력 기반 마련에 기여할 수 있다.

○ 후속 활용 계획

향후에는 확보된 과거 해빙 거칠기 자료를 활용하여 장기간에 걸친 시공간 변동성 분석을 수행하여 기후 변화 연구로 확장할 계획에 있다. 해빙 변동성이 큰 여름철 시기의 예측 성능을 강화하고, 고해상도 예측에 중점을 둔 후속 연구로 확장 예정에 있으며, 아울러, 해빙 두께, 경계 변화, 이동 경로 등 극지 자원 접근성에 영향을 미치는 요소들과의 통합 분석을 통해, 자원 탐사에 최적화된 예측 체계를 구축하고 정밀한 해빙 거칠기와 농도 예측 정보를 제공할 수 있다.

2. 기타사항

-

[별첨 3] 위탁연구과제 최종보고서 3

위탁연구 최종보고서

<table>
<tr><td colspan="3">본 과 제 명
(연구책임자)</td><td colspan="8">북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구 (김현철)</td></tr>
<tr><td rowspan="15">위
탁
과
제</td><td colspan="2" rowspan="2">과제명</td><td>국문</td><td colspan="7">위성 기반 북극 해빙 특성 분석 알고리즘 개발</td></tr>
<tr><td>영문</td><td colspan="7">Allgorithm Development for Characterization of the Arctic Sea Ice</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="5">연구책임자</td><td>성명</td><td colspan="2">임정호</td><td colspan="2">과학기술인등록번호</td><td colspan="2">1016-6013</td></tr>
<tr><td>부서</td><td colspan="2">지구환경
도시건설공학과</td><td colspan="2">생년월일</td><td colspan="2">1973.11.06</td></tr>
<tr><td>직위/직급</td><td colspan="2">교수</td><td colspan="2">전공(학위)</td><td colspan="2">원격탐사(박사)</td></tr>
<tr><td>전화번호</td><td colspan="2">052-217-2824</td><td colspan="2">휴대폰</td><td colspan="2">010-9024-6102</td></tr>
<tr><td>FAX</td><td colspan="2">052-217-2819</td><td colspan="2">e-mail</td><td colspan="2">ersgis@unist.ac.kr</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">협약 및
관리담당자</td><td>성명</td><td colspan="3">장영진</td><td>전화</td><td colspan="2">전화: 052-217-1445</td></tr>
<tr><td>소속</td><td colspan="3">연구관리팀</td><td>E-Mail</td><td colspan="2">savetheplanet@unist.ac.kr</td></tr>
<tr><td>주소</td><td colspan="6">울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 201동 206호</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="10">연 구 기 간 / 연
구 비 /
참 여 연 구 원</td><td colspan="2">연구연차</td><td colspan="3">연구기간</td><td>연구비
(백만원)</td><td>참여연구원수</td></tr>
<tr><td colspan="2">총연구기간</td><td colspan="3">2020. 01. 01 ~2025. 12. 31.</td><td>210</td><td>36</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1
단
계</td><td>1차년도</td><td colspan="3">2020. 01. 01 ~2020. 12. 31.</td><td>40</td><td>6</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="3">2021. 01. 01 ~2021. 12. 31.</td><td>40</td><td>6</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="3">2022. 01. 01 ~2022. 12. 31.</td><td>40</td><td>6</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2
단
계</td><td>1차년도</td><td colspan="3">2023. 01. 01 ~2023. 12. 31.</td><td>40</td><td>7</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="3">2024. 01. 01 ~2024. 12. 31.</td><td>25</td><td>5</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="3">2025. 01. 01 ~2025. 12. 31.</td><td>25</td><td>6</td></tr>
</table>

본인은 위 연구과제를 수행함에 있어 귀소와의 제반협약사항을 준수하여 본 위탁연구를 성실히 수행하여 최종보고서를 제출합니다.

2025. 04. 14.

연구책임자 : 임 정 호 (인)

위 연구책임자는 당 기관 소속직원으로서 연구를 효과적으로 완수할 수 있게 하기위하여 다음 사항을 성실히 이행하겠습니다.

1. 연구수행에 대한 종합적인 책임
2. 연구시설, 인력 및 행정의 우선적지원
3. 연구개발비의 관리, 사용 및 관리자 지정

2025. 04. 14.

위탁연구기관명 : 울산과학기술원

위탁연구기관장 : 박 종 래 (인)

극지연구소장 귀하

위탁연구 최종보고서

<table>
<tr><td colspan="3">본 과 제 명
(연구책임자)</td><td colspan="6">북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구 (김현철)</td></tr>
<tr><td rowspan="10">위탁과제</td><td rowspan="2">과제명</td><td>국문</td><td colspan="6">위성 기반 북극 해빙 특성 분석 알고리즘 개발</td></tr>
<tr><td>영문</td><td colspan="6">Allgorithm Development for Characterization of the Arctic Sea Ice</td></tr>
<tr><td rowspan="5">연구책임자</td><td colspan="2">성명</td><td>임정호</td><td colspan="2">과학기술인등록번호</td><td>1016-6013</td></tr>
<tr><td colspan="2">부서</td><td>지구환경
도시건설공학과</td><td colspan="2">생년월일</td><td>1973.11.06</td></tr>
<tr><td colspan="2">직위/직급</td><td>교수</td><td colspan="2">전공(학위)</td><td>원격탐사(박사)</td></tr>
<tr><td colspan="2">전화번호</td><td>052-217-2824</td><td colspan="2">휴대폰</td><td>010-9024-6102</td></tr>
<tr><td colspan="2">FAX</td><td>052-217-2819</td><td colspan="2">e-mail</td><td>ersgis@unist.ac.kr</td></tr>
<tr><td rowspan="3">협약 및
관리담당자</td><td>성명</td><td>장영진</td><td>전화</td><td colspan="3">전화: 052-217-1445</td></tr>
<tr><td>소속</td><td>연구관리팀</td><td>E-Mail</td><td colspan="3">savetheplanet@unist.ac.kr</td></tr>
<tr><td>주소</td><td colspan="5">울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 201동 206호</td></tr>
<tr><td rowspan="10">연구기간/
연구비/
참여연구원</td><td colspan="2">연구연차</td><td colspan="2">연구기간</td><td>연구비
(백만원)</td><td>참여연구원수</td></tr>
<tr><td colspan="2">총연구기간</td><td colspan="2">2020. 01. 01 ~2025. 12. 31.</td><td>210</td><td>36</td></tr>
<tr><td rowspan="3">1단계</td><td>1차년도</td><td colspan="2">2020. 01. 01 ~2020. 12. 31.</td><td>40</td><td>6</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="2">2021. 01. 01 ~2021. 12. 31.</td><td>40</td><td>6</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="2">2022. 01. 01 ~2022. 12. 31.</td><td>40</td><td>6</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2단계</td><td>1차년도</td><td colspan="2">2023. 01. 01 ~2023. 12. 31.</td><td>40</td><td>7</td></tr>
<tr><td>2차년도</td><td colspan="2">2024. 01. 01 ~2024. 12. 31.</td><td>25</td><td>5</td></tr>
<tr><td>3차년도</td><td colspan="2">2025. 01. 01 ~2025. 12. 31.</td><td>25</td><td>6</td></tr>
</table>

본인은 위 연구과제를 수행함에 있어 귀소와의 제반협약사항을 준수하여 본 위탁연구를 성실히 수행하여 최종보고서를 제출합니다.

2025. 04. 14.

연구책임자 : 임 정 호 (인)

위 연구책임자는 당 기관 소속직원으로서 연구를 효과적으로 완수할 수 있게 하기위하여 다음 사항을 성실히 이행하겠습니다.

1. 연구수행에 대한 종합적인 책임
2. 연구시설, 인력 및 행정의 우선적지원
3. 연구개발비의 관리, 사용 및 관리자 지정

2025. 04. 14.

위탁연구기관명 : 울산과학기술원

위탁연구기관장 : 박 종 래 (인)

극지연구소장 귀하

Ⅰ. 연구 실적

1. 연구개발 목표 달성도 및 평가 착안점

가. 연구개발 최종 목표

1) 1단계

- Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2) 위성 관측자료를 적극 활용하여 북극 해빙의 lead 및 melt pond가 해빙의 변화에 미치는 영향을 분석하여 해빙의 변화를 예측하고자 함.
- 1차년도(2020)에는 해빙 lead 탐지와 너비 추정 알고리즘을 개발하여 해빙 lead fraction의 공간분포를 분석할 수 있는 기반을 마련함.
- 2차년도(2021)에는 해빙의 melt pond를 탐지하고, 이들의 면적을 추정하는 알고리즘을 개발하여 melt pond fraction 공간분포를 분석할 수 있는 기반을 마련함.
- 마지막 3차년도(2022)에는 다양한 기후인자가 lead fraction과 melt pond fraction에 미치는 영향을 분석한 후, 이들이 해빙 변화에 미치는 영향을 분석하여, 최종적으로 해빙의 변화를 예측하는데 활용함.

2) 2단계

- 북극 해빙의 형태 중 하나인 유빙의 파편화를 정량화하고, 이와 해빙 관련 인자와의 상관성 분석을 통하여 FFI의 기후적 역할에 대하여 제시하고자 함.
- 1차년도(2023)에는 FFI 지표의 개발과 동시에 수동 마이크로파 위성 데이터를 활용하여 전 북극에 대한 FFI 추정 알고리즘을 구축함.
- 2차년도(2024)에는 FFI 추정 알고리즘을 안정화 하는 동시에, FFI의 시공간 패턴을 분석함으로써 FFI가 간빙기와 해빙기와 같은 시기 및 해역별로 어떠한 특성을 가지고 있는지에 대하여 분석함.
- 3차년도(2025)에는 FFI와 해빙인자들 사이의 시계열 상관성 및 해역별 상관성을 분석하고, FFI를 활용하여 해빙 인자 변화 예측에 끼치는 영향을 분석 및 평가하고자 함.

KOPRI 극지연구소

나. 연구개발목표 및 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1. 북극 해빙의 lead 및 melt pond가 해빙의 변화에 미치는 영향 분석 및 해빙 변화 예측	1-1	북극 해빙 lead 탐지 및 너비 추정	- 북극 해빙 lead 탐지 알고리즘 개발 - 북극 해빙 lead 너비 추정 알고리즘 개발	100
	1-2	북극 해빙 melt pond 탐지 및 면적 추정	- 북극 해빙 melt pond 참조자료 구축 - Meltpond 탐지 알고리즘 개발	100
	1-3	lead 및 melt pond fraction에 따른 북극 해빙 변화 영향 분석 및 해빙 변화 예측	- Lead 및 melt pond fraction과 기후인자와의 상관관계 분석 - Lead 및 melt pond fraction이 해빙 변화에 미치는 영향 분석	100
2. 북극 해빙의 파편화에 대한 정량화 및 파편화와 해빙 인자간의 상관성 분석	2-1	FFI 추정 알고리즘 개발	- FFI 지표 개발 및 FFI 추정을 위한 참조자료 구축 - FFI 추정 알고리즘 개발	100
	2-2	FFI 시공간 패턴 분석	- FFI 추정 알고리즘 개선 - FFI의 시공간 패턴 분석	100
	2-3	FFI와 해빙인자 간의 상관성 분석	- FFI와 해빙인자간의 계절별 상관성 분석 - FFI와 해빙인자간의 해역별 상관성 분석 - FFI 활용 해빙인자 변화 예측 영향 분석	25

KOPRI 극지연구소

다. 연구수행 세부 내용 및 결과

□ 성과목표 1:

○ 세부목표 1-1:

연 구 내 용	연 구 결 과
IceBridge 자료를 활용한 리드 샘플 추출	IceBridge 자료인 CAMBOT 항공영상을 활용하여 고해상도 리드 샘플링을 하여 6,718개의 리드 샘플, 26,541개의 해빙 샘플을 추출함
기계학습 기반 리드 탐지 모델 개발	랜덤 포레스트 모델을 활용하여 리드 탐지 모델을 개발함
ICESat-2의 리드 및 해빙에서의 특성 분석	추출한 리드 샘플을 분석하여 ICESat-2의 리드 및 해빙에서의 높이 및 여러 통계값을 분석함
ICESat-2를 활용한 리드 너비 탐지	ICESat-2의 리드 탐지 결과를 활용하여 연속된 리드의 너비를 추출하는 알고리즘 개발함

○ 세부목표 1-2:

연 구 내 용	연 구 결 과
IceBridge 고해상도 항공 영상을 활용한 melt pond reference 구축	IceBridge 자료인 CAMBOT 항공영상을 활용하여 고해상도 melt pond 샘플을 확보하고자 하였으나 (육안판별, 무감독분류기법 활용), 비정형적인 형태와 반사특성을 가지는 melt pond 샘플링의 정당성 확보가 어려운 관계로 다른 방법을 모색함
고해상도 위성자료를 활용한 melt pond reference 구축	ICESat-2를 활용한 해빙특성 탐지와 관련한 선행연구를 참고하여, Sentinel-2 A/B MSI 광학위성 관측자료 기반의 melt pond 샘플을 참고자료로 구축함.
북극 해빙의 melt pond 탐지를 위한 특성 분석	고해상도 광학위성을 활용하여 확보한 melt pond의 사례를 활용하여 해빙, 표면이 물인 melt pond, 표면이 얼음인 melt pond에 대한 특성을 분석함.
임계값 기반의 melt pond 탐지 모델 개발	분석 특성을 활용하여 ICESat-2의 높이의 표준편차 및 반사된 광자 개수를 활용하여 해빙, 물 표면의 melt pond, 얼음 표면의 melt pond를 분류하는 모델을 개발함.

○ 세부목표 1-3:

연 구 내 용	연 구 결 과
2019년 melting season Arctic melt pond fraction 추정 결과 분석	ICESat-2 photon height 및 photon count를 활용한 threshold 기반의 북극 melt pond 탐지 알고리즘을 활용하여 2019년 5~9월의 melt pond fraction을 도출하였음 NSIDC sea ice concentration 자료와 공간적인 분포를 비교하였으며, 해빙 가장자리 영역의 상대적으로 높은 melt pond fraction을 확인하였음 독일 Bremen 대학의 melt pond fraction 산출물과 정성적인 비교를 수행하였으며, 5, 6월에서는 차이가 있으나 7 - 9월에는 유사한 공간 분포를 가지는 것으로 나타남

□ 성과목표 2:

○ 세부목표 2-1:

연 구 내 용	연 구 결 과
FFI 지표 개발	주변 환경의 파편화에 대하여 정량적인 지표로써 표현되는 DIVI를 활용하여, 유빙의 파편화 또한 정량적인 지표로써 나타내고자 하였음. 하지만 DIVI를 그대로 차용하기에는 어려움이 있어, DIVI를 개량하여 FFI 지표를 개발하였음.
Sentinel-2 고해상도 광학위성 영상을 활용한 레퍼런스 구축	10m 해상도를 가지는 Sentinel-2 광학위성 자료를 활용하여 FFI 추정 모델링의 검증을 위한 레퍼런스를 구축하였음.
AMSR2 수동 마이크로파 위성 자료를 활용한 FFI 추정 알고리즘 개발	FFI 지표를 전 북극 지역에 대하여 매일마다 (daily) 산출하기 위해서 수동 마이크로파 데이터인 AMSR2 센서 자료를 활용하였으며, 추가로 기계학습 기법들을 활용하여 모델링 하였음.
FFI 추정 알고리즘 평가	결정계수 (R^2)와 root mean square error (RMSE) 측면에서 모델들을 평가하였으며, 전 북극 지역에서 어떤 공간적 패턴을 보이는지, SIC와는 어떠한 관계를 가지는지에 대해 분석하였음.

○ 세부목표 2-2:

연 구 내 용	연 구 결 과
SAR 영상을 활용한 FFI 레퍼런스 자료 및 추가 학습 자료 구축	구름 등의 장애물로 인해 취득에 한계가 있는 광학위성 기반 FFI 레퍼런스를 보완하기 위해 추가 레퍼런스를 구축하고자 하였음. Sentinel-1 SAR 고해상도 영상을 활용하였음.
개선된 FFI 추정 알고리즘 결과 분석	추가된 FFI 레퍼런스를 활용하여, FFI 추정 알고리즘의 개선을 수행하였으며, 1차년도에 기개발된 FFI 추정알고리즘과의 성능 비교를 수행하였음.
FFI의 공간 패턴 세부분석	북극의 해역별로 FFI가 지니고 있는 공간패턴의 차이를 분석함. 북극점을 기준으로 북극 중심해역과 외곽지역, 해류의 차이가 존재하는 해역들에 대하여 세부 분석을 수행하였음.
FFI의 연도별 패턴 세부분석	연구기간에 대하여 FFI의 시계열 변동을 분석함. 시간에 따른 북극전체 지역에서 FFI의 변동성을 파악하고, 원인등에 대한 세부분석을 수행하였음.

KOPRI 극지연구소

○ 세부목표 2-3:

연 구 내 용	연 구 결 과
FFI와 해빙인자 간의 계절별 상관성 분석	FFI와 해빙인자 간의 시계열 상관성 분석
FFI와 해빙인자 간의 해역별 상관성 분석	북극항로를 비롯한 여러 해역에서의 FFI와 해빙인자 간의 상관성 분석
FFI를 활용한 해빙인자 변화 예측 모델링 수행	FFI를 활용한 해빙인자 변화 예측 모델링 수행
FFI를 활용한 해빙인자 변화 예측 영향 분석	FFI가 사용된 모델과 사용되지 않은 모델 간의 비교분석

1단계) 북극 해빙의 lead 및 melt pond가 해빙의 변화에 미치는 영향 분석 및 해빙 변화 예측

1차년도) 북극 해빙 lead 탐지 및 너비 추정

1) IceBridge 자료를 활용한 리드 샘플 추출

- ICESat-2를 활용한 리드 탐지를 위하여 고해상도 샘플이 필요함. ICESat-2의 공간 해상도는 수 cm에서 수십 cm 이므로, 정확한 샘플링을 위해서는 가급적 ICESat-2와 일치하는 시간대의 샘플을 수집해야 함.

- NASA IceBridge 팀의 Continuous Airborne Mapping By Optical Translator (CAMBOT) 고해상도 현장사진자료를 활용하여 북극 해빙 lead 육안탐지 및 샘플링을 수행하였음

- 해당 영상은 지난 2019년 4월 및 9월 총 7회에 걸쳐 북극 Greenland 및 남극 지역의 해빙, 고착빙 등을 관측하였으며, 총 76,397장의 현장사진자료를 기하보정하여 제공하고 있음 (IceBridge CAMBOT L1B Geolocated Images, Version 2, https://nsidc.org/data/IOCAM1B/versions/2).

- 본 연구에서는 ICESat-2 관측시간과 지역이 매칭되는 2019년 9월 9일 수행한 Greenland 지역의 현장관측자료 10,901장을 활용하여 북극 해빙 lead를 육안탐지하고, red band의 반사도 특성을 활용하여 샘플링함 (그림 1).

- CAMBOT 항공영상을 육안 판독한 결과, 리드와 해빙을 쉽게 구별할 수 있었음. 이를 활용하여 RGB영상에 경험적인 임계값을 적용하여서 자동화된 샘플 추출을 수행함. 8비트 RGB 밴드 모두에 75의 임계값을 적용하여 리드에 대한 샘플을 추출함 (그림 2-3).

CAMBOT 광학 영상에서 추출한 리드 분류 영상과 ICESat-2를 중첩시킨 뒤, 총 6,718개의 리드 샘플, 26,541개의 해빙 샘플을 추출함.

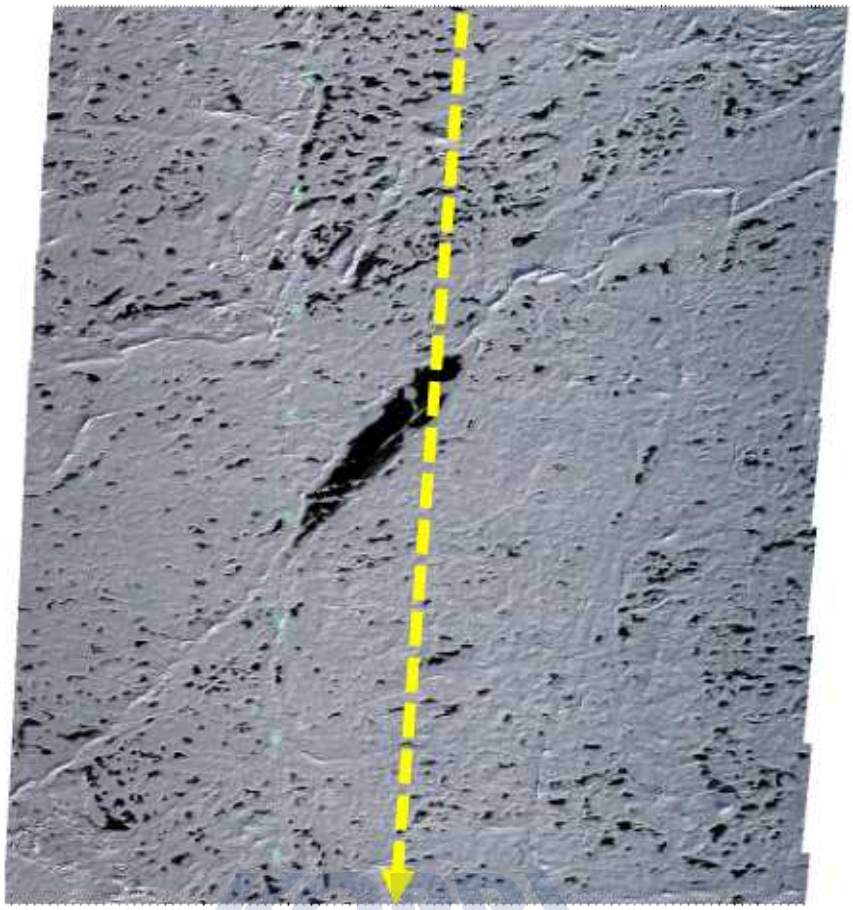


그림 1. 본 연구에서 활용한 IceBridge의 CAMBOT 항공영상. 노란색 점선은 ICESat-2의 관측 경로

극지연구소

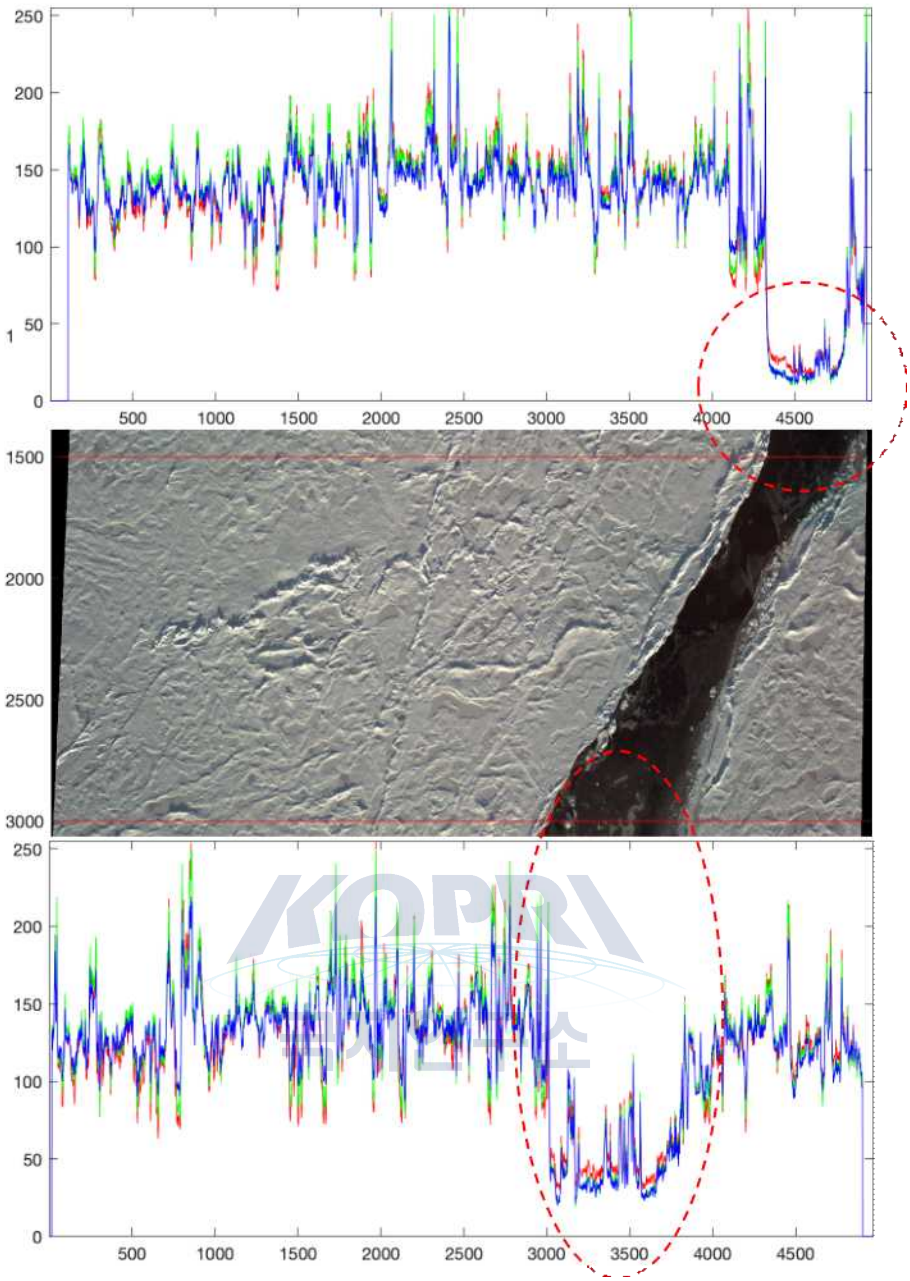


그림 2. CAMBOT 광항영상의 리드 및 해빙에 따른 RGB 밴드 값 분석. 가운데) CAMBOT 광학영상. 위, 아래) 위도별 RGB 값의 수평 평균값. 각 그림의 빨강, 파랑, 초록 그래프는 각각 8비트의 RGB 밴드 값을 나타냄.

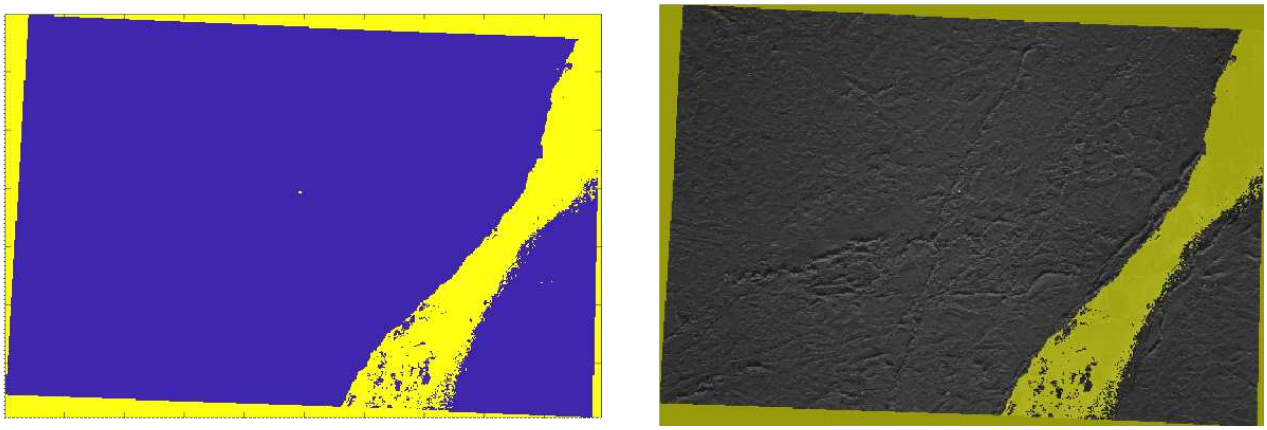


그림 3-1. CAMBOT 광학위성으로부터 추출한 리드 레이블. 노란 색은 리드, 파란 색은 해빙을 나타냄.

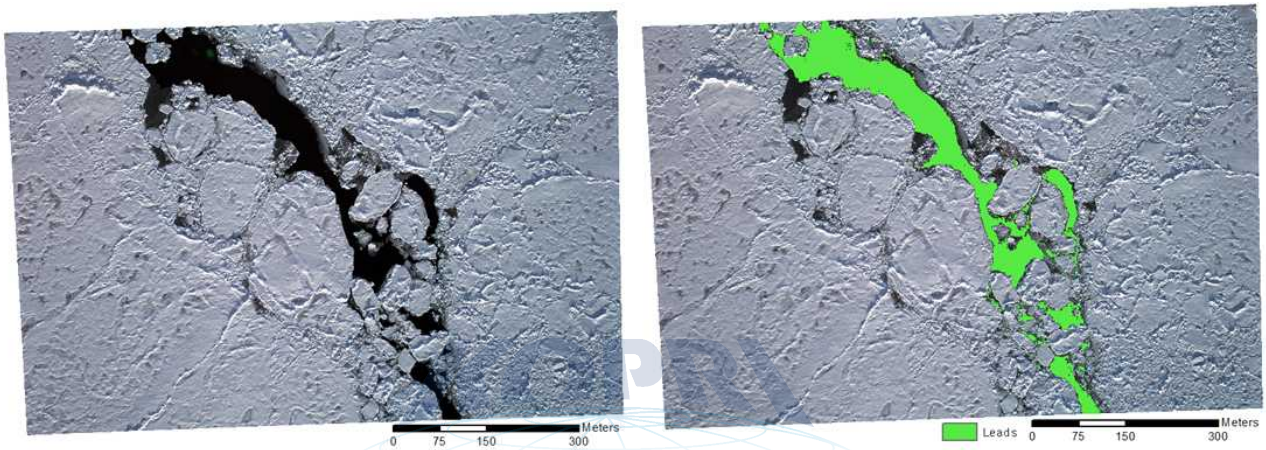


그림 3-2. Lead 육안 탐지 및 샘플링 예시 (CAMBOT 관측자료, 2019. 09. 09. 14:31)

2) 기계학습 기반 리드 탐지 모델 개발

- 북극 해빙 lead 샘플과 ICESat-2 track을 match-up 하여 ICESat-2 photon height data의 특성을 분석함 (ATLAS/ICESat-2 L2A Global Geolocated Photon Data (ATL03).

- 선행연구 등에서 해빙 lead 탐지에 많이 활용되고 있는 랜덤포레스트(Random Forest) 이진 분류 모델을 활용하여 lead 탐지 모델을 개발하였으며, 10 folds cross-validation을 수행하여 검증함.

- 랜덤 포레스트는 파라미터 값에 따른 모델의 민감도가 적은 편이기 때문에 새로운 샘플에 대한 모델 적용에 효과적임. 또한 랜덤 포레스트 모델은 내부적으로 변수 중요도를 제공하기 때문에 결과 해석에 보조적으로 사용할 수 있음.

- 모델링을 위해 해당 ICESat-2 지점의 높이 뿐만 아니라 주변의 관측 값을 함께 사용함. Short segment에서는 해당 지점 기준으로 앞,뒤 각각 25개의 관측 값을, long segment에서는 앞,뒤 각각 250개의 샘플을 사용함. 이를 통해 다양한 segment 길이를 반영하고자 했으며, 이에 따른 모델 기여도를 확인하고자 함. 각 segment별로 편차, 평균, 표준편차, 최소값, 최대값 등의 통계 값을 반영함.

- 랜덤 포레스트 모델의 변수 중요도에 대한 결과는 그림 4와 같음. 해당 지점의 높이 자체의 값이 가장 낮은 기여도를 보임. 이를 통해 해당 지점 이외의 주변 값을 함께 활용한 변수

가 리드 탐지에 훨씬 중요함을 알 수 있음. 전반적으로 long segment가 short segment에 비해 높은 변수 중요도를 보여주며, 그 중에서 long segment의 최소값이 가장 높은 변수 중요도를 보임. 이를 통해 긴 길이에 걸쳐 계속 낮은 높이 값을 가지는 것이 리드 탐지에 중요한 지표임을 추측할 수 있음.

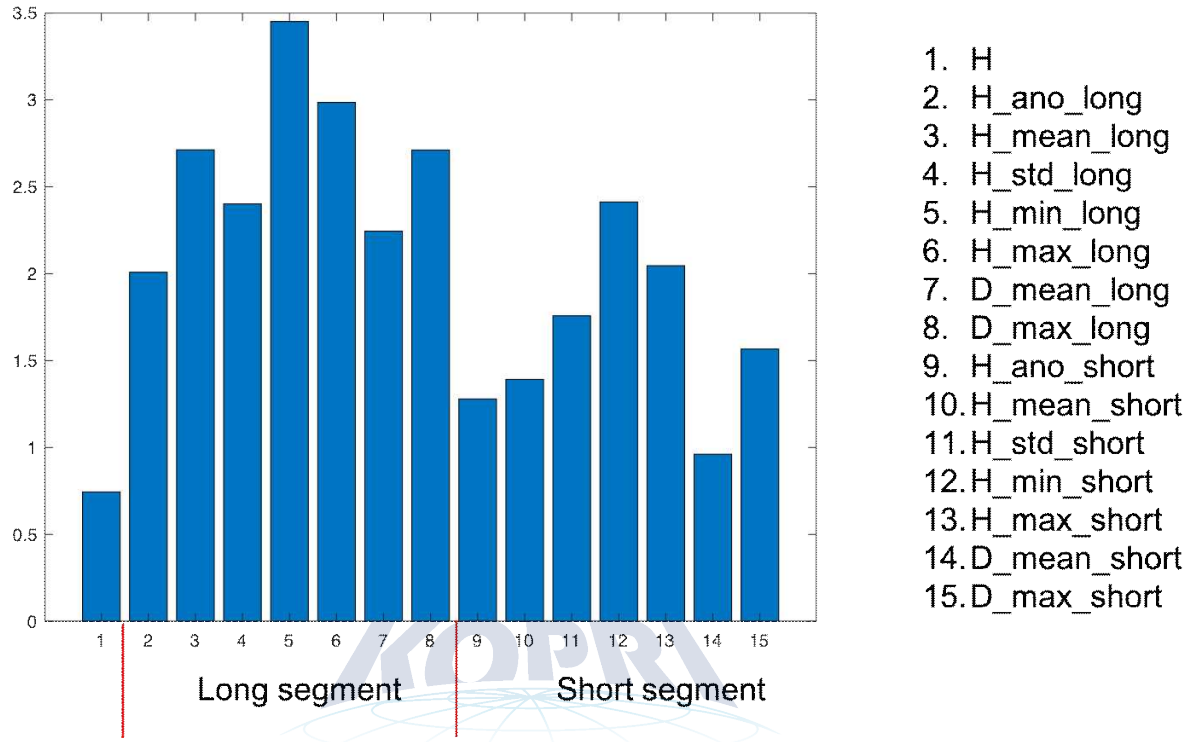


그림 4. 랜덤 포레스트 모델의 변수 중요도

KOPRI 극지연구소

- 주어진 샘플을 약 1:1 비율로 calibration, validation 샘플로 나눠서 랜덤 포레스트 모델의 분류 정확도를 측정함 (그림 5).
- Calibration 샘플에 대한 분류 정확도는 100%이며, validation 분류 정확도는 리드 및 해빙에 대해 각각 97%, 99% 이상을 보여줌. 이를 통해 획득한 샘플에 대해 랜덤 포레스트 모델의 분류 정확도는 매우 높음을 알 수 있음.

RF model performance

Calibaration

Reference	ice	water
ice	13203	0
water	0	3426

Prediction

Validation

	ice	water
ice	13310	28
water	75	3217

그림 5. 랜덤 포레스트 모델의 calibration, validation 샘플에 대한 정확도

- 모델 자체의 분류 정확도 이외에도 실제 영상에 대한 분류 정확도를 확인하기 위해 10개의 CAMBOT 영상에 대응하는 ICESat-2 위성 자료에 대한 리드 탐지를 수행함.
- 탐지율, 오탐지율, 정확도에 대한 성능 평가 결과 해당 영상 자체에 리드가 얼마나 포함되는지에 따라 탐지율 및 오탐지율이 매우 크게 달라짐. 이는 절대적인 분류 및 오분류된 절대값보다는 그 비율에 따라 달라지는 탐지율 및 오탐지율의 특성상, 영상 내의 리드 비중에 따라 정확도가 크게 달라지는 특성 때문임 (그림 6).
- 따라서 영상별 탐지율 및 오탐지율은 참고 자료로만 확인하는 것이 바람직한 것으로 판단됨. 10개의 영상 중 정확도가 높은 영상과 낮은 영상들에 대한 사례 분석을 실시함 .

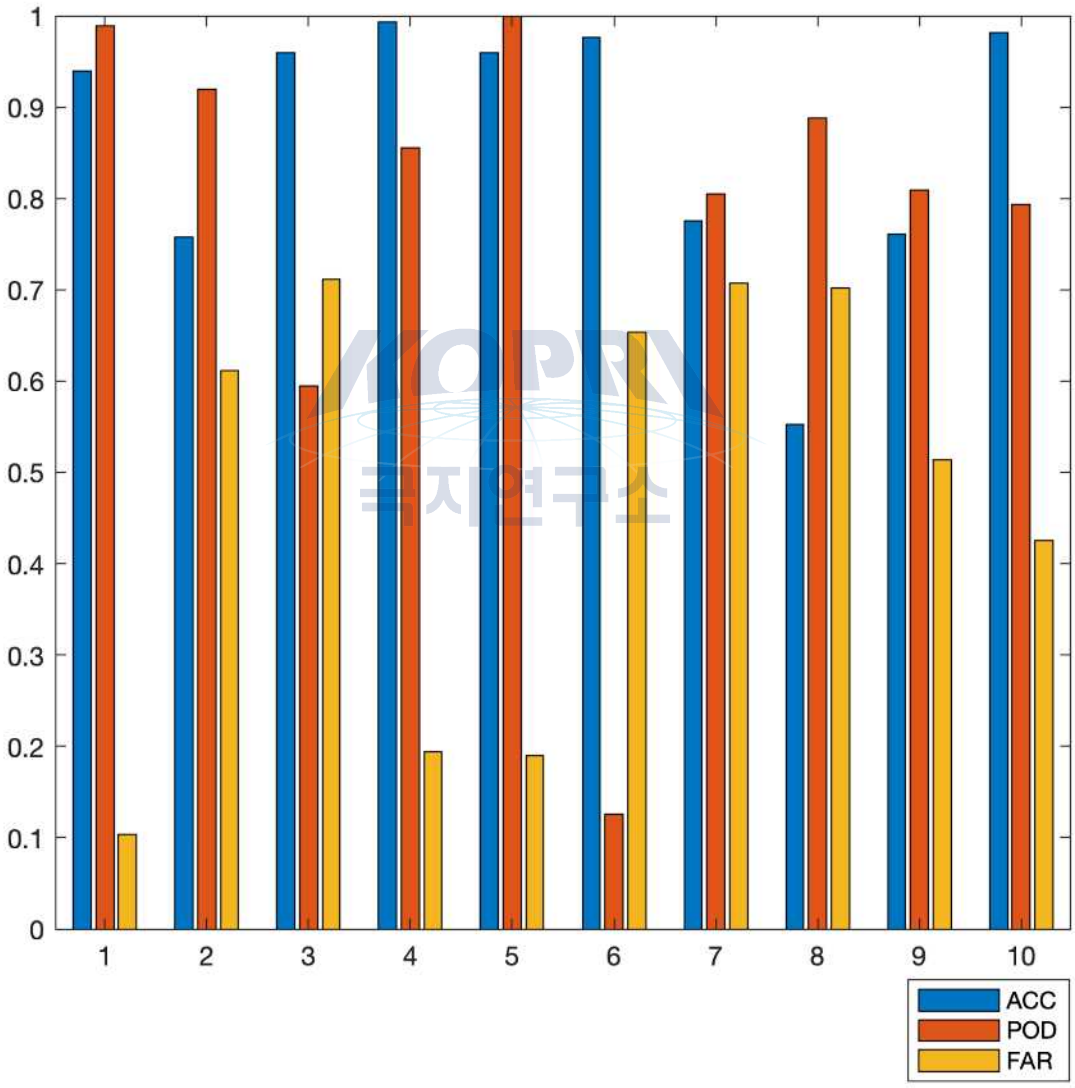


그림 6. 10개의 CAMBOT 영상에 대응하는 ICESat-2 위성의 리드 탐지 정확도

(3) ICESat-2의 리드 및 해빙에서의 특성 분석

- 리드 및 해빙에서의 ICESat-2의 특성을 확인하기 위해 10개의 CAMBOT 영상 중 3가지를 추출하여 분석함.

- 그림 6에서 나타난 10개의 영상 중, 1번, 5번, 6번에 대해 분석함. 1번 및 5번 영상의 경우 높은 정확도를 보이는 반면, 6번 영상의 경우 매우 낮은 탐지율과 높은 오탐지율을 보임.
- 그림 7은 1번 CAMBOT 영상에 대한 분석임. 빨간색 박스는 리드에 대한 부분이며, 리드 탐지 모델이 리드를 잘 탐지함을 볼 수 있음. 이 부분에 대해 long segment의 anomaly 및 표준편차를 확인했을 때, 해빙 부분에서의 값과 현저한 차이를 보이는 것을 확인함.

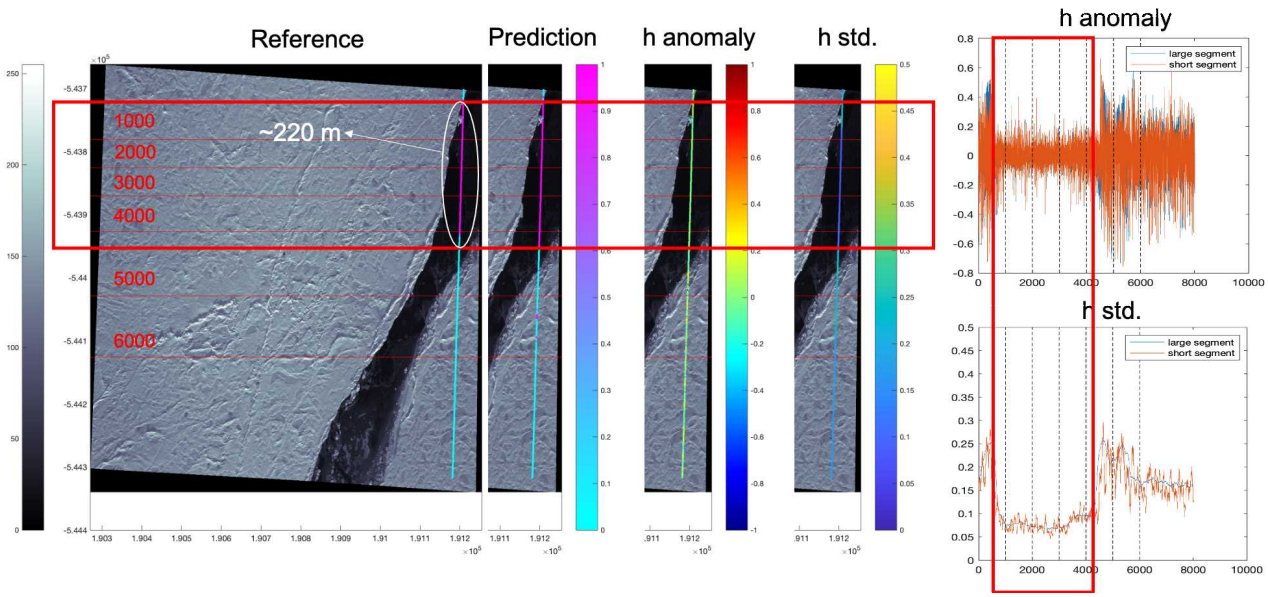


그림 7. CAMBOT 영상 1번에서의 리드 탐지 및 분석 결과

- 그림 8은 5번 CAMBOT 영상에 대한 분석임. 마찬가지로 빨간색 박스는 리드에 대한 부분이며, 리드 탐지 모델이 리드를 잘 탐지함을 볼 수 있음. 리드의 경우 해빙에 비해 표면이 비교적 매끄러운 것으로 예상할 수 있으며, 따라서 높이의 편차의 절대값과 및 표준편차가 적은 특성을 보여줌.

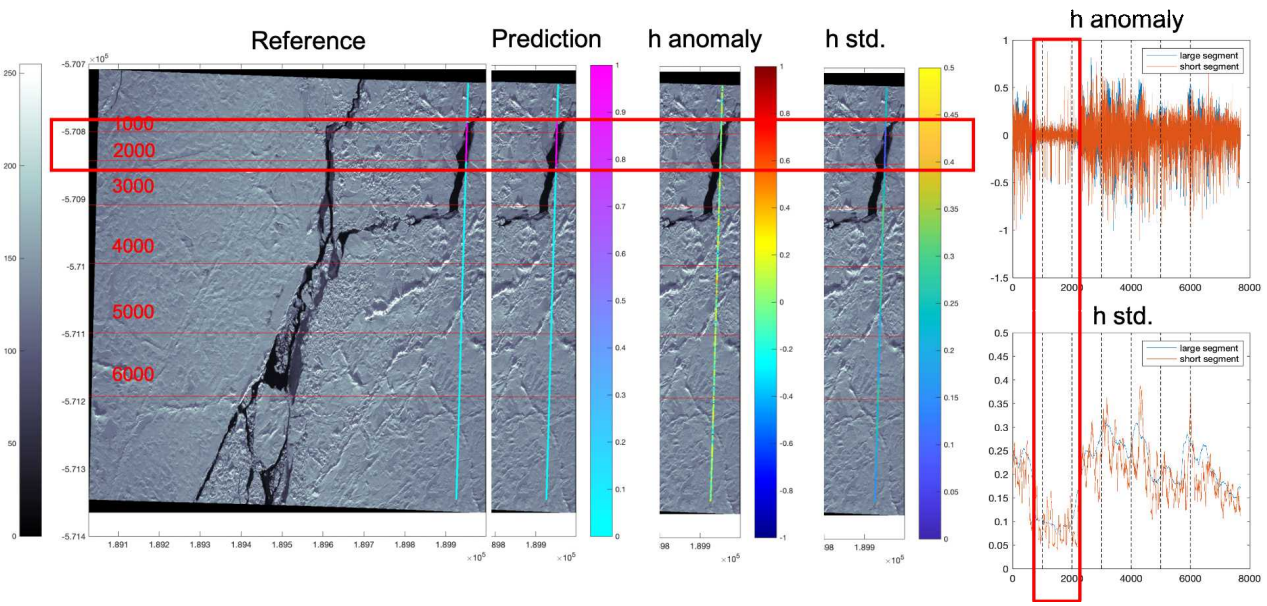


그림 8. CAMBOT 영상 5번에서의 리드 탐지 및 분석 결과

- 그림 9은 6번 CAMBOT 영상에 대한 분석임. 이 영상은 ICESat-2가 지나는 경로에서 매우 적은 리드 부분을 가지고 있음. 따라서 일부의 미탐지 및 오탐지로 인해 낮은 탐지율과 높은 오탐지율이 나타남. 비교적 큰 규모의 리드는 안정적으로 탐지하는 반면, 작은 규모의 리드에 대해 정확도가 낮으므로 추가적인 작업이 필요할 것으로 보임.

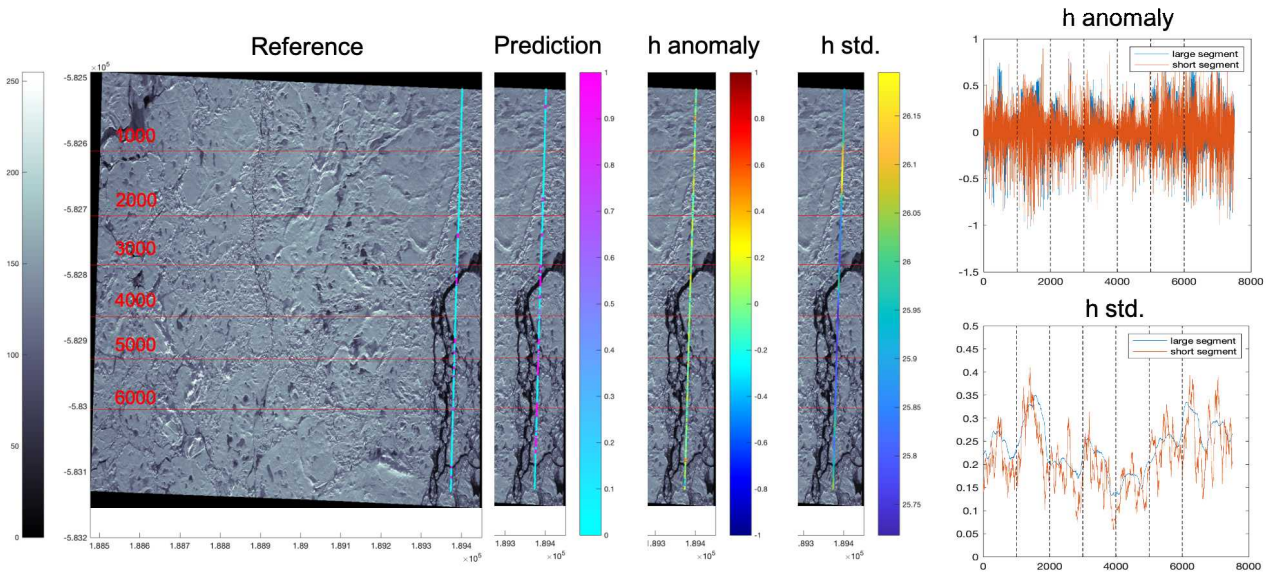


그림 9. CAMBOT 영상 6번에서의 리드 탐지 및 분석 결과

KOPRI 극지연구소

2차년도) 북극 해빙 lead 탐지 및 너비 추정

1) 북극 해빙 melt pond reference 구축

- 기존 공개되어 있는 북극지역 melt pond 관련 reference자료의 경우, ICESat-2와 매칭에 한계가 있거나 위·경도, 시간정보 등의 자료 부족으로 인하여 활용에 한계가 있는 실정임.
- 당초 계획상으로 아라온 연구선 승선을 통한 북극해 현장조사를 수행하기로 계획하였으며, 이때 위성 관측시간을 고려한 실제 여름철 북극의 melt pond의 샘플링을 수행 할 계획이었으나, COVID-19의 창궐로 인하여 실행하지 못함.
- 이로 인한 현장자료의 부족이 문제가 되었으나, 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여 아래와 같이 두 가지 방법을 활용하여 ICESat-2 signal을 활용할 수 있는 melt pond reference를 구축함.

(1) 고해상도 촬영 자료 활용 북극 해빙 melt pond 샘플링

- 1차년도에 활용한 NASA IceBridge 팀의 Continuous Airborne Mapping By Optical Translator (CAMBOT) 고해상도 현장사진자료를 활용하여 북극 해빙 melt pond 육안탐지 및 샘플링을 수행하고자 함.
- 해당 자료는 지난 2019년 4월 및 9월 총 7회에 걸쳐 북극 Greenland 및 남극 지역의 해빙, 고착빙 등을 관측하였으며, 총 76,397장의 현장사진자료를 기하보정하여 제공하고 있

음. (출처: IceBridge CAMBOT L1B Geolocated Images, Version 2, https://nsidc.org/data/IOCAM1B/versions/2)

- 본 연구에서는 ICESat-2 관측시간과 지역이 매칭되는 2019년 9월 9일 수행한 Greenland 지역의 현장관측자료 10,901장을 활용하여 북극 해빙 melt pond를 자동으로 분류하는 모델을 개발하여 reference 샘플로 활용하고자 계획함.
- 무감독 분류 (unsupervised classification)에 널리 활용되는 Iterative Self Organizing Data Analysis (ISODATA) 분류기를 활용하여 영상을 자동 분류하는 모델을 구축하였으며, 분류기의 parameter는 다양한 조합을 비교하여 가장 빠르고 비교적 분류가 잘 이루어지는 조합을 설정함. (설정값 : ArcGIS 10.1 활용, 대상 클래스 크기 (num_class)=10, 최소 클래스 크기 (min_class_size)=3, 분류 픽셀 단위 (sample_interval)=10 (default))
- ISODATA 분류기를 활용하여 melt pond가 가질 수 있는 특징 중 하나인 어두운 픽셀영역을 추출한 결과, 다음 그림처럼 다양한 형태의 melt pond로 의심되는 어두운 영역이 도출됨 (그림 10).
- 하지만, 육안 판별로는 melt pond가 제대로 분류되었는지 판단이 어려워, reference로 활용하기에는 어려울 것으로 생각되며, ice/snow ridge에 의한 그림자 등에 의해 발생한 어두운 영역에 대해서도 오분류가 자주 일어나는 것으로 나타남.
- 같은 CAMBOT 자료라도 1만장 이상의 각각의 영상에 대한 밝기가 제각각이어서 ISODATA의 판단기준 (parameter, threshold 등)을 일관성 있게 설정하는데에 한계가 있는 것으로 판단됨.

KOPRI 극지연구소

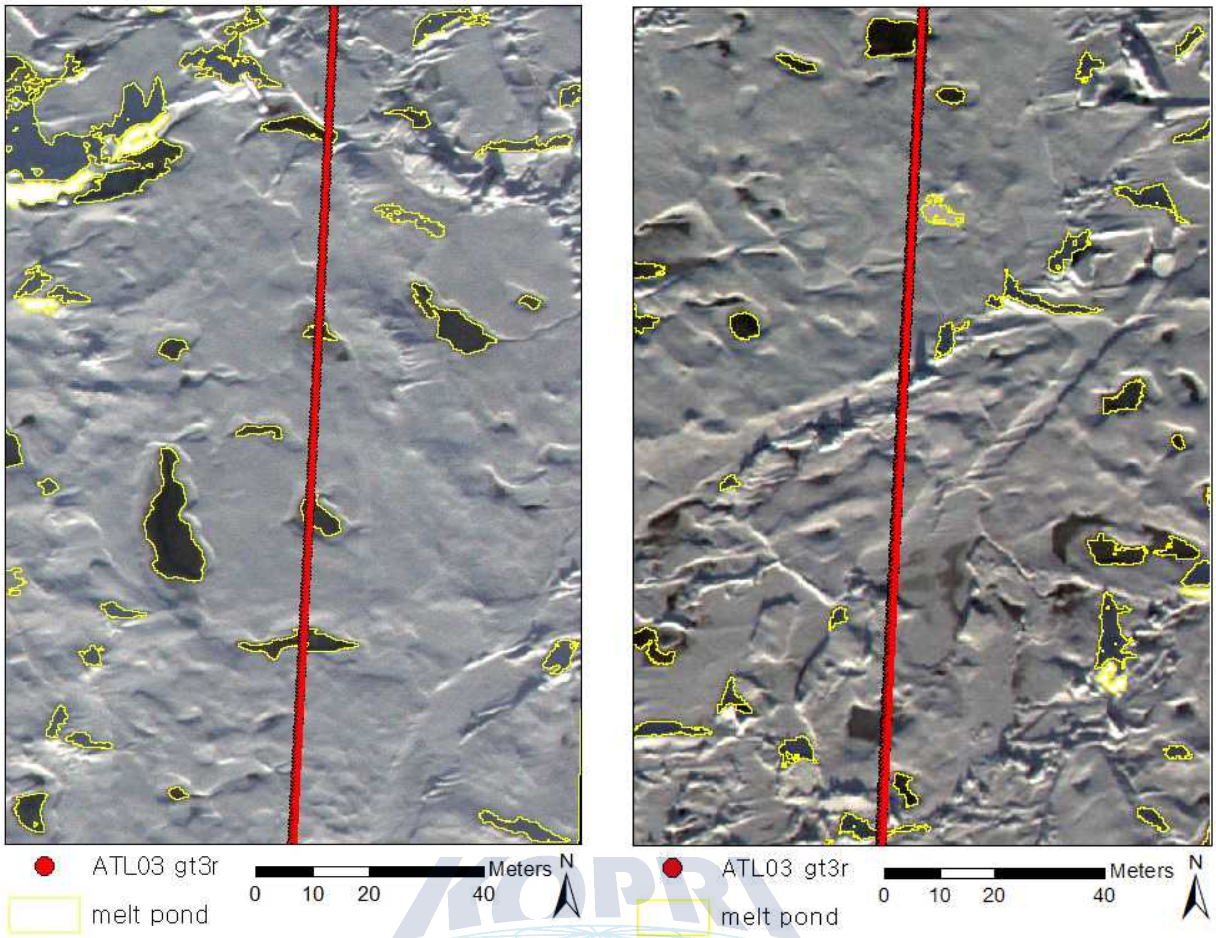


그림 10. ISODATA 분류기 활용 CAMBOT 영상 melt pond 의심 영역 탐지 결과 및 ICEsat-2 track 예시 (2019. 09. 09. 14:58)

(2) 선행연구 참고 고해상도 위성 기반 melt pond reference 수집

- 앞서 진행 한 고해상도 자료 (CAMBOT data) 활용 melt pond reference 구축 결과의 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 선행연구에서 ICESat-2 자료의 활용 및 분석에 활용한 고해상도 위성 관측기반 melt pond reference를 활용하고자 함.
- Tilling et al. (2020)의 ICESat-2를 활용한 여름철 북극의 melt pond 탐지에 관한 선행연구를 참고하였으며, 여기서 제시한 Sentinel-2 고해상도 광학 위성 (10 m 공간 해상도)을 기준으로 한 reference를 참고하여 분석에 활용하였음 (그림 11 및 표 1).

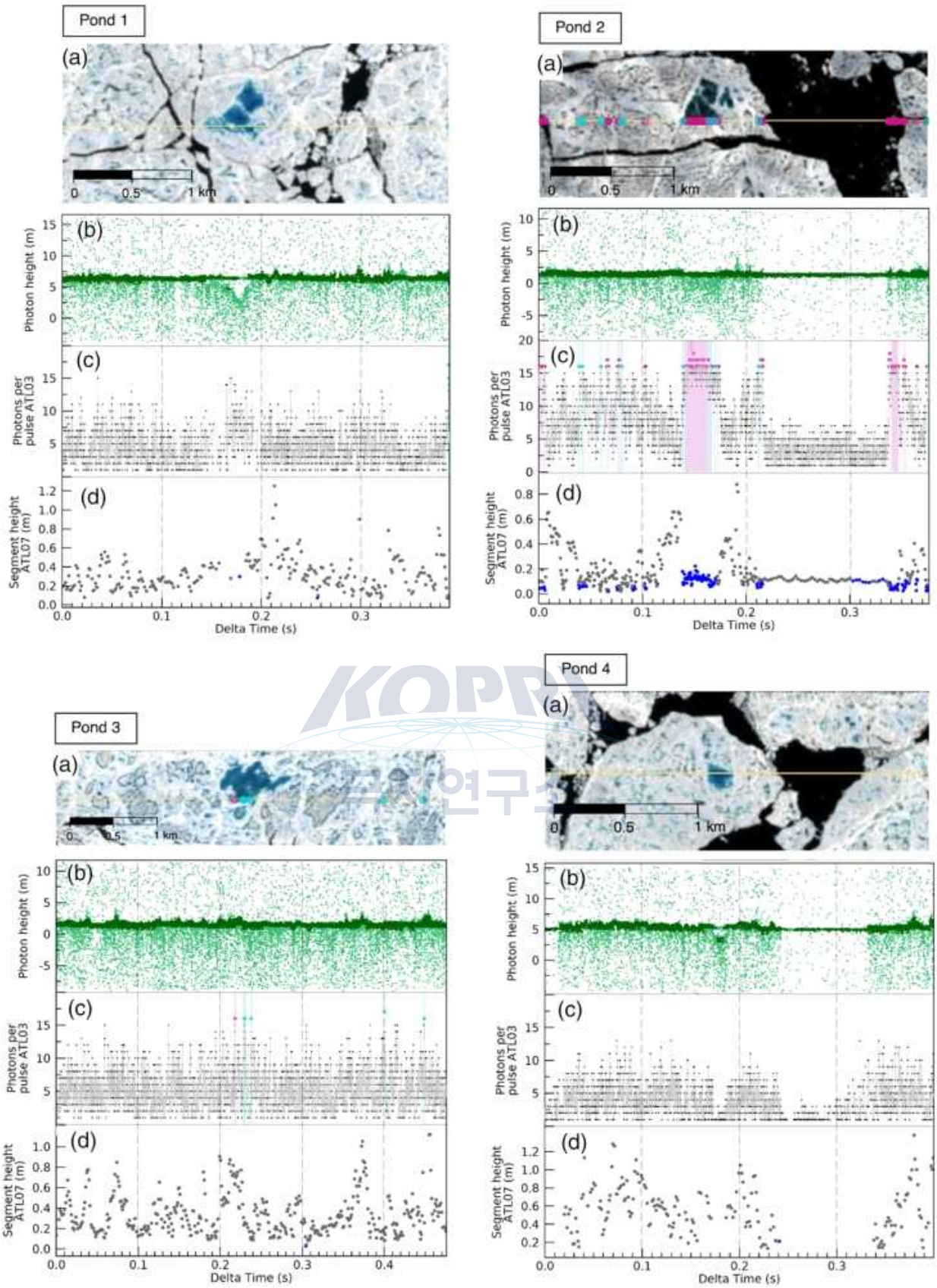


그림 11. Tilling et al. (2020)에서 분석한 Sentinel-2 영상 기반 melt pond 및 ICESat-2 ATL07 match-up data 예시

표 1 Tilling et al. (2020)에서 분석한 ICESat-2 활용 melt pond reference 참고 영상

Date of acquisition	Tile ID	Δtime (wrt ICESat-2)	Cloud cover	Shift (m/direction)	Location
26/07/2019	T14XMQ	−28 min	7%	230 m/N240°	Canadian Archipelago, N. of Eureka (multiyear ice)
26/07/2019	T13XEJ	−28 min	3%	310 m/N237°	
05/08/2019	T11XMK	−4 min	9%	Not applied	

- Ferrell et al. (2020)에서도 MODIS 및 Sentinel-2 광학영상을 활용하여 ICESat-2 track에 대한 melt pond signal을 예시로 제시하고 있으며, 본 연구에서도 해당 날짜에 대한 Sentinel-2 영상을 reference로써 활용하고자 함 (그림 12).

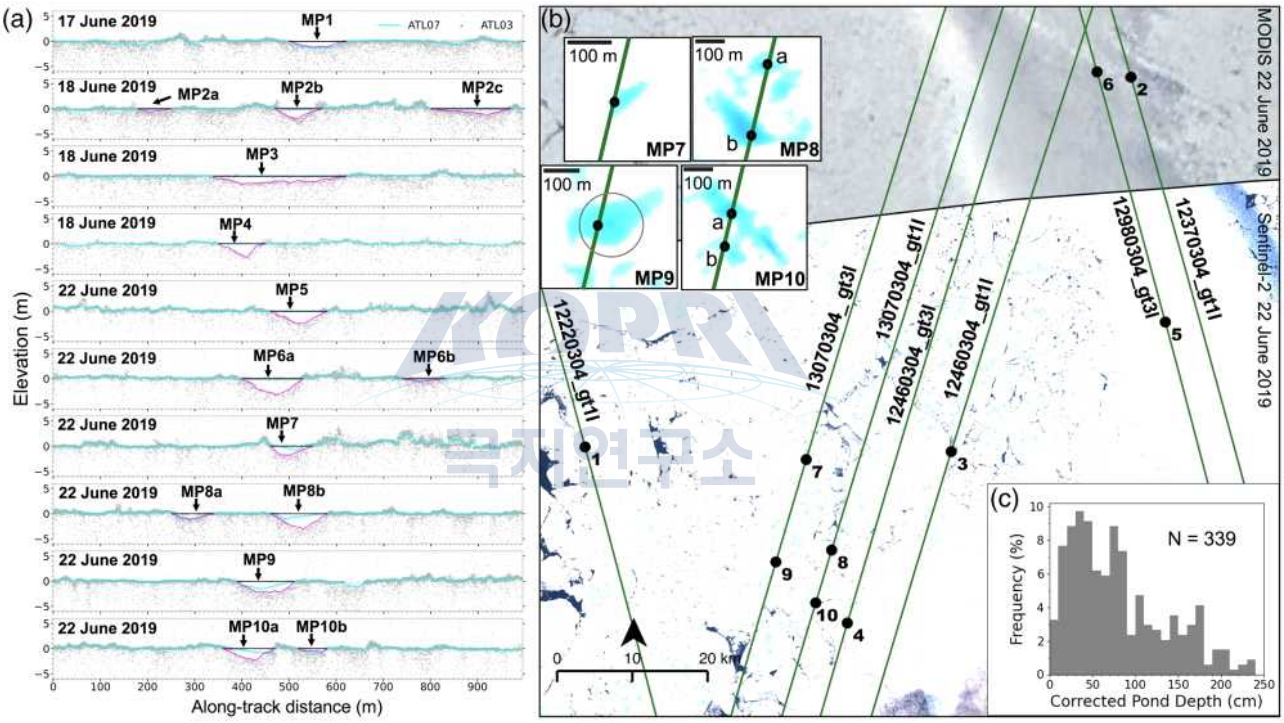


그림 12. Farrell et al. (2020)에서 제시한 MODIS 및 Sentinel-2 활용 영상 예시

2) 북극 해빙 melt pond 탐지 알고리즘 개발

(1) Sentinel-2 MSI 영상 활용 melt pond signal 분석

- 구축한 고해상도 위성 활용 melt pond reference와 ICESat-2 photon height data의 높이 분포 및 반사되는 광자 개수에 대해 분석함.
- Melt pond 발생 지역 및 시기에 Sentinel-2와 ICESat-2의 관측 시간 차가 적은 (약 1 시간 이내) 사례가 매우 드물기 때문에, 선행 연구를 참고하여 자료를 수집하였으며, 겹치는 영역은 그림 13과 같음.

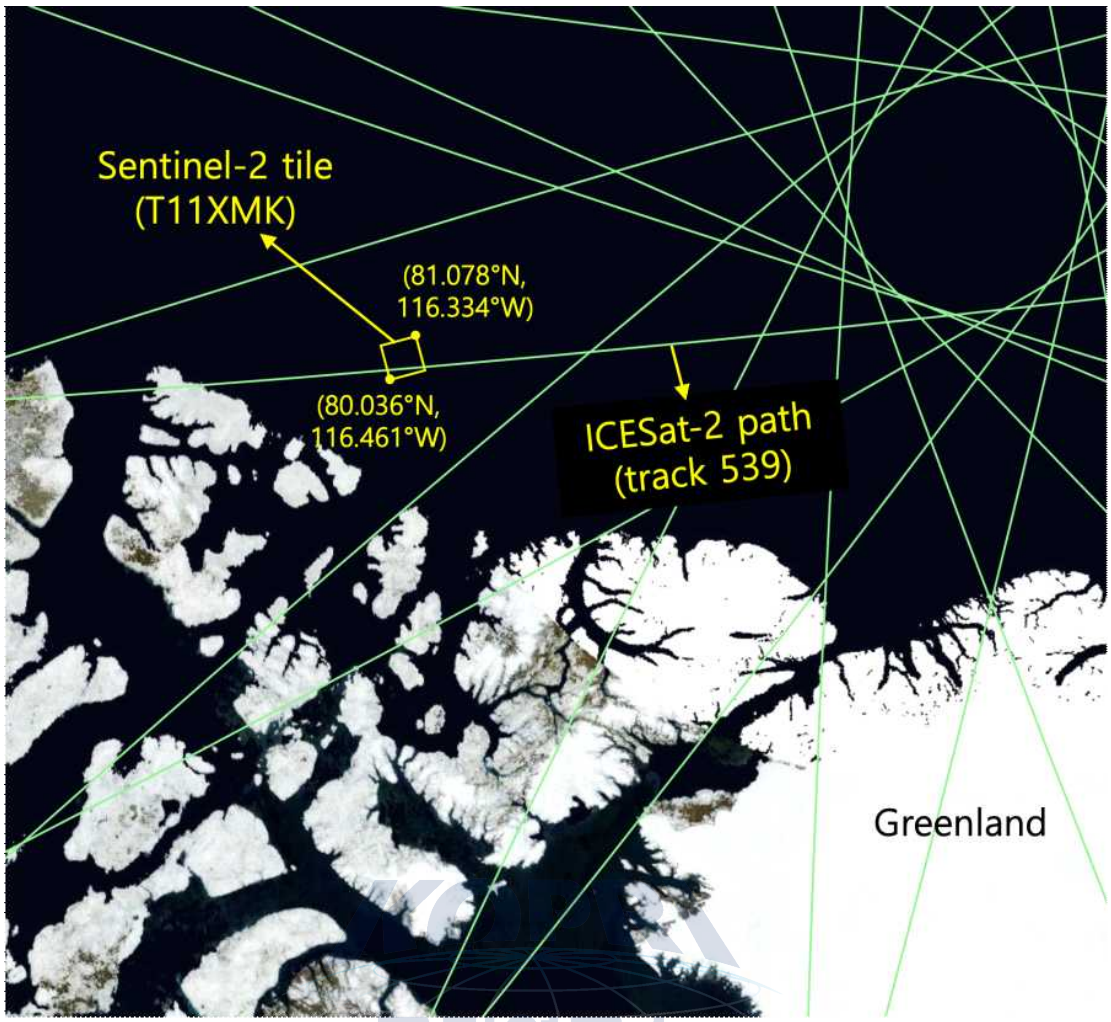


그림 13. 본 연구에서 활용한 2019년 8월 5일의 ICESat-2와 Sentinel-2의 공간적인 분포. 노란색 박스는 Sentinel-2의 영역을 나타내고, 초록색 선은 2019년 8월 5일에 관측된 ICESat-2의 궤도임.

- 분석을 위해 ICESat-2 level-2 Advanced topographic Laser (ATL) 03 Photon height 산출물을 활용하였으며, 광자의 이동 시간을 계산하여 구한 지표 높이인 photon height 자료와 단일 pulse당 반사된 광자 개수를 측정한 photon count per pulse 값을 활용하였음.

(2) 높이 표준편차 및 반사된 광자 수를 활용한 melt pond 탐지 모델 개발

- Segment별 높이의 표준편차는 표면이 거친 해빙과 표면이 매끄러운 melt pond에서 서로 다른 특징을 보임. 물로 이루어진 melt pond와 얼음으로 덮인 melt pond 모두 해빙에 비해 매끄러운 표면을 가지기 때문에 상대적으로 높이의 표준편차가 매우 작기 때문임. 해빙과 melt pond를 구분하기 위한 높이의 표준편차는 0.1 m를 임계값을 활용하였으며, 임계값보다 작은 값은 매끄러운 표면이므로 melt pond로 분류함. 이를 활용하여 일차적으로 해빙과 melt pond를 구별함.
- 물로 이루어진 melt pond와 얼음으로 덮인 melt pond를 구별하기 위해서는 반사되는 광자의 개수를 활용함. 물에서는 광자들이 많이 흡수되는 반면, 얼음에서는 광자들이 많이 반사되기 때문에 똑같이 매끄러운 표면이라 할지라도 반사되는 광자의 수는 큰 차이를

보임. 10 m segment별로 총 수집된 광자의 개수 75개 미만이면 표면이 물이라 판단하였고, 200개 이상의 광자의 경우 표면이 매끄러운 얼음으로 판단함. 이를 활용하여 표면에 따른 melt pond 종류를 구분함.

- 최종적으로 제시된 melt pond 탐지 모델에서는 해빙, 물을 표면으로 하는 melt pond, 얼음을 표면으로 하는 melt pond를 탐지할 수 있음.
- melt pond 탐지모델의 전체 흐름은 그림 14와 같음.

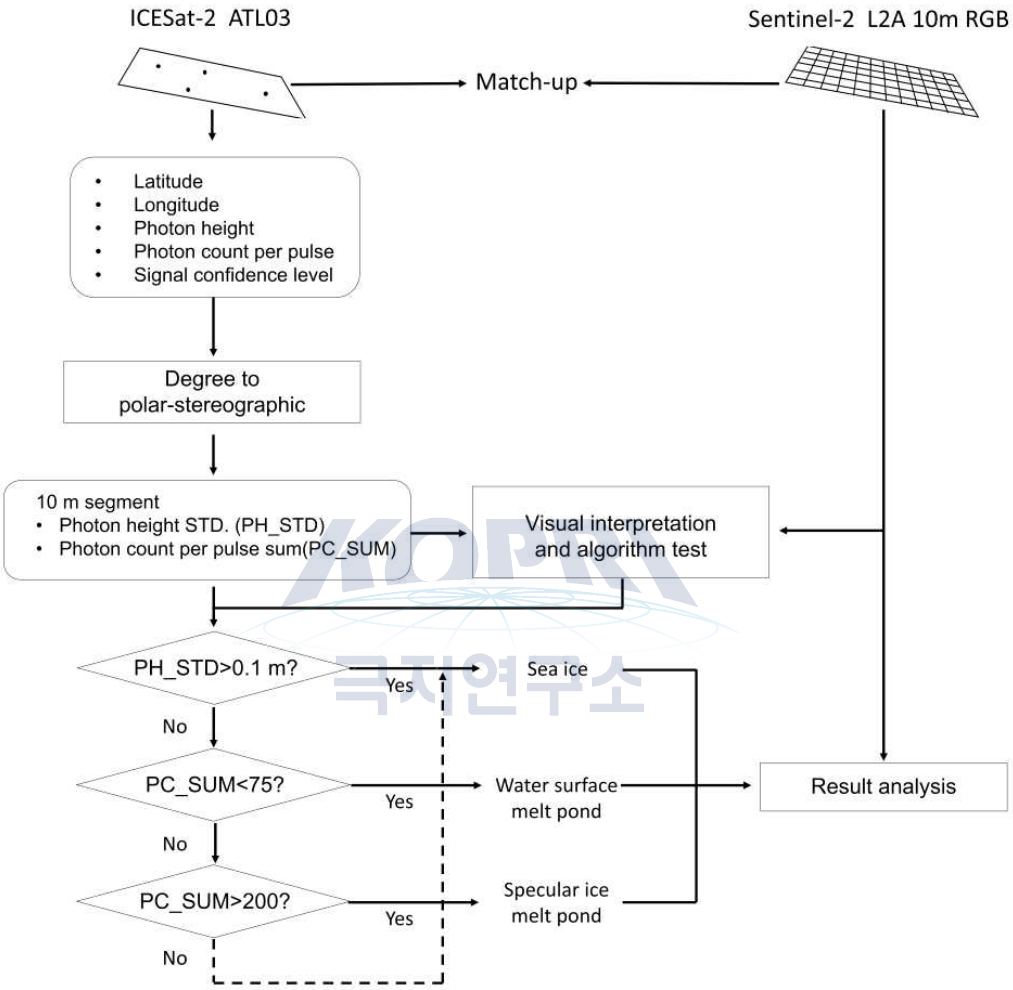


그림 14. 본 연구에서 제시한 melt pond 탐지 알고리즘의 흐름도.

- 그림 15에서는 북극의 다양한 형태의 리드 및 melt pond를 확인할 수 있음. 높이 표준편차의 분포는 모든 리드 및 melt pond에서 비교적 일관적인 분포를 보임. 약 1 km 규모의 Lead1과 나머지 리드 및 melt pond에서 segment 중 일부가 높이 표준편차가 임계값보다 낮은 결과를 보임. 이를 통해 해빙과 리드 및 melt pond를 일차적으로 구분하는 데에는 높이의 표준편차가 효과적으로 사용될 수 있다는 가능성을 제시함.
- 하지만 높이 표준편차 만으로는 표면이 물인 melt pond와 얼음인 melt pond를 구별하기 어려움. 이는 광자의 총 합을 활용하면 보다 뚜렷하게 구분할 수 있는데, 규모가 큰 리드인 Lead1과 나머지 리드 및 melt pond의 신호를 비교하면, 광자의 반사율이 극명하게 차이나는 것을 확인할 수 있음.

- 이를 통해 표면이 물인 Lead 1에서는 광자의 총 합 매우 낮은 반면, 다른 리드 및 melt pond에서는 높은 광자의 총 합을 보이므로 표면이 얼음으로 덮였다는 것을 알 수 있음. 특히 Sentinel-2 광학 영상에서는 Lead1, Lead2, Pond3의 차이를 육안으로 구분하기 어려운 반면, ICESat-2에서 수집되는 광자의 양이 뚜렷하게 차이나는 것은 고해상도 고도계의 핵심적인 특성으로 판단됨.
- 지표 특성에 따른 광자 양의 차이는 그림 6(g)에서도 확인할 수 있는데, 수면인 Lead1에 비해 Pond1-3, Lead2에서는 단위 길이당 비교적 많은 양의 ICESat-2 높이 정보가 분포하고 있음.

KOPRI
극지연구소

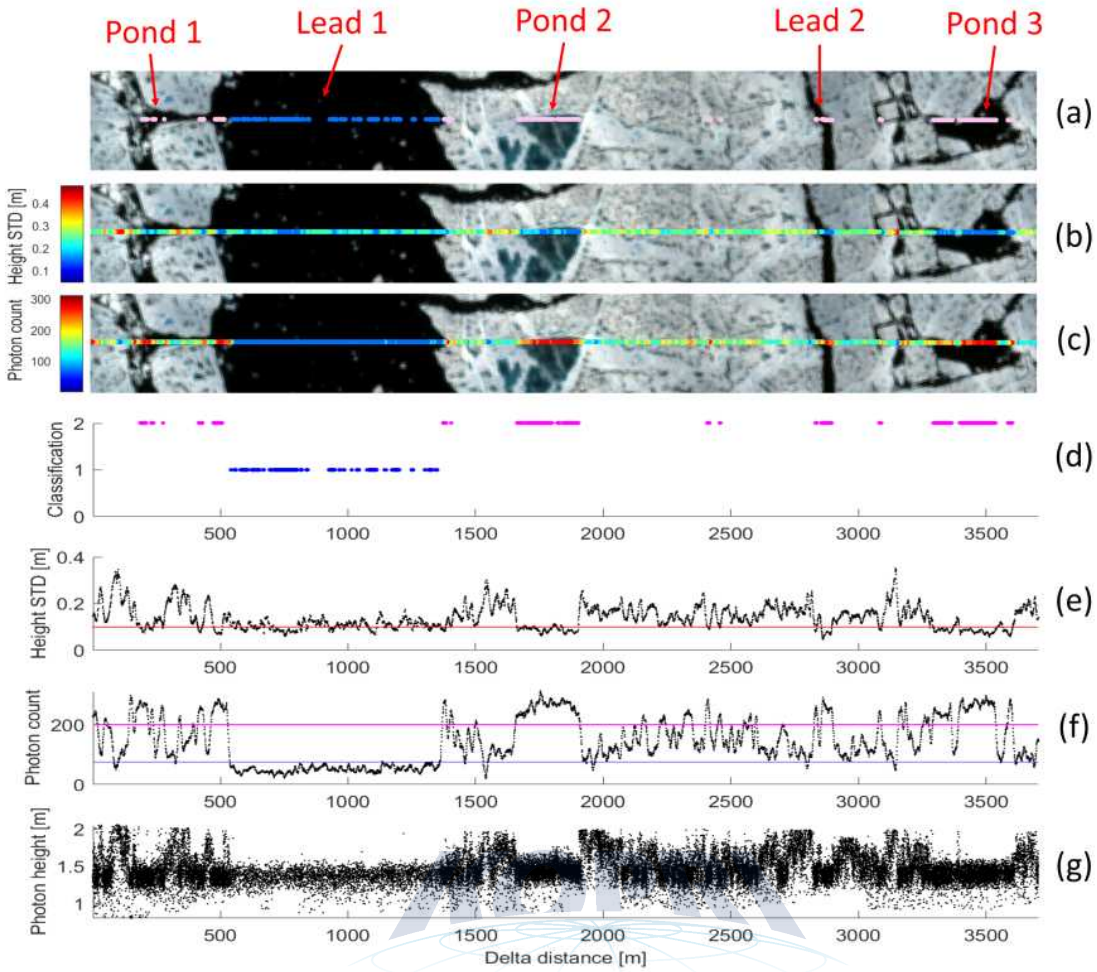


그림 15. 2019년 08월 05일의 Sentinel-2 영상의 일부를 확대한 것이다. (a)는 제시한 melt pond 탐지 결과를 Sentinel-2와 비교한 것이며, 파란 색은 물을 표면으로 가지는 melt pond, 분홍 색은 반사도가 높은 얼음 표면을 가진 melt pond (specular pond) 및 작은 리드를 나타냄. (b)는 각 segment의 높이 표준편차 를 나타내며 단위는 m이다. (c)는 각 segment당 획득한 광자의 총 합을 의미함. (d)는 (a)에서 물이 표면인 melt pond와 얼음이 표면인 melt pond의 분류 결과가 섞여있을 때 분류 결과를 판독하기 쉽게 하기 위해 수면(파랑)과 얼음 표면 melt pond(분홍)를 분리한 것임. (e)의 붉은 선은 높이 표준편차의 임계값인 0.1 m를 나타내며, (f)의 파란색 및 분홍색 선은 각각 수면 및 얼음 표면 melt pond의 광자 총 합의 임계값인 75와 200을 나타냄. 마지막으로 (g)는 segment로 묶지 않은 photon height의 분포를 나타냄.

- 그림 16은 같은 Sentinel-2 광학 영상의 다른 melt pond 사례임. Pond2에서는 높이의 표준편차 및 광자의 총 합의 분포가 비교적 균일함. 반면에 Pond1에서는 이웃한 지점에서도 다른 광자의 총 합 분포를 보여주며, 결과적으로 하나의 melt pond 내에서 물과 매끄러운 얼음이 동시에 존재하는 것으로 분류됨.
- 또한 해빙 내에서도 일부 오분류가 발생하였으며, 반대로 탐지하지 못한 melt pond 정보도 다수 존재함. 이를 통해 제시한 분류 알고리즘이 모든 상황에서 활용될 수 없다는 한계점을 확인함. 본 연구에서 설정한 임계값은 본 연구에서 관찰한 melt pond에 대해 최

적화 되었기 때문에, 추가적인 분석을 통해 더욱 일반화된 임계값 설정이 필요할 것으로 판단됨.

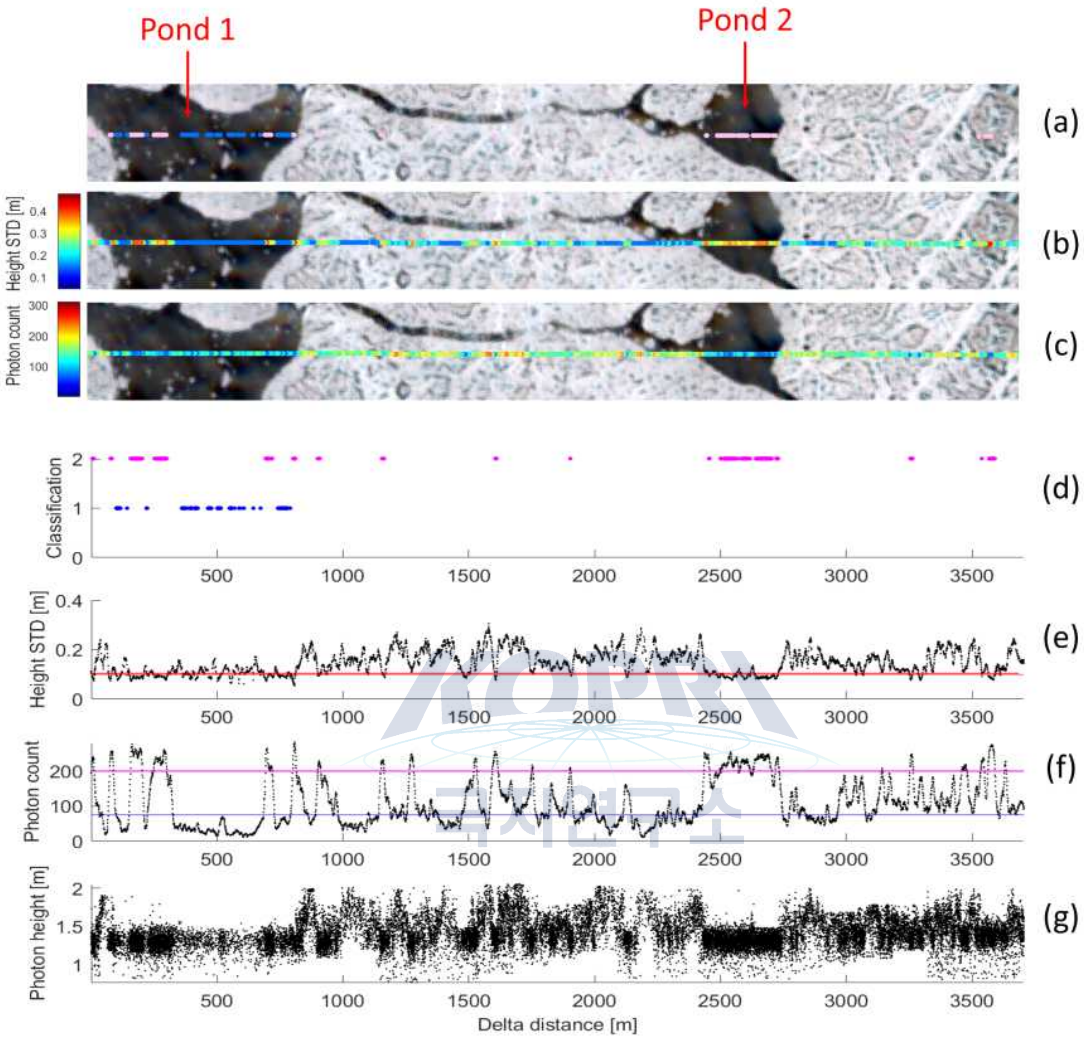


그림 16. 2019년 08월 05일의 Sentinel-2 영상의 일부를 확대한 것이다. (a)는 제시한 melt pond 탐지 결과를 Sentinel-2와 비교한 것이며, 파란 색은 물을 표면으로 가지는 melt pond, 분홍 색은 반사도가 높은 얼음 표면을 가진 melt pond (specular pond) 및 작은 리드를 나타냄. (b)는 각 segment의 높이 표준편차를 나타내며 단위는 m임. (c)는 각 segment당 획득한 광자의 총 합을 의미한다. (d)는 (a)에서 물이 표면인 melt pond와 얼음이 표면인 melt pond의 분류 결과가 섞여 있을 때, 분류 결과를 판독하기 쉽게하기 위해 수면(파랑)과 얼음 표면 melt pond(분홍)를 분리한 것임. (e)의 붉은 선은 높이 표준편차의 임계값인 0.1 m를 나타내며, (f)의 파란색 및 분홍색 선은 각각 수면 및 얼음 표면 melt pond의 광자 총 합의 임계값인 75와 200을 나타냄. 마지막으로 (g)는 segment로 묶지 않은 photon height의 분포를 나타냄.

3) Monthly melt pond fraction 산출 및 분석

- 앞서 제시된 melt pond 탐지 모델을 활용하여 북극 전반적으로 ICESat-2를 활용한 melt

pond fraction을 산출할 수 있을 것으로 예상함. 이를 위해 ICESat-2 자료를 수집하여 전처리하는 과정이 필요함.

- ICESat-2는 매우 세밀한 관측 간격 (궤도를 따라 pulse간 약 70 cm)을 가지므로, 개별 자료의 크기가 매우 큼. 본 연구에서 활용한 ATL03 photon height 자료의 경우 하나의 track 별로 약 수 백 MB에서 수 TB의 용량을 가짐. 북위 60도에서 90도에 대항하는 북극 지역에 대한 ICESat-2 ATL03 자료를 처리하려면 하루에 약 50개의 자료를 다운로드 받아야 하며, 하루당 약 75 GB의 용량이 필요함.
- 이를 한 달로 환산하면 한 달에 약 1,500 개의 ATL03 자료가 필요하고 약 2 TB의 정보가 필요함. 1,500 트랙을 모두 처리하여 melt pond를 탐지한 뒤 이를 월별 melt pond fraction으로 변환하는 작업은 용량 및 처리 시간을 많이 필요로 함. 일 년 단위로 보면 약 20 TB 이상의 자료가 필요한 만큼, 고용량의 저장 공간 및 자료 처리 성능이 필요함.
- 본 연구에서 개발한 melt pond 탐지 알고리즘을 활용하여 melt pond fraction을 산출하기 위해 2019년 1년에 해당하는 자료를 전처리함.

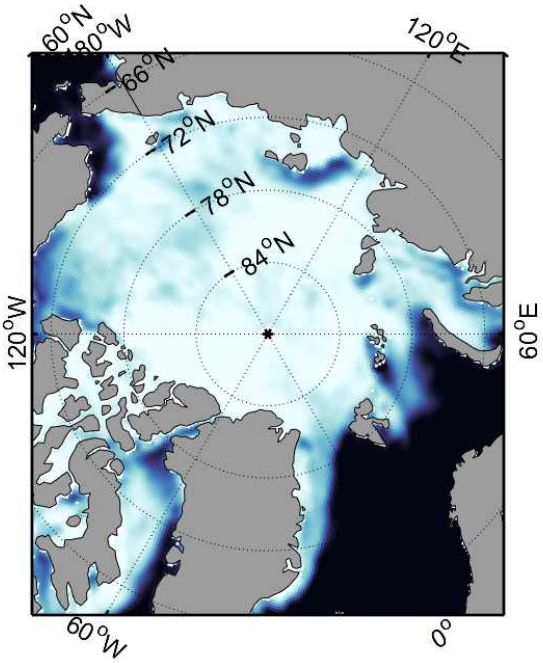
3차년도) lead 및 melt pond fraction에 따른 북극 해빙 변화 영향 분석 및 해빙 변화 예측

1) 2019년 melting season Arctic melt pond fraction 추정 결과

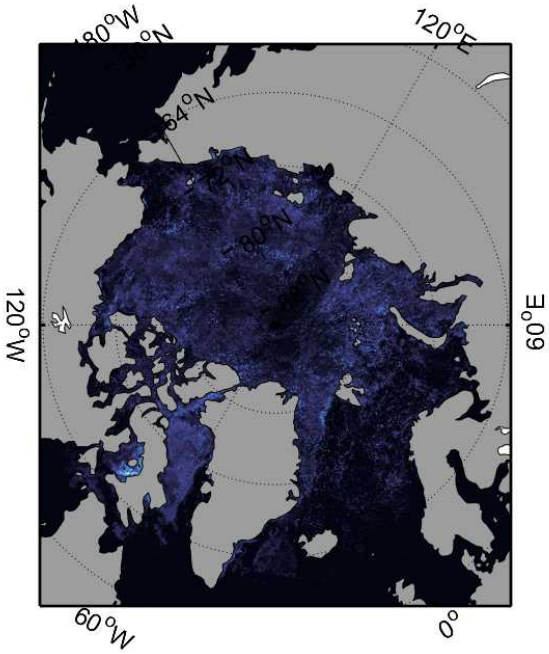
- ICESat-2 photon height 및 photon count를 활용한 threshold 기반의 북극 melt pond 탐지 알고리즘을 활용하여 2019년 5~9월의 melt pond fraction을 도출함 (그림 14).
- 기타 해빙 및 환경변수와의 비교를 위하여 NSIDC에서 활용하고 있는 polar stereographic projection grid (25 x 25 km)를 활용하여 ICESat-2 Signal을 monthly aggregation 함.
  - 2019년 5-9월 월평균 melt pond 분석 결과는 다음과 같음 (그림 17-21).
  - melt pond fraction에 대한 시·공간적인 reference data가 존재하지 않는 실정으로, 본 연구에서는 NSIDC에서 제공하는 해빙농도 (Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1) 자료를 함께 비교함 (그림 17-21a).
  - 공간적인 분포 추정 결과에 대한 비교를 위하여 독일 Bremen 대학에서 2017년부터 melting season (5 – 9월)에 Sentinel-3 OLCI를 활용하여 매일 산출하고 있는 melt pond fraction 자료를 월평균 하여 비교에 활용함 (그림 17-21b).
  - 해당 자료의 경우, OLCI와 SLSTR 영상을 융합 활용하여 cloud screening을 수행한 후, clear pixel에 대하여 가시-적외 파장 (400 – 900 nm) 반사도를 활용하여 sea ice albedo를 산출함. 계산된 albedo에 대하여 inversion model를 활용하여 melt pond area fraction을 12.5 km의 공간 해상도로 제공함.
  - melt pond detection 결과의 경우, 각 픽셀 별 최빈 관측 결과를 나타낸 것으로, sea ice (blue), open sea (green), melt pond (yellow)로 표기함 (그림 17-21c).
  - melt pond fraction 의 경우, 각 픽셀 별 melt pond class의 관측 빈도를 정리한 것으로, 0 – 100%의 값을 가지며, 월별 melt pond fraction 자료를 활용하여 ICESat-2 관측이 이루어지지 못한 지역에 대하여 내삽 기법 및 spatial kernel를 적용한 후처리를 통한 공간적

gap-filling 결과를 표출함 (그림 17-21d).

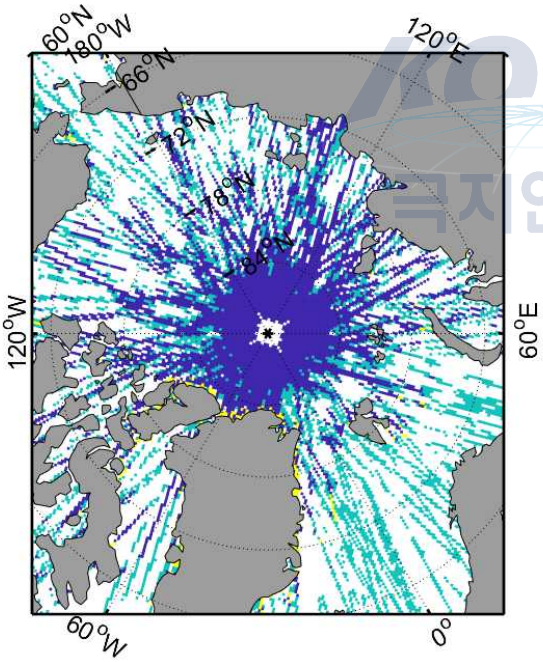
- 내삽 기법의 경우, 간단한 역거리 가중 기법을 활용하여 수행하였으며, 관측되지 않은 missing pixel에 대하여 선형적으로 값을 추정하되, 관측치와 떨어진 거리에 대하여 역가중치를 활용하여 내삽을 수행함.
- 내삽 기법 적용 후, track-based pattern이 강조되는 경향을 줄이기 위하여 Gaussian filter를 활용하여 (주변부 11 픽셀 활용) 공간적으로 smoothing 작업을 통한 후처리를 수행함.
- 월별 분석 결과, NSIDC 해빙 농도 자료 기준 해빙이 관측되지 않은 open sea 지역에 대해서도 (특히 2019년 6월) melt pond가 관측되고 있음. 이는 25 km grid로 치환하는 과정에서 ICESet-2 track에서 관측된 작은 유빙들에 의해서 발생한 관측 오차일 가능성이 있음.
- Bremen 대학의 산출물 또한 NSIDC 해빙 농도자료와 공간적인 범위(extent)에서 차이가 나타나는 것으로 보이며 이는 월평균 fraction으로 치환하는 과정에서 발생한 관측오차일 가능성이 있음.
- 정성적인 관점에서 Bremen의 산출물과 본 연구의 월평균 melt pond fraction의 공간 분포는 5, 6월에서는 차이를 보이고 있으나, 7, 8, 9월 추정 결과는 비슷하게 나타남. 5월의 경우, ICESat-2를 활용한 추정 결과는 해빙의 가장자리 영역에서 높은 비율을 보이고 있으나, Bremen 산출물의 경우 Arctic center 지역까지 골고루 분포하고 있는 것으로 나타남. 추정 알고리즘의 원리차이 (photon height, broadband albedo inversion)에서 기인한 것으로 보이며 추후 차이에 대한 원인분석이 추가적으로 수행될 필요가 있음.
- 특히, 관측 빈도수에 따르면, 저위도로 갈수록 ICESat-2에 의한 관측빈도가 낮은 것으로 나타나며, 상대적으로 고위도(Arctic-Center)지역에 비하여 저위도 지역의 월평균 관측결과에 대한 불확실성이 높게 나타날 수 있을 것으로 판단됨 (그림 22).



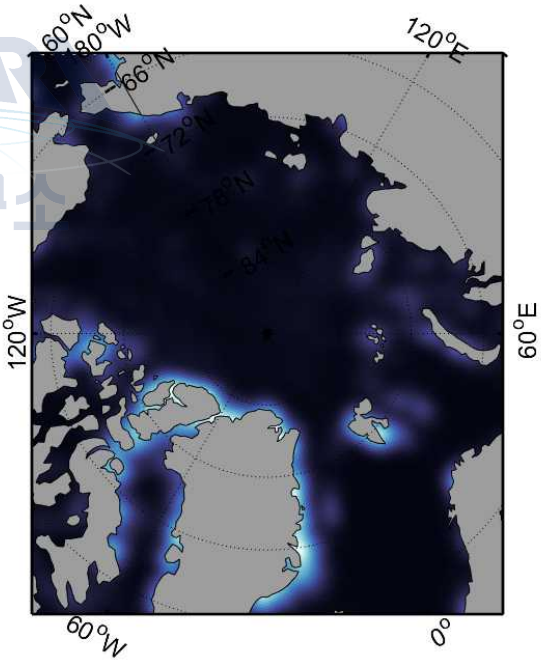
(a) 월평균 해빙 농도 (0 – 100%)



(b) Bremen Univ. 월평균 MPF 산출물 (0 – 100%)



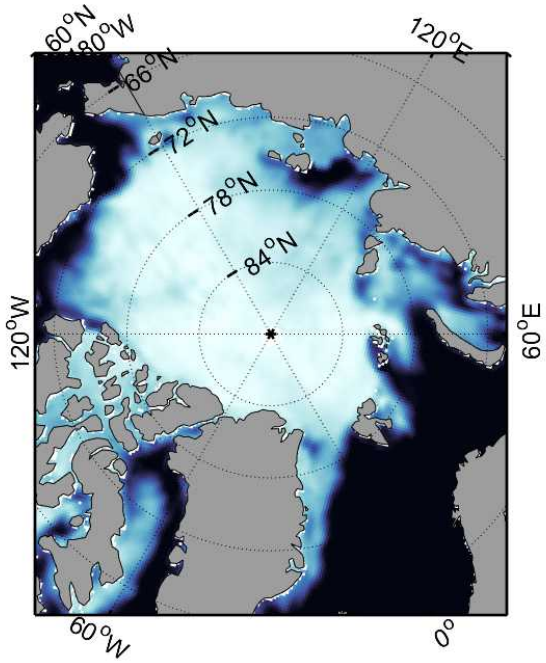
(c) 월평균 melt pond detection (yellow: melt pond, green: open sea, blue: sea ice)



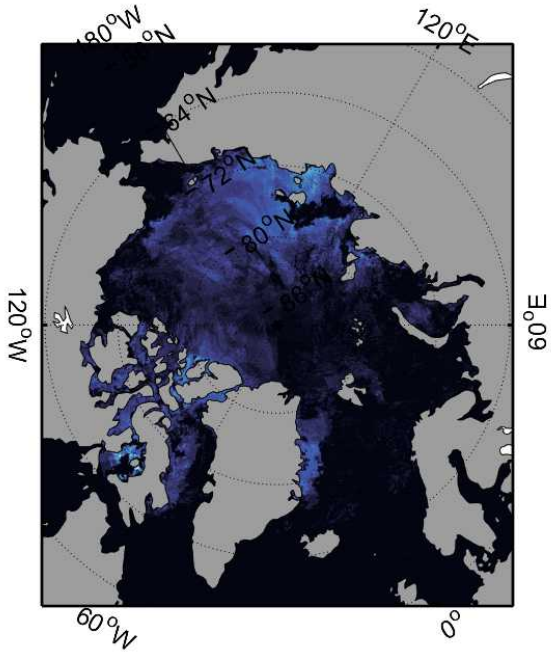
(d) 내삽 기법 활용 월평균 melt pond fraction (0 – 100%)

그림 17. ICESat-2 활용 2019년 5월 평균 melt pond 탐지 결과

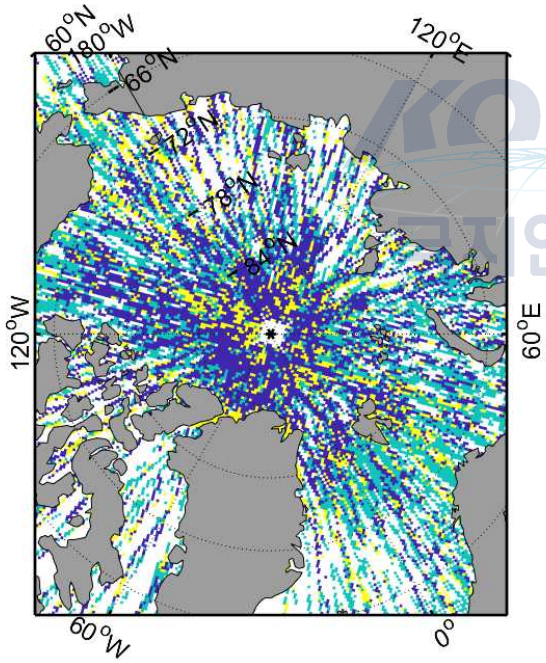
KOPRI 극지연구소



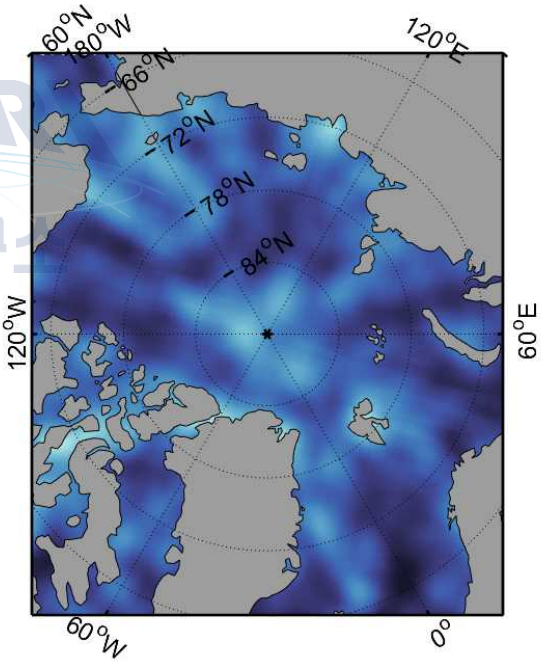
(a) 월평균 해빙 농도 (0 – 100%)



(b) Bremen Univ. 월평균 MPF 산출물 (0 – 100%)

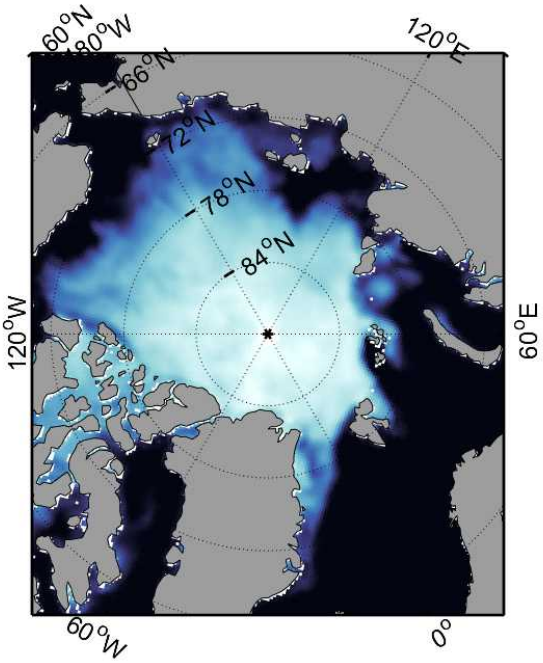


(c) 월평균 melt pond detection (yellow: melt pond, green: open sea, blue: sea ice)

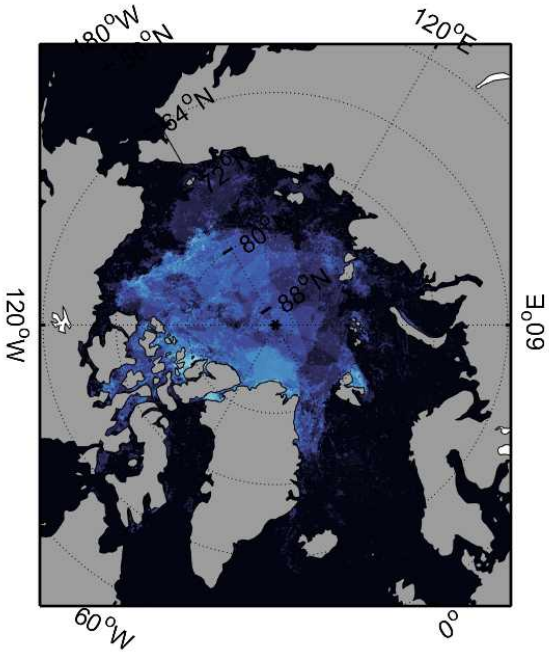


(d) 내삽 기법 활용 월평균 melt pond fraction (0 – 100%)

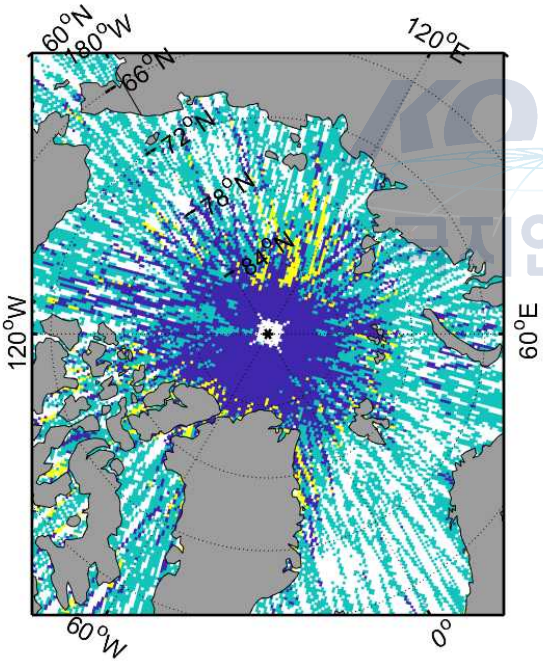
그림 18. ICESat-2 활용 2019년 6월 평균 melt pond 탐지 결과



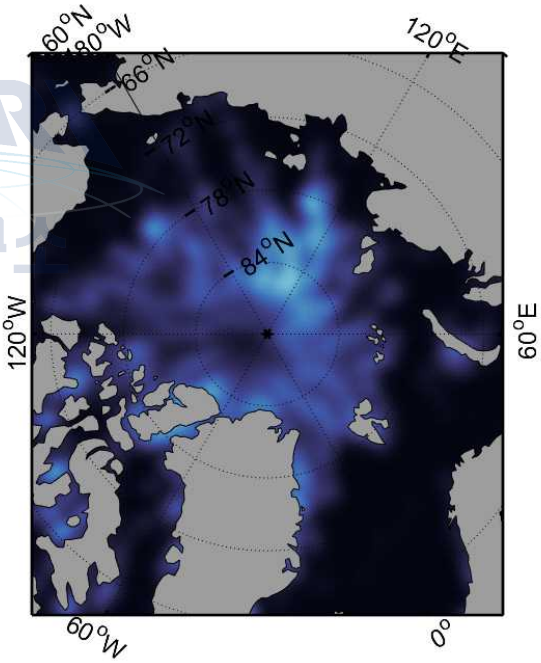
(a) 월평균 해빙 농도 (0 – 100%)



(b) Bremen Univ. 월평균 MPF 산출물 (0 – 100%)

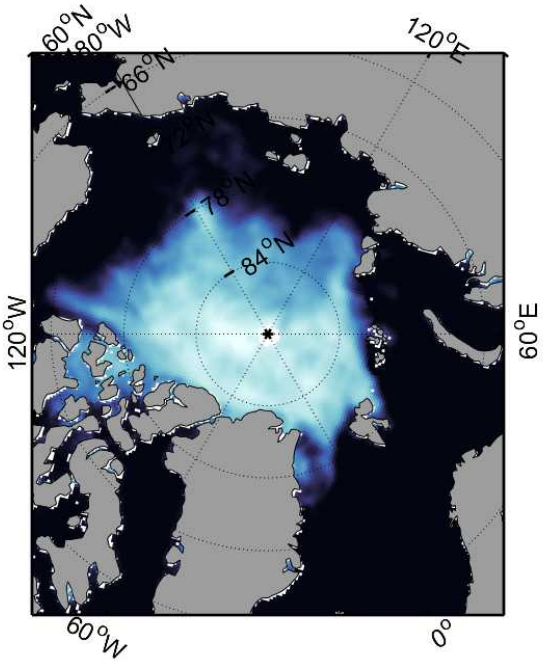


(c) 월평균 melt pond detection (yellow: melt pond, green: open sea, blue: sea ice)

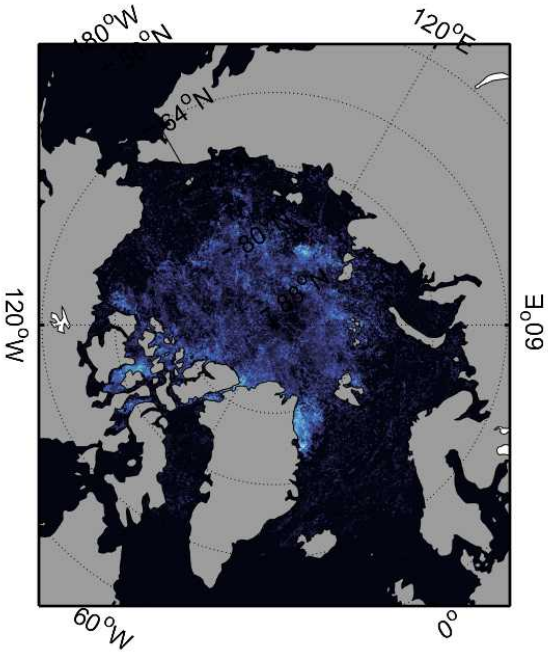


(d) 내삽 기법 활용 월평균 melt pond fraction (0 – 100%)

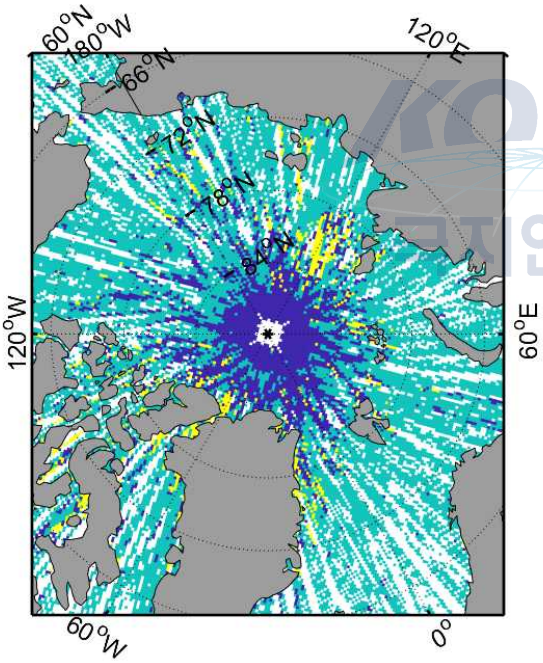
그림 19. ICESat-2 활용 2019년 7월 평균 melt pond 탐지 결과



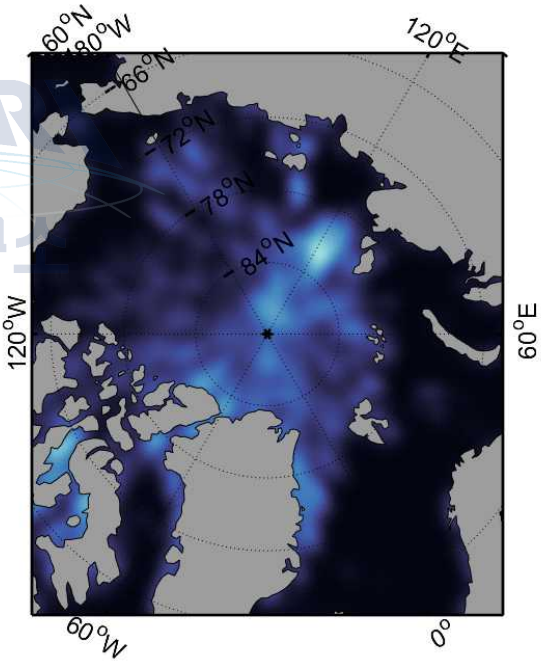
(a) 월평균 해빙 농도 (0 – 100%)



(b) Bremen Univ. 월평균 MPF 산출물 (0 – 100%)

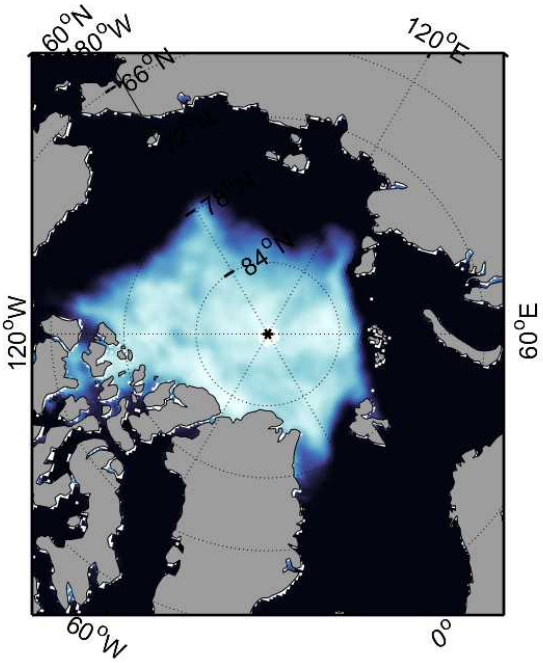


(c) 월평균 melt pond detection (yellow: melt pond, green: open sea, blue: sea ice)

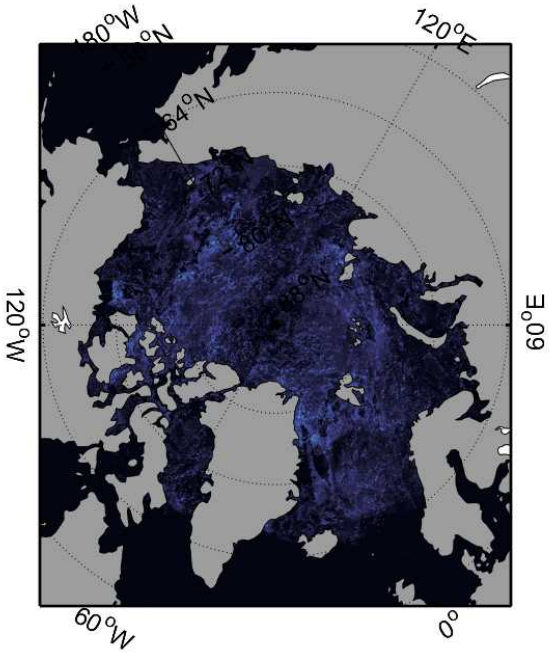


(d) 내삽 기법 활용 월평균 melt pond fraction (0 – 100%)

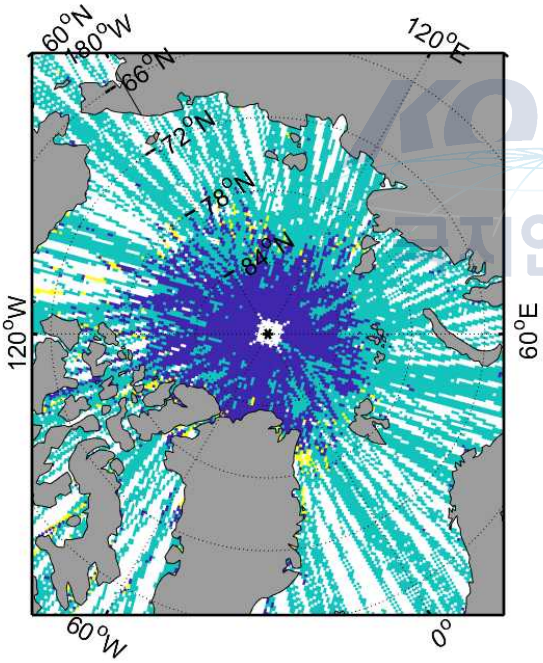
그림 20. ICESat-2 활용 2019년 8월 평균 melt pond 탐지 결과



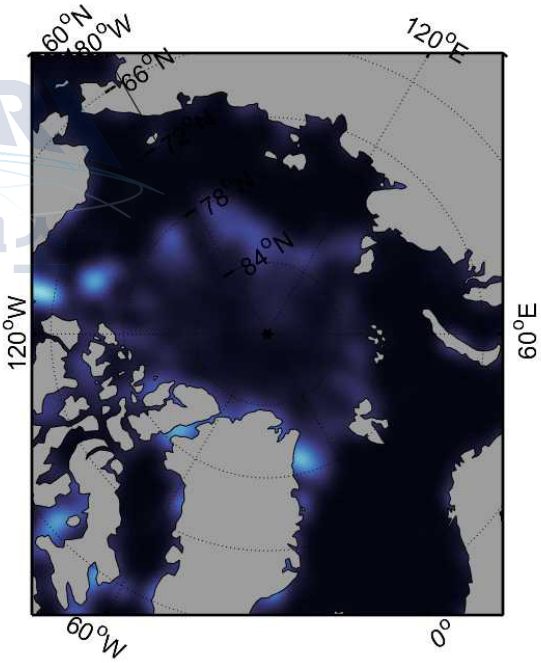
(a) 월평균 해빙 농도 (0 – 100%)



(b) Bremen Univ. 월평균 MPF 산출물 (0 – 100%)

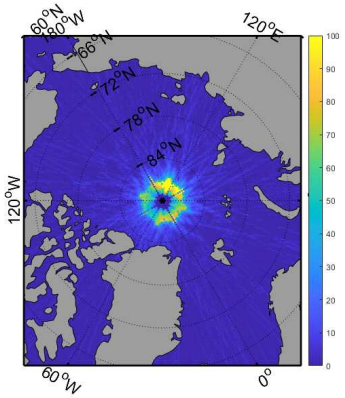


(c) 월평균 melt pond detection (yellow: melt pond, green: open sea, blue: sea ice)

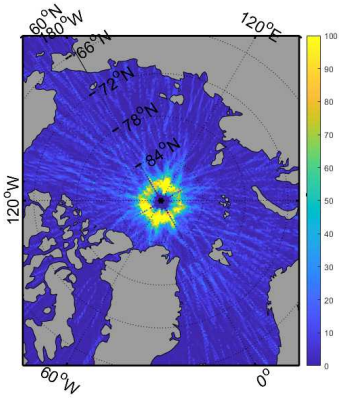


(d) 내삽 기법 활용 월평균 melt pond fraction (0 – 100%)

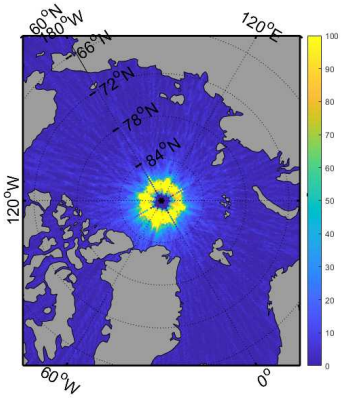
그림 21. ICESat-2 활용 2019년 9월 평균 melt pond 탐지 결과



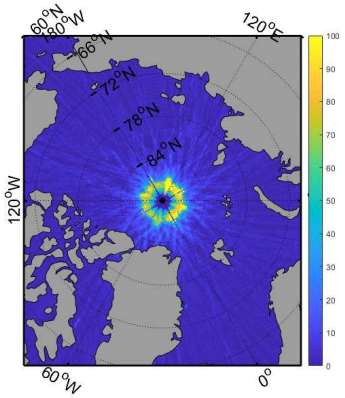
(a) ICESat-2 관측 누적 빈도수 (2019. 05.)



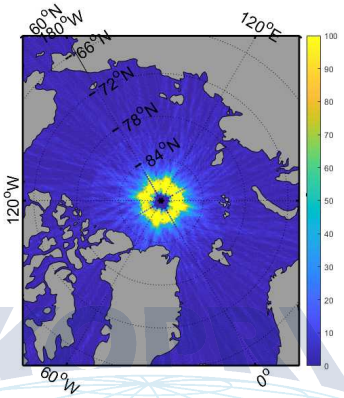
(b) ICESat-2 관측 누적 빈도수 (2019. 06.)



(c) ICESat-2 관측 누적 빈도수 (2019. 07.)



(d) ICESat-2 관측 누적 빈도수 (2019. 08.)



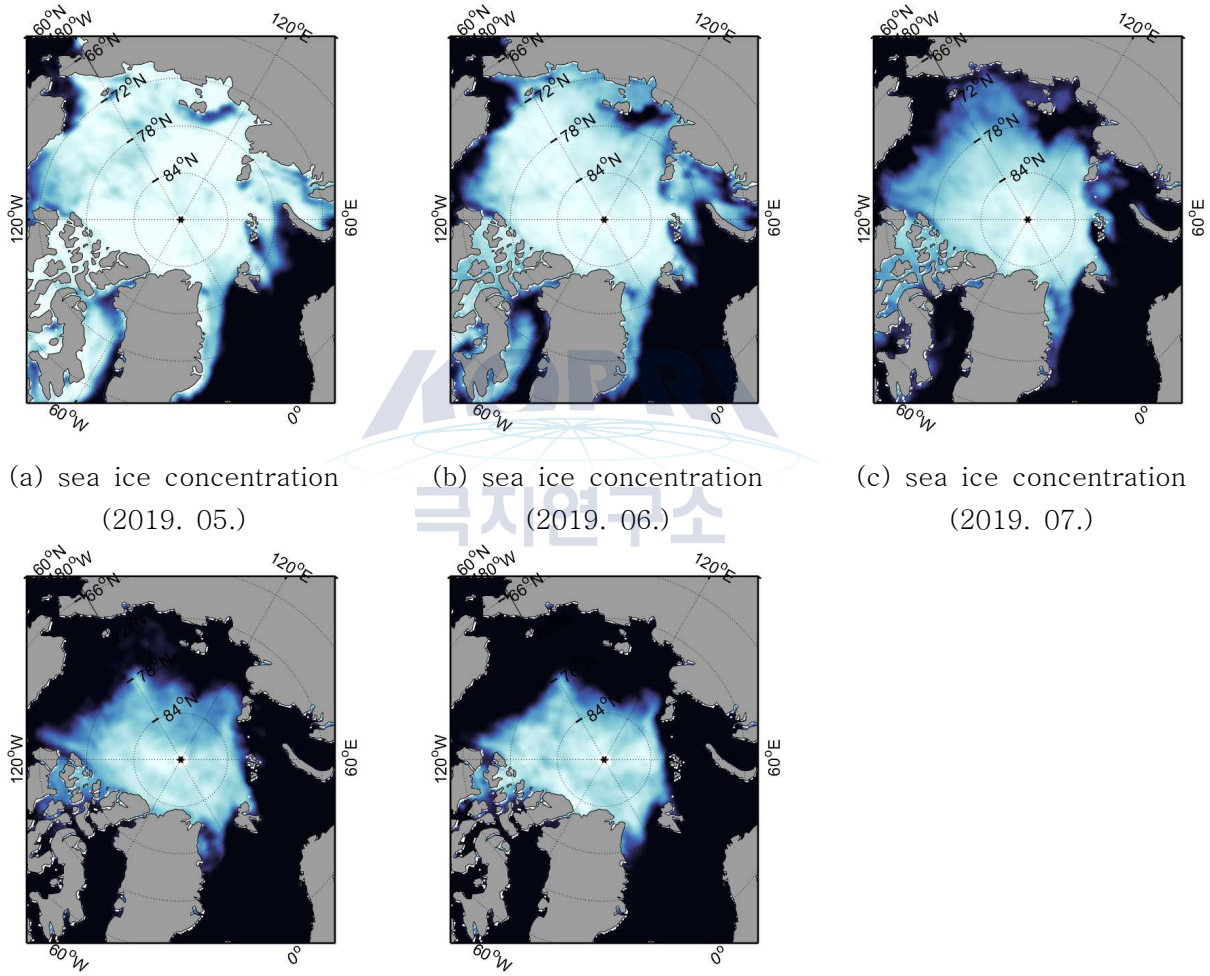
(e) ICESat-2 관측 누적 빈도수 (2019. 09.)

그림 22 2019년 월별 ICESat-2 관측 누적 빈도수

2) 2019년 melting season Arctic melt pond fraction과 기후 및 해빙 인자 상관관계 분석

- 2019년 여름철 (5 – 9월) 월평균 북극 해빙 melt pond fraction과 해빙 및 기후 관련 인자와의 상관관계를 분석함 (Pearson's correlation coefficient).
- 기후인자의 경우, Guemas et al. (2016)을 참고하여 선정하였으며, 주로 해빙 표면 특성에 영향을 미친다고 알려져있는 열환경과 관련된 인자를 선정함.
- ECMWF ERA5 reanalysis monthly mean 자료를 활용하였으며, 분석 단위의 경우, 정규화 (normalization) 없이 실제 추정값과의 상관관계를 분석함.
- 선정한 변수는 다음과 같이 6개 변수로, sea ice concentration (SIC), mean sea level pressure (msl), surface thermal radiation downwards (strd), 2-meter temperature (t2m), total cloud cover (tcc), total column vertically-integrated water vapour (tcwv)로 구성함.
- 각 변수별 시·공간적 분포는 다음 그림과 같음 (그림 23 – 28)

- 해빙 농도의 경우, melting season (해빙기)으로 들어서면서 해빙면적이 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있음.
- 상대적으로 해빙이 얇고 초년빙이 다수 분포하고 있는 Chuckchi Sea, Laptev-Kara Seas 지역에서 보다 많은 해빙의 감소가 보이는 특징이 있음.
- 실제로 앞에서 분석한 melt pond의 공간적 분포 또한 해빙이 줄어들고 있는 바깥쪽 (marginal sea ice zone)에 상대적으로 많이 관측됨 (그림 23 - 28).
- 해빙의 농도와 melt pond fraction의 상관관계는 서로 변화에 대한 영향을 미칠 것으로 보이나, 본 연구에서는 인과관계 (causality)에 대한 고려를 하지 않고 단순한 상관관계만 분석을 수행함.

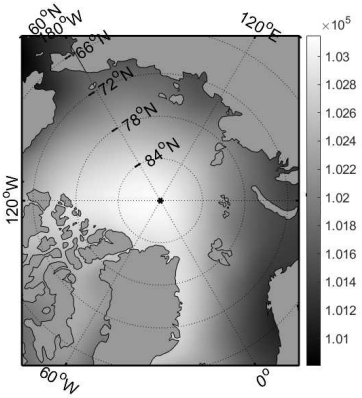


(a) sea ice concentration (2019. 05.)
(b) sea ice concentration (2019. 06.)
(c) sea ice concentration (2019. 07.)
(d) sea ice concentration (2019. 08.)
(e) sea ice concentration (2019. 09.)

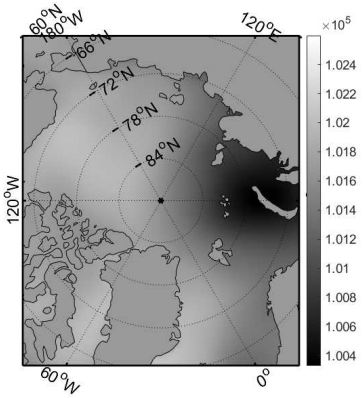
그림 23. 2019년 월별 NSIDC 해빙농도 관측자료

KOPRI 극지연구소

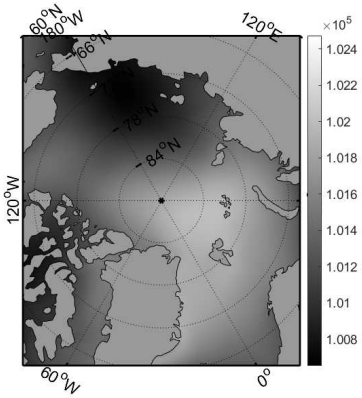
- 이 외에 기후관련 인자에 대한 시·공간 분포특성은 그림 10-13와 같으며, 2-meter temperature 변수를 제외하면 모두 대기와 관련된 변수로써 해빙농도의 공간적 패턴과는 상관성이 적은 것으로 나타남.
- 본 연구에서는 직접적인 열(thermal)과 관련된 기후변수가 해빙 표면특성 (melt pond fraction)과 어떤 관계를 가지는가에 대한 분석을 위하여 해빙농도 변수와 마찬가지로 인과관계(causality)를 고려하지 않고 직접적인 상관계수를 분석함.



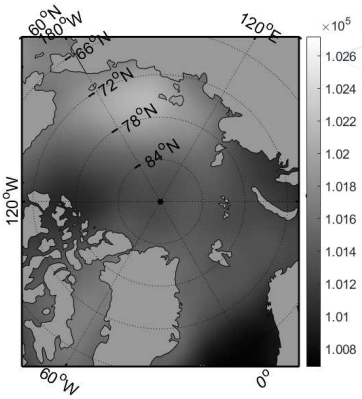
(a) mean sea level pressure (2019. 05.)



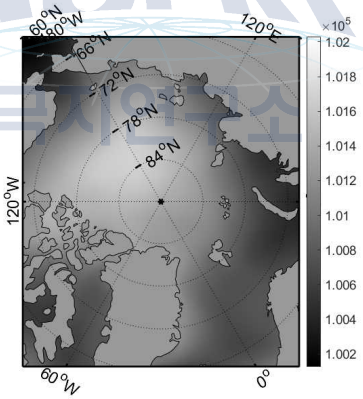
(b) mean sea level pressure (2019. 06.)



(c) mean sea level pressure (2019. 07.)

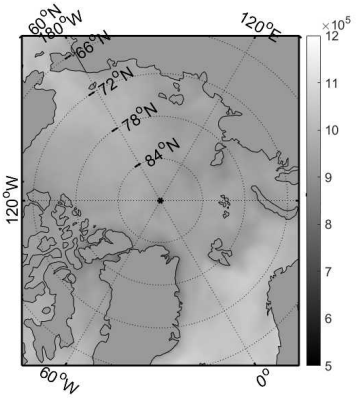


(d) mean sea level pressure (2019. 08.)

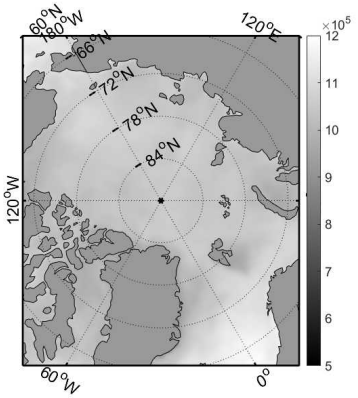


(e) mean sea level pressure (2019. 09.)

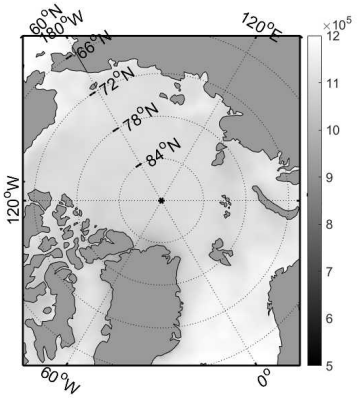
그림 24. 2019년 월별 ERA-5 mean sea level pressure 재분석자료



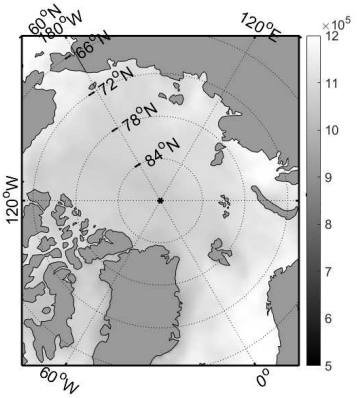
(a) surface thermal radiation downwards (2019. 05.)



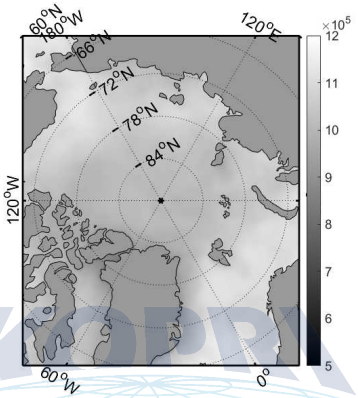
(b) surface thermal radiation downwards (2019. 06.)



(c) surface thermal radiation downwards (2019. 07.)



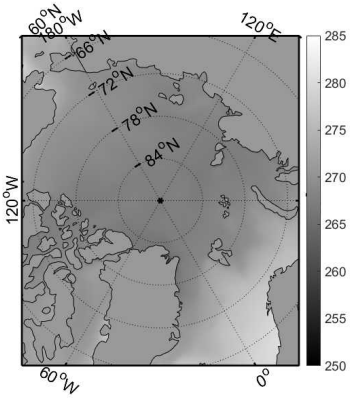
(d) surface thermal radiation downwards (2019. 08.)



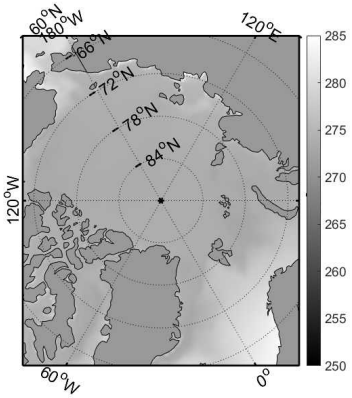
(e) surface thermal radiation downwards (2019. 09.)

그림 25. 2019년 월별 ERA-5 surface thermal radiation downwards 재분석자료

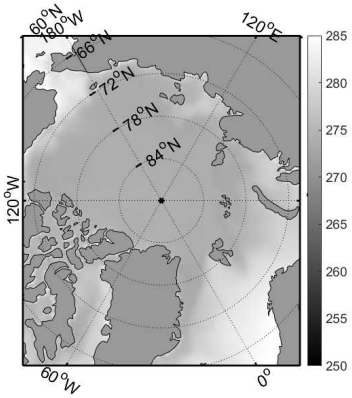
KOPRI 극지연구소



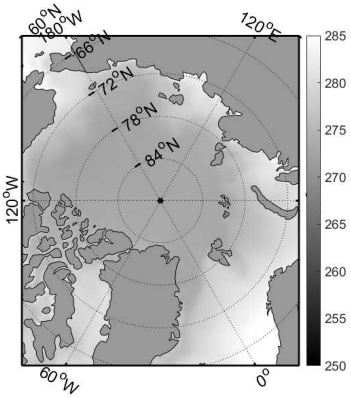
(a) 2-meter temperature (2019. 05.)



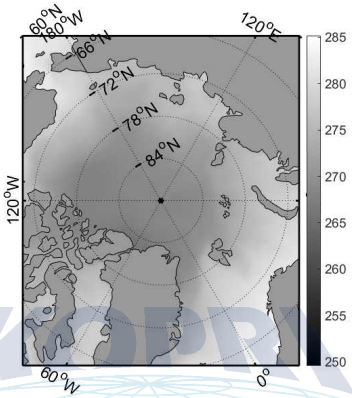
(b) 2-meter temperature (2019. 06.)



(c) 2-meter temperature (2019. 07.)



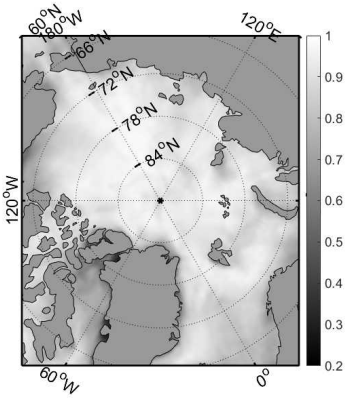
(d) 2-meter temperature (2019. 08.)



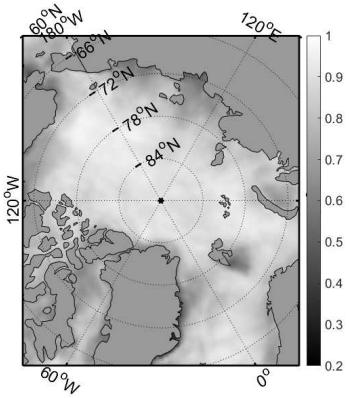
(e) 2-meter temperature (2019. 09.)

그림 26. 2019년 월별 ERA-5 2-meter temperature 재분석자료

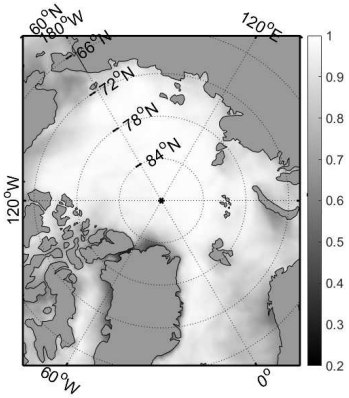
KOPRI 극지연구소



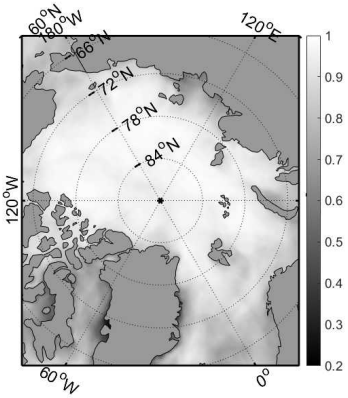
(a) total cloud cover (2019. 05.)



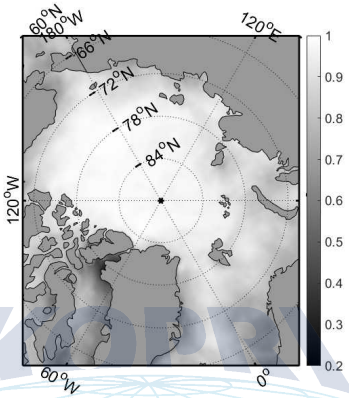
(b) total cloud cover (2019. 06.)



(c) total cloud cover (2019. 07.)



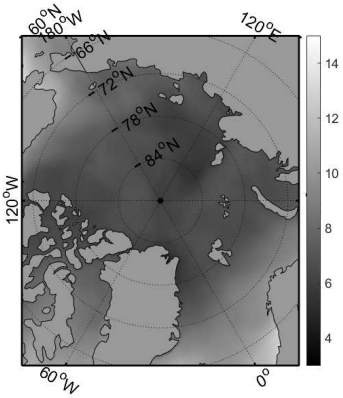
(d) total cloud cover (2019. 08.)



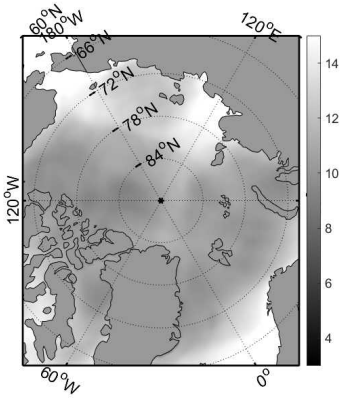
(e) total cloud cover (2019. 09.)

그림 27. 2019년 월별 ERA-5 total cloud cover 재분석자료

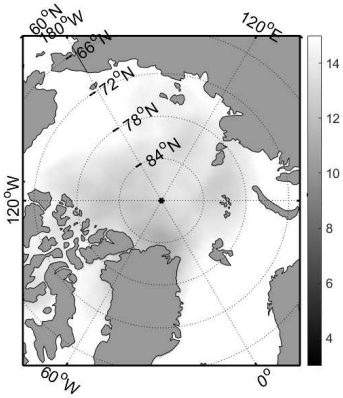
KOPRI 극지연구소



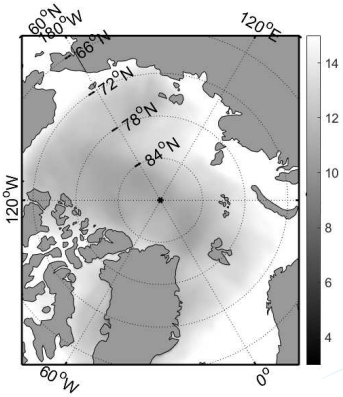
(a) total column vertically-integrated water vapour (2019. 05.)



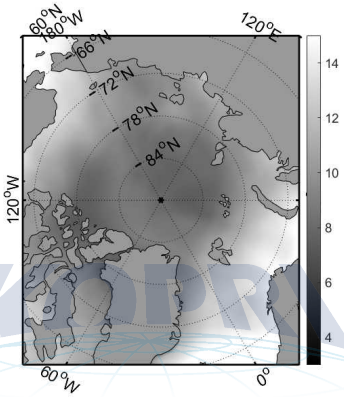
(b) total column vertically-integrated water vapour (2019. 06.)



(c) total column vertically-integrated water vapour (2019. 07.)



(d) total column vertically-integrated water vapour (2019. 08.)



(e) total column vertically-integrated water vapour (2019. 09.)

KOPRI 극지연구소

그림 28. 2019년 월별 ERA-5 total column vertically-integrated water vapour 재분석자료

- 2019년 월별 melt pond fraction과 관련 인자의 상관관계 분석 결과, 변수별로, 월별로 편차가 큰 것으로 나타남.
- SIC의 경우, 융빙이 진행되면서 상관계수가 음에서 양으로, 그리고 다시 음의 값으로 변화하는 것으로 나타남. 상관계수의 경우, 동일 픽셀에 대한 상관도를 나타내므로, 5, 9월은 각각 해빙농도가 낮을수록 melt pond fraction이 높은 것으로 볼 수 있으며, 반대로 6, 7, 8월의 경우는 해빙농도가 높은 지역에 melt pond fraction 또한 높은 것으로 나타남.
- MSL의 경우 또한 융빙이 진행되면서 상관계수가 음에서 양으로, 그리고 다시 음으로 변하는 패턴을 보임.
- STRD의 경우는 꾸준히 음의 상관관계를 보이고 있으며, downward radiation의 양이 많을수록 melt pond fraction이 많은 것으로 나타남.
- T2M의 경우 앞의 경우와 반대로 융빙이 진행되면서 양의 상관계수가 음으로 변했다가 다시 양으로 바뀌는 패턴을 보임.

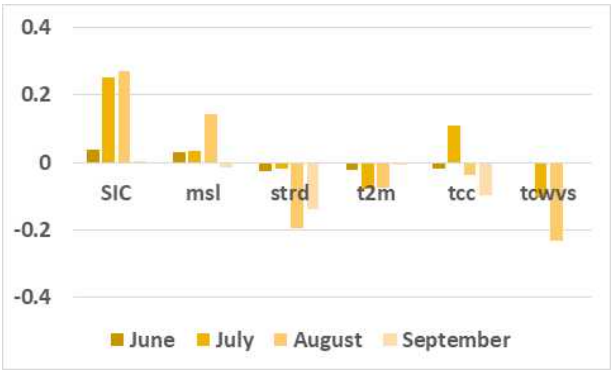
- TCC의 경우, 5월달에 높은 음의 상관계수를 보였으며, 7월을 제외하면 대체로 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타남. 이는 구름이 많이 덮인 지역일수록 melt pond fraction이 낮다는 것으로, 일조량이 상대적으로 적은 지역일수록 낮은 fraction을 보이는 것으로 나타남.
- TCWVS 변수의 경우는 water vapor를 대표하는 변수로써 융빙이 진행되면서 양의상관관계에서 음의 상관관계로 변하는 모습을 보임.
- melting season 전체 기간에 대한 상관관계 분석 결과 (그림 29b), SIC, STRD, T2M, TCWVS가 높을수록, 반면 MSL, TCC가 낮을수록 melt pond fraction이 높은 것으로 나타남.



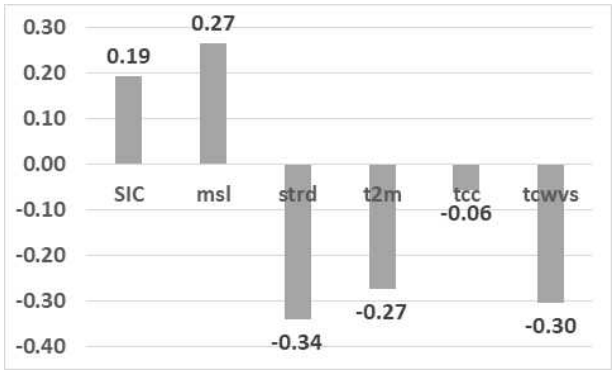
(a) 월별 상관계수 (Pearson's *r*) (b) 2019년 5-9월 전체 상관계수 (Pearson's *r*)

그림 29. 2019년 (a)월별 (b)5-9월 전체 melt pond fraction과 관련 변수 간 상관계수

- 추가적으로 북극 melt pond의 변화에 영향을 미치는 요인과 그 정량적인 수준을 비교·분석하기 위하여 현재 melt pond fraction과 1개월 전 관련 변수와의 상관관계를 분석함 (예: 2019년 5월의 해빙 및 기후 상황과 6월의 melt pond fraction과의 상관관계 분석) (그림 30).
- 분석 결과, 1개월 전 SIC가 높을수록 melt pond fraction이 높은 것으로 나타났으며, 이는 지난 달의 낮은 해빙농도를 가지는 픽셀이 융빙기가 진행됨에 따라 녹아 없어지는 결과로 이어져 melt pond 자체가 탐지되지 않는 결과를 야기한 것으로 보임.
- 앞서 분석한 결과와는 다른 패턴을 보이며, 과거 SIC, MSL이 높을수록, 과거 STRD, T2M, TCC, TCWVS가 낮을수록 melt pond fraction이 높은 것으로 나타남.



(a) 월별 상관계수 (Pearson's *r*)



(b) 2019년 6-9월 전체 상관계수 (Pearson's *r*)

그림 30. 2019년 (a)월별 (b)5-9월 전체 melt pond fraction과 1개월 이전 관련 변수 간 상관계수

3) 기후 및 해빙 인자별 melt pond fraction과의 상관관계에 대한 선행연구 활용 비교검증

- 본 연구에서 분석한 기후·해빙 인자와 melt pond fraction과의 통계적인 상관관계에 대하여 선행연구에서 분석한 결과와 비교를 통하여 간접적으로 검증을 수행함.
- 해빙 관련 인자 (sea ice concentration, sea ice extent)의 경우 Flocco et al. (2012)은 5월부터 발생하기 시작하는 melt pond가 점점 확장되어 8월에 maximum fraction을 보이며, 6 - 9월에 걸친 여름철 해빙 면적 감소에 기여한다고 밝혔으며, 초년빙에서 두드러지게 나타난다고 밝힘. Schröder et al. (2014)은 봄철(5월)부터 나타나는 melt pond가 9월의 해빙 최소면적을 기록하는데에 강한 상관관계가 있다고 밝혔으며, 특히 초년빙 및 얇은 해빙의 면적 감소에 기여한다고 밝힘 (그림 31).
- 이는 본 연구에서 분석한 초년빙에서의 높은 melt pond fraction과 일치하는 것으로 보이나, 선행연구의 경우 열역학에 기초한 melt pond distribution 및 melt pond evolution의 모의 실험에 근거한 분석이므로 정량적인 비교는 어려운 실정임.

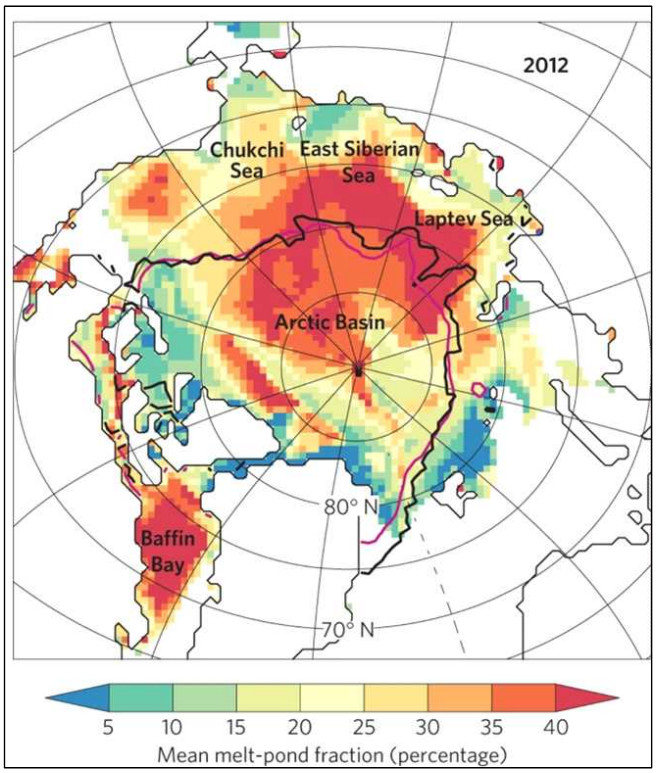


그림 31. 2012년 북극 melt pond fraction 분포도 (Schröder et al. (2014)의 Figure 2b)

- 기후인자의 경우, 널리 알려진 바와 같이 표층온도 (T2m, STRD) 및 albedo (proxy variable: TCC)와 유의미한 상관관계를 가지는 것으로 알려져있으며 (Malinka et al., 2016; Zege et al., 2015; Istomina et al., 2015), 본 연구에서 도출한 상관관계와 같이 융빙기에 한하여 음의 상관관계를 보이는 것으로 나타남.
- 또한, MSL 변수의 경우, sea ice thinning를 야기하는 지표로 널리 알려져 있으며 (Kwok and Untersteiner, 2011) 융빙기에 점점 넓어지는 melt pond가 albedo의 감소를 가져오고 surface runoff 및 water vapor (TCWVS)의 형성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있음 (Kwok and Untersteiner, 2011) (그림 32). 본 연구에서도 MSL과 융빙호의 비율이 양의 상관관계를 가지며, 융빙기가 진행됨에 따라 그 상관계수가 감소하는 것으로 나타나, 영향이 점점 감소하는 현상을 확인함.

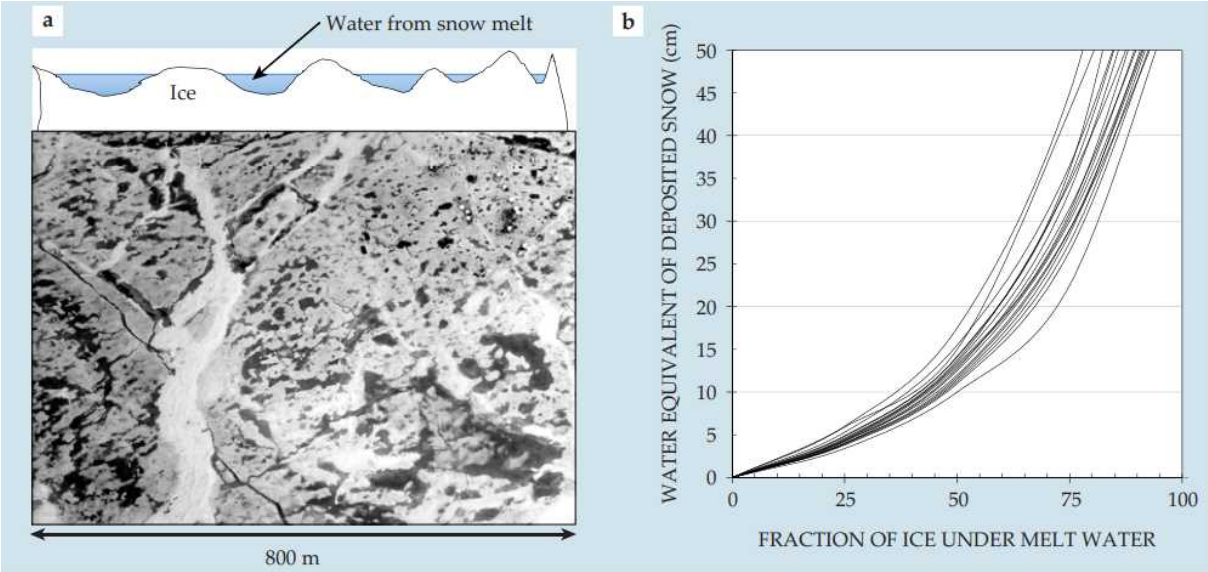


그림 32. 여름철 북극 melt pond로 인한 (a) 해빙 albedo 차이 및 (b) 표층 수분 함량의 상관관계 (Kwok and Untersteiner, 2011)

2단계) 북극 해빙의 파편화에 대한 정량화 및 파편화와 해빙 인자간의 상관성 분석

1차년도) FFI 추정 알고리즘 개발

1) FFI 지표 개발 및 FFI 추정을 위한 레퍼런스 구축

(1) FFI 지표 개발

- 기존 해빙의 파편화에 대한 연구인 FSD는 유빙의 크기와 개수 밀도간의 상관관계를 나타내는 개념임. 이는 멱함수의 형태를 띠고 있으며, 그 기울기와 해빙농도간의 상관관계를 분석하는 등의 분석이 수행됨.
- 하지만 FSD는 특정 그리드 내에서 유빙의 크기와 개수에 따라 달라질 수 있기 때문에, 전반적인 북극지역에 대하여 정량화하여 사용하는 데에는 무리가 있음.
- 유빙의 파편화에 대한 정보가 기후 모델 및 다른 해빙인자들의 예측모델에 사용되기 위해서는 정량화된 지표로써 표현될 필요가 있기 때문에, 유빙의 파편화에 대한 정보를 담을 수 있는 보다 직관적이며 활용 가능한 인자를 개발하고자 하였음.
- DIVI는 특정 그리드 내에서 건물들이 어떻게 파편화 되어 배치되어 있는지를 정량적으로 표현하는 지표이며, 다음과 같은 수식으로 계산 됨.

$$\mathrm{DIVI} = 1 - \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{A_i}{A_t} \right)^2$$

- At는 해당 scene의 총 면적을 의미하며, Ai는 해당 객체만의 면적을 의미함. DIVI 수식만으로는 극지방의 유빙에 대해 적용되는 데에 어려움이 있으므로 최적화 과정이 필요함. 최적화 과정을 통해 도출된 수식은 다음과 같음.

$$DIVI_{floe} = -\log\left(\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{A_i}{A_t}\right)^2\right)$$

- 해당 수식을 통해 얻어지는 값의 이론적 범위를 확인하기 위해 시뮬레이션을 진행하였으며 그 결과는 다음과 같음 (그림 33).

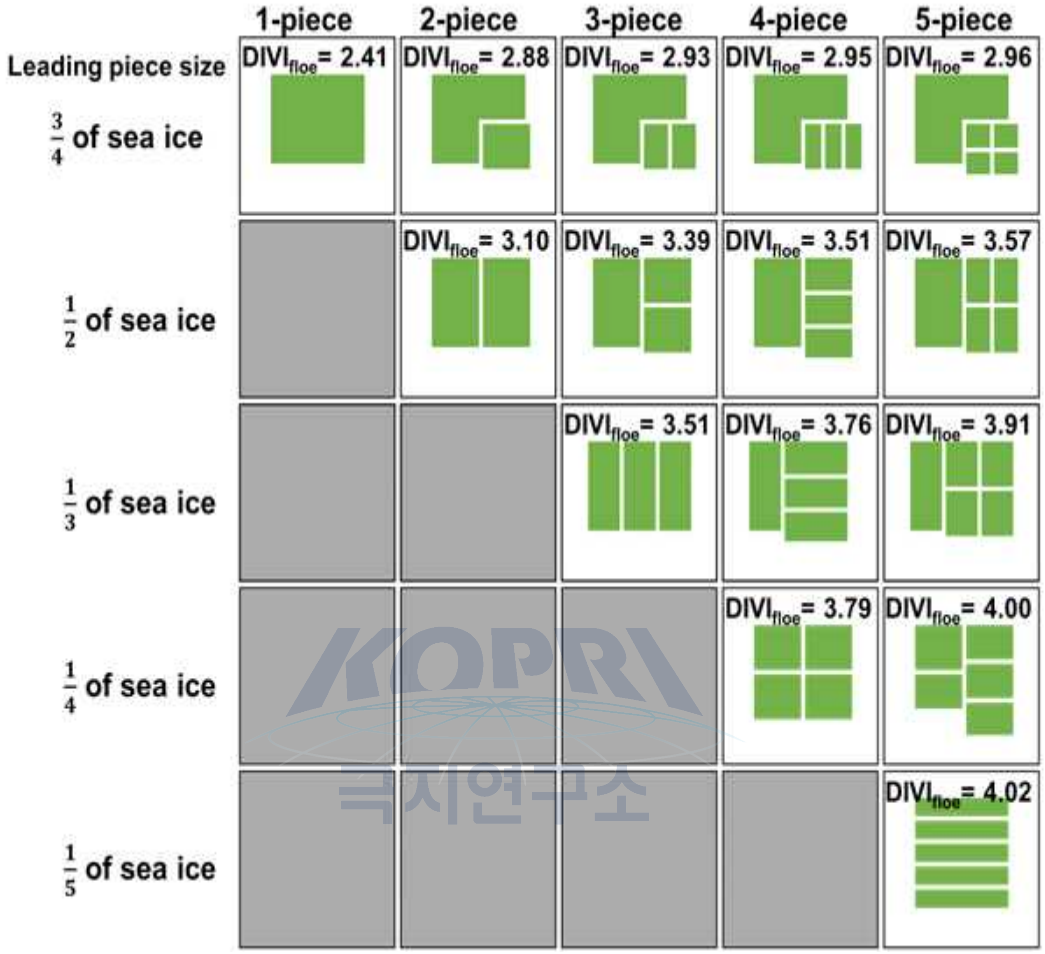


그림 33. 해빙농도가 50%일 때의 $DIVI_{floe}$의 시뮬레이션 결과. 우측으로 갈수록 유빙의 조각의 수가 늘어나며, 아래로 내려갈수록 가장 큰 유빙의 크기가 작아짐.

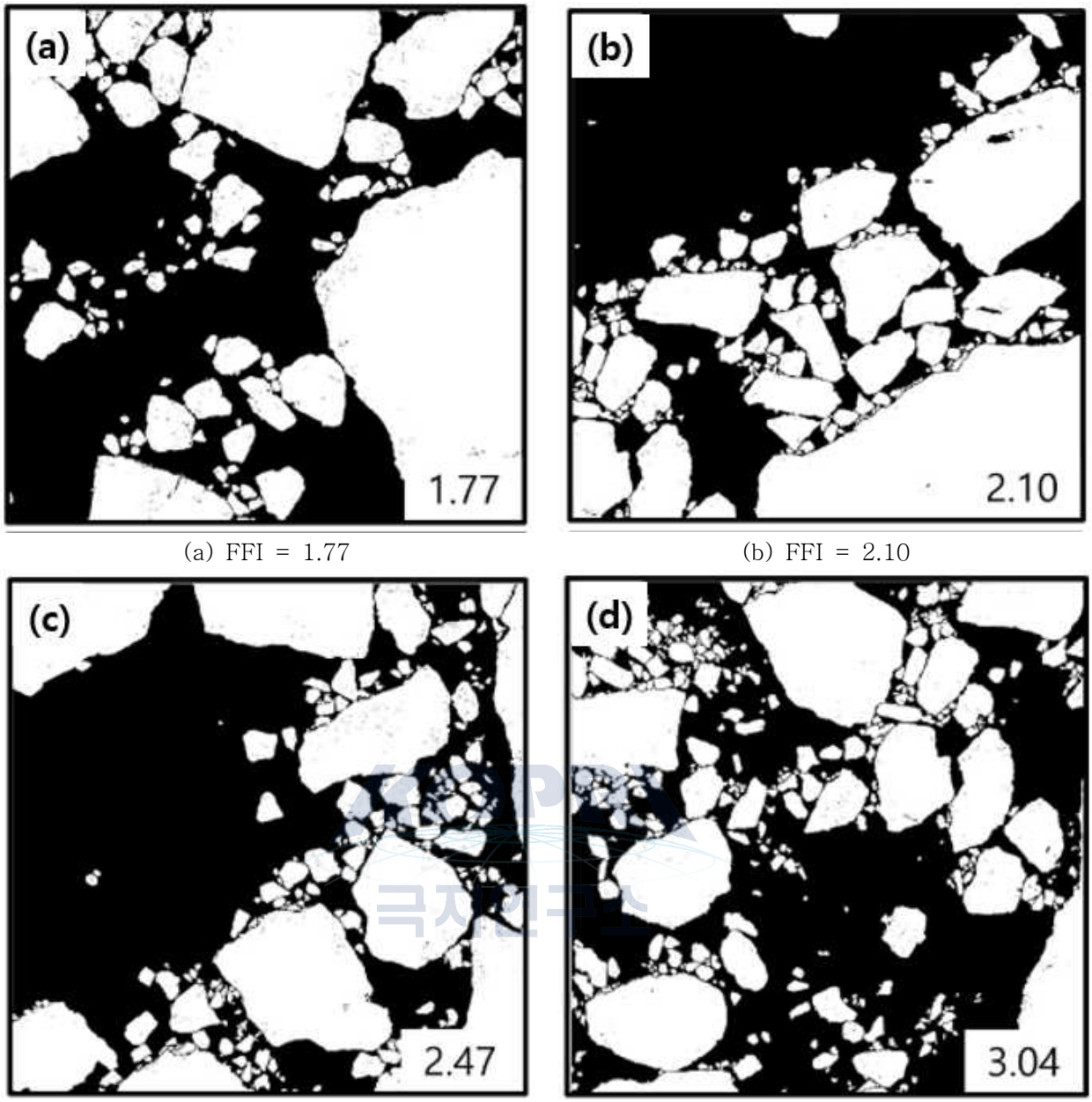
- 그림 33을 통해 확인할 수 있듯이 scene을 구성하는 유빙의 수가 증가할수록, 그리고 scene에서 가장 큰 유빙의 크기가 작아질수록, $DIVI_{floe}$의 값이 증가함. 이는 유빙이 파편화될수록 지표의 값이 따라서 증가하는 것을 의미함.
- 하지만 이러한 $DIVI_{floe}$는 해당 scene의 해빙 농도에 따라서 그 값이 달라질 수 있으며, 이는 하나의 독립된 지표로써 작용하기에 어려움이 있음. 때문에, 그림 34와 같은 식을 활용하여 지표를 최적화함으로써 해빙 농도에 관계없이 독립적으로 작동하게 함.

$$FFI = -\log\left(\frac{100\%^2}{n\%^2}\right) - \log\sum\left(\left(\frac{floe\ segment\ area}{target\ area}\right)^2\right)$$
$$= \log\left(\frac{100\%^2}{n\%^2}\right) + DIVI_{n\%}$$

그림 34. DIVI를 활용하여 계산되는 FFI 수식

- 이렇게 개발된 인자는 시뮬레이션을 통해 가설이 입증되었다 할지라도 실제 북극의 사례들에서 정상적으로 작동하는지에 대해 검증할 필요가 있기 때문에, 추가적으로 실제 사례를 통해 확인해야 함.
- FFI가 SIC에 관계없이 제대로 작동하는지에 대한 여부를 평가하기 위해서 SIC를 약 50%로 고정한 뒤에 해당 해빙농도에서 파편화 정도가 다른 이미지를 확인함 (그림 35).
- 유빙 조각의 수가 더 많아지거나, 혹은 가장 큰 유빙의 크기가 작아질수록 FFI가 증가하는 모습을 확인할 수 있으며, 이를 통해 FFI가 잘 작동하고 있음을 알 수 있음.

KOPRI 극지연구소



(a) FFI = 1.77 (b) FFI = 2.10

(c) FFI = 2.47 (d) FFI = 3.04

그림 35. 유사한 해빙 농도(약 50%)에서 유빙의 파편화 정도에 따른 FFI 값의 변화 예시.

(2) Sentinel-2 고해상도 광학위성을 활용한 레퍼런스 구축

- FFI 추정을 위해서는 유빙의 파편화 정도를 파악해야 하지만, 유빙의 파편화 정도 의 정보를 담고있는 현장자료를 취득하는 것은 매우 어려움. 때문에 본 연구에서는, 고해상도의 광학위성 자료를 활용하여 FFI 분석을 수행하였음. 오픈 소스로 누구나 활용할 수 있으며, 10m의 높은 공간해상도를 제공하여 작은 크기의 유빙도 분별해낼 수 있을 것으로 기대되는 Sentinel-2A/B 위성을 활용함.

- 극지방의 특성상 구름을 비롯한 여러 기상현상으로 인하여, 분석에 활용할 수 있는 깨끗한 위성영상을 대량으로 확보하지는 못하였으나, 구름이 없이 맑은 간빙기에 해당하는 총 8개의 Sentinel-2 광학 위성 영상을 확보하였으며, 이는 FFI 구축 및 추정에 있어 충분한 양임

(표 2).

표 2. FFI 추정을 위한 reference 구축에 활용된 Sentinel-2 광학 위성 자료 요약

Mission	Sensing data	Level/ Processing baseline/ relative orbit/ tile number
Sentinel-2A	2018.06.03	L2/ 02.06/ 100/ T09XWC
	2019.06.07	L2/ 02.07/ 086/ T09XWE
Sentinel-2B	2018.06.02	L2/ 02.06/ 014/ T09XWB
	2019.06.05	L2/ 02.07/ 129/ T08XNL
		L2/ 02.12/ 129/ T09XVE
	2019.09.03	L2/ 02.13/ 129/ T10XDK
		L2/ 02.08/ 129/ T09XWE
		L2/ 02.13/ 129/ T09XWE

- Sentinel-2 광학 위성의 raw 데이터만으로는 reference 자료로 활용하는 데에 있어 어려움이 있음. 육안상으로는 유빙이 분리되어있는 것을 유추할 수 있으나, 영상을 확대하여 자세히 보면, 여러 크고 작은 유빙이 픽셀 단위(10m)로 서로 연결되어 있는 경우를 확인할 수 있음 (그림 36).
- 때문에 FFI 추정을 위한 레퍼런스 자료를 구축하기 위해서는 다음과 같은 Sentinel-2 위성영상의 전처리 과정이 필요함.

a) 임계값 기반 유빙-바다 1차 구분
b) 비지도 학습을 통한 객체 분리
c) 육안 확인을 통한 수작업 수정

KOPRI 극지연구소

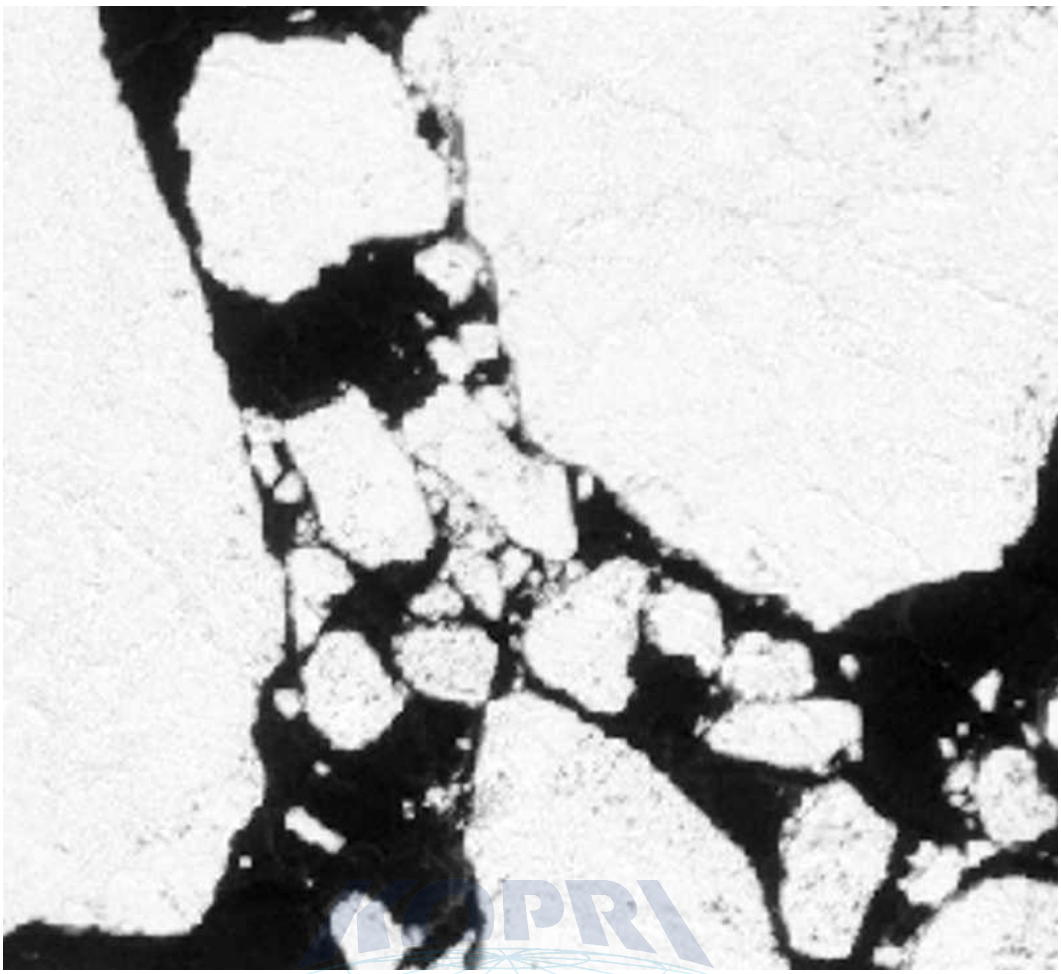


그림 36. 픽셀 단위로 연결되어 있는 Sentinel-2 L2 위성영상의 예시 (band 2). 육안으로 판단할 때에는 여러 개의 유빙으로 확인되지만, 픽셀 단위로 연결되어 있어 단순 객체화 작업에서는 모든 유빙들이 한 객체로 인식됨.

- 유빙과 바다를 구분하기 위해서 차적으로 Sentinel-2 위성의 band2(0.490㎛)와 Band8(0.842㎛)의 비를 활용하여 임계값을 설정하고자 하였으며, 여러 가지의 임계값들을 테스트 함 (그림 37).

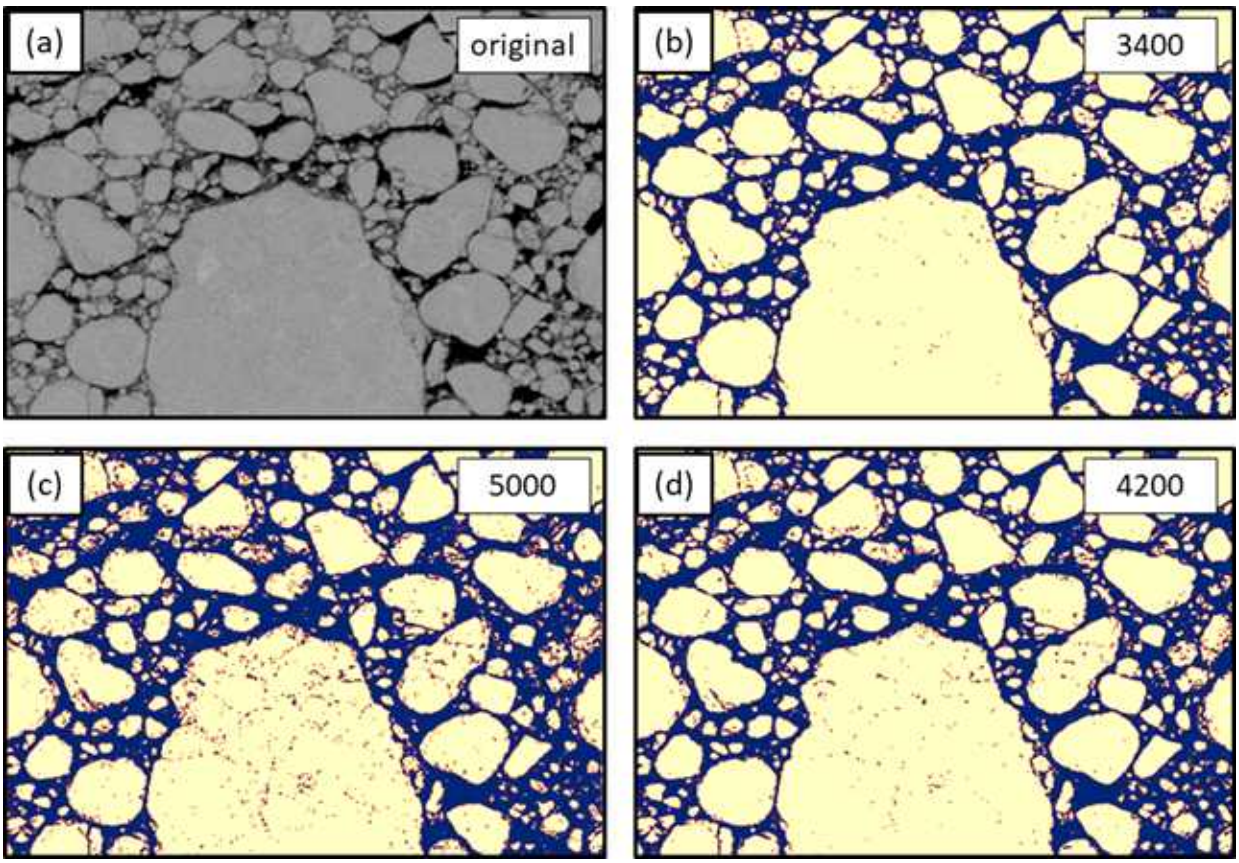
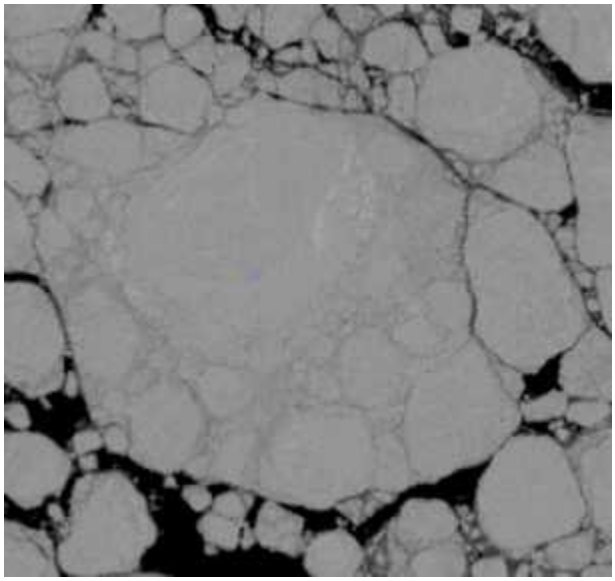
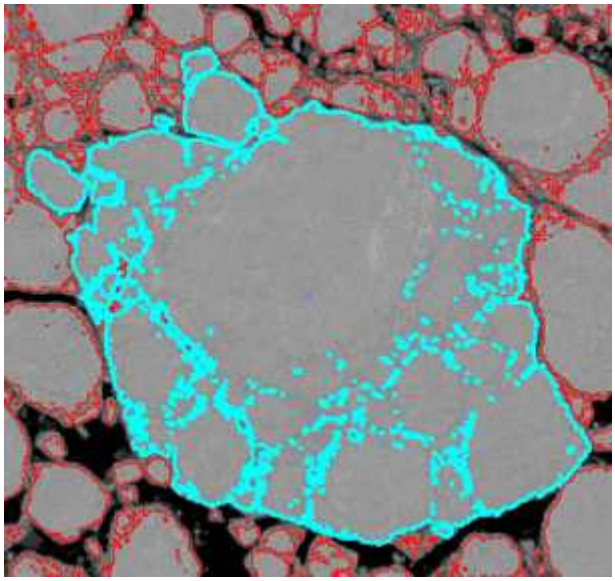


그림 37. 유빙과 바다 구분을 위한 Sentinel-2 위성의 Band2와 Band8의 비를 활용한 임계값 테스트 결과. 우측 상단의 숫자는 직관화를 위해 실제 임계값에 10000을 곱한 수치임.

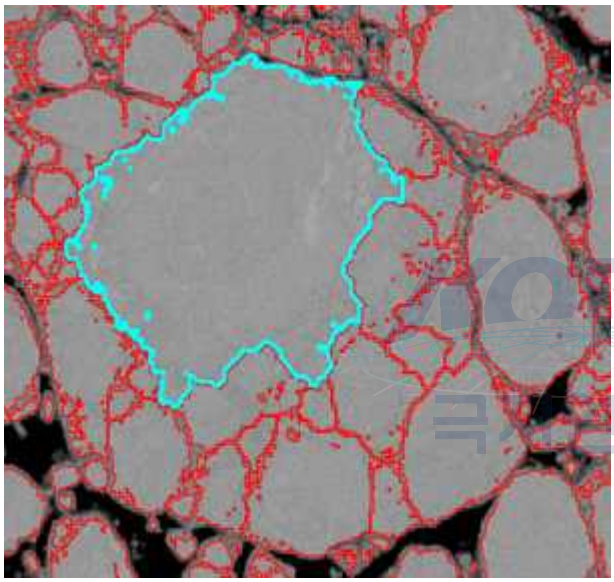
- 낮은 임계값 (0.34)에서는 매우 작은 크기의 유빙들이 뭉쳐져서 하나의 유빙인 것처럼 보임 (그림 38(b)).
- 높은 임계값 (0.50)에서는 하나로 뭉쳐져 분리되지 않았던 유빙들이 잘 분리되는 모습을 보였으나, 큰 크기의 유빙에 융빙호를 비롯하여 반사도에 영향을 주는 요인들이 존재할 경우, 그를 중심으로 유빙이 여러 갈래로 쪼개지는 것을 확인할 수 있음 (그림 38(c)). 따라서 경험적 접근을 통하여 유빙-바다 구분을 위한 최적의 임계값 선정이 필요함.



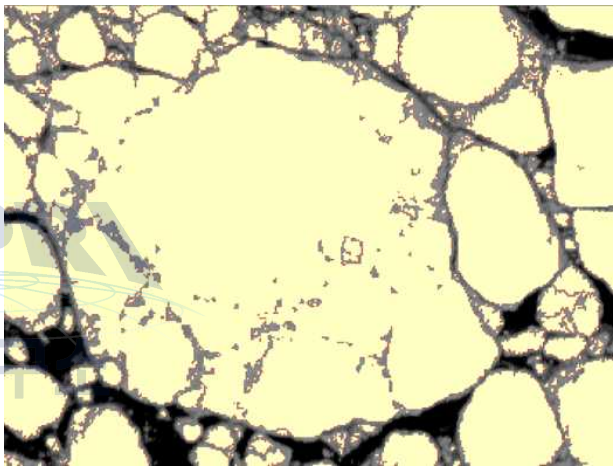
(a) raw Sentinel-2 광학위성 영상



(b) 낮은 임계값을 활용한 결과



(c) 높은 임계값을 활용한 결과



(d) 임계값 기반 분류 예시

그림 38. 임계값 별 유빙-바다 구분 결과 예시.

- 레퍼런스 자료를 구축하기 위한 두 번째 과정인 비지도 학습을 통한 객체 분리를 수행하기 위해 K-means clustering 기법을 활용함 (그림 39).
- K-means clustering 기법은 특성이 비슷한 객체들을 한 개의 군집으로 나누어 주는 비지도 학습의 일종으로, 나누어지는 군집의 수를 임의로 조정할 수 있음. 레퍼런스 구축에 있어서는 여러 개의 군집으로 분류한 뒤에 유빙과 바다로 재분류 함.
- 여러 가지의 군집의 개수를 테스트 해보았을 때, 낮은 수의 군집 결과에서는 분류가 제대로 되지 않았으며, 군집의 개수가 6개일 때 최적의 객체 분리를 해내는 것을 확인함.
- 위의 두 과정들을 바탕으로 최적의 임계값과 군집 수를 산정하여 유빙-바다 분리 과정을 진행하였음.

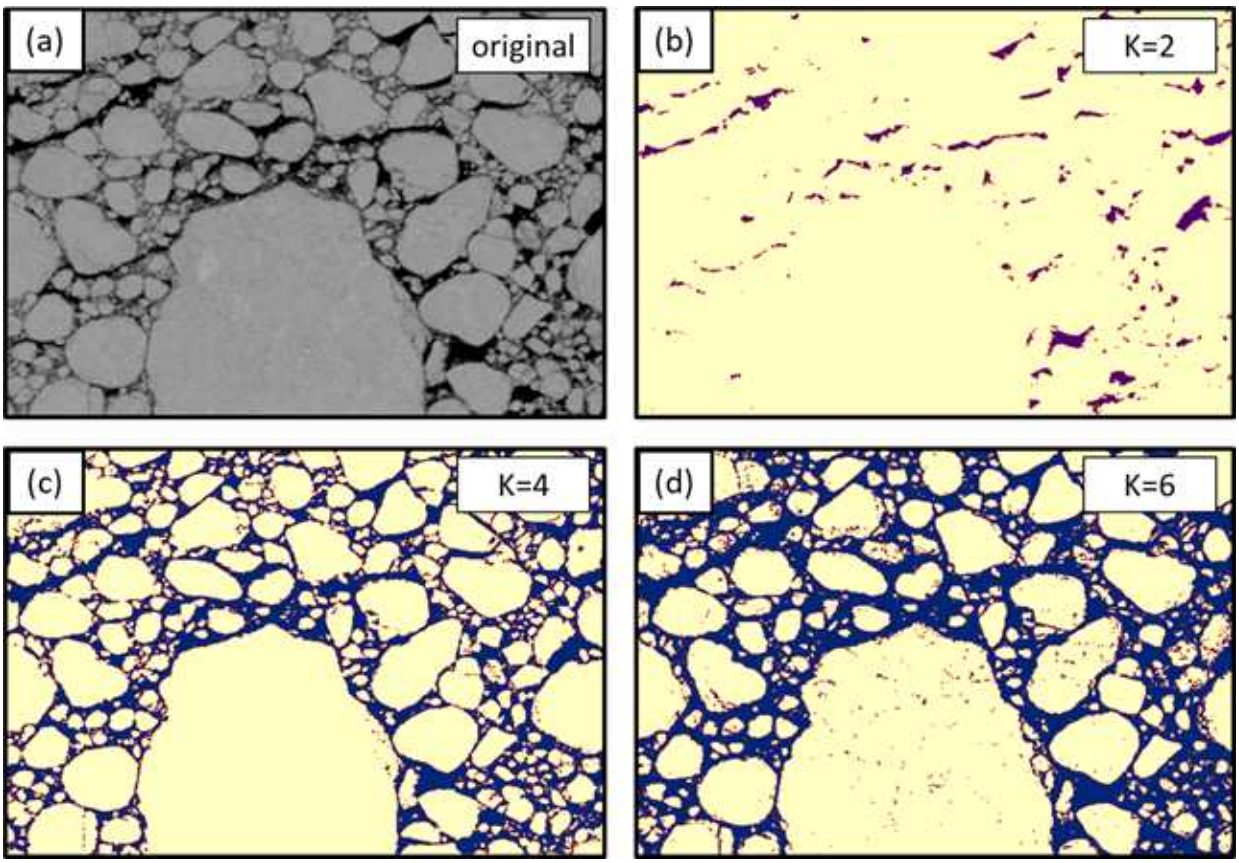
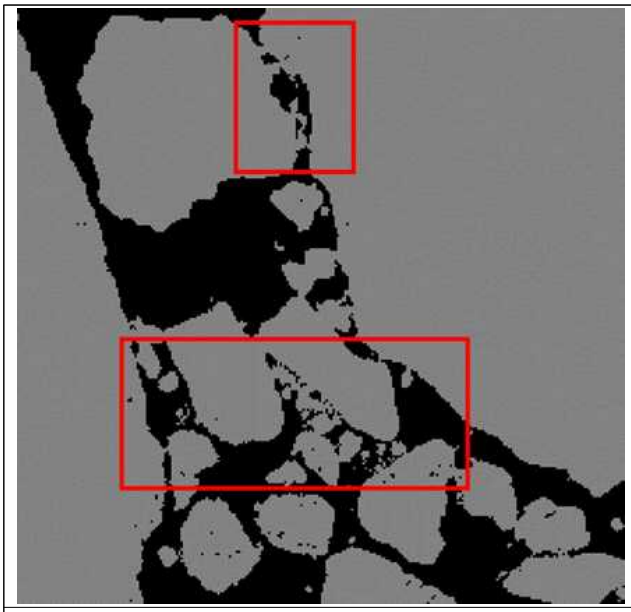
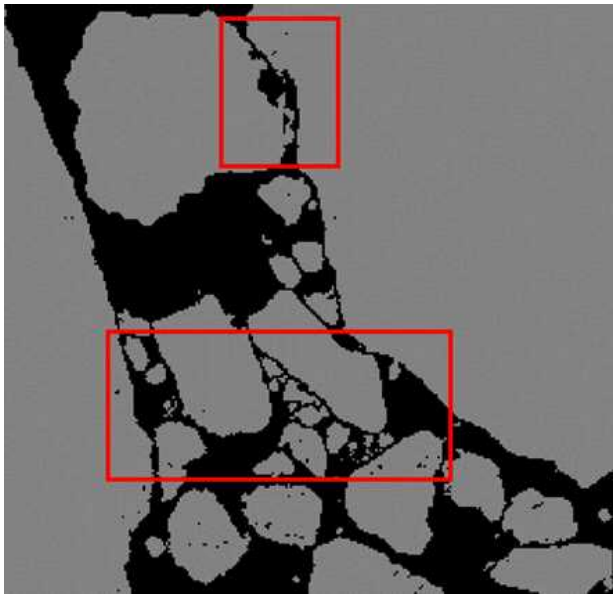


그림 39. 유빙의 객체분리를 위한 K-means clustering의 테스트 결과. 우측 상단의 숫자는 clustering 기법의 cluster 수를 의미함.

- 임계값 기반 유빙-바다 구분과 K-means clustering을 모두 적용하였더라도 서로 다른 객체인 유빙들이 픽셀 단위로 연결되어 있는 경우가 남아 있을 수 있음 (그림 40(a)). 때문에 육안 판별 (visual inspection)을 통해 서로 다른 객체이지만 연결되어 있는 유빙들을 일일이 분리하는 편집 과정을 수행함 (그림 40(b)).



(a) 임계값 기반 유빙-바다 구분과 K-means clustering이 모두 적용된 결과 예시



(b) manual editing을 수행한 결과

그림 40 manual editing 결과 예시.

- 총 8개의 영상에 대하여 임계값 기반 유빙-바다 구분, K-means clustering, manual editing을 모두 수행하였으며 (그림 41), 레퍼런스 자료로 활용하기 어려운 부분에 대해서는 nan 값으로 마스킹 처리 하였음 (그림 42).

KOPRI 극지연구소

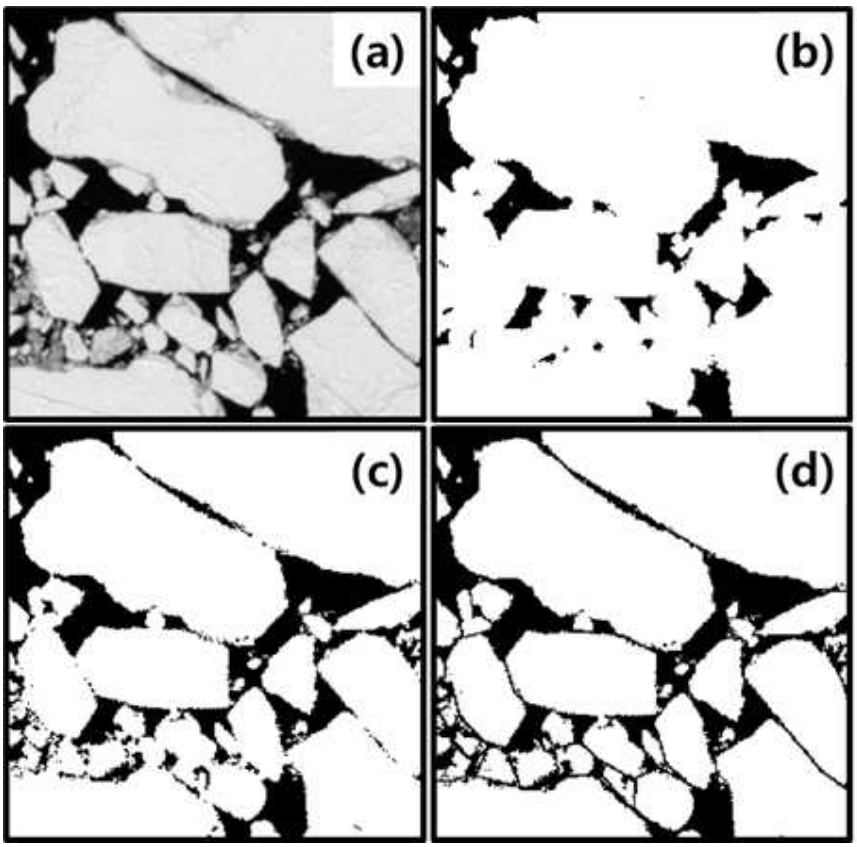
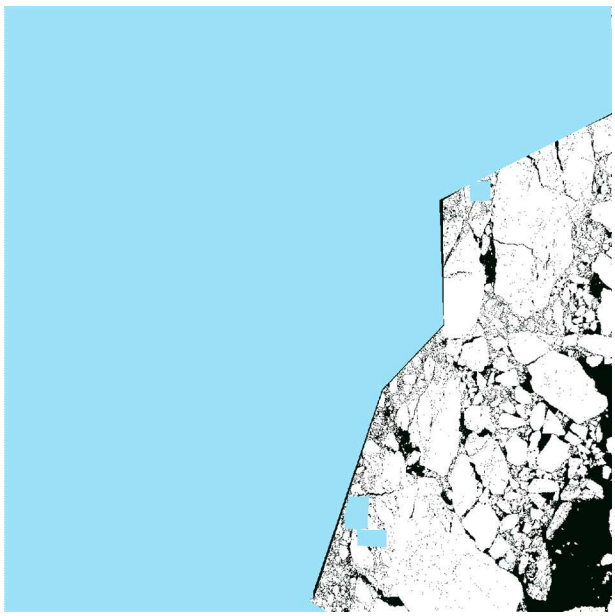
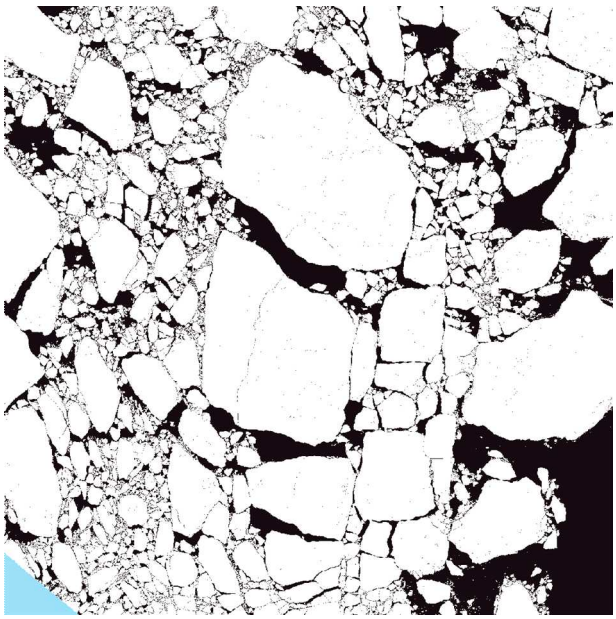


그림 41. 레퍼런스 구축 과정 요약 (a) raw Sentinel-2 이미지, (b) 임계값 기반 구분 결과, (c) K-means clustering 결과, (d) 최종 결과

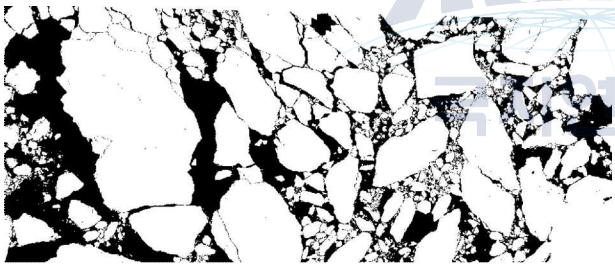
KOPRI 극지연구소



(a) scene #1



(b) scene #2

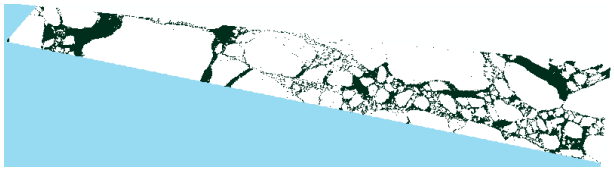


(c) scene #3

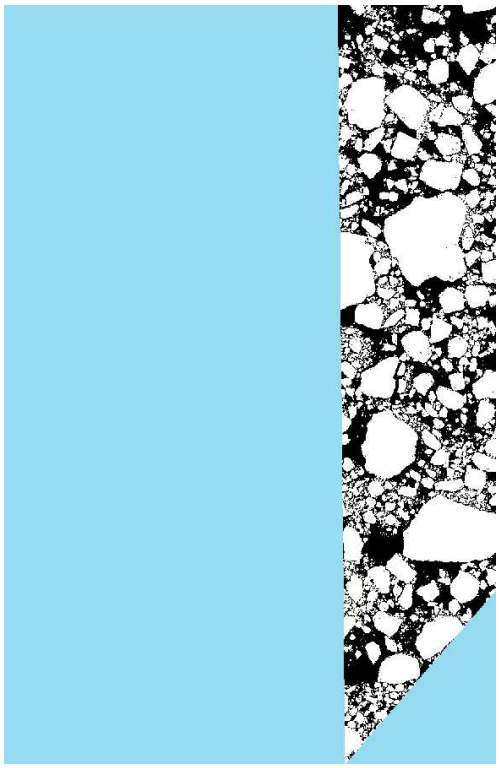


(d) scene #4

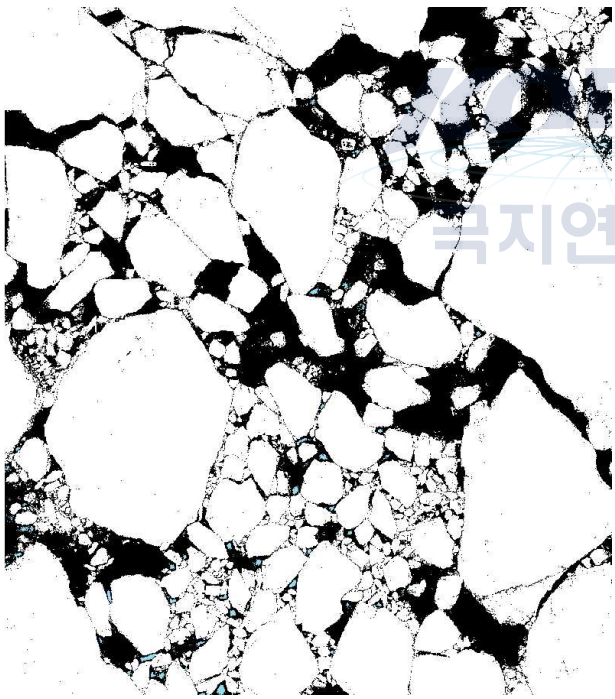
KOPRI 극지연구소



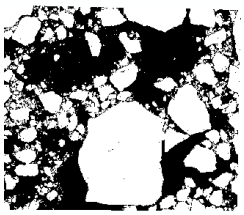
(e) scene #5



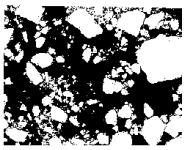
(f) scene #6



(g) scene #7







(h) scene #8

그림 42. 구축된 reference 자료 그림. 검은색은 바다, 흰 색은 얼음, 푸른색 및 투명한 색은 nan값을 의미함.

KOPRI 극지연구소

2) FFI 추정 알고리즘 개발

(1) FFI 추정 알고리즘 개발

- Sentinel-2 광학위성을 활용하여 레퍼런스 자료를 구축하였지만, 극지방의 특성상 구름의 영향을 받지 않는 자료를 취득하는 데에는 한계가 있음. 때문에, 광학위성보다 구름 등 기상 현상으로 인한 영향이 적은 수동 마이크로파 위성이 광학위성의 대안으로써 활용될 수 있음.

- AMSR2 수동 마이크로파 센서의 경우 6GHz부터 89GHz까지 다양한 파장대의 채널을 보유하고 있으며, daily 자료를 활용할 경우 북극 전 지역을 커버할 수 있다는 장점이 있음. 이러한 특성 때문에 극지방 원격탐사 연구에서 널리 활용되고 있으며, AMSR2 자료를 활용하여 SIC 등의 여러 산출물들이 산출되고 있음.

- FFI 추정 알고리즘은 앞선 1)FFI 지표 개발 및 레퍼런스 구축의 indexing 파트와 AMSR2 자료와 기계학습을 활용한 modeling 파트로 나뉨 (그림 43).

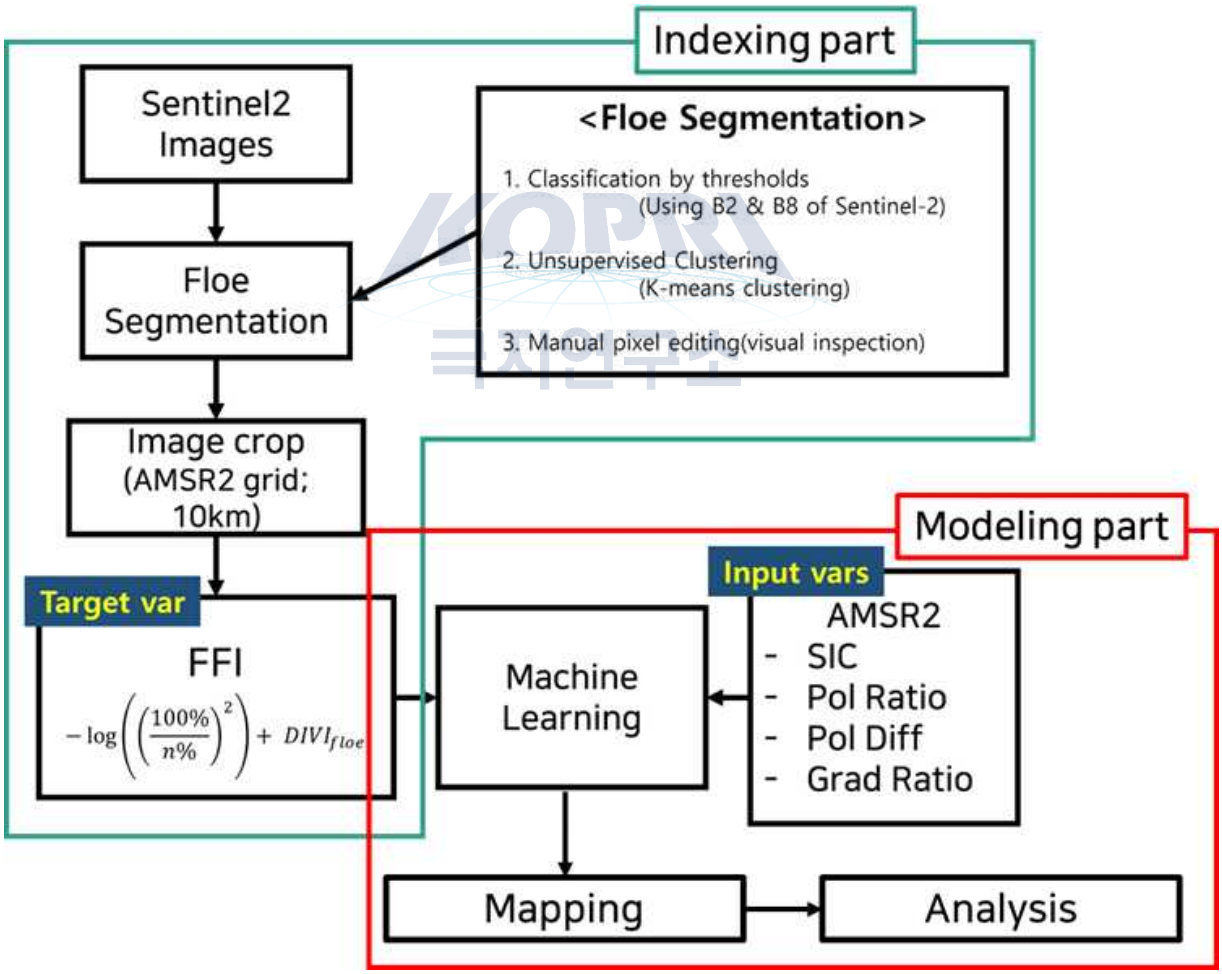


그림 43. FFI 추정 알고리즘 개발 흐름 모식도

- 레퍼런스 자료로부터 계산된 10km x 10km 그리드의 FFI를 종속변수로 두고 AMSR2 센서의 채널값들 중 10km 그리드 해상도에 가까운 채널들을 사용한 PD, PR, GR 값들을

입력변수로 사용하였음 (표 3).

표 3. FFI 모델링에 사용된 입력변수 표

Variable Name	Description
PD23	Polarization difference of 23.8GHz bands (Kelvin)
PD36	Polarization difference of 36.5GHz bands (Kelvin)
PD89	Polarization difference of 89,0GHz bands (Kelvin)
PR23	Polarization ratio of 23.8GHz bands (unitless)
PR36	Polarization ratio of 36.5GHz bands (unitless)
PR89	Polarization ratio of 89.0GHz bands (unitless)
GR2336V/H	Gradient ratio of 23.8GHz and 36.5GHz vertical/horizontal bands (unitless)
GR2389V/H	Gradient ratio of 23.8GHz and 89.0GHz vertical/horizontal bands (unitless)
GR3689V/H	Gradient ratio of 36.5GHz and 89.0GHz vertical/horizontal bands (unitless)

KOPRI 극지연구소

- 모델링에는 random forest (RF), gradient boosting (GB), support vector regression (SVR) 세 개의 모델을 테스트 하였으며, 결과를 산점도로 나타내었음 (그림 44).
- Rule based 모델인 RF와 GB 모델이 좋은 성능을 보여주었으며, GB가 RF보다 R2에서 0.27, RMSE에서 0.048만큼 더 좋은 성능을 보임.
- 위의 두 모델에 비해 SVR의 경우 상대적으로 낮은 성능을 보였는데, 각각의 변수들과 FFI 사이의 상관관계가 명확하지 않으며, 여러 변수들이 복합적으로 상관성을 띄고 있음을 의미함.

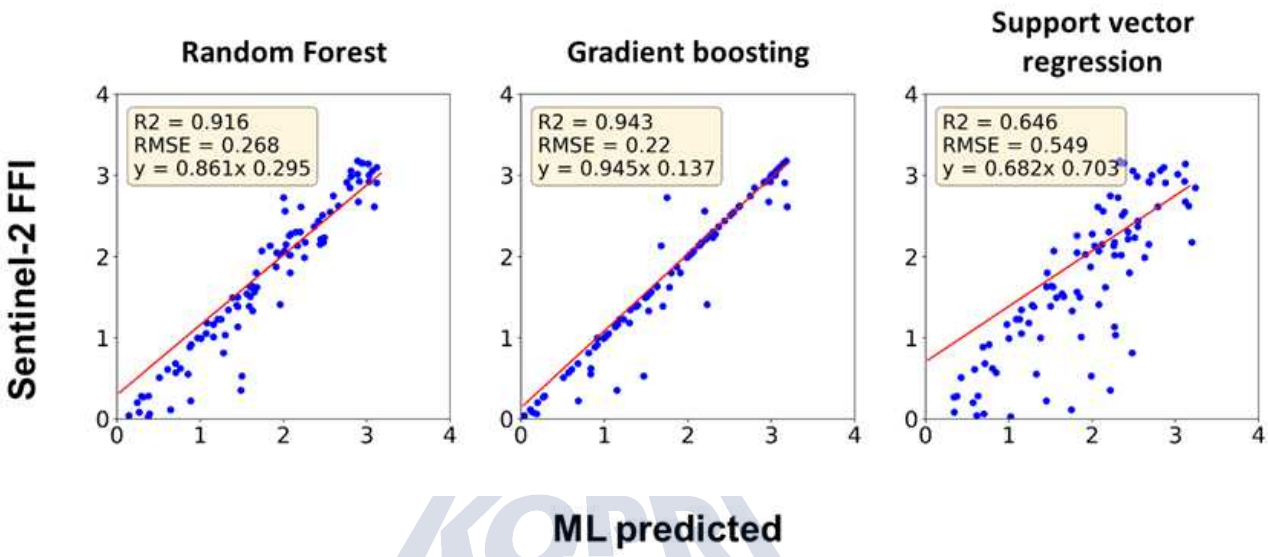


그림 44. FFI 추정 모델링 결과

KOPRI 극지연구소

- 가장 좋은 성능을 보인 GB 모델에 대해 각각의 변수들이 모델링에 어떻게 작용하였는지 확인하기 위하여 SHapley Additive exPlanations (SHAP) 분석을 수행함 (그림 45).
- 모든 변수들 중에서 GR값들이 대체적으로 높은 기여도를 갖고 있음을 확인할 수 있으며 상대적으로 PD값들이 낮은 기여도를 갖고 있음.
- GR 값들의 경우 그 값이 높을수록 얼음의 신호가 강하며, 그 값이 낮을수록 물의 신호가 강함을 나타냄. 그림 13에서 확인할 수 있듯이 낮은 GR 값들은 FFI가 높아지는 방향으로 forcing 하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 곧 유빙의 파편화 정도가 높은 것을 시사함. 그 반대의 경우인 높은 GR 값들에 대해서도 FFI가 낮아지는 방향으로 forcing 하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 유빙의 파편화 정도가 낮다는 것을 의미함.

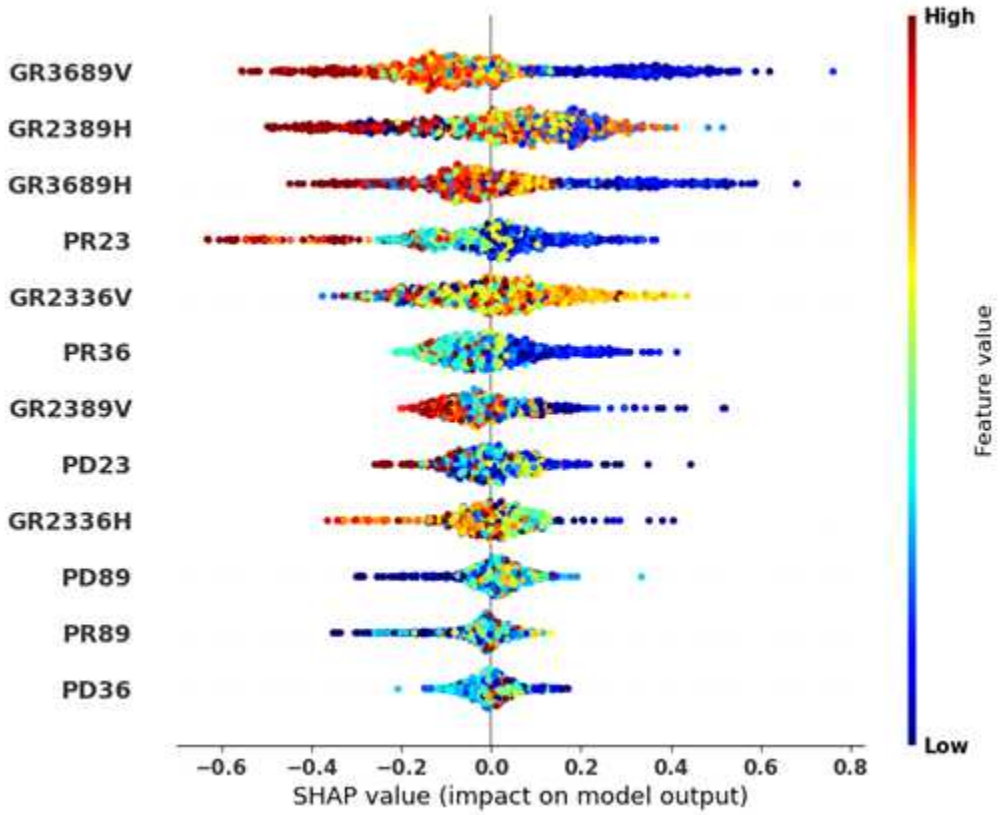


그림 45. GB 모델 변수들의 SHAP summary plot

(2) FFI 추정 알고리즘 평가

- 전 북극지역에 대하여 FFI의 공간적 패턴을 확인하기 위해 2018년 9월 9일부터 10월 24일까지 FFI 매핑을 수행하였음 (그림 46).
- 해당 기간은 간빙기가 끝나고 해빙이 다시 얼어붙는 시기로 해빙의 면적이 외곽에서부터 다시 넓어지는 것을 확인할 수 있음. 그와 동시에, 해빙영역의 가장자리부터 FFI 값이 점점 낮아지는 모습을 확인할 수 있음.
- 융빙호 등으로 인해 중간중간 FFI 값이 상승하는 경우도 있지만, 중앙보다 가장자리가 더 파편화되어 있는 모습을 확인할 수 있음.
- 또한 2018년 9월 9일에 해당하는 FFI 맵과 MODIS 광학위성을 보았을 때, 해빙이 잘게 파편화 되어 있는 지역은 FFI가 상당히 높은 값을 나타내고 있으며, 해빙의 파편화가 비교적 덜한 지역에 대해서는 낮은 FFI값을 유지하고 있는 것을 확인할 수 있음 (그림 47).

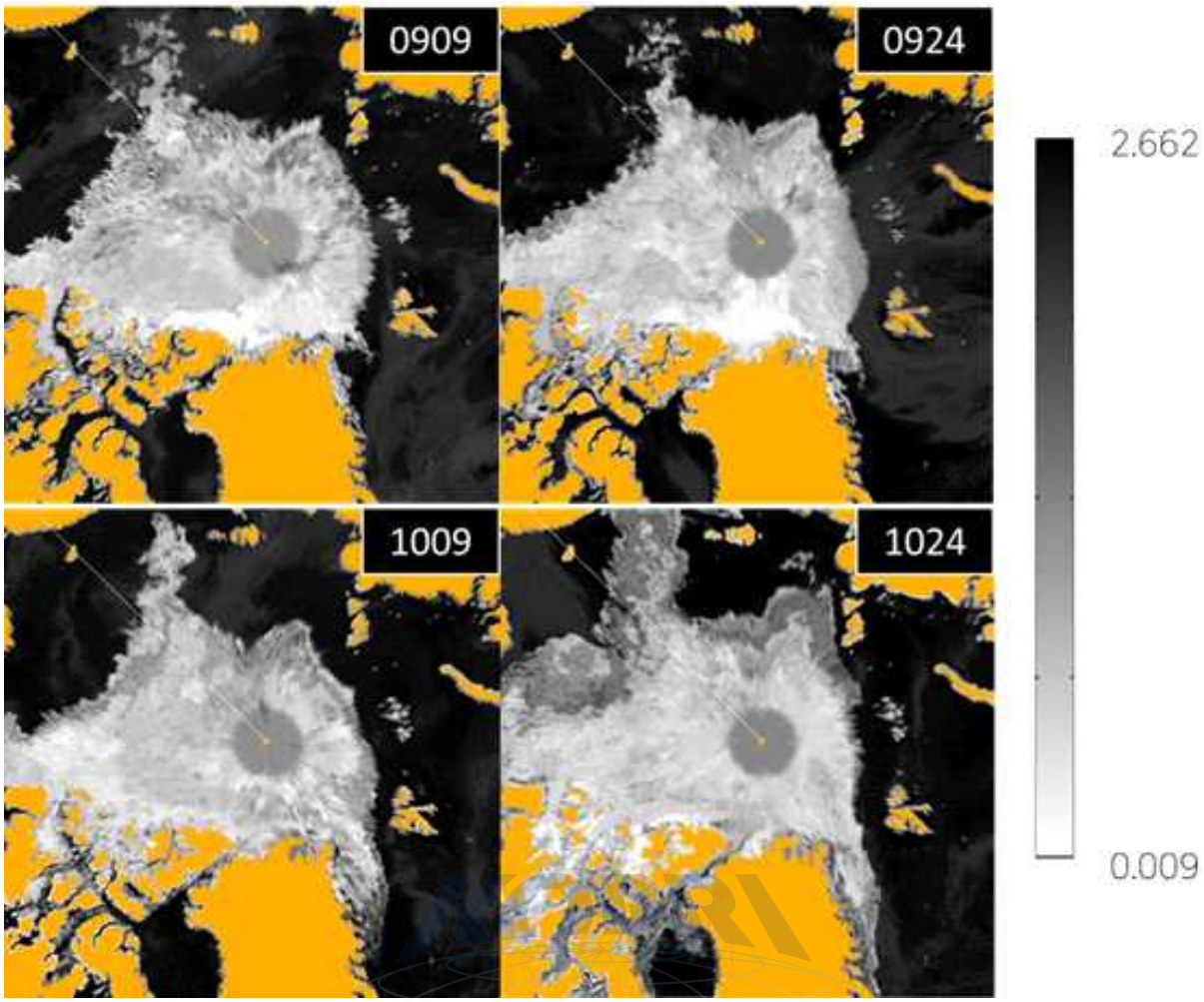
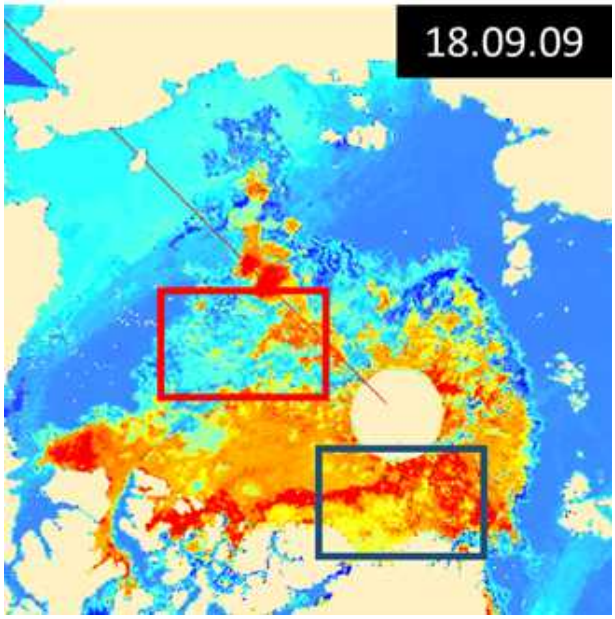
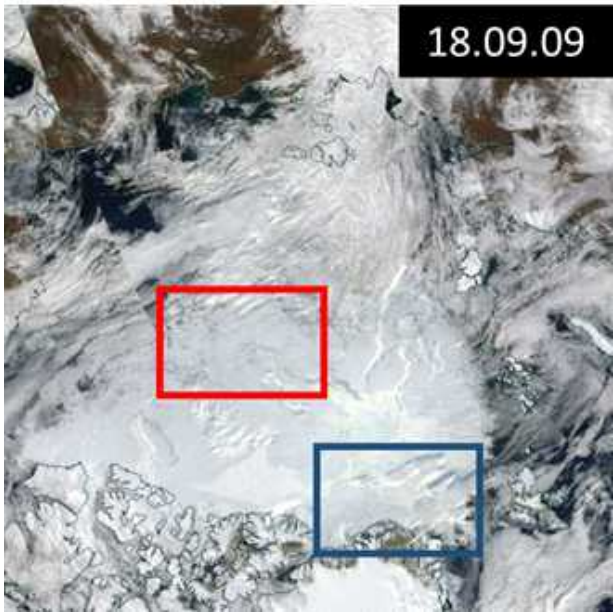


그림 46. 2018년 9월 9일부터 10월 24일까지의 FFI 공간 패턴



(a) FFI 지도 결과



(b) MODIS 광학위성 이미지



(c) (a),(b)에서의 빨간 상자 지역의 MODIS 이미지



(c) (a),(b)에서의 파란 상자 지역의 MODIS 이미지

그림 47. 2018년 9월 9일의 FFI 지도 결과 및 MODIS 광학위성 이미지

(3) FFI 인덱스를 통한 SIC 변동 예측 가능성 확인

- FFI와 SIC의 관계 확인을 위해 북극 해역들의 특성을 확인해 보았으나, 해빙의 이동이 많은 지역이 대부분이라, lateral melting에 의한 SIC 변화에 대한 검증을 하기가 쉽지 않음.
- 해역들 중 Siberian Shelf 지역에 있는 Laptev해와 East Siberian해의 경우 고착빙이 많고 북극점 방향으로의 해류가 있어, 해빙의 유입이 적은 지역이었고, 이에 Laptev해와 East Siberian해를 포함하는 영역을 검증지역으로 선정함 (그림 48).
- 선정된 연구지역에 대해 일평균 FFI와 SIC를 추출하여, Melting season인 6월-9월을 포함한 day of year (DOY) 150-240을 연구기간으로 선정하여 변동 트렌드 분석 수행을 진행함.
- 갑작스러운 SIC의 감소 이벤트와 이에 선행하는 FFI 변동추이의 확인을 통해 관계성을 알아보려 하였고, FFI와 SIC 모두 melting season 기준의 최소/최대값 기준에서의 트렌드값과 일별 변화폭을 평균한 변동 변수를 기준으로 특이 이벤트를 선정함.
- 2018년과 2020년에서는 SIC의 갑작스러운 감소가 확인되었는데, 이 기간 직전까지 FFI값의 비정상적인 상승이 관측됨 (그림 49a,c).

- 2019년에는 SIC의 갑작스러운 감소와 FFI의 비정상적인 상승이 동시에 관측이 되었고, 이후, FFI가 높은 값을 유지한 뒤 갑작스러운 SIC의 감소 이벤트가 확인됨 (그림 49b).
- 2021년에는 SIC의 갑작스러운 감소보다 FFI의 비정상적인 상승이 선행이 되었으나, 겹치는 기간이 많았던 것을 확인함 (그림 49d).
- 2018년과 2020년 사례를 통해, FFI의 비정상적인 상승을 통해 갑작스러운 SIC의 감소의 예측성을 확인할 수 있었고, 2019년 사례를 통해, FFI의 값이 높게 유지가 되는 상황을 통해서도 SIC의 감소 예측성을 확인할 수 있었음.
- 2019년과 2021년에는 연구지역의 겨울기간에 warm anomaly가 확인이 되었고, 이에 따라 초년빙 비율이 많아져 해빙의 파편화에 따라 lateral melting이 즉시적으로 발생한 결과로 유추할 수 있어, 직전 겨울의 기온 및 해빙상태에 대한 고려가 복합적으로 필요할 것으로 보임.



그림 48. FFI 인덱스를 통한 SIC 변동 예측 가능성 확인을 위한 연구지역. Siberian Shelf 지역의 Laptev해와 East Siberian해를 포함하는 지역.

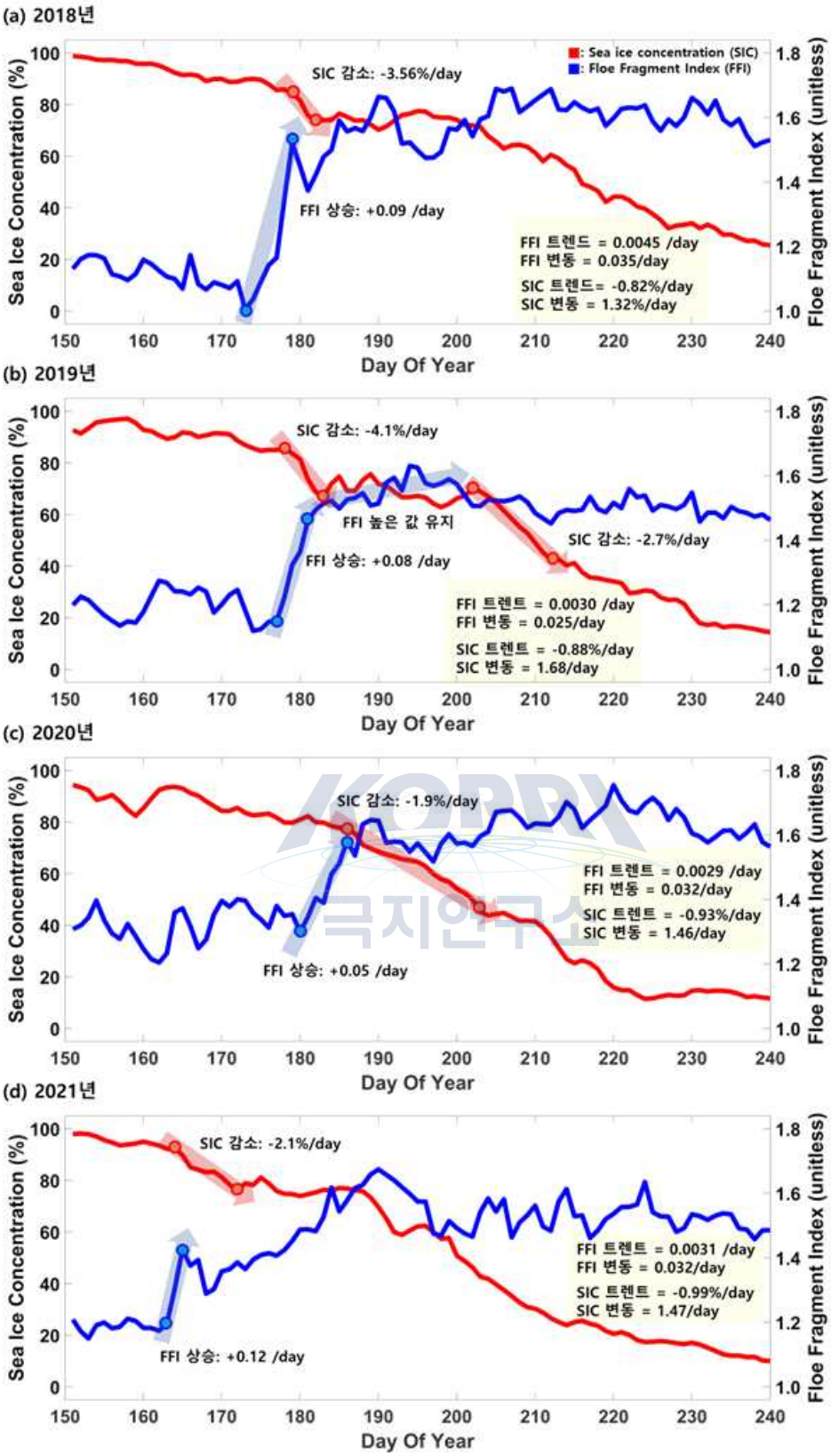


그림 49. 연구지역에 대한 FFI와 SIC의 일평균 변화 그래프. (a)2018년, (b)2019년, (c)2020년, (d)2021년.

2차년도) FFI 시공간 패턴 분석

1) FFI 추정 알고리즘 개선

(1) SAR 자료를 활용한 추가 FFI 레퍼런스 구축

- 1차년도의 FFI 추정 알고리즘을 개발하기 위해서 구축된 레퍼런스는 Sentinel-2 광학위성 자료 기반의 자료임. 광학위성 자료를 활용하여 레퍼런스를 구축할 경우 비교적 정확하게 물과 얼음을 구분해 낼 수 있는 장점이 있음. 하지만, 구름의 영향을 크게 받기 때문에 영상을 취득하는 데에 어려움이 있으며, 하나의 샘플을 만들 때에 소요되는 시간이 매우 큼. 이를 해결하고자, 구름의 영향을 받지 않는 Synthetic Aperture Radar (SAR) 영상을 활용하여 레퍼런스를 구축하고자 함.

- SAR 영상은 speckle 노이즈라는 특유의 잡음이 섞여 있음. 때문에, 레퍼런스 구축에 활용하기 위해서는 적절한 전처리 과정이 필수임. SAR 영상의 전처리는 사용되는 파라미터들에 따라서 그 결과 값이 달라지기 때문에, 연구자에 따라서 그 방법이 상이함. 따라서, 선행연구들을 조사하여 적합한 SAR 영상 전처리 방법을 벤치마킹하고자 함.

- Khaleghian 외 (2021)은 Sentinel-1 SAR 영상과 Convolutional Neural Network (CNN)을 활용하여 sea ice 분류 연구를 수행하였음. SAR 영상을 전처리 하기 위하여 European Space Agency (ESA)에서 제동하는 Sentinel 위성 처리 프로그램인 SeNtinel Application Platform (SNAP)을 사용하였으며, 다른 처리 작업 없이 thermal noise removal 알고리즘만 활용하였음. 해당 SAR 영상 샘플들을 아카이브에 공유하였으며, 쉽게 다운로드할 수 있음. 하지만 처리가 완료된 샘플을 확인했을 때, SAR 영상의 노이즈가 완전히 제거되지 않은 것을 확인할 수 있으며, 해당 부분에 대하여 추가적인 전처리 작업이 필요할 것으로 사료됨 (그림 50).

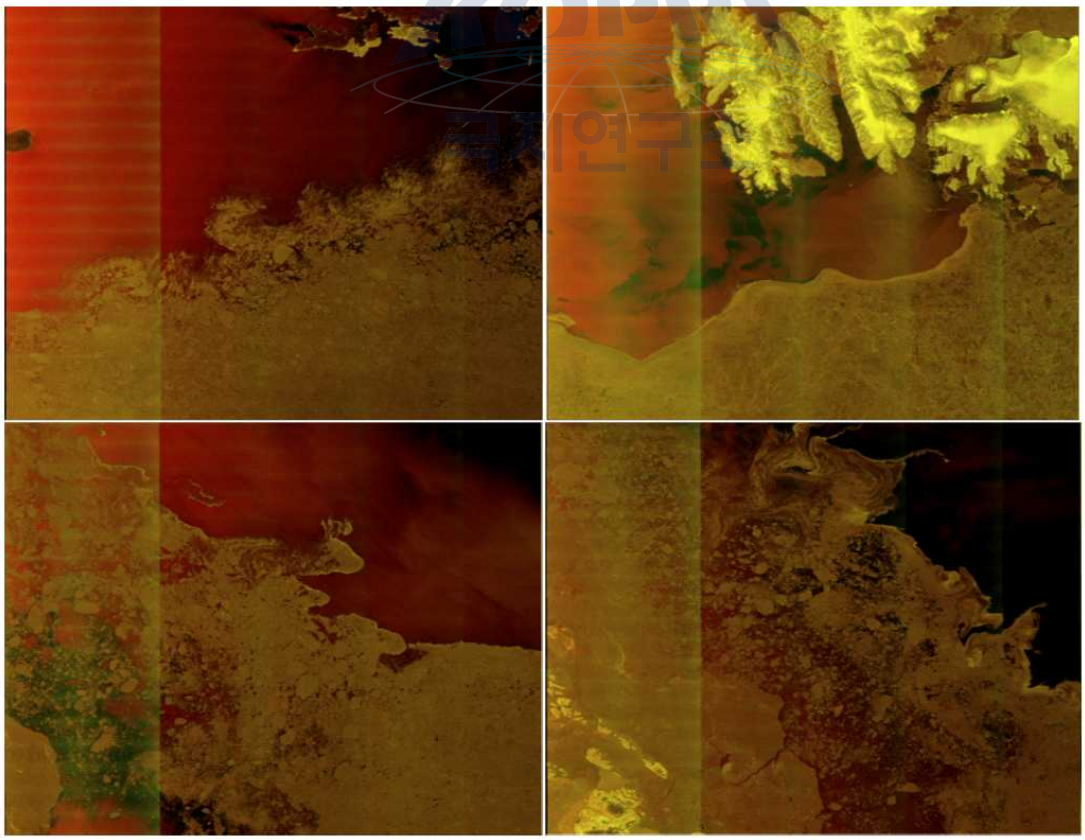


그림 50. SNAP을 통한 thermal noise removal만 적용된 SAR 영상 전처리 결과, 수직선의 형태로 아직 SAR 영상의 잡음이 남아있는 것을 확인할 수 있음. (출처:Khaleghian 외 2021)

- Song 외 (2021)은 SAR 영상과 Residual Neural Network가 (RNN) 및 Long Short-Term

Memory (LSTM) 기법을 활용하여 sea ice 분류를 수행하였음. SAR 영상자료는 Sentinel-1 위성 영상을 사용하였으며, 허드슨 만 지역에 대한 시계열 자료를 사용함. Khaleghian 외 (2021)과 마찬가지로 SNAP 프로그램을 사용하였지만, thermal noise removal 뿐만이 아니라, radiometric calibration, range-Dopple and terrain correction 등의 추가 보정 작업을 수행함. 하지만 그림 51에서 확인할 수 있듯이 여전히 영상기준 subswath 사이 수직선의 형태로 SAR 잡음이 남아있는 것을 확인할 수 있어서 입사각 보정 등의 추가 작업이 필요할 것으로 사료됨.

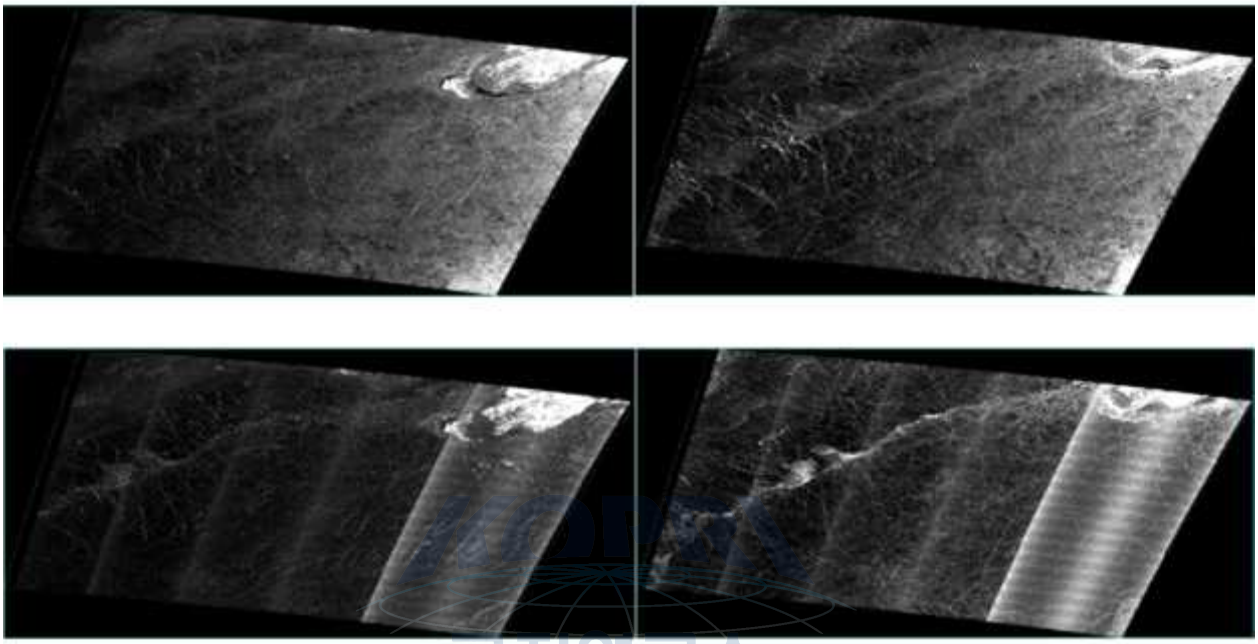


그림 51. 전처리가 완료된 HH 이미지 (위) 및 HV 이미지 (아래). 수직선 형태의 잡음이 여전히 존재하며, 특히 HV 이미지에서 잡음이 상당 부분 남아있음. (출처:Song 외 2021)

- Park 외 (2020)은 SAR 영상을 활용한 sea ice type 분류 연구를 수행함에 있어, Sentitnel-1 SAR 영상의 denoising 방법을 공유함. Park 외 (2018), Park 외 (2019)와 Korosov 외 (2022)에서 개발한 thermal noise removal 및 textual noise removal를 활용하여 잡음을 제거하였으며, 이후 입사각 보정 및 텍스처 특성 계산을 통해, SAR 영상으로부터 물과 얼음을 구분할 수 있게 함. Open ocean과 Pack Ice 사이의 입사각에 따른 후방산란계수 차이로부터 기인하는 잡음들을 보정함으로써 앞의 두 연구들에서 확인할 수 있었던 subswath 사이 수직선 형태의 잡음들이 상당수 제거된 것을 확인할 수 있음 (그림 52, 53). 또한 파이썬 환경에서 사용할 수 있도록 파이썬 패키지와 예제 코드들을 github를 통하여 공유함.

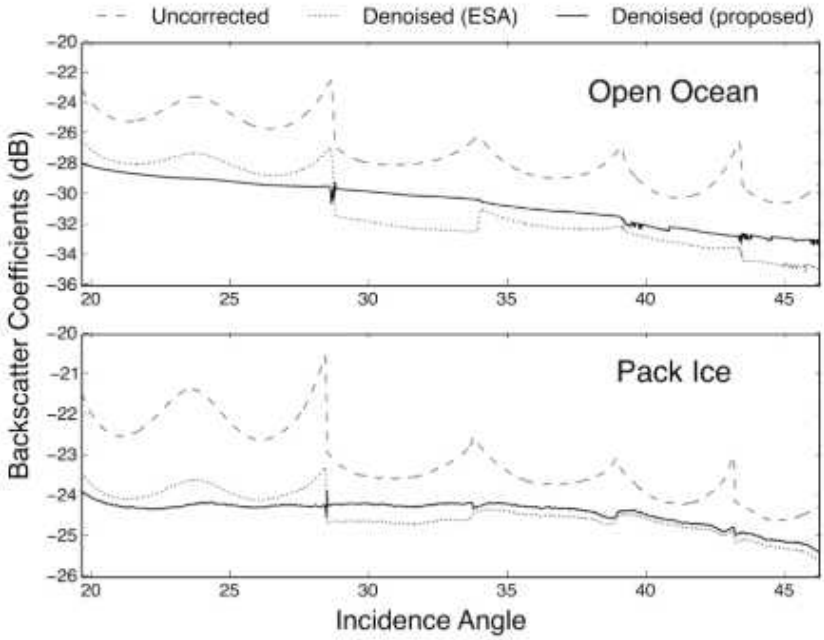


그림 52. 입사각에 따른 후방산란계수 차이를 보정한 결과. Denoising 이전 및 기존 ESA의 denoising 결과와 비교 하였을 때 상당한 개선이 이루어진 것을 확인할 수 있음. (출처:Park 외 2018)

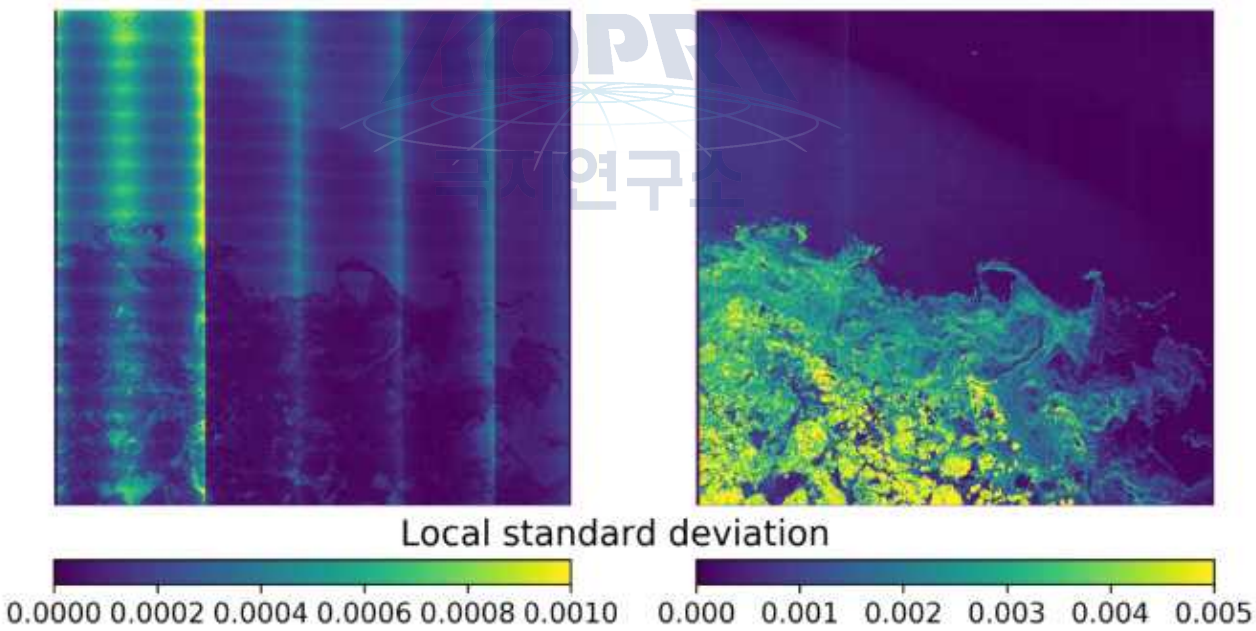


그림 53. Textural noise correction이 적용된 결과. 앞선 두 연구들에서 확인되었던 수직선 형태의 잡음이 거의 사라진 것을 확인할 수 있음. (출처:Park 외 2019)

- Park 외 (2020)이 제시한 SAR 영상 전처리에 사용된 파이썬 패키지들은 쉽게 적용이 가능하며, 실제 Sentinel-1 SAR 영상에 적용하여 전처리 전과 후의 영상을 비교함 (그림 554). 원본 영상과 비교하여 단순히 denoising만 적용했음에도 불구하고 상당수의 speckle 잡음과 subswath 사이에서 발생하는 수직선 형태의 잡음이 사라진 것을 확인할 수 있음. 추가로 간단한 임계값을 적용하여 이진분류를 수행할 경우 얼음과 물이 비교적 명확하게 구분되나, 광

학위성 기반 레퍼런스와 마찬가지로 여러 픽셀 단위로 유빙들이 이어져 있어 FFI를 계산하기 위해서는 추가 과정이 필요함.

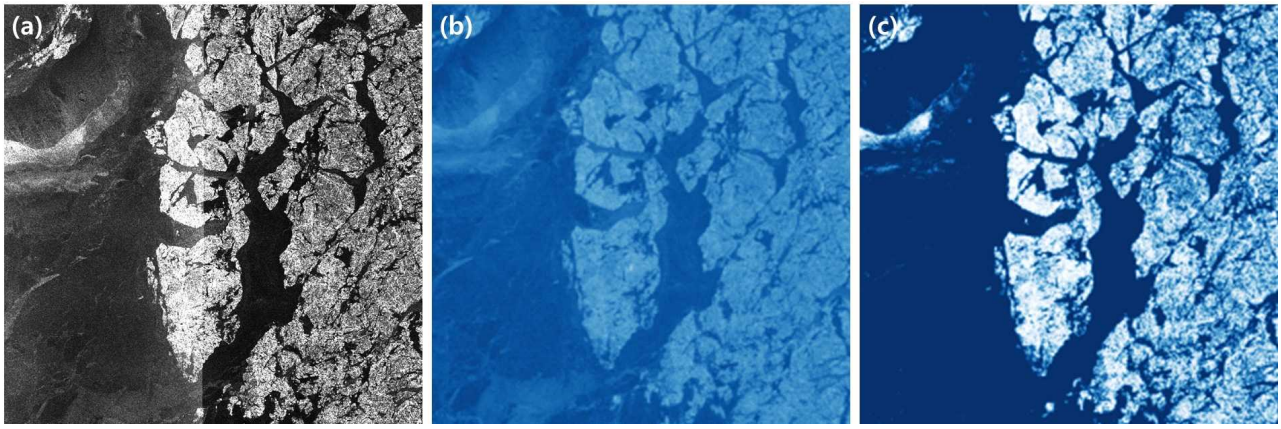


그림 54. Sentinel-1 SAR 영상 denoising 결과 비교 그림. (a) raw SAR 영상, (b) 1차 denoising 결과, (c) 임계값 적용 결과.

- 여러 개의 객체를 분리해내는 방법 중 한가지인 K-means clustering을 테스트함. K-means clustering은 주어진 데이터를 k개의 군집으로 나누는 비지도 학습 알고리즘이며, 각 군집은 중심점을 기준으로 데이터를 그룹화한뒤 중심점을 반복적으로 업데이트함. 군집 내 데이터의 거리 차이를 최소화하는 방식으로 최적화함. 입력자료로써 denoising된 HH, HV polarization 데이터를 사용하였으며, 그 결과는 그림 55과 같음. 세 개의 클래스로 클러스터링한 결과, 유빙임에도 불구하고 SAR 신호의 차이로 인해 다른 클래스로 구분이 되는 것을 확인할 수 있음. 2번과 0번 클래스를 얼음이라고 분류 했을 때에, 가장 잘 구분이 되는 것으로 보이지만, 여전히 여러 픽셀을 통해 유빙들이 연결되어 FFI를 계산하기에 어려움이 있음.

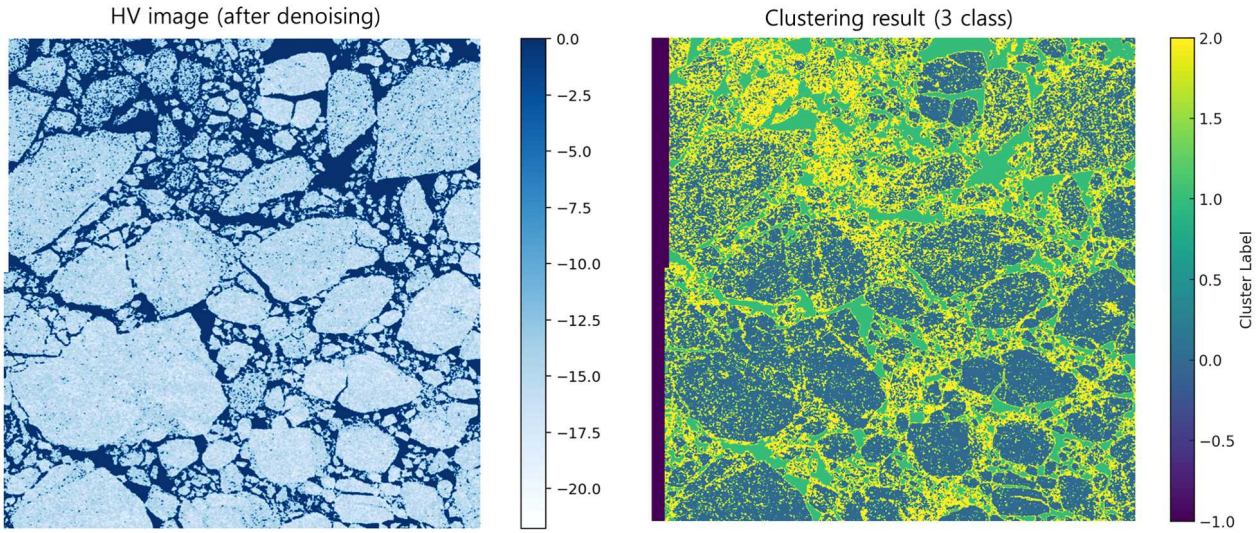


그림 55. K-means clustering에 사용된 (좌) denoising된 HV 이미지와 (우) K-means clustering의 결과

- 위와 같은 k-means clustering 결과는 같은 얼음일지라도 SAR 신호에 차이가 존재하기 때문임 (그림 56). 특정 임계값을 기준으로 denoising된 SAR 이미지를 0과 1로 이진분류하였을

때, 얼음이 작고 신호가 약한 지역은 유빙에서 상당한 양의 구멍들을 확인할 수 있으며, 그렇지 않은 지역은 상대적으로 깨끗하게 이진화되는 것을 확인할 수 있음. 때문에 얼음이 작고 신호가 약한지역은 K-means clustering을 수행하였을 때에, 얼음보다는 오히려 물로써 판단이 되는 경우가 발생함. 따라서, K-means clustering 기법만으로는 SAR 영상 내의 얼음의 객체 분리에는 효과적이지 못한 것으로 판단됨.

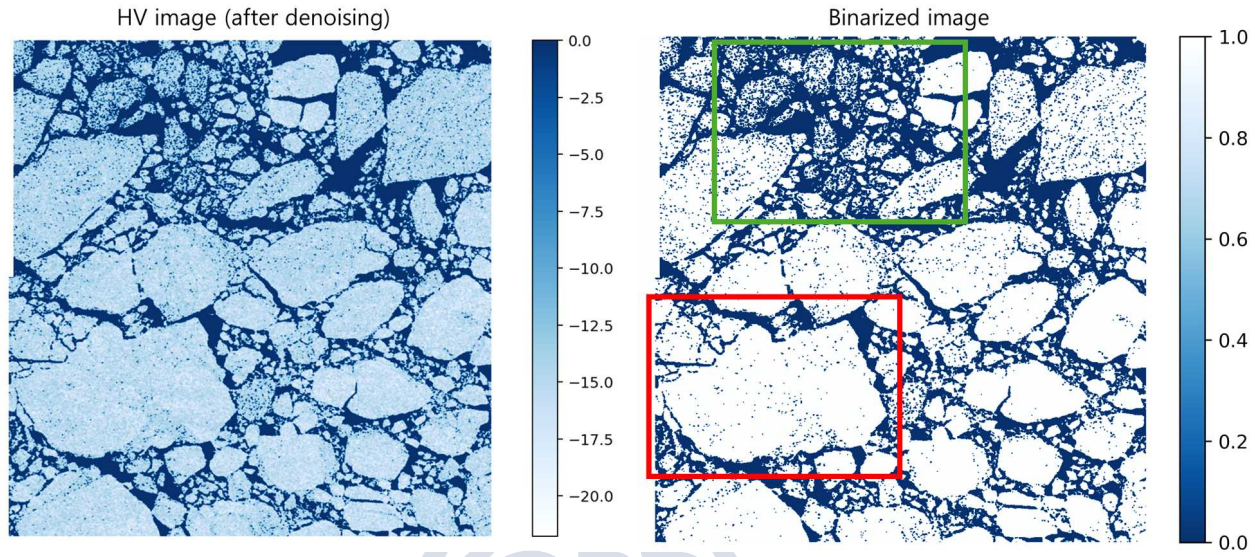


그림 56. K-means clustering에 사용된 (좌) denoising된 HV 이미지와 (우) 값 -15 기준으로 이진화한 이미지. 초록상자 지역이 상대적으로 얼음의 신호가 약한지역을, 붉은상자 지역이 상대적으로 얼음의 신호가 강한지역을 나타냄.

KOPRI 극지연구소

- SAR 이미지 내에서 보다 효과적으로 객체분리를 해내기 위해서 morphology 연산을 수행하였음. morphology 연산은 이미지 처리에서 물체의 형태나 구조를 기반으로 변형을 가하는 방법이며, 이진화된 이미지에 적용할 수 있음. 노이즈 제거, 영역확장 또는 축소 등을 수행할 수 있으며, kernal size와 iteration을 변경해가면서 최적화 작업을 수행할 수 있음.

- 객체를 효과적으로 분리해내기 위해 erosion 연산을 수행하고자 하였음. erosion 연산은 물체의 경계를 깎아내는 연산이며, 적은 픽셀들로 연결되어 있는 유빙들을 깎아내는데 효과적으로 작용함. 또한, 구조 요소의 모양을 사각형, 타원형, 십자형등의 다양한 형태로 구성할 수 있으며, 모든 방향에서 균일하게 침식시키는 사각형 커널 내신 대각선 방향을 덜 침식시키는 십자형 커널을 적용하고자 하였음. 최적의 kernal size와 iteration을 얻기 위해 테스트를 수행하였음 (그림 57, 58). Kernal size와 interation을 과도하게 설정할 경우, 깎여나가는 얼음의 양이 많아 FFI가 과대추정될 수 있으며, 계절 해역에 따라서 가장 적합한 kernal size와 iteration이 다름.

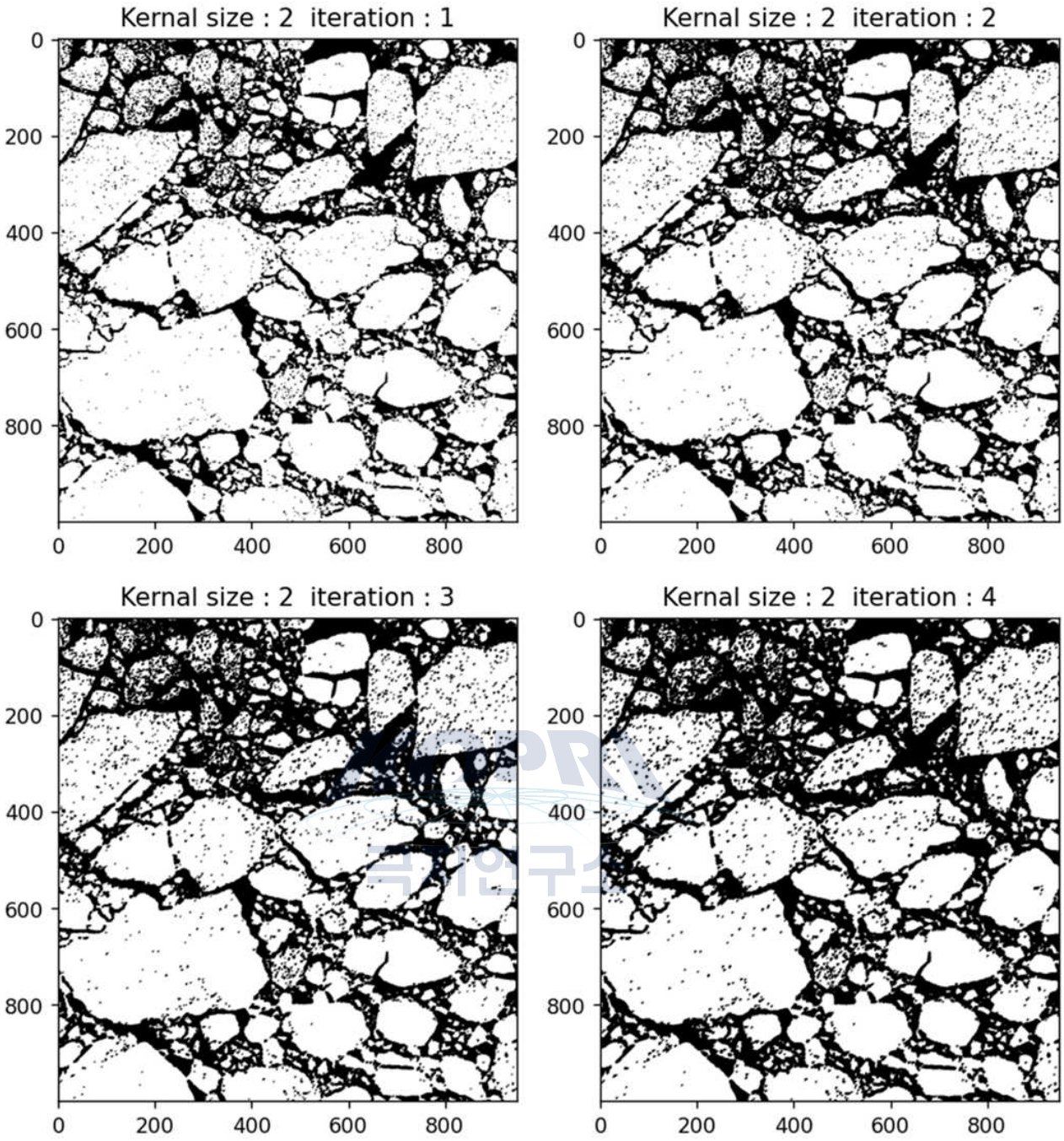


그림 57. Kernal size를 2로 지정한 erosion 연산 적용 결과

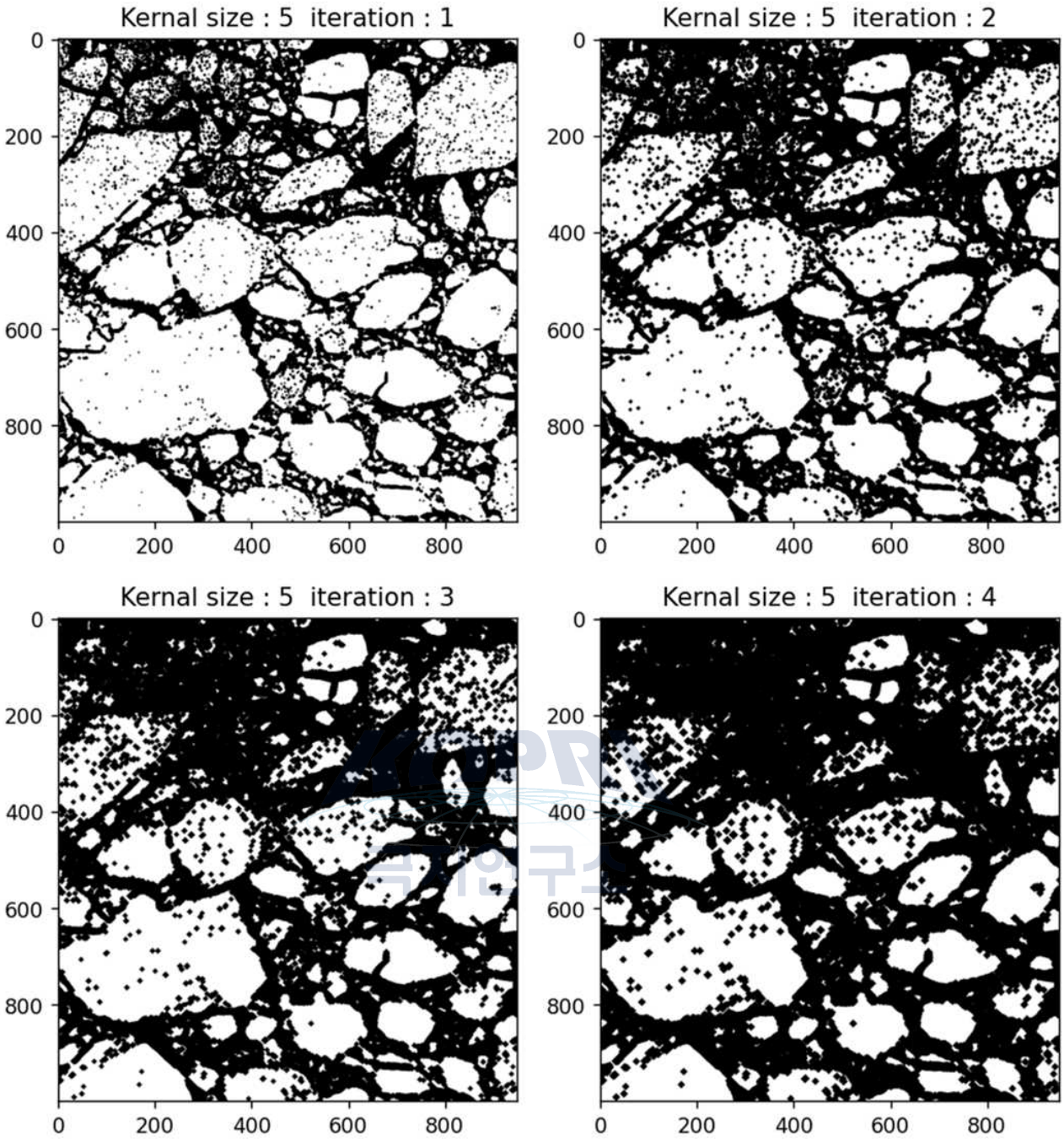


그림 58. Kernal size를 5로 지정한 erosion 연산 적용 결과

- 그림 57의 경우 얼음 객체들이 적절히 분리되고 있으나, 그림 58는 iteration이 거듭될수록 상당량의 얼음이 사라지는 것을 확인할 수 있음. 때문에 케이스별로 추가 검수 과정을 거쳤으며, 총 16개의 케이스에 대하여 추가 참조자료를 확보 하였음 (그림 59, 60).

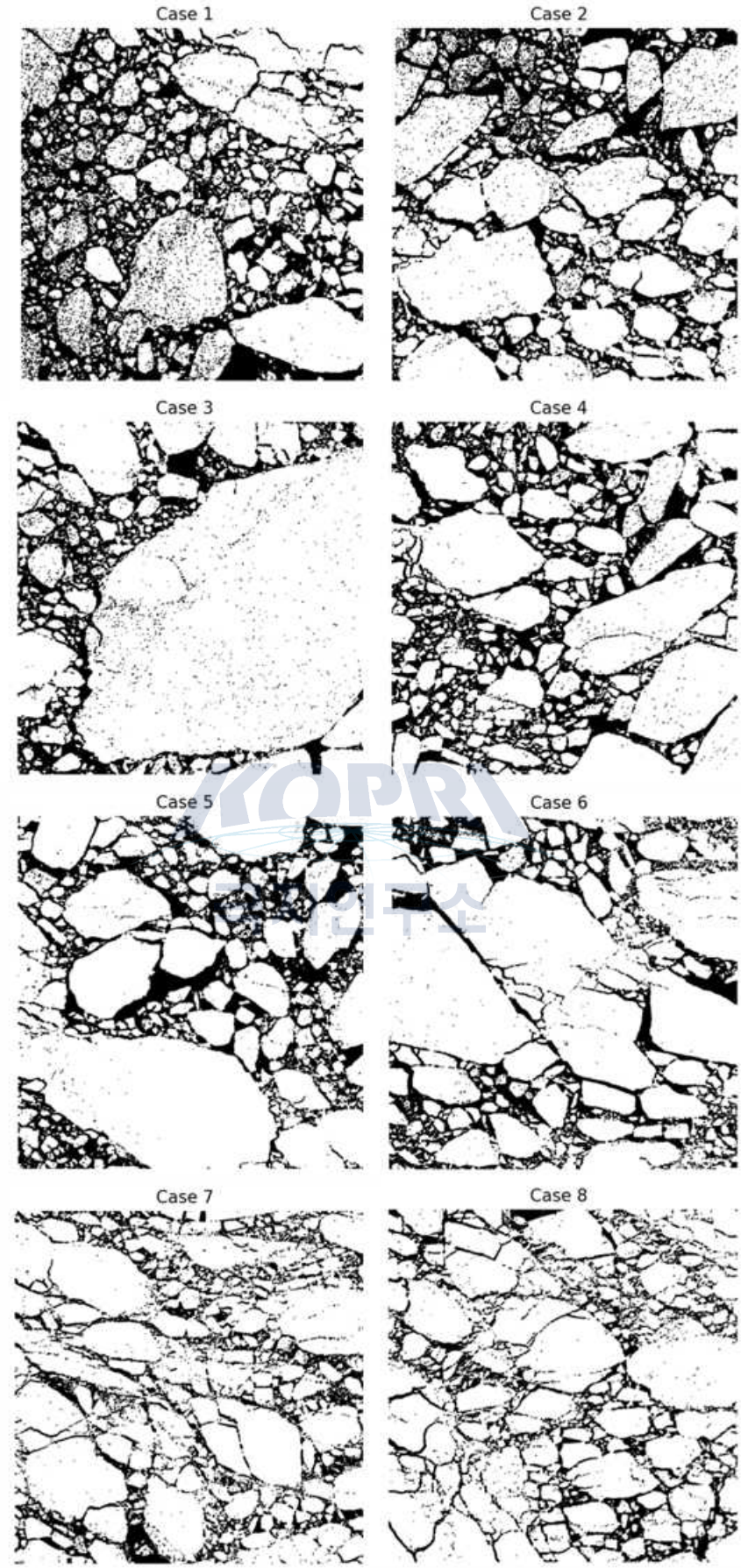


그림 59. 추가 구축된 FFI 레퍼런스 case 1~8

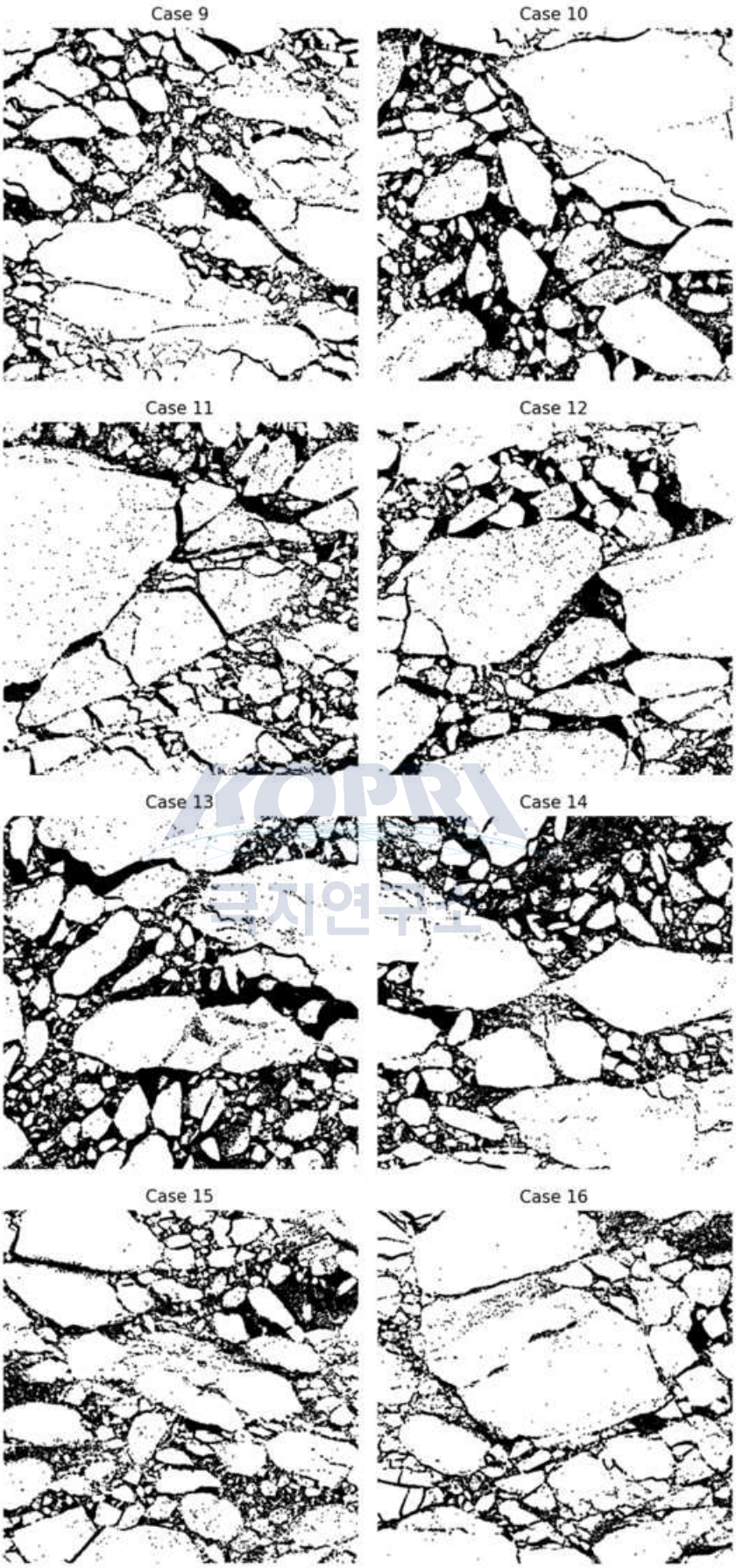


그림 60. 추가 구축된 FFI 레퍼런스 케이스 9~16

(2) FFI 추정 알고리즘 개선 및 결과 분석

- 추가된 SAR 기반 FFI 레퍼런스들을 활용하여 1차년도에 개발된 FFI 추정 알고리즘 중 가장 좋은 성능을 보인 스킴을 활용해 (Gradient boosting 모델, PD·PR·GR 변수 사용) FFI를 추정하였음 (그림 61). 비교군으로 SAR 기반 FFI 레퍼런스 자료를 사용하지 않은 모델을 사용하였음.

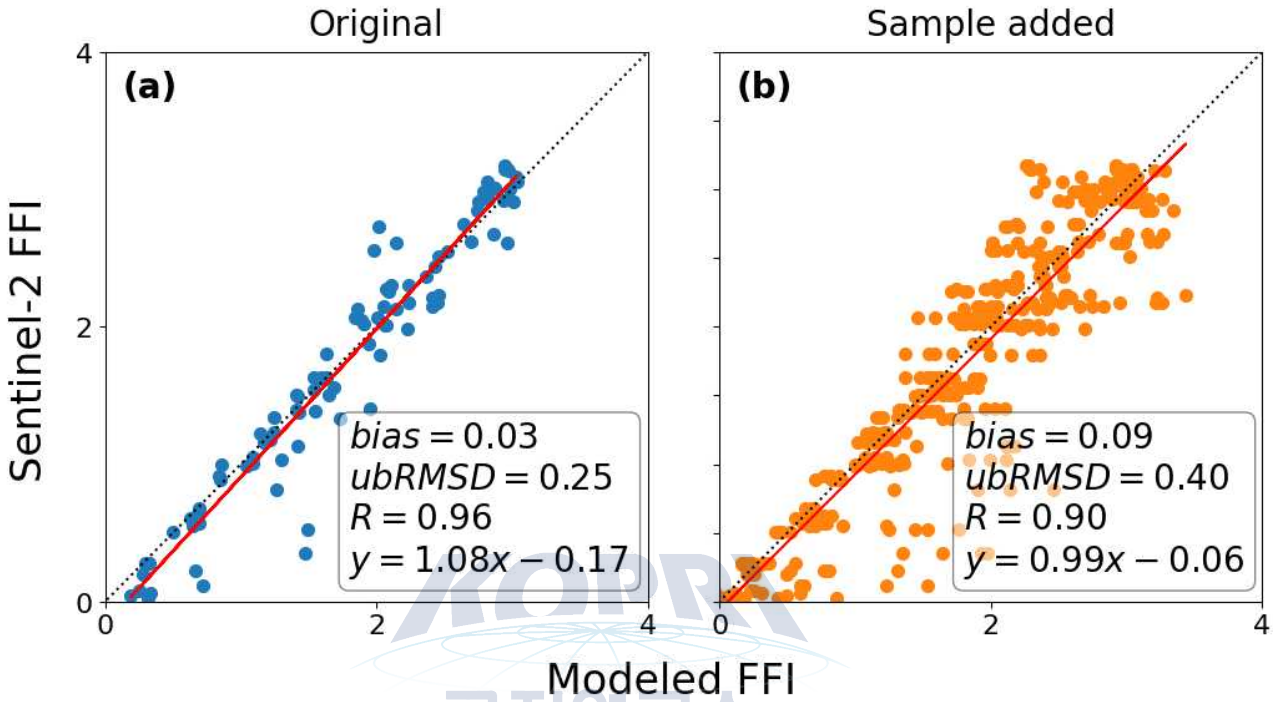


그림 61 (a) 기존 1차년도 FFI 추정 알고리즘 결과 및 (b) SAR 기반 FFI 레퍼런스가 추가된 FFI 추정 알고리즘의 결과

- 샘플이 추가된 모델 (S2)가 기존 1차년도의 모델 (S1)에 비해서 bias, ubRMSD, R 측면에서 상대적으로 낮은 성능을 보이고 있음. 하지만, 해당 수치들이 큰 차이를 보이고 있는 것은 아니며, 샘플 수의 추가로 인해 예상된 결과임. S2는 S1에 비해서 더 넓은 범위의 예측 값 범위를 보이고 있으며, 이는 이전에 비해 샘플의 계절 및 해역이 다양해졌기 때문에 발생한 결과로 판단됨. 상대적으로 낮은 값의 범위에서는 높은 값의 범위에서와 달리 과대추정하는 경향이 있는 것을 확인함. 이는 morphology 연산으로 인해 큰 크기의 유빙에 존재하는 meltpond 등이 확장되어 발생한 결과임.

2) FFI 시공간 패턴 분석

(1) FFI 공간 패턴 세부 분석

- FFI는 북극 중심부에서 외곽으로 향할수록 그 값이 높아지는 경향을 나타내며, 주변부에 비해서 FFI가 상대적으로 높다면 더 빨리 녹아 없어짐. 하지만 FFI가 높음에도 불구하고 해빙이 녹아 없어지지 않는 지역이 존재하며, 해당 지역은 북극 중심부와 Laptev 해역 경계에 위치함 (그림 62). 또한 같은 지역 내에서도 여름이 심화될수록 중심부(고위도)에 비해 더 높은

FFI 값을 가지는 가장자리(저위도)가 존재하는 것을 확인했으며, 해당 지역은 Beafort 해역에 위치함.

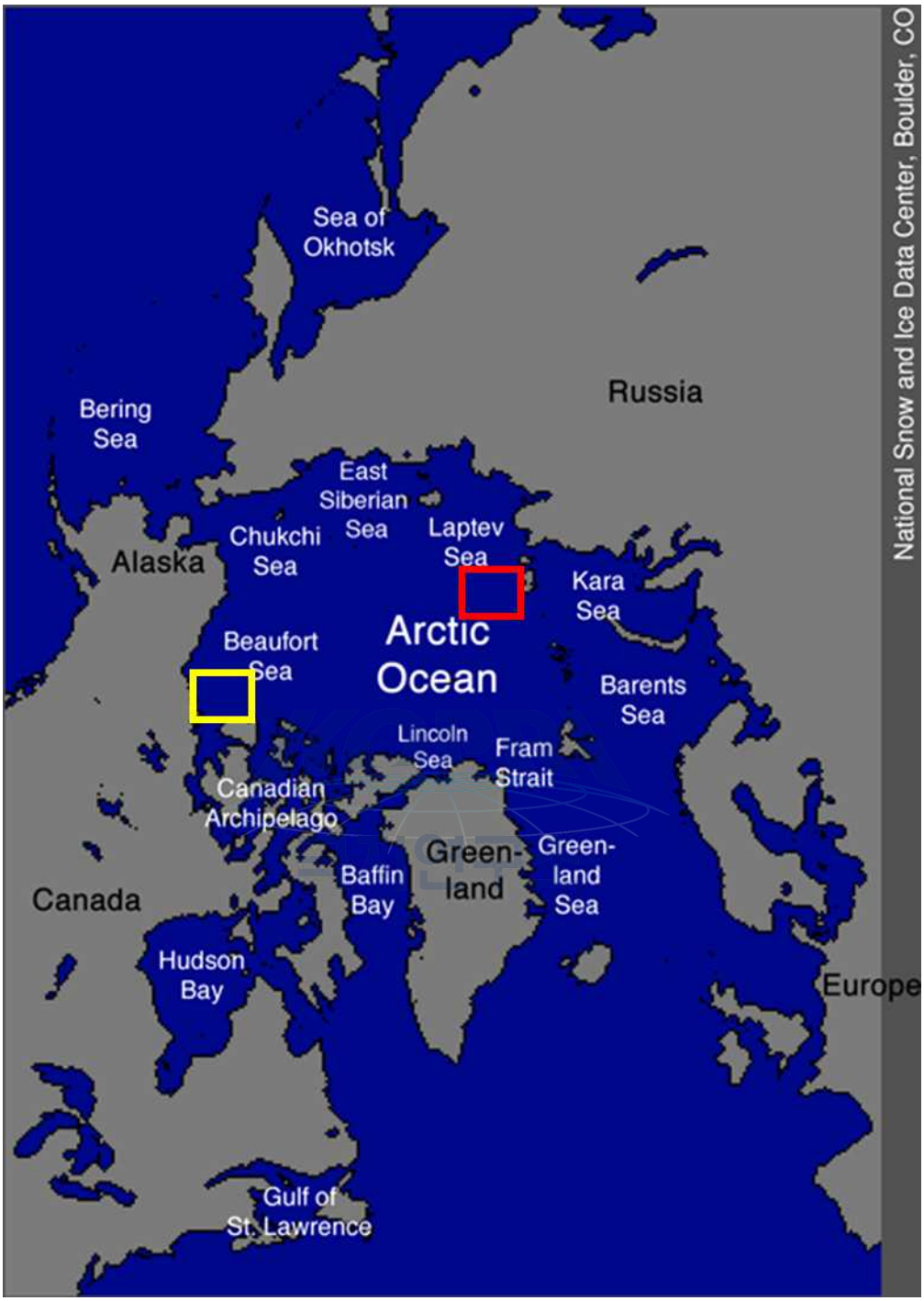


그림 62. FFI 공간 패턴 세부분석을 위한 연구 지역 그림. 붉은 상자는 FFI가 높음에도 불구하고 해빙이 녹아 없어지지 않는 지역, 노란 상자는 다른 지역에 비해 독특한 공간 패턴을 보이는 지역임.

- 첫번째 사례에 대해 MOderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 광학 영상도 함께 활용하여 세부 분석을 수행하였음 (그림 63). 2020년 6월 15일 기준 FFI의 공간분포는 그림의 중간지역에서 주변지역에 비해 상대적으로 높은 값을 보이고 있으며, MODIS 영상 상에서도 상당히 파편화 되어 있는 것을 확인할 수 있음. 하지만 약 한 달 후인 7월 8일

기준으로 높은 값의 분포를 보였던 중앙지역에 비해 주변부의 FFI가 더 높은 값을 보였으며, 8월 4일에는 다시 중심지역의 FFI가 상승하며 주변부의 해빙이 녹아 없어짐. 이러한 공간 패턴이 나타내는 이유를 분석하기 위해 북극지역 해류와 관련된 선행연구를 확인하였음 (그림 64). Zhang 외 2022는 1979년부터 2019년까지의 sea ice motion 산출물들과, ERA-5 자료를 비롯한 여러 재분석 자료를 활용하여 대기순환 변수와 sea ice motion간의 상관성을 분석하였음. 여름철 북극에서 Dipole Anomaly (DA), Central Arctic Index (CAI), Beaufort High (BA)가 극단적인 음의 위상을 갖고 있을 때 (표준편차가 1보다 클 때), Transpolar Drift Stream (TDS)가 상대적으로 약해지는 것을 확인하였음. TDS가 상대적으로 약해짐에 따라서 해빙의 움직임이 Fram strait으로 빠져나가는 방향이 아닌 반시계 방향으로 움직이는 것을 확인할 수 있음. 음의 위상을 갖는 AO가 이를 약화시킬 수 있지만, Wu 외 2006이 이 지역에서의 TDS에 따른 해빙의 이동은 AO 보다는 DA에 의해서 설명될 수 있음을 밝힘. DA는 이 지역에서 강력한 남북풍을 유도하며, 이에 따라 북극 중심부에서 외곽지역으로의 해빙의 움직임이 발생할 수 있음. 때문에, 그림 64 기준으로 왼쪽에서 오른쪽으로 해빙이 계속해서 움직이고 있으며, 이에 따라 높은 FFI값을 보임에도 불구하고, 먼저 녹지 않고 얼음이 남아있는 것을 확인할 수 있음.

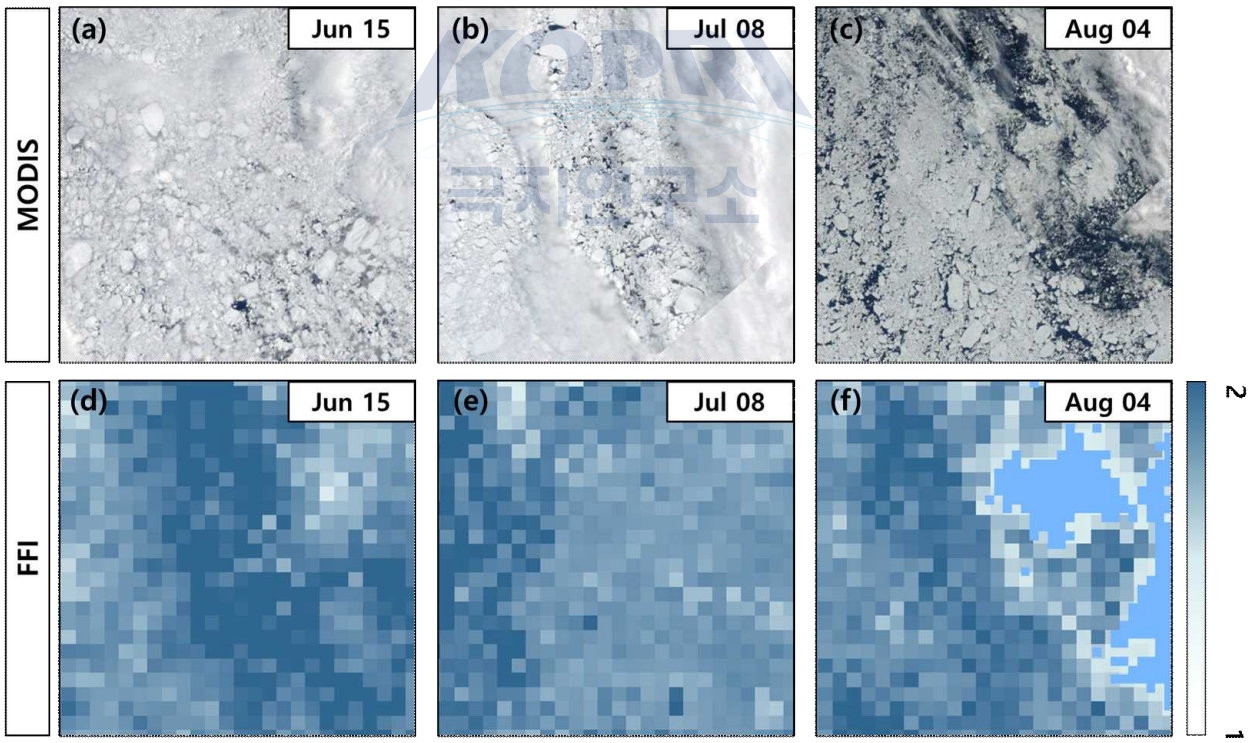


그림 63. FFI가 높음에도 불구하고 얼음이 먼저 녹아 없어지지 않는 지역에 대한 시계열 변화 그림. 왼쪽부터 2020년 6월 15일, 7월 8일, 8월 4일의 그림들임. 위의 영상들은 해당 날짜의 MODIS 영상이며, 아래의 그림은 해당 날짜의 FFI 공간 분포임.

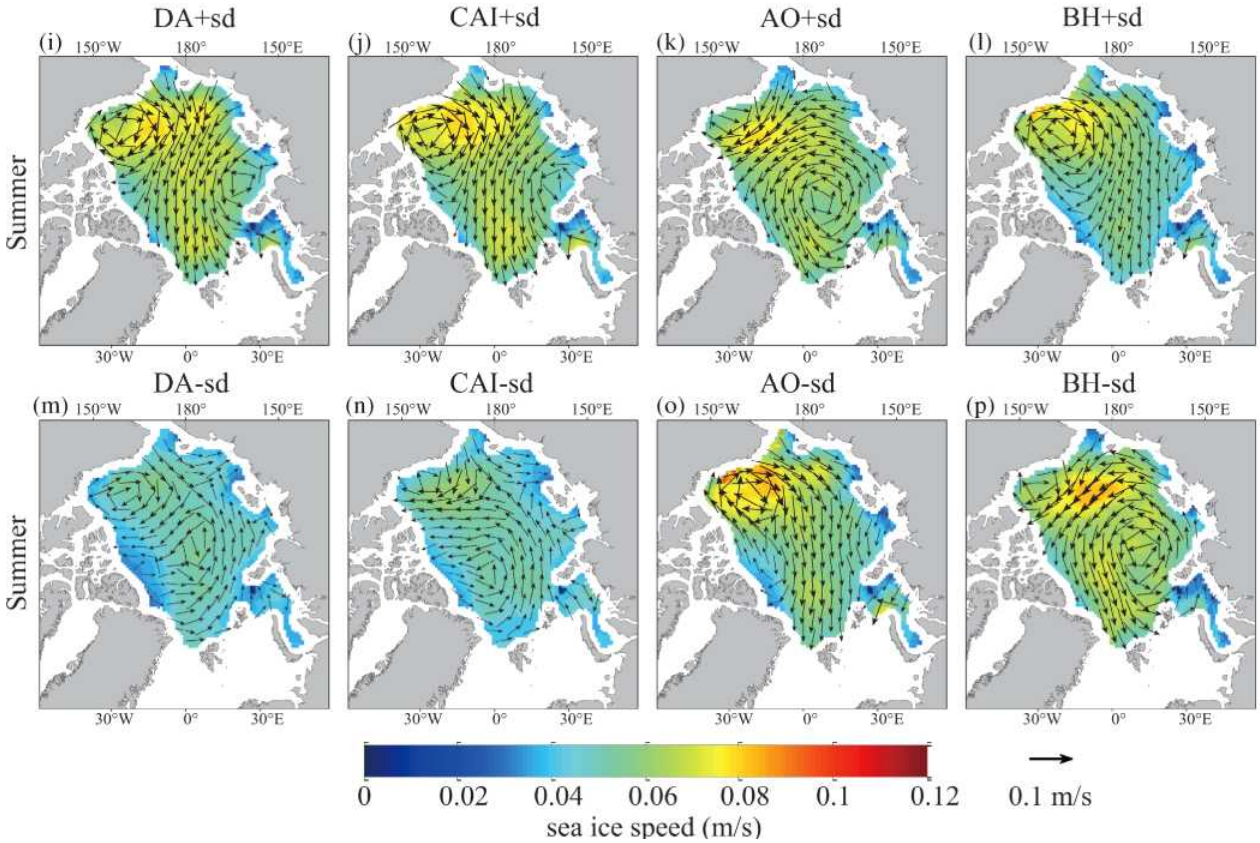


그림 64. 네 가지 대기순환 패턴 dipole anmaly (DA), central arctic index (CAI), arctic oscillation (AO), Beaufort high (BA)의 양, 음 위상에 따른 해빙의 이동 합성장 그림. (출처:Zhang 외 2022)

- 두 번째 사례에 대해서는 2020년 4월부터 9월까지의 공간패턴을 분석하였음 (그림 65). 해당 지역은 Beaufort gyre가 매우 큰 영향을 끼치는 지역이며, 1년 내내 해류를 따라 시계 방향으로 해빙이 이동함. Timmermans 외 2023은 북극 Beaufort 해역의 gyre에 따른 물리량의 공간패턴을 분석하였으며, 특히 wind stress, ice drift speed, ocean geostrophic flow가 움직이는 방향이 FFI가 변화하는 모습과 유사함 (그림 66). Dynamic ocean topography가 높은 지역을 중심으로 해류가 회전하며 흐르며, 중심에서의 FFI는 낮은 값을 유지하는 반면, ice drift speed가 빠른 지역부터 얼음이 녹아 없어지는 것을 확인할 수 있음. 하지만 실제 해빙이 해당 방향으로 이동하며 녹아 없어지는 지에 대해서는 광학위성을 취득할 수 없어 시각적으로 확인이 불가능하기 때문에, 다른 간접적인 검증 방법을 통해 추가 검증할 필요가 있음.

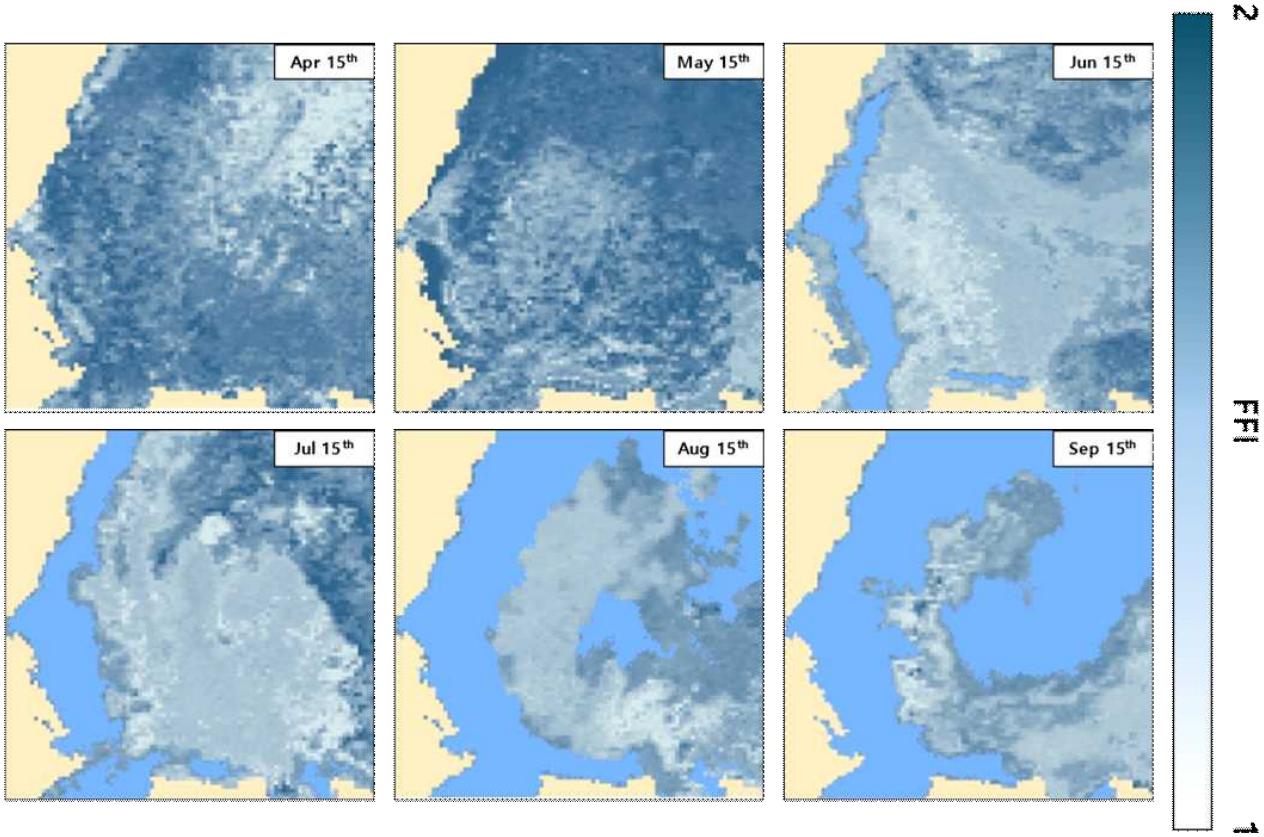


그림 65. 2020년 4월부터 9월까지 Beaufort 해역의 FFI 공간 패턴 변화 그림. 소용돌이 모양으로 변화하고 있음.

KOPRI
극지연구소

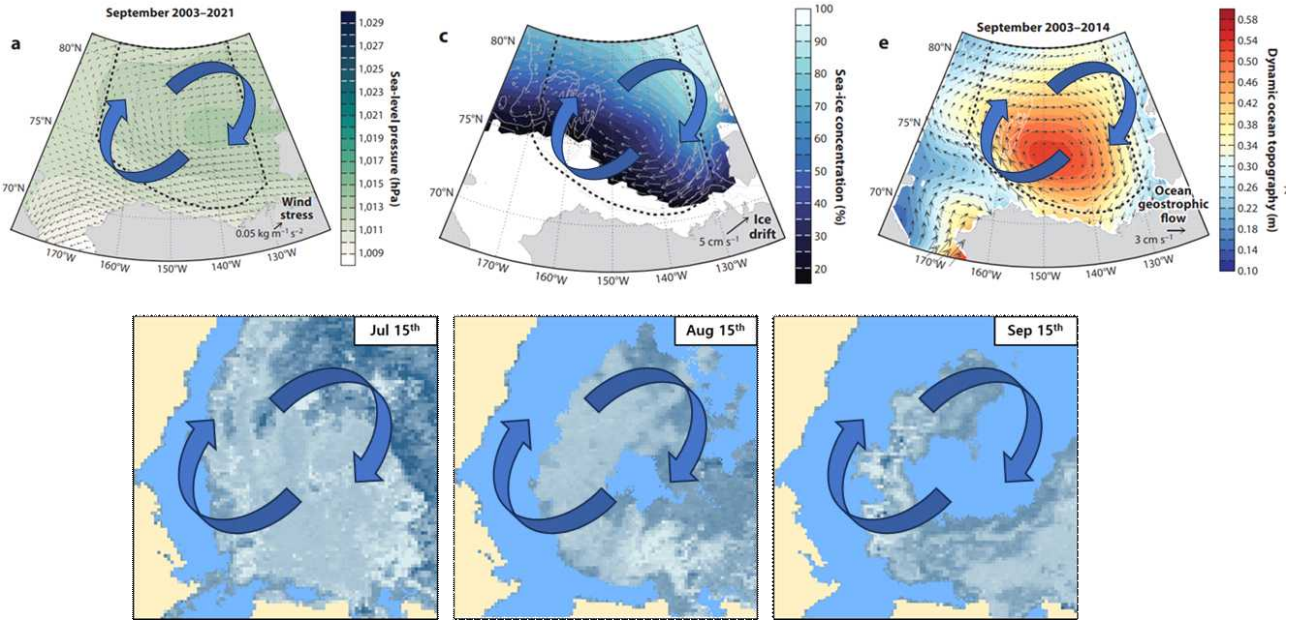


그림 66. 2003년부터 2021년까지 9월 Beafort 해역에서의 wind stress, ice drift speed, ocean geostrophic flow 평균 패턴. Beaufort gyre 기준으로 시계방향으로 회전하고 있으며, 공간 패턴이 해당 지역의 FFI 공간패턴과 유사한 모습을 나타내고 있음. (출처:Timmermans 외 2023)

(2) FFI 연도별 패턴 세부 분석

- 얼음이 녹기 시작하는 6월에 대하여 2018년부터 2021년까지 월평균 FFI가 어떻게 변화하는지에 대해 분석하였음 (그림 67). 연도별로 작은 폭이지만 북극 전체에 대한 FFI 값이 증가하고 있으며, 해역별로 연도별 공간패턴이 상이한 것을 확인할 수 있음. 북극 중심부에 비해서 외곽지역의 FFI 값의 변화가 두드러지며, 해역별로 FFI의 변화가 어느 정도의 수준인지 확인하기 위해서 연도별 이전 년도 대비 FFI 변화 지도를 작성하였음 (그림 68). 2018년에 비해서 2019년은 북극 전반에 대해서 FFI가 상승하는 것을 확인할 수 있음. National Snow and Ice Data Center (NSIDC)에서 매년 발행하는 Arctic report 2019에 따르면, 2019년은 1985년 이후로 해빙의 평균 나이가 가장 어린 해로 기록됨. 해빙의 나이가 어리면 비교적 쉽게 파편화될 수 있고 FFI 인자에 반영된 것으로 사료됨. Arctic report 2020에 따르면 직전 가을에서 겨울철 즉 2019년 12월부터 2020년 5월이 상대적으로 추운 기온이었으며, 이에 따라 2019년에서 확인된 변화에 비해 그 정도가 작은 것으로 판단됨. 다만, 상대적으로 중심부에서 FFI 값이 작지만 증가하는 모습을 보였기 때문에, 이에 대한 추가분석이 필요함. Arctic report 2021은 Fram strait으로 빠져나가는 해역에서의 해빙이 예년에 비해 1m 이상의 두께가 감소된 것으로 보고함. 해당 해역의 해빙들은 대부분 초년빙으로 구성되어 있으며, 그 두께가 평상시보다 훨씬 얇아 쉽게 깨져 FFI 변화가 크게 나타난 것으로 판단됨.

KOPRI 극지연구소

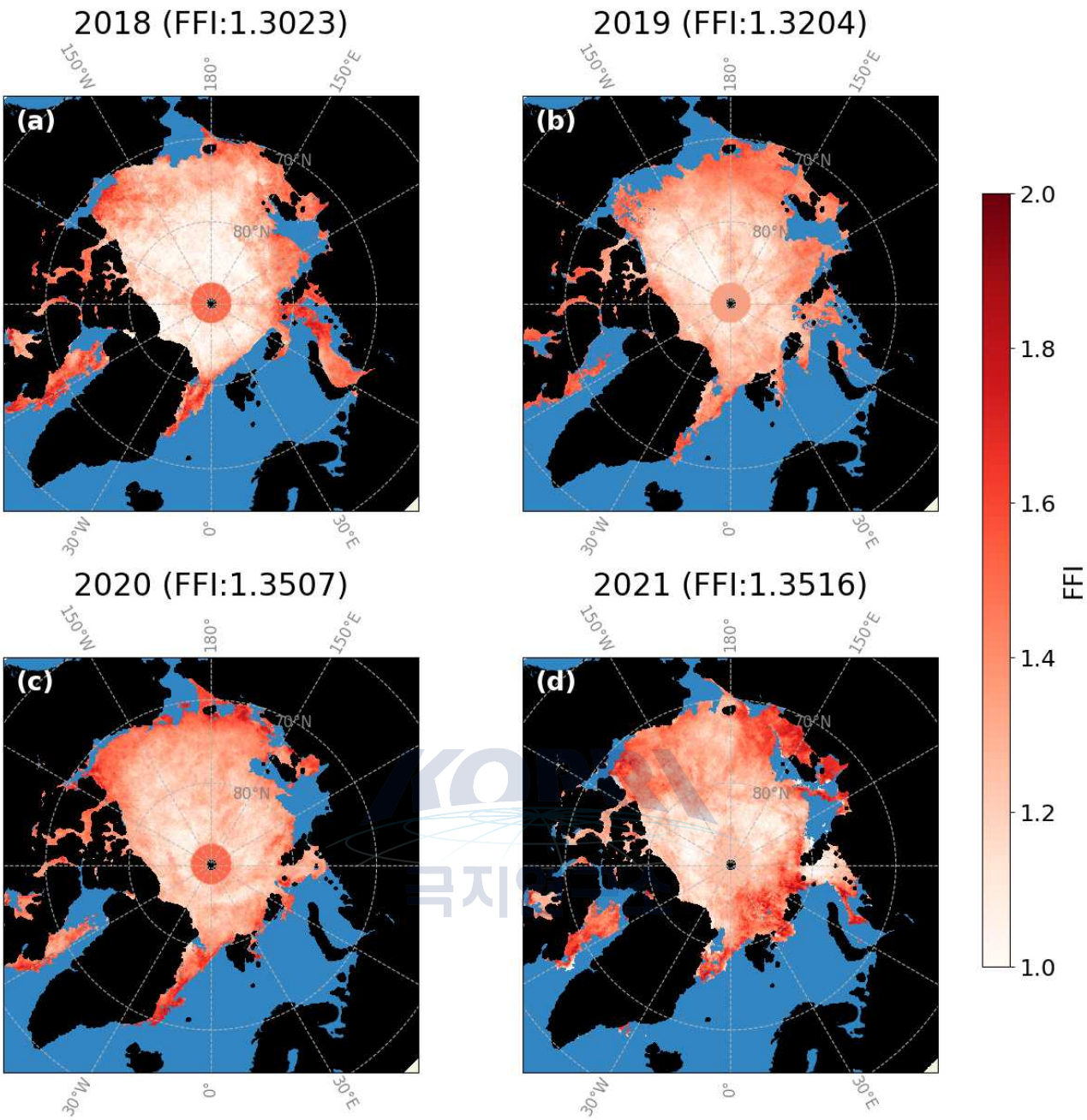


그림 67. 북극 전체지역에 대한 연도별 6월 평균 FFI 지도. 연도가 지남에 따라 작은 폭이지만 FFI 값이 전체적으로 증가하고 있으며, 특히 가장자리의 변화가 두드러지게 나타남.

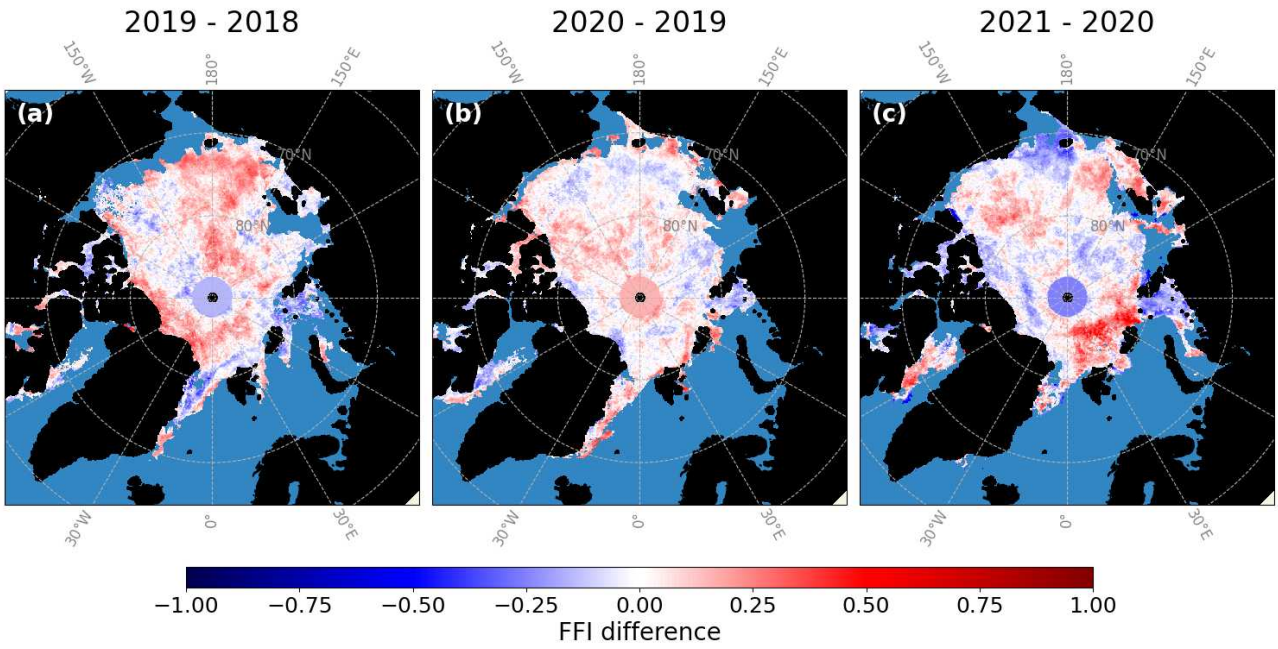


그림 68. FFI 변화 지도 그림. (a) 2019년과 2018년의 차이, (b) 2020년과 2019년의 차이, (c) 2021년과 2020년의 차이.

3차년도) FFI와 해빙인자 간의 상관성 분석

1) FFI 추정 알고리즘 업데이트 및 해빙인자와의 시공간 상관성 분석

- 일반적으로 수동마이크로파 센서의 PD, PR 및 GR 값들은 SIC를 산출하는 데에 있어 매우 중요한 요소로 작용함. AMSR2의 채널들은 open water와 FYI, MYI를 잘 구분해낼 수 있으며, 이는 6GHz부터 89GHz 모두 마찬가지임 (그림 69). 그중에서도 89GHz 채널은 가장 고해상도 (3km x 5km)이기 때문에 고해상도의 SIC를 산출해 내는 데에 있어서 매우 중요한 채널이며, FFI 추정 알고리즘에서도 활용됨.

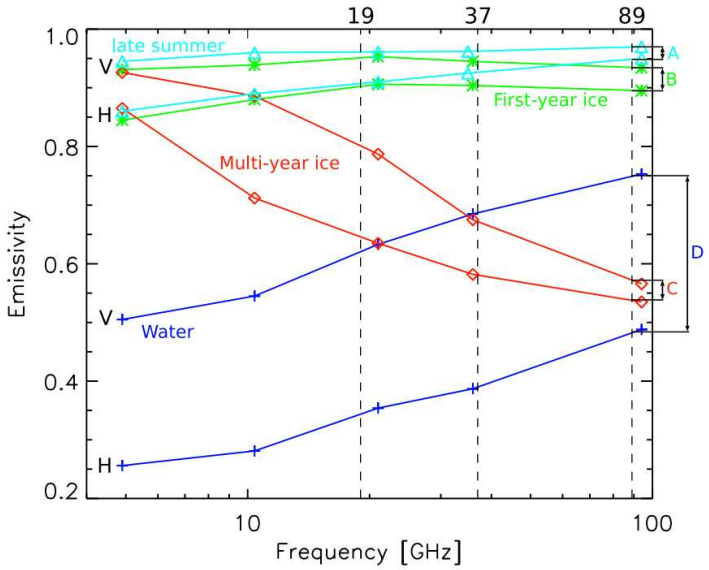


그림 69. 수동 마이크로파의 주파수에 따른 water, FYI, MYI 에서의 Emmisivity 그림 (Spreen 외 2008)

- 하지만 89GHz 채널의 변수들은 수동 마이크로파 기반의 자료임에도 불구하고, 수증기를 다량으로 함유하고 있는 두꺼운 구름 및 대기에 영향을 받을 수 있음 (Comiso 외 2003; Spreen 외 2008; Junshen 외 2018). 실제로 구름이 매우 두껍게 존재하는 날의 89GHz 채널의 밝기온도 값은 편광의 방향에 상관 없이 이상한 공간 패턴을 갖는 것을 확인함 (그림 70). 따라서 89GHz 채널 관련 변수가 사용되는 모델과 그렇지 않은 모델을 비교 분석하기로 함.

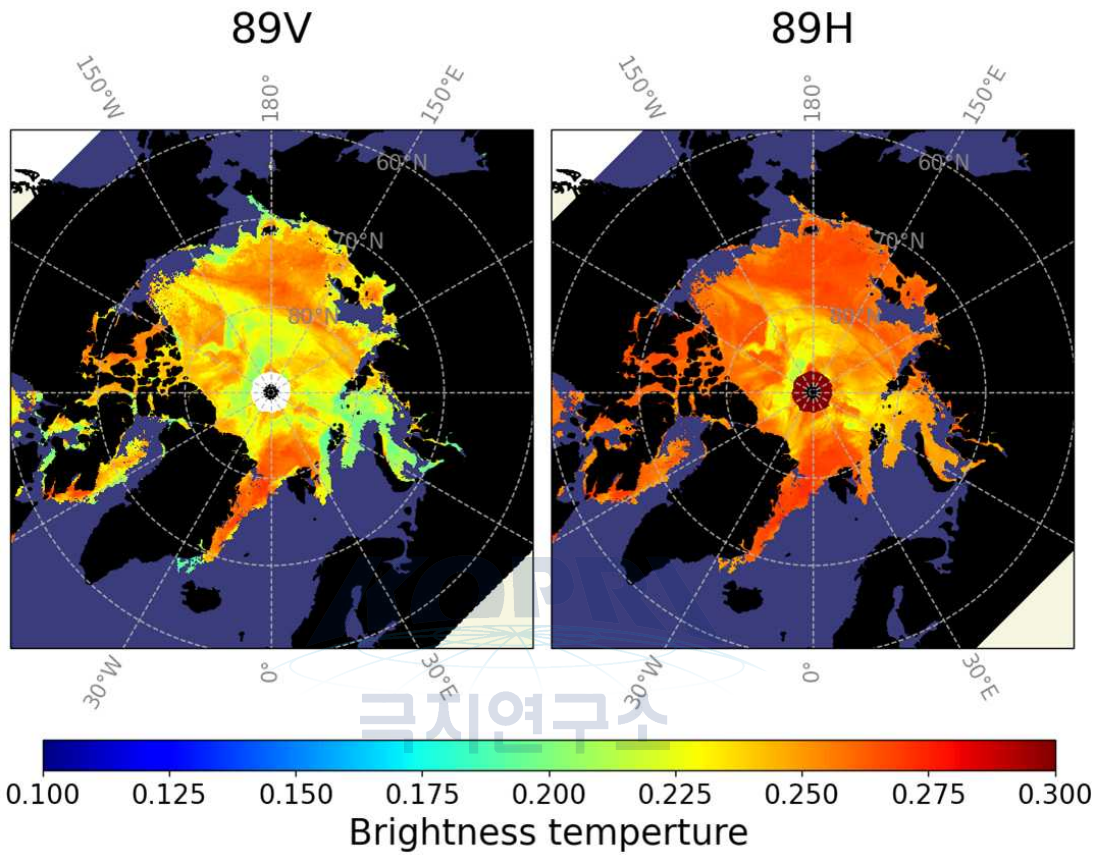


그림 70. 두꺼운 구름이 존재하는 상황에서의 AMSR2 89GHz 채널의 밝기온도 값

- FFI 참조자료를 활용한 모델링 결과, 89GHz 채널이 사용된 변수가 존재하는 모델과 그렇지 않은 모델 간의 차이가 유의미하지 않음 (그림 71). 하지만 이는 구름이 존재하지 않는 청천에서의 샘플을 활용한 모델의 결과이기 때문에 구름이 짙게 낀 날의 mapping 결과를 통해 추가 분석해야할 필요가 있음.

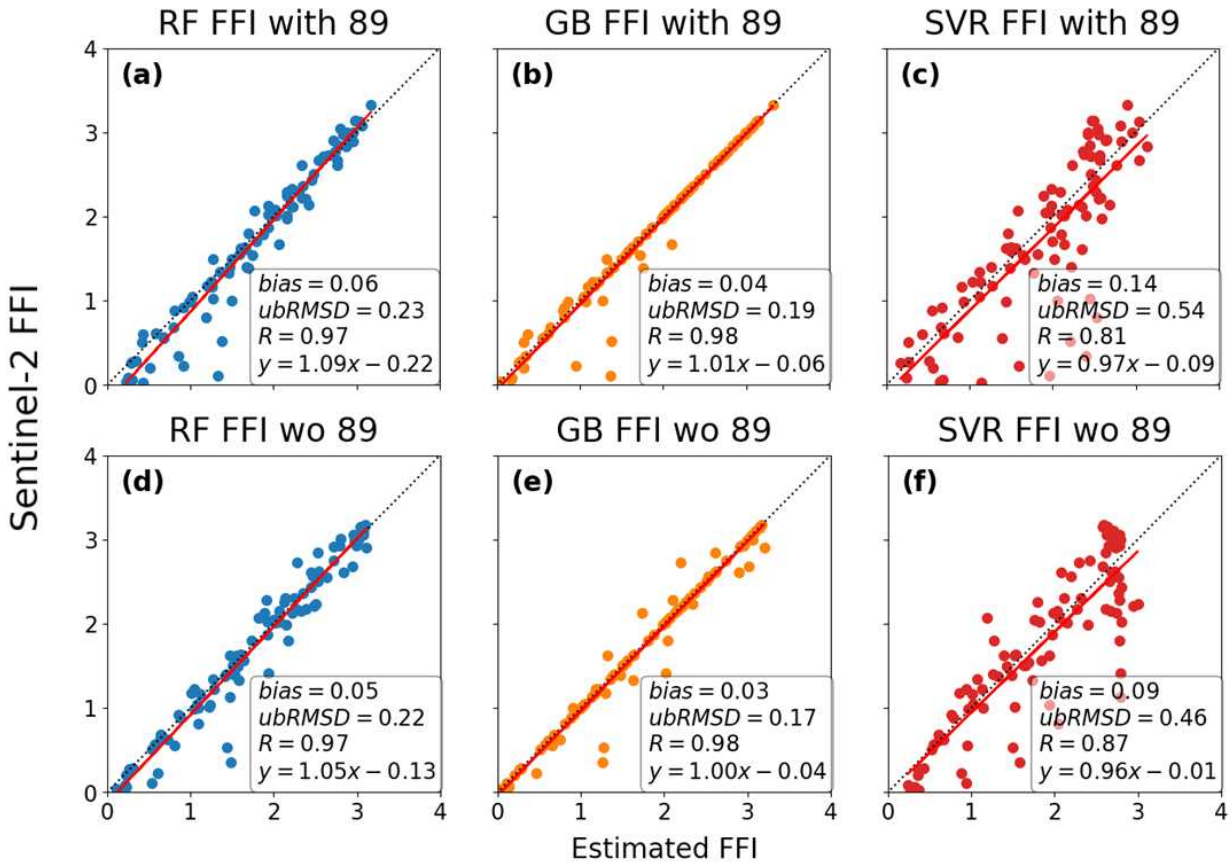


그림 71. 89GHz 채널을 사용한 변수가 활용된 모델 (위) 및 활용되지 않은 모델 (아래)간의 훈련 결과 비교 그림. Random forest (a, d), Gradient boosting (b, e), Support vector regression (c, f) 간의 비교임.

KOPRI 극지연구소

- 2019년 내에서 가장 큰 SIE를 보인 1월 23일과 가장 작은 SIE를 보인 9월 28일 에서의 두 모델의 차이를 확인함 (그림 72). 겨울철에서, 89GHz의 변수가 없는 모델에서 MYI와 FYI 간의 구분이 보다 뚜렷한 것을 확인할 수 있음. 뿐만 아니라 sea ice age 자료와 비교하였을 때, FFI가 낮은 지역과 sea ice age가 높은 지역이 상응 하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 89GHz 채널의 변수가 없는 모델에서 더 뚜렷하게 나타남 (그림 73).

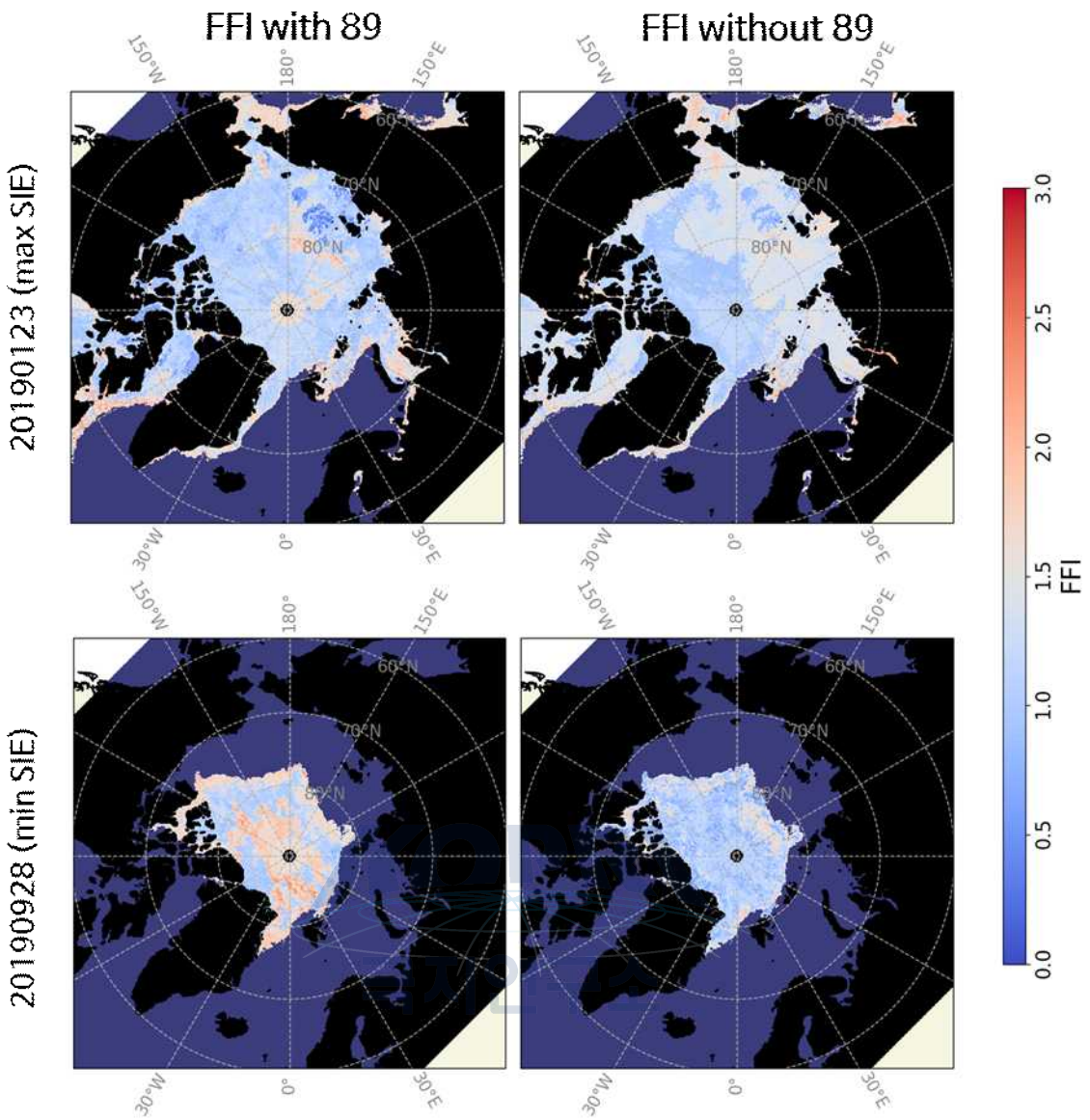


그림 72. 2019년의 SIE가 가장 큰 날 (위)과 가장 작은 날 (아래)에서의 89GHz 채널의 변수가 사용된 모델 (왼쪽)과 그렇지 않은 모델 (오른쪽)의 그림

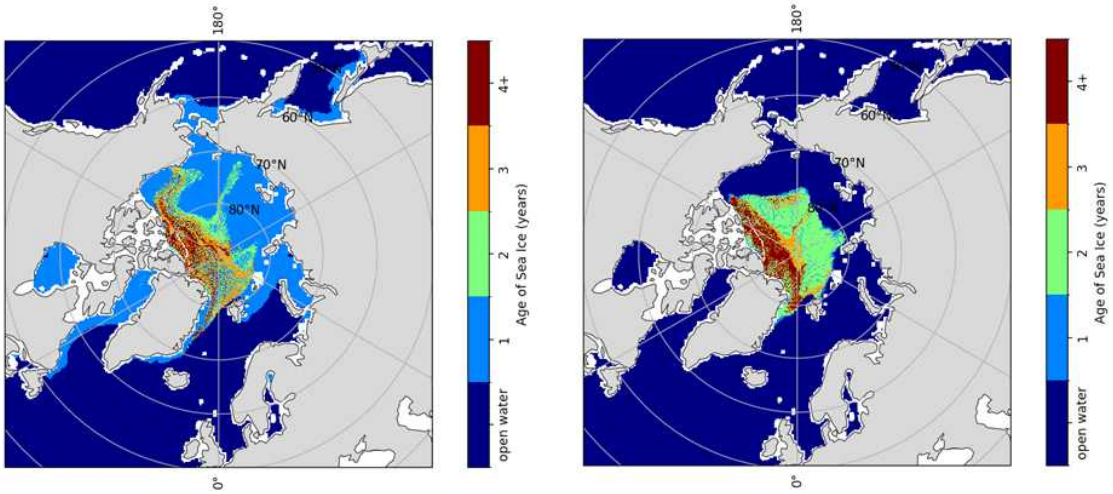


그림 73.. 2019년의 SIE가 가장 큰 날 (왼쪽)과 가장 작은 날 (오른쪽)에서의 sea ice age.

- 또한 2019년 6월 전체 북극 지역의 평균 FFI와 2019년의 minimum SIE를 비교해 보았을 때, minimum SIE 바깥의 해역에서의 FFI의 값이 minimum SIE 내부의 FFI의 값에 비해서 상당히 큰 것을 확인할 수 있음 (그림 74). 또한 이러한 FFI의 값의 대비는 89GHz 채널의 변수가 사용된 모델에 비해서 그렇지 않은 모델에서 더 잘 드러나는 것을 확인함.

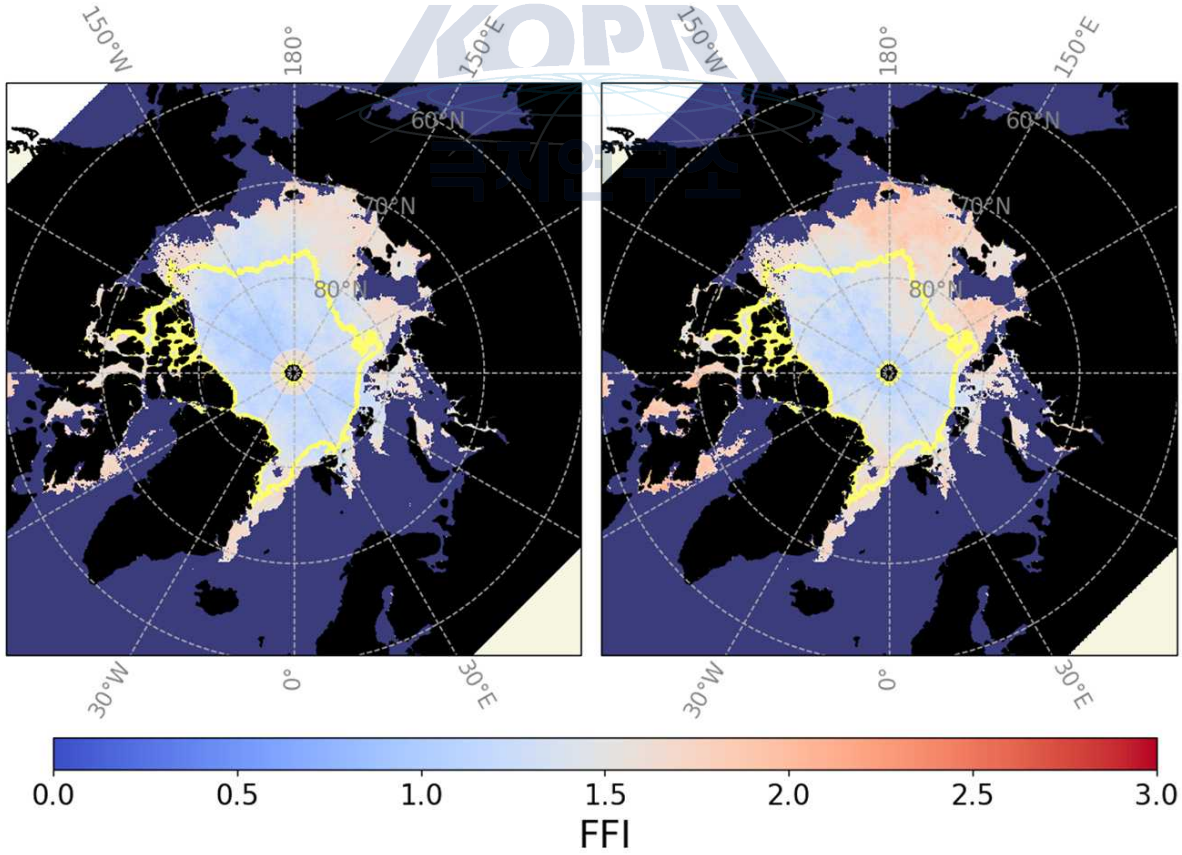


그림 74. 2019년 6월의 평균 FFI. AMSR2의 89GHz 채널의 변수가 사용된 모델 (왼쪽)과 사용되지 않은 모델 (오른쪽) 결과

라. 평가의 착안점

년도		성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1 단계	1차년도 (2020)	북극 해빙 lead 탐지 및 너비 추정	○북극 해빙 lead 탐지 알고리즘 개발	50%	Sentinel 위성 등을 활용한 검증자료 구축 및 평가
			○북극 해빙 lead 너비 추정 알고리즘 개발	50%	
	2차년도 (2021)	북극 해빙 melt pond 탐지 및 면적 추정	○북극 해빙 melt pond 탐지 알고리즘 개발	50%	Sentinel 위성 등을 활용한 검증자료 구축 및 평가
			○북극 해빙 melt pond 면적 추정 알고리즘 개발	50%	Sentinel 위성 등을 활용한 검증자료 구축 및 평가
	3차년도 (2022)	lead 및 melt pond fraction에 따른 북극 해빙 변화 영향 분석 및 해빙 변화 예측	○lead 및 melt pond fraction과 기후인자와의 상관관계 분석	50%	상관관계 분석 및 물리적 영향 분석
			○lead 및 melt pond fraction이 해빙 변화에 미치는 영향 분석	50%	상관관계 분석 및 물리적 영향 분석

KOPRI 극지연구소

2 단계	1차년도 (2023)	FFI 추정 알고리즘 개발	○FFI 지표 개발 및 FFI 추정을 위한 레퍼런스 자료 구축	50%	- FFI 지표 개발 여부 - FFI 레퍼런스 구축 여부
			○FFI 추정 알고리즘 개발	50%	
	2차년도 (2024)	FFI 시·공간 패턴 분석	○FFI 추정 알고리즘 개선	50%	- FFI 레퍼런스 추가 구축 여부 - FFI 추정 알고리즘 개선 여부
			○FFI 의 시·공간 패턴 분석	50%	
	3차년도 (2025)	FFI와 해빙 인자 간의 상관성 분석	○FFI와 해빙 인자 간의 시공간 상관성 분석	50%	- FFI와 해빙인자 간의 상관성 분석 여부 - FFI를 활용한 해빙인자 변화 예측 모델링 수행 및 결과 분석 여부
			○FFI를 활용한 해빙인자 변화 예측 영향 분석	50%	

KOPRI 극지연구소

2. 목표달성을 위한 연구수행 방법

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적 · 실험적 접근방법)	구체적인 내용
북극 해빙 lead 탐지 및 너비 추정 (2020)	○북극 해빙 lead 탐지 알고리즘 개발	북극해빙 lead 탐지 알고리즘 개발	ICESat-2 Waveform 특성 분석을 통한 해빙 lead 탐지 알고리즘 개발
	○북극 해빙 lead 너비 추정 알고리즘 개발	북극 해빙 lead 너비 추정 알고리즘 개발	다종 위성을 활용한 lead 두께 추정 알고리즘 개발
북극 해빙 melt pond 탐지 및 면적 추정 (2021)	○북극 해빙 melt pond 탐지 알고리즘 개발	북극 해빙 melt pond 탐지 알고리즘 개발	ICESat-2 altimeter 분석을 통한 해빙 melt pond 탐지 알고리즘 개발
	○북극 해빙 melt pond 면적 추정 알고리즘 개발	북극 해빙 melt pond 면적 추정 알고리즘 개발	다종 위성을 활용한 melt pond 면적 추정 알고리즘 개발

lead 및 melt pond fraction에 따른 북극 해빙 변화 영향 분석 및 해빙 변화 예측 (2022)	○ lead 및 melt pond fraction과 기후인자와의 상관관계 분석	북극 해빙 lead 및 melt pond에 영향을 미치는 인자 파악	북극 lead 및 melt pond fraction에 영향을 미치는 기후인자 파악
	○ lead 및 melt pond fraction이 해빙 변화에 미치는 영향 분석	북극 해빙 lead 및 melt pond와 해빙변화와의 상관성 분석	북극 lead 및 melt pond fraction와 해빙의 변화와의 상관관계 분석
FFI 지표 개발 및 FFI 추정 알고리즘개발	FFI 지표 개발 및 FFI 추정을 위한 레퍼런스 자료 구축	- 유빙의 파편화 정도를 정량적으로 나타낼 수 있는 새로운 해빙 인자인 FFI 지표 개발 - FFI 추정 알고리즘 개발을 위한 고해상도 광학위성 기반 레퍼런스 구축	- 도시 설계분야의 공간적 파편화 개념인 DIVI 지표를 차용하여 해빙 농도에 상관없이 유빙의 파편화에 대한 정도를 나타내는 FFI 지표 개발 - FFI의 이론적 범위 확인을 위한 시뮬레이션 및 실제 북극 scene에서의 지표 작동 여부 평가 - Sentinel-2 고해상도 광학위성을 활용하여 물-유빙 분류를 통해 FFI 추정 알고리즘에 활용할 레퍼런스 구축
	FFI 추정 알고리즘 개발	- AMSR2 수동마이크로파 데이터와 기계학습을 활용한 FFI 추정 알고리즘 개발 - FFI 추정 알고리즘의 평가	- 구름 영향의 한계를 극복하기 위해 AMSR2 수동마이크로파 데이터와 기계학습 데이터를 활용하여 FFI 추정 알고리즘 개발 - SHAP 분석을 통해 FFI 추정 알고리즘에서 활용된 변수들의 모델 기여도 및 FFI와 의 상관성 확인 - 구축된 알고리즘 기반 북극 전체 매핑을 통한 공간적 패턴 분석 및, 특정 해역에서의 FFI와 SIC 변화 사이의 상관성 분석

KOPRI 극지연구소

FFI 추정 알고리즘 개선 및 시·공간 패턴분석	FFI 참조자료 추가 구축 및 FFI 추정 알고리즘 개선	- SAR 영상을 활용한 FFI 참조 자료 추가 구축 - FFI 추정 알고리즘 개선 - 1차년도에 개발된 FFI 추정 알고리즘과 개선된 알고리즘 비교	- SAR 영상의 노이즈를 제거하기 위해 효과적인 denoising 방법을 조사 및 적용 - Morphology 기법을 적용해 denoising된 SAR 영상 내의 얼음 객체 분리 - 일괄적인 전처리 과정을 통한 FFI 참조 자료 추가 구축 - 추가 구축된 참조 자료를 활용, 기존 이상한 공간패턴을 보인 봄철의 FFI 추정 알고리즘 개선
	FFI 시·공간적 패턴 분석	- 독특한 FFI의 공간적 패턴을 가지고 있는 해역에 대한 세부 분석 수행 - 연도별 FFI 분석 및 장기 시계열 분석	- 북극 항로로 사용되는 Beafort 해 및 Laptev 해역에서의 FFI 공간패턴 분석 - 여러 환경 요인 및 해양 물리량에 따라 해류가 변화하는 해역에서의 FFI 공간패턴 분석 - 연도별 북극 전역에 대한 FFI 분석 - FFI의 연도에 따른 시계열 변동 분석
FFI와 해빙인자간의 상관성 분석	FFI와 해빙인자간 시공간 상관성 분석	- 지속적인 FFI 알고리즘 업데이트 - FFI와 여러 해빙인자와의 시계열 상관성 및 공간적 상관성 분석	- 구름의 영향을 받을 수 있는 수동마이크로파 채널과 관련된 변수에 의한 영향 확인 - 해당 채널 변수가 제외된 모델과 그렇지 않은 모델 간의 차이 분석 - SIC, SIE, sea ice age와 같은 여러 해빙 인자들과의 시계열 및 공간적 상관성 분석
	FFI를 활용한 해빙 인자 변화 예측 영향 분석	- FFI를 활용한 해빙 인자 변화 예측 모델링 수행 - FFI가 사용된 모델과 그렇지 않은 모델간의 차이 분석	- FFI를 SIC 예측 모델에 사용할 수 있도록 입력자료화 - FFI를 활용한 SIC 예측 모델 및 비교를 위한 기본 SIC 예측 모델링 수행 - FFI가 사용된 모델과 그렇지 않은 모델 간의 차이점 분석 - 타 해빙인자와 SIC 예측 결과 간의 상관성 분석

KOPRI 극지연구소

3. 연구성과(정량적 성과)

□ 계획 대비 실적

(계획(건수)/대비(건수))

구분		계획					
논문		국외			국내		
		SCI	기타	소계	SCI	기타	소계
		6/2	0/0	6/ 2	0/1	0/0	0/1
Proceeding		국외			국내		
		0/0			0/0		
단행본(저서)		0/0					
특허		국외			국내		
	출원	0/0			0/0		
	등록	0/0			0/0		
기술실시계약		0/0					
세미나개최		0/0					
인터넷사이트 개설		0/0					
기타사항		0/0					

KOPRI 극지연구소

○ **연구성과 실적 현황**

- 계획대비 국외논문 출판 실적이 부족한 실정임 (1단계 계획 3편 대비 1편 달성; 2단계 계획 3편 대비 1편 달성).

○ **추후 연구성과 달성 계획**

- 남은 연구기간 동안 추가적으로 두 편의 국외 논문을 투고할 계획임. 최대한 빠르게 성과 실적을 달성할 수 있도록 진행할 계획이며, 예상되는 추가실적은 다음과 같음

(1) 기계학습과 AMSR2를 활용한 유빙 파편화 정량화 (4월 내 투고 예정)

- **Title : "A novel sea ice floe fragmentation index using Sentinel-2 and AMSR2 satellite data based on machine learning"**
- **Journal: Journal of Geophysical Research: Ocean**
- 2단계 연구실적 내용의 논문 투고 예정

(2) 생성형 모듈과 SimVP를 활용한 해빙농도 단기 예측 (8월 내 투고 예정)

- **Title : "A sub-seasonal high resolution sea ice concentrration forecast framework using flow matching"**
- **Journal: Remote Sensing and Environment**
- Flow matching은 생성형 모듈의 일종으로 간단한 분포에서 데이터 분포로 확률 질량이 흐

르는 방향을 직접 학습하는 것임. 시간에 따른 확률 질량의 이동 경로(trajectory)를 정의하는 벡터 필드를 파라미터화 한 뒤 이 흐름이 실제 데이터 분포와 일치하도록 학습이 진행됨 (그림 75).

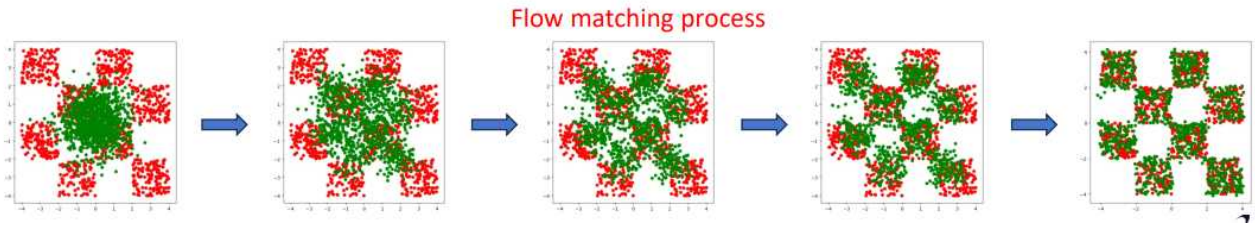


그림 75. Flow matching 생성모듈의 학습 과정 예시

- Flow matching과 최신 video prediction 기법인 SimVP 기법을 결합함으로써 해수의 대류와 같은 정교하고 물리적인 과정들을 학습시켜 보다 정확한 해빙 예측 모델을 개발하고자 하였음.
- 30일 예측 결과를 OSI-SAF의 해빙농도 산출물과 비교하였을 때, Environment and Climate Change Canada (ECCC)의 해빙 예측 모델 및 ECMWF의 해빙 예측 모델에 비해서 SimVP 모델이 더 좋은 성능을 나타냄 (그림 76).

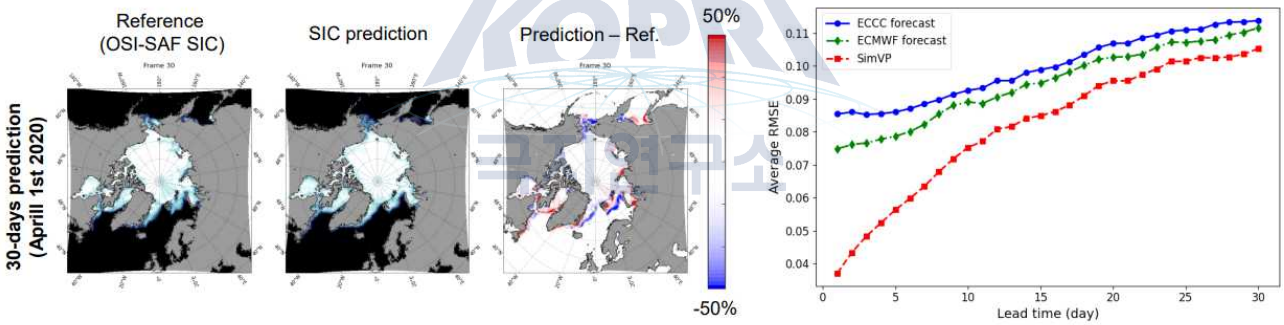


그림 76. 30일 해빙 예측에 대한 SimVP 모델과 ECCC 및 ECMWF의 해빙예측 모델과의 비교 결과

4. 연구비 집행실적

(작성기준일: 2025.04.14)

(단위 : 천원)

비목	세목		예산금액	사용금액	잔액	집행률(%)
직접비	인건비	미지급	0	0	0	-
		지급	13,179	13,179	0	100.0
	인건비소계		13,179	13,179	0	100.0
	연구시설·장비비		0	0	0	-
	연구재료비		0	0	0	-
	연구활동비		5,645	5,645	0	100.0
	연구수당		1,310	1,310	0	0
	연구비소계		6,955	6,955	0	100.0
간접비			4,866	4,866	0	100.0
연구비 총액			25,000	25,000	0	100.0

주) 연구비 집행실적은 연말기준 추정 사용금액을 기재하며, 작성기준일은 최종보고서 제출시점을 기록함

KOPRI 극지연구소

5. 연구수행에 따른 문제점 및 개선방향

○ 해당사항 없음

6. 주요 연구변경 사항

○ 해당사항 없음

Ⅱ. 성과 활용 계획

1. 성과 활용 계획

- 본 연구 결과의 활용을 통하여 북극 해빙의 변화에 대한 보다 다각적인 분석이 가능할 것으로 기대됨.
- 해빙의 리드와 융빙호의 분포 자료를 융합·활용한다면 기존에 한계점으로 지적되고 있던 열역학 기반의 해빙 변화 메커니즘에 대한 예측 모델의 보완이 가능 할 것으로 기대되며, 추후 해빙 두께, 더 나아가 북극 해빙의 부피의 변화에 대한 분석이 가능할 것으로 기대됨.
- 현재까지 위성을 활용한 북극 해빙의 리드 및 melt pond에 대한 구체적인 분석이 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이며, 특히 리드의 너비(lead width)나 melt pond의 면적 등에 대한 산출물이 제공되지 않고 있기 때문에, 본 과업에서 제시한 북극 해빙의 리드 탐지 및 lead fraction 지도를 활용한 개발에 주요 참고자료로 활용할 수 있을 것임.
- 북극 해빙의 리드 및 melt pond가 해빙의 변화에 미치는 영향을 분석하여 해빙의 변화를 예측하는 연구가 진행될 수 있을 것으로 기대됨. 해빙의 리드 및 너비 추정 알고리즘 개발을 하기 위한 참고자료로 활용 할 수 있을 것이며, lead fraction의 공간분포를 분석할 수 있는 기반으로 참고할 수 있음.
- 해빙의 파편화를 정량화함으로써 해빙이 녹는 속도 및 시점에 대해 기존의 해빙농도에 비해 보다 직관적으로 파악할 수 있음.
- 현재까지 해빙의 크기 및 파편화와 관련된 연구는 FSD에 관한 연구들뿐이며, 이들은 특정 광학 이미지 혹은 특정 해역에서만 활용될 수 있기 때문에, 전 북극지역에서 직관적으로 확인할 수 있는 FFI를 활용함으로써 전북극 해빙농도 예측 모델을 비롯한 여러 해빙 모델에 기여할 수 있을 것으로 기대됨.
- 본 연구에서 분석한 ECMWF나 MERRA-2와 같은 재분석자료를 활용한 북극 해빙 농도 및 면적에 영향을 미치는 요인으로 참고할 수 있으며, 이 뿐만 아니라 Arctic Oscillation (AO), 북극 dipole index 등을 활용한 기상인자들과 북극 리드 및 melt pond fraction의 상관관계를 분석할 수 있음.

KOPRI 극지연구소

[별첨 4] 논문실적 증빙자료

The Cryosphere, 14, 2629–2645, 2020
https://doi.org/10.5194/tc-14-2629-2020
© Author(s) 2020. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 4.0 License.

The Cryosphere Open Access EGU

Classification of sea ice types in Sentinel-1 synthetic aperture radar images

Jeong-Won Park[1,2], Anton Andreevich Korosov[1], Mohamed Babiker[1], Joong-Sun Won[3], Morten Wergeland Hansen[1,4], and Hyun-Cheol Kim[2]

[1]Ocean and Sea Ice Remote Sensing Group, Nansen Environmental and Remote Sensing Center, 5006 Bergen, Norway
[2]Unit of Arctic Sea Ice Prediction, Korea Polar Research Institute, Incheon, 21990, South Korea
[3]Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul, 03722, South Korea
[4]Department of Remote Sensing and Data Management, Norwegian Meteorological Institute, 0371 Oslo, Norway

Correspondence: Jeong-Won Park (jeong-won.park@kopri.re.kr)

Received: 29 May 2019 – Discussion started: 11 June 2019
Revised: 22 June 2020 – Accepted: 14 July 2020 – Published: 20 August 2020

Abstract. A new Sentinel-1 image-based sea ice classification algorithm using a machine-learning-based model trained in a semi-automated manner is proposed to support daily ice charting. Previous studies mostly rely on manual work in selecting training and validation data. We show that the readily available ice charts from the operational ice services can reduce the amount of manual work in preparation of large amounts of training/testing data. Furthermore, they can feed highly reliable data to the trainer by indirectly exploiting the best ability of the sea ice experts working at the operational ice services. The proposed scheme has two phases: training and operational. Both phases start from the removal of thermal, scalloping, and textural noise from Sentinel-1 data and calculation of grey level co-occurrence matrix and Haralick texture features in a sliding window. In the training phase, the weekly ice charts are reprojected into the SAR image geometry. A random forest classifier is trained with the texture features on input and labels from the rasterized ice charts on output. Then, the trained classifier is directly applied to the texture features from Sentinel-1 images operationally. Test results from the two datasets spanning winter (January–March) and summer (June–August) seasons acquired over the Fram Strait and the Barents Sea showed that the classifier is capable of retrieving three generalized cover types (open water, mixed first-year ice, old ice) with overall accuracies of 87 % and 67 % in winter and summer seasons, respectively. For the summer season, the classifier failed in distinguishing mixed first-year ice from old ice with accuracy of only 12 %; however, it performed rather like an ice–water discriminator with high accuracy of 98 % as the misclassification between the mixed first-year ice and old ice was between them. The accuracy for five cover types (open water, new ice, young ice, first-year ice, old ice) in the winter season was 60 %. The errors are attributed both to incorrect manual classification on the ice charts and to the semi-automated algorithm. Finally, we demonstrate the potential for near-real-time service of the ice map using daily mosaicked Sentinel-1 images.

1 Introduction

Wide swath SAR observation from several spaceborne SAR missions (RADARSAT-1, 1995–2013; Envisat ASAR, 2002–2012; ALOS-1 PALSAR, 2006–2011; RADARSAT-2, 2007-present; Sentinel-1, 2014–present) played an important role in studying global ocean and ice-covered polar regions. The Sentinel-1 constellation (1A and 1B) is producing dual-polarization observation data with the largest Arctic coverage and the highest temporal resolution ever. The cross-polarization is known to be more sensitive to the difference in scattering from sea ice and open water than the co-polarization (Scheuchl et al., 2004), and the combination of HH and HV polarizations has been widely used for ice edge detection and ice type classification (a nice overview is given in the paper by Zakhvatkina et al., 2019). However, most of the recent ice classification algorithms were developed using RADARSAT-2 ScanSAR (Leigh et al., 2014; Liu et al., 2015; Zakhvatkina et al., 2017), which has different sensor charac-

Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.

ination was feasible in the summer season. The main technological innovation is two-fold: (i) reduced manual work in the preparation of a large amount of training and validation reference data using readily available public ice charts and (ii) more objective evaluation of the SAR-based sea ice type classifier compared to the previous studies conducted with a small number of images and customized ice type references from sources not open to the public. A conventional approach for selecting training and testing data by anonymous human ice experts is undesirable not only because it is laborious, but also due to subjectivity and lack of standardization in the assessment of the automated classifier. Therefore, the performance from different literature sources cannot be intercompared directly.

Test results from the datasets of the winter season acquired over the Fram Strait and the Barents Sea area showed overall accuracies of 87 % and 60 % and the Cohen kappa coefficients of 0.75 and 0.67 for the three-class and five-class ice type classifiers, respectively. These are slightly lower than the numbers in previous studies, and the errors are attributed not only to the automated algorithm but also to the inconsistency of the ice charts and the high level of their generalization. Test results from the datasets of summer seasons showed overall accuracy of 67 % and the Cohen kappa coefficient of 0.78 for the three-class classifiers. Considering the misclassifications in different ice types were among themselves, the three-class classifiers are not really a sea ice type classifier, but they performed well at least as an ice–water discriminator with accuracy of 98 %.

Based on the results, we envisage that three-class ice type classification from SAR imagery would be useful for making a global sea ice type product like OSI SAF OSI-403-c with higher spatial resolution. The proposed approach importantly showed that a daily ice type mapping from the Sentinel-1 data is feasible and can help capture details of short-term changes in the stage of sea ice development. Based on the achieved results, we believe that the proposed approach may be efficiently used for operational ice charting services for supporting navigation in the Arctic.

Data availability. Relevant data can be made available upon request to the authors. The Sentinel-1 data are produced by European Space Agency and are freely available at https://scihub.copernicus.eu/ upon registration. The weekly ice charts are produced by U.S. National Ice Center and are freely available at https://www.natice.noaa.gov/. The daily sea ice type products are produced by Ocean and Sea Ice Satellite Application Facilities and are freely available at http://osisaf.met.no/.

Author contributions. JWP and AAK formulated the research plan. JWP and AAK developed the algorithm. JWP implemented the algorithm and performed the data processing. JWP, AAK, MB, JSW, MWH, and HCK carried out the analyses, and JWP wrote the paper.

Competing interests. The authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgements. We would like thank the three anonymous reviewers for their invaluable comments and suggestions that helped improve the manuscript. We would also like to thank the editor, John Yackel.

Financial support. This research has been supported the French Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) (SHOM-ImpSIM Project 111222), the Research Council of Norway and the Russian Foundation for Basic Research (NORRUSS Project 243608, SONARC), and the Korea Polar Research Institute (grant no. PE20080).

Review statement. This paper was edited by John Yackel and reviewed by three anonymous referees.

References

Aaboe, S., Breivik, L.-A., and Eastwood, S.: Improvement of OSI SAF product of sea ice edge and sea ice type, EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Geneva (Switzerland), 22–26 September 2014.

Aaboe, S., Breivik, L.-A., Sørensen, A., Eastwood, S., and Lavergne, T.: Global sea ice edge and type product user's manual OSI-402-c & OSI-403-c, Ocean & Sea Ice Satellite Application Facilities (OSI SAF), version 2.3, available at: http://osisaf.met.no/docs/osisaf_cdop3_ss2_pum_sea-ice-edge-type_v2p3.pdf (last access: 18 August 2020), 2018.

Adnan, M. N. and Islam, M. Z.: One-Vs-All Binarization Technique in the Context of Random Forest, Proc. European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning, Bruges (Belgium), 22–24 April 2015.

Aldenhoff, W., Heuzé, C., and Eriksson, L.: Comparison of ice/water classification in Fram Strait from C- and L-band SAR imagery, Ann. Glaciol., 59, 112–123, https://doi.org/10.1017/aog.2018.7, 2018.

Anand, R., Mehrotra, K., Mohan, C. K., and Ranka, S.: Efficient classification for multiclass problems using modular neural networks, IEEE T. Neural Networ., 6, 117–124, https://doi.org/10.1109/72.363444, 1995.

Barber, D. G. and LeDrew, E. F.: SAR sea ice discrimination using texture statistics: A multivariate approach, Photogramm. E. Rem. S., 57, 385–395, 1991.

Cohen, J.: A coefficient of agreement for nominal scales, Educ. Psychol. Meas., 20, 37–46, https://doi.org/10.1177/001316446002000104, 1960.

Cortes, C. and Vapnik, V.: Support-vector networks, Mach. Learn., 20, 273–297, https://doi.org/10.1007/BF00994018, 1995.

Deng, H. and Clausi, D. A.: Unsupervised segmentation of synthetic aperture radar sea ice imagery using a novel Markov random field model, IEEE T. Geosci. Remote, 43, 528–538, https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.839589, 2005.

ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 172 (2021) 147–159

Contents lists available at ScienceDirect

ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing

journal homepage: www.elsevier.com/locate/isprsjprs

Digital surface model generation for drifting Arctic sea ice with low-textured surfaces based on drone images

Jae-In Kim [a], Chang-Uk Hyun [a], Hyangsun Han [a,b], Hyun-Cheol Kim [a,*]

[a] Center of RS & GIS, Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon 21990, Republic of Korea
[b] Department of Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Keywords:
Sea ice
Digital surface model
Unmanned aerial vehicle
Image matching
Georeferencing
Low-textured surface

ABSTRACT

Arctic sea ice is constantly moving and covered with low-textured surfaces, making it difficult to generate reliable digital surface models (DSMs) from drone images. The movement of sea ice makes georeferencing of DSMs difficult, and the low-textured surfaces of sea ice cause the uncertainty of image matching. This paper proposes a robust method to generate high-quality DSMs for drifting sea ice. To overcome the challenges, the proposed method introduces four improvements to the object-space-based image-matching pipeline: relative georeferencing to recover the horizontality and scale of sea-ice DSMs using a terrestrial light detection and ranging (LiDAR) dataset, match inspection to verify the matched points using several matching constraints, adaptive search-window adjustment to ensure distinct texture information through simple texture analysis, and robust vertical positioning to reduce the matching uncertainty via matching-indicator modeling. Performance evaluations were conducted with drone and LiDAR datasets obtained from a sea-ice campaign using the Korean Icebreaker Research Vessel (IBRV) Araon in the summer of 2017. The experimental results indicated that the proposed method can achieve significant quality enhancements compared with the existing matching method and that all the considerations contributed significantly to the enhancements.

1. Introduction

Arctic sea ice is an important factor affecting global climate change (Kim et al., 2019a; Nolin and Mar, 2019; Vihma, 2014). This is because the bright surfaces of sea ice reflect up to 80% of the incident sunlight back into space, whereas open water caused by ice melting absorbs up to 90% of the sunlight (Eicken et al., 2004; Scharien and Yackel, 2005). Because of this positive ice-albedo feedback, a reduction in the amount of sea ice accelerates global warming (Vinnikov, 1999; Meier et al., 2014; Pistone et al., 2014). Therefore, to evaluate the current status of global warming and predict its future impact, periodic monitoring of the Arctic sea-ice regime is essential.

Sea ice can be characterized according to its concentration, extent, thickness, roughness, etc. (Vinnikov, 1999; Scharien and Yackel 2005; Lang et al., 2017). Although sea ice is widely distributed throughout the Arctic Ocean, these parameters can be derived and analyzed from various satellite data with wide coverage and repeatability (Karvonen et al., 2012). However, there are many difficulties in the development of satellite remote-sensing methods for this purpose. Arctic clouds and polar nights limit the use of satellite data. It is also difficult to distinguish between clouds, ice, and snow from satellite data. In particular, obtaining field data is the most significant challenge, owing to the limited accessibility to Arctic sea ice (Tschudi et al., 2008; Hong et al., 2018). This makes it difficult to generate various sea-ice products.

As a solution to this limitation, the utilization of manned and unmanned aerial vehicles has recently emerged (Hagen et al., 2014; Divine et al., 2016). These observation platforms enable the acquisition of scientific data without unpredictable dangers on sea ice, such as the threat from wild animals and the collapse of ice. Although this approach may be inaccurate compared with manual field surveys, it can acquire denser and more extensive data, such as mosaic images and digital surface models (DSMs). DSMs are very useful in that they provide topographical information about sea ice. In a previous study, we found that sea-ice roughness estimation models based on synthetic aperture radar (SAR) satellites can be developed using sea-ice DSMs (Han et al., 2020). In addition, Hendricks et al. (2010) reported the importance of sea-ice DSMs for verifying freeboard estimation models based on altimetry satellites. Yitayew et al. (2018) tried to verify the topographical information of sea ice derived from interferometric SAR data with height profiles obtained from helicopter-borne measurements.

* Corresponding author.
E-mail addresses: jikim0312@kopri.re.kr (J.-I. Kim), chyun@kopri.re.kr (C.-U. Hyun), hyangsun@kangwon.ac.kr (H. Han), kimhc@kopri.re.kr (H.-C. Kim).

https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.12.008
Received 10 August 2020; Received in revised form 14 November 2020; Accepted 14 December 2020
Available online 31 December 2020
0924-2716/© 2020 International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS). Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This research was funded by the Korea Polar Research Institute (KOPRI), Grant PE20080 (Study on remote sensing for quantitative analysis of changes in the Arctic cryosphere).

References

Banks, J., Corke, P., 2001. Quantitative evaluation of matching methods and validity measures for stereo vision. Int. J. Robot. Res. 20 (7), 512–532. https://doi.org/10.1177/02783640122067525.

Besl, P.J., McKay, N.D., 1992. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 14 (2), 239–256. https://doi.org/10.1109/34.121791.

Chen, Y., Medioni, G., 1992. Object modelling by registration of multiple range images. Image Vision Comput. 10 (3), 145–155. https://doi.org/10.1016/0262-8856(92)90066-C.

Chiang, K.-W., Tsai, M.-L., Chu, C.-H., 2012. The development of an UAV borne direct georeferenced photogrammetric platform for ground control point free applications. Sensors 12 (7), 9161–9180. https://doi.org/10.3390/s120709161.

Clapuyt, F., Vanacker, V., Van Oost, K., 2016. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. Geomorphology 260, 4–15. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.011.

Divine, D.V., Pedersen, C.A., Karlsen, T.I., Aas, H.F., Granskog, M.A., Hudson, S.R., Gerland, S., 2016. Photogrammetric retrieval and analysis of small scale sea ice topography during summer melt. Cold Reg. Sci. Technol. 129, 77–84. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.06.006.

Eicken, H., Grenfell, T.C., Perovich, D.K., Richter-Menge, J.A., Frey, K., 2004. Hydraulic controls of summer Arctic pack ice albedo. J. Geophys. Res. 109 (C8), 1–12. https://doi.org/10.1029/2003JC001989.

Elboher, E., Werman, M., 2013. Asymmetric correlation: a noise robust similarity measure for template matching. IEEE Trans. Image Process. 22, 3062–3073. https://doi.org/10.1109/TIP.2013.2257811.

Fischler, M.A., Bolles, R.C., 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Commun. ACM 24, 381–395. https://doi.org/10.1145/358669.358692.

Fusiello, A., Roberto, V., Trucco, E., 1997. Efficient stereo with multiple windowing. In: Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, USA, 17–19 June. pp. 858–863. doi: 10.1109/CVPR.1997.609428.

Gonçalves, J.A., Henriques, R., 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 104, 101–111. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009.

Hagen, R.A., Peters, M.F., Liang, R.T., Ball, D.G., Brozena, J.M., 2014. Measuring Arctic sea ice motion in real time with photogrammetry. IEEE Geosci. Remote S. 11 (11), 1956–1960. https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2314958.

Han, H., Kim, J.-I., Hyun, C.-U., Kim, S.H., Park, J.-W., Kwon, Y.-J., Kim, H.-C., 2020. Surface roughness signatures of summer arctic snow-covered sea ice in X-band dual-polarimetric SAR. GISci. Remote Sens. 57 (5), 650–669. https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1767857.

Hendricks, S., Stenseng, L., Helm, V., Haas, C., 2010. Effects of surface roughness on sea ice freeboard retrieval with an Airborne Ku-Band SAR radar altimeter. In: Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA, 25–30 July, pp. 3126–3129. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5654350.

Helgesen, H.H., Leira, F.S., Bryne, T.H., Albrektsen, S.M., Johansen, T.A., 2019. Real-time georeferencing of thermal images using small fixed-wing UAVs in maritime environments. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 154, 84–97. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.05.009.

Hirschmüller, H., Innocent, P.R., Garibaldi, J., 2002. Real-time correlation-based stereo vision with reduced border errors. Int. J. Comput. Vis. 47, 229–246. https://doi.org/10.1023/A:1014554110407.

Hirschmuller, H., Scharstein, D., 2007. Evaluation of cost functions for stereo matching. In: Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Minneapolis, USA, 17-22 June. pp. 1–8. doi: 10.1109/CVPR.2007.383248.

Hirschmuller, H., Scharstein, D., 2009. Evaluation of stereo matching costs on images with radiometric differences. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 31 (9), 1582–1599. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.221.

Höhle, J., Höhle, M., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 64 (4), 398–406. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003.

Hong, S.-H., Wdowinski, S., Amelung, F., Kim, H.-C., Won, J.-S., Kim, S.-W., 2018. Using TanDEM-X pursuit monostatic observations with a large perpendicular baseline to extract glacial topography. Remote Sens. 10 (11), 1851. https://doi.org/10.3390/rs10111851.

Kanade, T., Okutomi, M., 1994. A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 16 (9), 920–932. https://doi.org/10.1109/34.310690.

Kang, S.B., Szeliski, R., Chai, J., 2001. Handling occlusions in dense multi-view stereo. In: Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Kauai, USA, 8–14 December. pp. I-103-I-110. doi: 10.1109/CVPR.2001.990462.

Karvonen, J., Cheng, B., Vihma, T., Arkett, M., Carrieres, T., 2012. A method for sea-ice thickness and concentration analysis based on SAR data and a thermodynamic model. Cryosphere 6, 1507–1526. https://doi.org/10.5194/tc-6-1507-2012.

Kim, H., Han, H., Hyun, C., Chi, J., Son, Y., Lee, S., 2019a. Research on analytical technique for satellite observation of the Arctic sea ice. Korea J. Remote Sens. 34 (6_2), 1283–1298. https://doi.org/10.7780/kjrs.2018.34.6.2.12.

Kim, J.-I., Kim, H.-C., 2018. Incorrect match detection method for Arctic sea-ice reconstruction using UAV images. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLII-2, 501–505. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-501-2018.

Kim, J.-I., Hyun, C.-U., Han, H., Kim, H., 2019b. Evaluation of matching costs for high-quality sea-ice surface reconstruction from aerial images. Remote Sens. 11 (9), 1055. https://doi.org/10.3390/rs11091055.

Lang, A., Yang, S., Kaas, E., 2017. Sea ice thickness and recent Arctic warming. Geophys. Res. Lett. 44 (1), 409–418. https://doi.org/10.1002/2016GL071274.

Meier, W.N., Hovelsrud, G.K., van Oort, B.E.H., Key, J.R., Kovacs, K.M., Michel, C., Reist, J.D., 2014. Arctic sea ice in transformation: a review of recent observed changes and impacts on biology and human activity. Rev. Geophys. 52 (3), 185–217. https://doi.org/10.1002/2013RG000431.

Nolin, A.W., Mar, E., 2019. Arctic sea ice surface roughness estimated from multi-angular reflectance satellite imagery. Remote Sens. 11 (1), 50. https://doi.org/10.3390/rs11010050.

Padró, J.-C., Muñoz, F.-J., Planas, J., Pons, X., 2019. Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. Int. J. Appl. Earth Obs. 75, 130–140. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.018.

Pistone, K., Eisenman, I., Ramanathan, V., 2014. Observational determination of albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice. Proc. Natl. Acad. Sci. 111 (9), 3322–3326. https://doi.org/10.1073/pnas.1318201111.

Pluim, J.P.W., Maintz, J.B.A., Viergever, M.A., 2003. Mutual-information-based registration of medical images: a survey. IEEE Trans. Med. Imaging 22 (8), 986–1004. https://doi.org/10.1109/TMI.2003.815867.

Scharien, R.K., Yackel, J.J., 2005. Analysis of surface roughness and morphology of first-year sea ice melt ponds: implications for microwave backscatter. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 43 (12), 2927–2939. https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.857896.

Shi, H., Zhu, H., Wang, J., Yu, S.-Y., Fu, Z.-F., 2016. Segment-based adaptive window and multi-feature fusion for stereo matching. J. Algorithms Comput. Technol. 10 (1), 3–11. doi: 10.1177%2F1748301815618299.

Toutin, T., 2004. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. Int. J. Remote Sens. 25 (10), 1893–1924. https://doi.org/10.1080/0143116031000101611.

Tschudi, M.A., Maslanik, J.A., Perovich, D.K., 2008. Derivation of melt pond coverage on Arctic sea ice using MODIS observations. Remote Sens. Environ. 112 (5), 2605–2614. https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.009.

Turner, D., Lucieer, A., Watson, C., 2012. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) Imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. Remote Sens. 4 (5), 1392–1410. https://doi.org/10.3390/rs4051392.

Turner, D., Lucieer, A., Wallace, L., 2014. Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 52 (5), 2738–2745. https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2265295.

Vihma, T., 2014. Effect of Arctic sea-ice decline on weather and climate: a review. Surv. Geophys. 35, 1175–1214. https://doi.org/10.1007/s10712-014-9284-0.

Vinnikov, K.Y., 1999. Global warming and northern hemisphere sea ice extent. Science 286 (5446), 1934–1937. https://doi.org/10.1126/science.286.5446.1934.

Veksler, O., 2003. Fast variable window for stereo correspondence using integral images. In: Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Madison, USA, 18–20 June. pp. I–I. doi: 10.1109/CVPR.2003.1211403.

Wu, W., Zhu, H., Yu, S., Shi, J., 2019. Stereo matching with fusing adaptive support weights. IEEE Access 7, 61960–61974. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2916035.

Yang, Q., Wang, L., Yang, R., Stewenius, H., Nister, D., 2009. Stereo matching with color-weighted correlation, hierarchical belief propagation, and occlusion handling. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 31 (3), 492–504. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.99.

Yitayew, T.G., Dierking, W., Divine, D.V., Eltoft, T., Ferro-Famil, L., Rosel, A., Negrel, J., 2018. Validation of sea-ice topographic heights derived from TanDEM-X interferometric SAR data with results from laser profiler and photogrammetry. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 56 (11), 1–17. https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2839590.

Yoon, K.J., Kweon, S., 2006. Adaptive support-weight approach for correspondence search. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 28 (4), 650–656. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.70.

Zhang, J., Li, D.-X., Zhang, M., 2010. Fast stereo matching algorithm based on adaptive window. In: Proc. International Conference on Audio, Language and Image Processing, Shanghai, China, 23–25 November. pp. 138–142. doi: 10.1109/ICALIP.2010.5684994.

Zhang, K., Sheng, Y., Wang, M., Fu, S., 2018. An enhanced multi-view vertical line locus matching algorithm of object space ground primitives based on positioning consistency for aerial and space images. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 139, 241–254. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.03.017.

Zhang, Y., Zhang, Y., Mo, D., Zhang, Y., Li, X., 2017. Direct digital surface model generation by semi-global vertical line locus matching. Remote Sens. 9 (3), 214. https://doi.org/10.3390/rs9030214.

GISCIENCE & REMOTE SENSING
2021, VOL. 58, NO. 6, 812–830
https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1943213

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Check for updates

Retrieval of daily sea ice thickness from AMSR2 passive microwave data using ensemble convolutional neural networks

Junhwa Chi and Hyun-Cheol Kim

Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea

ABSTRACT

Recently, measurement of sea ice thickness (SIT) has received increasing attention due to the importance of thinning ice in the context of global warming. Although altimeter sensors onboard satellite missions enable continuous SIT measurements over larger areas compared to in situ observations, these sensors are inadequate for mapping daily Arctic SIT because of their small footprints. We exploited passive microwave data from AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) by incorporating a state-of-the-art deep learning (DL) approach to address this limitation. Passive microwave data offer better temporal resolutions than those from a single altimeter sensors, but are rarely used for SIT estimations due to their limited physical relationship with SIT. In this study, we proposed an ensemble DL model with different modalities to produce daily pan-Arctic SIT retrievals. The proposed model determined the hidden and unknown relationships between the brightness temperatures of AMSR2 channels and SITs measured by CryoSat-2 (CS2) from the extended input features defined by our feature augmentation strategy. Although AMSR2-based SITs agreed well with CS2-derived gridded SIT values, they had similar uncertainties and errors in the CS2 SIT measurements, particularly for thin ice. However, based on quantitative validations using long-term unseen data and IceBridge data, the proposed retrieval model consistently generated SITs from AMSR2 at 25 km spatial resolution, regardless of time and space.

ARTICLE HISTORY
Received 9 March 2021
Accepted 8 June 2021

KEYWORDS
AMSR2; Arctic sea ice; convolutional neural network; deep learning; passive microwave; sea ice thickness

1. Introduction

Sea ice is the largest reflector of solar radiation, is known to reduce heat exchanges between the ocean and the atmosphere and is one of the most visible components of the climate system (Smith 1998; Spreen, Kaleschke, and Heygster 2008; Vinnikov et al. 1999). Thinning ice and increases in both ice-free periods and regions reportedly accelerate global warming (Ivanova et al. 2015; Stroeve et al. 2012, 2014). Among the most important Arctic sea ice parameters, sea ice thickness (SIT) and volume are related to changes in the heat budget of the Arctic and the exchanges of fresh water between sea ice and the ocean (Han et al. 2020; Laxon et al. 2013; Liu et al. 2020).

Observations of ice thickness by research vessels and aircraft are generally made via field campaigns, such as the National Aeronautics and Space Administration (NASA) Operation IceBridge (OIB), which links the measurements of air- and space-borne laser altimeters to compare and generate a long-term ice altimetry record (Koenig et al. 2010; Kwok et al. 2011). Ice thickness data from ships and aircraft enable coverage of extended areas, compared to data from ice profiling sonar (IPS) or upward-looking sonar (ULS), and are used to fill in gaps in polar observations between satellite missions (Koenig et al. 2010; Kwok et al. 2011). A moored sonar has the advantage of being able to record ice drafts at specific locations throughout the year continuously; however, these data are often noisy and are challenging to accurately convert into their corresponding thickness values (Proshutinsky, Bourke, and McLaughlin 2002; Yoshizawa, Shimada, and Cho 2018). Alternatively, since the initiation of the ICESat (IS) and CryoSat (CS) missions, satellite-based altimeters now provide the capacity to periodically measure ice freeboard over extended areas; thus, enabling ice volume estimations (Kwok et al. 2019; Laxon et al. 2013). Sea ice thickness observations from satellite missions have been validated using airborne electromagnetic sensors, sonar moorings, and OIB aircraft lasers (Kwok et al. 2019; Laxon et al. 2013). Since overall comparisons between satellite-based thickness estimates and in situ data show good agreement, these data are

CONTACT Hyun-Cheol Kim kimhc@kopri.re.kr
© 2021 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

Although the proposed ensemble 1D-CNN model successfully estimated SITs from AMSR2 PMW data at 25 km spatial resolution and showed good agreements with gridded CS2 estimates, the uncertainties and errors in the CS2 measurements, particularly for ice less than 1 m thick, were also observed in comparisons with daily SMOS ice thickness data (Figures 7 and 8). Since the SIT retrieval model used in this study was trained using gridded SIT_{CS2} as a reference for all ice thickness ranges, it may also capture uncertainties and errors in the reference data due to the characteristics of the DL models. Although 12 cm of MAE may not be trivial for new or young ice, it is worth noting that providing daily SIT maps for the entire Arctic would improve various cryosphere studies/models and support industrial applications. In addition, combining the proposed model with L-band (1.4 GHz) data from SMOS, widely used to derive thin ice thicknesses, would be worthwhile for extending this research.

Acknowledgements

Daily Level-3 gridded TB data of AMSR2, SIT trajectory data of CS2, and NASA's OIB data are publicly available at the Globe Portal System (https://gportal.jaxa.jp) operated by JAXA, AWI (https://awi.de), and NSDIC (https://nsidc.org), respectively.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

Funding

This work was supported by the Korea Polar Research Institute [PE21040].

ORCID

Junhwa Chi http://orcid.org/0000-0003-4943-3790
Hyun-Cheol Kim http://orcid.org/0000-0002-6831-9291

References

Aaboe, S., L. A. Breivik, A. Sørensen, S. Eastwood, and T. Lavergne. 2016. "Global Sea Ice Edge and Type Product User's Manual." *OSI-403-c & EUMETSAT* 250: 1–34.

Agarap, A. F. 2018. "Deep Learning Using Rectified Linear Units (Relu)." *arXiv Preprint arXiv:1803.08375*.

Alexandrov, V., S. Sandven, J. Wahlin, and O. M. Johannessen. 2010. "The Relation between Sea Ice Thickness and Freeboard in the Arctic." *Cryosphere* 4 (3): 373–380. doi:10.5194/tc-4-373-2010.

Bellman, R. E. 2015. *Adaptive Control Processes: A Guided Tour*. Princeton, New Jersey: Princeton university press.

Brochu, E., V. M. Cora, and N. De Freitas. 2010. "A Tutorial on Bayesian Optimization of Expensive Cost Functions, with Application to Active User Modeling and Hierarchical Reinforcement Learning." *arXiv Preprint arXiv:1012.2599*.

Cavalieri, D. J., C. L. Parkinson, P. Gloersen, J. C. Comiso, and H. H. Zwally. 1999. "Deriving Long-term Time Series of Sea Ice Cover from Satellite Passive-microwave Multisensor Data Sets." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 104 (C7): 15803–15814. doi:10.1029/1999JC900081.

Cavalieri, D. J., P. Gloersen, and W. J. Campbell. 1984. "Determination of Sea Ice Parameters with the Nimbus 7 SMMR." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 89 (D4): 5355–5369. doi:10.1029/JD089iD04p05355.

Chi, J., and H.-C. Kim. 2017. "Prediction of Arctic Sea Ice Concentration Using a Fully Data Driven Deep Neural Network." *Remote Sensing* 9 (12): 1305. doi:10.3390/rs9121305.

Chi, J., H.-C. Kim, S. Lee, and M. M. Crawford. 2019. "Deep Learning Based Retrieval Algorithm for Arctic Sea Ice Concentration from AMSR2 Passive Microwave and MODIS Optical Data." *Remote Sensing of Environment* 231: 111204. doi:10.1016/j.rse.2019.05.023.

Comiso, J. C. 1986. "Characteristics of Arctic Winter Sea Ice from Satellite Multispectral Microwave Observations." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 91 (C1): 975–994. doi:10.1029/JC091iC01p00975.

Comiso, J. C., C. L. Parkinson, R. Gersten, and L. Stock. 2008. "Accelerated Decline in the Arctic Sea Ice Cover." *Geophysical Research Letters* 35 (1). doi:10.1029/2007GL031972.

Durner, G. M., D. C. Douglas, S. E. Albeke, J. P. Whiteman, S. C. Amstrup, E. Richardson, M. Ben-David, and M. Ben-David. 2017. "Increased Arctic Sea Ice Drift Alters Adult Female Polar Bear Movements and Energetics." *Global Change Biology* 23 (9): 3460–3473. doi:10.1111/gcb.13746.

Fernández-Delgado, M., E. Cernadas, S. Barro, and D. Amorim. 2014. "Do We Need Hundreds of Classifiers to Solve Real World Classification Problems?" *Journal of Machine Learning Research* 15: 3133–3181.

Gardner, M. W., and S. R. Dorling. 1998. "Artificial Neural Networks (The Multilayer Perceptron)—a Review of Applications in the Atmospheric Sciences." *Atmospheric Environment* 32 (14–15): 2627–2636. doi:10.1016/S1352-2310(97)00447-0.

Gloersen, P., and D. J. Cavalieri. 1986. "Reduction of Weather Effects in the Calculation of Sea Ice Concentration from Microwave Radiances." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 91 (C3): 3913–3919. doi:10.1029/JC091iC03p03913.

Han, Hz., J.-I. Kim, C.-U. Hyun, S. H. Kim, J.-W. Park, Y.-J. Kwon, S. Lee, S. Lee and H.-C. Kim. 2020. "Surface roughness signatures of summer arctic snow-covered sea ice in X-band dual-polarimetric SAR." *GIScience & Remote Sensing* 57(5): 650–669. doi:10.1080/15481603.2020.1767857

Remote Sensing of Environment 242 (2020) 111782

Contents lists available at ScienceDirect

Remote Sensing of Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rse

Object-based landfast sea ice detection over West Antarctica using time series ALOS PALSAR data

Miae Kim[a,b,c], Hyun-Cheol Kim[d], Jungho Im[a,*], Sanggyun Lee[e], Hyangsun Han[f]

[a] School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, South Korea
[b] Institute of Meteorology and Climate Research, Karlsruhe Institute of Technology, 76128 Karlsruhe, Germany
[c] Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Karlsruhe Institute of Technology, 76128 Karlsruhe, Germany
[d] Unit of Arctic Sea-Ice Prediction, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, South Korea
[e] Centre for Polar Observation and Modelling, Earth Sciences, University College London, London WC1E 6BS, UK
[f] Division of Geology & Geophysics, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do 24341, South Korea

ARTICLE INFO

Edited by Menghua Wang

Keywords:
Landfast sea ice
L-band SAR
ALOS PALSAR
Object correlation analysis
Machine learning

ABSTRACT

Landfast sea ice (fast ice) is an important feature prevalent around the Antarctic coast, which is affected by climate change and energy exchanges with the atmosphere and ocean. This study proposed a method for detection of the West Antarctic fast ice using the Advanced Land Observing Satellite Phased Array L-band SAR (ALOS PALSAR) images. The algorithm has combined image segmentation, image correlation analysis, and machine learning techniques (i.e., random forest (RF), extremely randomized trees (ERT), and logistic regression (LR)). We used SAR images with a baseline of 5 days that are not in the same orbit but overlap each other as overlaps between swaths in adjacent orbits are often available in the polar regions. The underlying assumption for the proposed fast ice detection algorithm is that fast ice regions in SAR images with a time interval of 5 days are highly correlated. The object-based approach proposed in this study was well suited to high-resolution SAR images in deriving spatially homogeneous fast ice regions. The image segmentation results using the optimized parameters showed a distinct difference in the backscatter temporal evolution between fast ice and pack ice regions. Correlation and STD of backscattering coefficients were found to be the most significant variables for the object-based fast ice detection from two temporally separated images. In overall, the quantitative and qualitative evaluation demonstrated that the algorithm was an effective approach to detect fast ice with high accuracies. The models well detected various fast ice regions in the West Antarctica but misclassified some objects. The misclassifications occurred toward the edge of fast ice regions with relatively rapid changes in backscattering between both data acquisitions. On the other hand, few fast ice objects were misclassified as uniform backscattering over time occurred by chance on very small objects far from the coast. Very old multi-year fast ice regions with high backscattered signals were also a source for some misclassifications. This may be due to the sensitivity of L-band to snow structure to some extent and a thinner ice over the region with either ice growth (no deformation) or closing (slight deformation) between both images. Heavy snow load on the ice could be another error source for some misclassification as well. The approach allowed for the reliable detection of fast ice regions by using L-band SAR images with a small local incidence angle difference.

1. Introduction

Sea ice plays an important role in modulating global climate and ocean changes by reflecting incoming solar radiation (Parkinson and DiGirolamo, 2016) and decreasing heat loss from the ocean to the atmosphere (Stammerjohn et al., 2008). Antarctic sea ice production also contributes to deep-water formation and hence affects global atmospheric and thermohaline ocean circulation (Zwally et al., 1983; Bintanja et al., 2013; Ohshima et al., 2013). Sea ice conditions including extent, concentration, thickness, and deformation have practical implications on scientific exploration and research such as ice navigation and route planning for icebreakers, and in situ sampling strategy (Parkinson and Cavalieri, 2012; Normile, 2015). The Antarctic sea ice extent has shown a slowly increasing trend while Arctic sea ice extent has diminished (Zwally et al., 2002; Cavalieri and Parkinson, 2008; Simmonds, 2015; Parkinson and DiGirolamo, 2016; Comiso et al.,

* Corresponding author.
E-mail address: ersgis@unist.ac.kr (J. Im).

https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111782
Received 31 December 2019; Received in revised form 11 March 2020; Accepted 16 March 2020
Available online 24 March 2020
0034-4257/ © 2020 Elsevier Inc. All rights reserved.

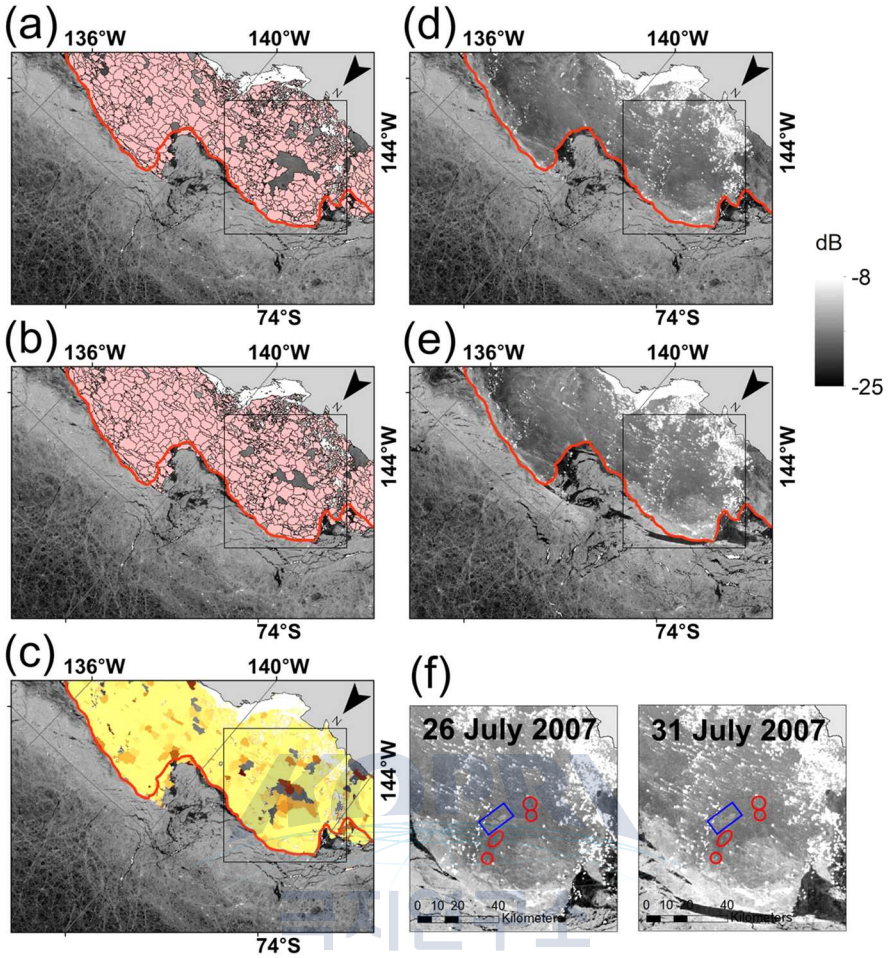


Fig. 12. Landfast sea ice detection results off the Nickerson ice shelf, eastern Ross Sea of (a) random forest (RF), (b) extremely randomized trees (ERT), (c) logistic regression (LR) models, (d) backscatter image of L-band HH-pol ALOS PALSAR for date 1 (26 July 2007), and (e) backscatter image for date 2 (31 July 2007), and (f) a closer view for the misclassified fast ice region (solid black line box) with red circles and a floe in the blue rectangular box that show some changes in the backscattering between both images. Red solid lines indicate the reference fast ice edge, RF and ERT results are shown in pink color and LR result for the probability of fast ice coverage in yellowish-starched color, and gray areas are both Antarctic continent and ice shelves. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This study was supported by the Korea Polar Research Institute (KOPRI) grant PE20080 (Study on remote sensing for quantitative analysis of changes in the Arctic cryosphere), by the Korea Meteorological Administration Research and Development Program under Grant KMIPA 2017-7010, by the Space Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT, & Future Planning (NRF-2017M1A3A3A02015981) and by Ministry of Interior and Safety (MOIS), Korea (2019-MOIS32-015). Special thanks to Dr. Wolfgang Dierking for valuable discussion of the research findings.

Appendix A. Segmentation process in eCognition software

The multiresolution segmentation algorithm in eCognition was used, which is a bottom-up segmentation method that minimizes the heterogeneity of image objects and maximizes homogeneity to obtain the best segmentation results (Belgiu and Drăguţ, 2014). Segmentation starts with single pixels and repeatedly merges them into larger groups by using certain user-defined criteria for homogeneity (Chen et al., 2018; Lu and He, 2018; Han et al., 2018). The segmentation procedure iterates until each image object finds the best neighbor to merge with based on several user-defined segmentation criteria with three parameters (i.e., scale, shape, and compactness; Witharana and Civco, 2014). First, the scale parameter

The Cryosphere, 14, 1083–1104, 2020
https://doi.org/10.5194/tc-14-1083-2020
© Author(s) 2020. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 4.0 License.

The Cryosphere Open Access EGU

Prediction of monthly Arctic sea ice concentrations using satellite and reanalysis data based on convolutional neural networks

Young Jun Kim[1], **Hyun-Cheol Kim**[2], **Daehyeon Han**[1], **Sanggyun Lee**[3], **and Jungho Im**[1]

[1]School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, South Korea
[2]Unit of Arctic Sea-Ice Prediction, Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea
[3]Centre for Polar Observation and Modelling, University College London, London, UK

Correspondence: Jungho Im (ersgis@unist.ac.kr)

Received: 30 June 2019 – Discussion started: 5 August 2019
Revised: 11 February 2020 – Accepted: 26 February 2020 – Published: 25 March 2020

Abstract. Changes in Arctic sea ice affect atmospheric circulation, ocean current, and polar ecosystems. There have been unprecedented decreases in the amount of Arctic sea ice due to global warming. In this study, a novel 1-month sea ice concentration (SIC) prediction model is proposed, with eight predictors using a deep-learning approach, convolutional neural networks (CNNs). This monthly SIC prediction model based on CNNs is shown to perform better predictions (mean absolute error – MAE – of 2.28 %, anomaly correlation coefficient – ACC – of 0.98, root-mean-square error – RMSE – of 5.76 %, normalized RMSE – nRMSE – of 16.15 %, and NSE – Nash–Sutcliffe efficiency – of 0.97) than a random-forest-based (RF-based) model (MAE of 2.45 %, ACC of 0.98, RMSE of 6.61 %, nRMSE of 18.64 %, and NSE of 0.96) and the persistence model based on the monthly trend (MAE of 4.31 %, ACC of 0.95, RMSE of 10.54 %, nRMSE of 29.17 %, and NSE of 0.89) through hindcast validations. The spatio-temporal analysis also confirmed the superiority of the CNN model. The CNN model showed good SIC prediction results in extreme cases that recorded unforeseen sea ice plummets in 2007 and 2012 with RMSEs of less than 5.0 %. This study also examined the importance of the input variables through a sensitivity analysis. In both the CNN and RF models, the variables of past SICs were identified as the most sensitive factor in predicting SICs. For both models, the SIC-related variables generally contributed more to predict SICs over ice-covered areas, while other meteorological and oceanographic variables were more sensitive to the prediction of SICs in marginal ice zones. The proposed 1-month SIC prediction model provides valuable information which can be used in various applications, such as Arctic shipping-route planning, management of the fishing industry, and long-term sea ice forecasting and dynamics.

1 Introduction

Sea ice refers to the frozen seawater that covers approximately 15 % of the oceans in the world (National Snow and Ice Data Center, 2018). Sea ice reflects more solar radiation than the water's surface, which makes the polar regions relatively cool. Sea ice shrinks in summer due to the warmer climate and expands in the winter season. Many studies on Arctic sea ice monitoring and dynamics have been conducted because it plays a significant role in the energy and water balance of global climate systems (Ledley, 1988; Guemas et al., 2016). In particular, the change in sea ice is an important indicator that shows the degree of ongoing climate change (Johannessen et al., 2004). Global warming causes a decrease in sea ice that worsens the arctic amplification, which in turn accelerates global warming itself (Cohen et al., 2014; Francis and Vavrus, 2015). In addition, sea ice affects various oceanic characteristics and societal issues, such as ocean current circulation, by changing salinity and temperature gradation (Timmermann et al., 2009); polar ecosystems, by affecting key parts of the Arctic food web like sea ice algae (Doney et al., 2012); and economic industries, e.g., Arctic shipping routes (Melia et al., 2016).

Arctic sea ice has been rapidly declining, which impacts not only the Arctic climate but also possibly the mid-latitudes (L. Yu et al., 2017). Numerous studies have shown significant interactions between the ocean and climate character-

Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.

ice minimums were caused by not only the anomalous warm atmospheric conditions of the summer season but also by persistently warm winter and spring seasons, which especially affected the melting in the marginal ice zone (Devasthale et al., 2013). The proposed CNN model could be used for the longer prediction (i.e., 2- or 3-month prediction) in consideration of the persistent effects of input variables such as SST and T2m. Moreover, additional input variables that represent seasonal or longer-term variabilities in the Arctic environment should be considered in the proposed models. The persistence of sea ice volume and atmospheric-circulation-related variables would be suitable for the long-term sea ice forecast (Guemas et al., 2016). Second, the sea ice thickness is an important factor when predicting sea ice changes because the thinner sea ice is relatively vulnerable to melt (Stroeve et al., 2008; Chevallier et al., 2013; Zhang et al., 2013). However, we did not consider sea ice thickness data because of the limited availability of reliable sea ice thickness products. Third, there is a well-known problem with deep-learning models – interpretability. Because of complicated and non-linear connections between hidden layers, the deep-learning models are hard to interpret (Koh and Liang, 2017; Guidotti et al., 2018). Recent deep-learning studies have attempted to report explainable results using various visualization approaches such as heat maps and occlusion maps (Brahimi et al., 2017; Trigueros et al., 2018). The present study explained the model using variable sensitivity analysis as well as the inspection of the spatial distribution. However, the model still has problems providing clear interpretations of the non-linear relationships among variables.

5 Conclusions

The main purpose of this study was to develop a novel 1-month SIC prediction model using the CNN approach. The CNN model showed better prediction performance (MAE of 2.28 %, ACC of 0.98, RMSE of 5.76 %, nRMSE of 16.15 %, and NSE of 0.97) than the persistence forecast (MAE of 4.31 %, ACC of 0.95, RMSE of 10.54 %, nRMSE of 29.17 %, and NSE of 0.89) and RF models (MAE of 2.45 %, ACC of 0.98, RMSE of 6.61 %, nRMSE of 18.64 %, and NSE of 0.96). The prediction accuracy in the melting season (June–September; nRMSE of 19.09 %) was lower than the freezing season (December–March; nRMSE of 14.08 %). The overall prediction accuracy decreased in more recent years because of the accelerated sea ice melting caused by global warming. In two extreme cases, the CNN model yielded promising prediction results with respect to RMSE as well as the spatial distribution of SICs (less than 5 % RMSE). The prediction errors normally occurred in the marginal ice zone, which has higher sea ice anomalies. From the variable sensitivity analysis using CNN, the SICs 1 year before were identified as the most important factor in predicting sea ice changes. While the SIC-related variables had large effects on SIC prediction over ice-covered areas, the other meteorological and oceanographic variables were more sensitive in predicting the SICs in marginal ice zones.

Data availability. The research data can be obtained by request to the corresponding author (ersgis@unist.ac.kr).

Author contributions. YJK led the paper writing and contributed to data analysis and research design. HK and SL contributed to the research design and discussion of the results. DH contributed to data processing and analysis. JI supervised this study; contributed to the research design, paper writing, and discussion of the results; and served as the corresponding author.

Competing interests. The authors declare that they have no conflict of interest.

Financial support. This study was supported by the Korea Polar Research Institute (grant no. PE20080), the Korea Meteorological Administration (grant no. KMIPA 2017-7010), and the National Research Foundation of Korea (grant no. NRF-2017M1A3A3A02015981).

Review statement. This paper was edited by David Schroeder and reviewed by three anonymous referees.

References

Archer, K. J. and Kimes, R. V.: Empirical characterization of random forest variable importance measures, Comput. Stat. Data. An., 52, 2249–2260, https://doi.org/10.1016/j.csda.2007.08.015, 2008.

Årthun, M., Eldevik, T., Smedsrud, L. H., Skagseth, Ø., and Ingvaldsen, R. B.: Quantifying the Influence of Atlantic Heat on Barents Sea Ice Variability and Retreat, J. Climate, 25, 4736–4743, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00466.1, 2012.

Brahimi, M., Boukhalfa, K., and Moussaoui, A.: Deep learning for tomato diseases: classification and symptoms visualization, Appl. Artif. Intell., 31, 299–315, 2017.

Cavalieri, D. J. and Parkinson, C. L.: Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010, The Cryosphere, 6, 881–889, https://doi.org/10.5194/tc-6-881-2012, 2012.

Chen, K., Wang, J., Chen, L.-C., Gao, H., Xu, W., and Nevatia, R.: Abc-cnn: An attention based convolutional neural network for visual question answering, arXiv Prepr. arXiv1511.05960, 2015.

Chevallier, M., Salas y Mélia, D., Voldoire, A., Déqué, M., and Garric, G.: Seasonal forecasts of the pan-Arctic sea ice extent using a GCM-based seasonal prediction system, J. Climate, 26, 6092–6104, 2013.

Chi, J. and Kim, H.: Prediction of Arctic Sea Ice Concentration Using a Fully Data Driven Deep Neural Network, Remote Sens., 9, 1305, https://doi.org/10.3390/rs9121305, 2017.

remote sensing

MDPI

Technical Note

Spatial and Temporal Variability of Minimum Brightness Temperature at the 6.925 GHz Band of AMSR2 for the Arctic and Antarctic Oceans

Young-Joo Kwon [1], Sungwook Hong [2], Jeong-Won Park [1], Seung Hee Kim [1], Jong-Min Kim [1] and Hyun-Cheol Kim [1,*]

[1] Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea; kwonyj@kopri.re.kr (Y.-J.K.); jeong-won.park@kopri.re.kr (J.-W.P.); seunghee@kopri.re.kr (S.H.K.); poko519@kopri.re.kr (J.-M.K.)

[2] Department of Environment, Energy and Geoinfomatics, Sejong University, 209 Neungdongro, Gwangjin-gu, Seoul 05006, Korea; sesttiya@sejong.ac.kr

* Correspondence: kimhc@kopri.re.kr

Abstract: The minimum brightness temperature (mBT) of seawater in the polar region is an important parameter in algorithms for determining sea ice concentration or snow depth. To estimate the mBT of seawater at 6.925 GHz for the Arctic and Antarctic Oceans and to find their physical characteristics, we collected brightness temperature and sea ice concentration data from the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) for eight years from 2012 to 2020. The estimated mBT shows constant annual values, but we found a significant difference in the seasonal variability between the Arctic and Antarctic Oceans. We calculated the mBT with the radiative transfer model parameterized by sea surface temperature (SST), sea surface wind speed (SSW), and integrated water vapor (IWV) and compared them with our observations. The estimated mBT represents the modeled mBT emitted from seawater under conditions of 2–5 m/s SSW and SST below 0 °C, except in the Arctic summer. The exceptional summer mBT in the Arctic Ocean was related to unusually high SST. We found evidence of Arctic amplification in the seasonal variability of Arctic mBT.

Keywords: passive microwave; ocean; AMSR2; tie point; Arctic amplification

check for updates

Citation: Kwon, Y.-J.; Hong, S.; Park, J.-W.; Kim, S.H.; Kim, J.-M.; Kim, H.-C. Spatial and Temporal Variability of Minimum Brightness Temperature at the 6.925 GHz Band of AMSR2 for the Arctic and Antarctic Oceans. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 2122. https://doi.org/10.3390/rs13112122

Academic Editor: Xiaofeng Yang

Received: 5 April 2021
Accepted: 25 May 2021
Published: 28 May 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

The brightness temperature (BT) of seawater measured by passive microwave (PMW) satellite data is approximately proportional to sea surface emissivity and sea surface temperature. The emissivity of seawater depends on the salinity of the sea surface (SSS), sea surface temperature (SST), and sea surface wind speed (SSW) for the given observation frequency band and incidence angle of the sensor. The polar region is where the phase transition occurs between seawater and sea ice. Because solar radiation incidents in the Arctic and Antarctic oceans are low, the SST can drop to the freezing point. Open water with a salinity of 35 ‰ starts to freeze below the freezing point of −1.75 °C. If seawater were colder than the freezing point, it would freeze in thermal equilibrium. When seawater is frozen and sea ice is formed, emissivity in the microwave region increases from a value of 0.2–0.5 for the seawater to 0.9 for sea ice. Therefore, even if the sea ice has the same temperature as the ocean, the BT of sea ice measures higher than that of the ocean. Therefore, we suggest that the minimum BT (mBT) should be the coldest region near the freezing point of seawater in the polar oceans.

The mBT values in the Arctic and Antarctic oceans can be used as endpoint members of the BT distribution. The parameters related to the endpoint members of seawater and sea ice have been utilized for monitoring sea ice in the cryosphere. The most popular products including sea ice concentration (SIC) and snow depth come from PMW satellite observation data using significant emissivity contrast between the seawater and sea ice in

the polar regions is extending to the weather in the mid-latitudes and the global radiative energy budget. The minor spatial-temporal difference we found could be related to climate change. Our results provide new evidence for rapid climate change in the Arctic Ocean.

Our findings can be used to improve the accuracy of the SIC and snow depth retrieval algorithm and lead to the development of the C-band-based SIC and snow depth algorithm. C-band observation data by a PMW sensor are sensitive to sea ice while having a weak atmospheric effect. Since it has been observed for a relatively longer time than the L-band observation, it is expected that it can be used for long-term variability studies, and the L-band is sensitive to SST change and the sea ice thickness whereas 6.9 GHz is not. Radio Frequency Interference is mitigated when using low frequency such as L- and C-band channels. Furthermore, both bands are insensitive to atmospheric conditions. L/C-band combination will provide a considerable synergy to solve uncovered geophysical variables.

Author Contributions: Conceptualization, Y.-J.K.; methodology, S.H. and J.-W.P.; investigation, S.H., J.-W.P., S.H.K., J.-M.K., and H.-C.K.; resources, Y.-J.K.; writing—original draft preparation, Y.-J.K.; writing—review and editing, S.H., J.-W.P., S.H.K., J.-M.K., and H.-C.K.; visualization, Y.-J.K.; project administration, H.-C.K.; funding acquisition, H.-C.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was supported by the Korea Polar Research Institute (KOPRI) through grant PE21040 and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Korea) (Project Number: PN21030).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data and code used in this study are available by contacting the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Comiso, J.C. *SSM/I Sea Ice Concentrations Using the Bootstrap Algorithm*; National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center: Greenbelt, MD, USA, 1995; Volume 1380.
2. Cavalieri, D.J.; Gloersen, P.; Campbell, W.J. Determination of Sea Ice Parameters with the Nimbus-7 Smmr. *J. Geophys Res.-Atmos* **1984**, *89*, 5355–5369. [CrossRef]
3. Markus, T.; Cavalieri, D.J. Snow depth distribution over sea ice in the Southern Ocean from satellite passive microwave data. *Antarct. Sea Ice Phys. Process. Interact. Var.* **1998**, *74*, 19–39.
4. Andersen, S.; Tonboe, R.; Kern, S.; Schyberg, H. Improved retrieval of sea ice total concentration from spaceborne passive microwave observations using numerical weather prediction model fields: An intercomparison of nine algorithms. *Remote Sens Environ.* **2006**, *104*, 374–392. [CrossRef]
5. Huntemann, M.; Heygster, G.; Kaleschke, L.; Krumpen, T.; Makynen, M.; Drusch, M. Empirical sea ice thickness retrieval during the freeze-up period from SMOS high incident angle observations. *Cryosphere* **2014**, *8*, 439–451. [CrossRef]
6. Kilic, L.; Prigent, C.; Jimenez, C.; Donlon, C. A sensitivity analysis from 1 to 40 GHz for observing the Arctic Ocean with the Copernicus Imaging Microwave Radiometer. *Ocean. Sci. Discuss* **2020**, 1–11.
7. Ivanova, N.; Pedersen, L.; Tonboe, R.; Kern, S.; Heygster, G.; Lavergne, T.; Sørensen, A.; Saldo, R.; Dybkjær, G.; Brucker, L. Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: Towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations. *Cryosphere* **2015**, *9*, 1797–1817. [CrossRef]
8. Rostosky, P.; Spreen, G.; Farrell, S.L.; Frost, T.; Heygster, G.; Melsheimer, C. Snow depth retrieval on Arctic sea ice from passive microwave radiometers—Improvements and extensions to multiyear ice using lower frequencies. *J. Geophys. Res. Ocean.* **2018**, *123*, 7120–7138. [CrossRef]
9. Kilic, L.; Prigent, C.; Aires, F.; Boutin, J.; Heygster, G.; Tonboe, R.T.; Roquet, H.; Jimenez, C.; Donlon, C. Expected performances of the Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR) for an all-weather and high spatial resolution estimation of ocean and sea ice parameters. *J. Geophys. Res. Ocean.* **2018**, *123*, 7564–7580. [CrossRef]
10. Simmonds, I. Comparing and contrasting the behaviour of Arctic and Antarctic sea ice over the 35 year period 1979-2013. *Ann. Glaciol.* **2015**, *56*, 18–28. [CrossRef]
11. Serreze, M.C.; Francis, J.A. The arctic amplification debate. *Clim. Chang.* **2006**, *76*, 241–264. [CrossRef]
12. Stroeve, J.C.; Maslanik, J.; Serreze, M.C.; Rigor, I.; Meier, W.; Fowler, C. Sea ice response to an extreme negative phase of the Arctic Oscillation during winter 2009/2010. *Geophys. Res. Lett.* **2011**, 38. [CrossRef]

remote sensing

MDPI

Article

Evaluation of Sea Ice Radiative Forcing according to Surface Albedo and Skin Temperature over the Arctic from 1982–2015

Noh-Hun Seong [1], Hyun-Cheol Kim [2], Sungwon Choi [1], Donghyun Jin [1], Daeseong Jung [1], Suyoung Sim [1], Jongho Woo [1], Nayeon Kim [1], Minji Seo [2], Kyeong-Sang Lee [3] and Kyung-Soo Han [1,*]

[1] Division of Earth Environmental System Science (Major of Spatial Information System Engineering), Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea; seongnohhun@pukyong.ac.kr (N.-H.S.); cswyj94@pukyong.ac.kr (S.C.); dhyun201@pukyong.ac.kr (D.J.); jungdaeseong@pukyong.ac.kr (D.J.); simsuyoung@pukyong.ac.kr (S.S.); johnwoo@pukyong.ac.kr (J.W.); nayeon@pukyong.ac.kr (N.K.)

[2] Center of Remote Sensing & GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea; kimhc@kopri.re.kr (H.-C.K.); seo_mj@kopri.re.kr (M.S.)

[3] Korea Institute of Ocean Science and Technology, Korea Ocean Satellite Center, Busan 49111, Korea; kyeongsang@kiost.ac.kr

* Correspondence: kyung-soo.han@pknu.ac.kr; Tel.: +82-51-629-6659

Abstract: Rapid warming of the Arctic has resulted in widespread sea ice loss. Sea ice radiative forcing (SIRF) is the instantaneous perturbation of Earth's radiation at the top of the atmosphere (TOA) caused by sea ice. Previous studies focused only on the role of albedo on SIRF. Skin temperature is also closely related to sea ice changes and is one of the main factors in Arctic amplification. In this study, we estimated SIRF considering both surface albedo and skin temperature using radiative kernels. The annual average net-SIRF, which consists of the sum of albedo-SIRF and temperature-SIRF, was calculated as -54.57 ± 3.84 W/m^2 for the period 1982–2015. In the net-SIRF calculation, albedo-SIRF and temperature-SIRF made similar contributions. However, the albedo-SIRF changed over the study period by 0.12 ± 0.07 W/m^2 per year, while the temperature-SIRF changed by 0.22 ± 0.07 W/m^2 per year. The SIRFs for each factor had different patterns depending on the season and region. In summer, rapid changes in the albedo-SIRF occurred in the Kara and Barents regions. In winter, only a temperature-SIRF was observed, and there was little difference between regions compared to the variations in albedo-SIRF. Based on the results of the study, it was concluded that the overall temperature-SIRF is changing more rapidly than the albedo-SIRF. This study indicates that skin temperatures may have a greater impact on the Arctic than albedo in terms of sea ice surface changes.

Keywords: radiative forcing; sea ice change; radiative kernel; surface albedo; skin temperature; arctic

check for updates

Citation: Seong, N.-H.; Kim, H.-C.; Choi, S.; Jin, D.; Jung, D.; Sim, S.; Woo, J.; Kim, N.; Seo, M.; Lee, K.-S.; et al. Evaluation of Sea Ice Radiative Forcing according to Surface Albedo and Skin Temperature over the Arctic from 1982–2015. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 2512. https://doi.org/10.3390/rs14112512

Academic Editor: Yi Luo

Received: 30 April 2022
Accepted: 19 May 2022
Published: 24 May 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

Sea ice is a key indicator of climate variability and changes in the Arctic region, and one of the essential climate variables (ECVs) in the Global Climate Observing System (GCOS) [1]. Arctic sea ice strongly influences surface energy balance at high latitudes, which in turn modulates the regional and global climate system [2]. In recent decades, the near-surface air temperature of the Arctic has increased twofold relative to the global average, which is called Arctic amplification [3–6]. Arctic amplification is directly or indirectly affecting Northern Hemisphere mid-latitude weather by causing changes in storm tracks, the jet stream, and planetary waves [7]. The rapid warming of the Arctic has been accompanied by extensive sea ice loss [5]. This is also evident in paleoclimatic records [8,9], observations [10–12], and model projections [13,14]. The polarimetric radar backscattering characteristics can be utilized to observe the sea ice feature, such as sea ice condition, sea ice extent, and overlying snow on sea ice [15–17]. According to the National Snow and Ice Data Center (NSIDC), the lowest minimum sea ice extent on record occurred

4. Concluding Remarks

We calculated the net-SIRF, albedo-SIRF, and temperature-SIRF according to sea ice changes in the Arctic during 1982–2015 and analyzed the characteristics of radiative forcing by season and region. We identified the factors affecting SIRF by year, season, and month. In addition, we further analyzed the regions where annual changes are more rapid than the Arctic average. Annual average radiative forcing differed depending on the cli-mate model used, but all change trends were the same. The average albedo-SIRF and temperature-SIRF during the study period were similar; however, the albedo-SIRF changed by 0.12 ± 0.07 W/m^2 per year, while the temperature-SIRF changed by 0.22 ± 0.07 W/m^2 per year. The Baffin, Barents, Kara, Laptev, Beaufort, and Chukchi regions had the largest net-SIRF changes in the Arctic. Among these areas, the Kara Sea experienced the most rapid changes, with a net-SIRF of 0.62 ± 0.25 W/m^2, albedo-SIRF of 0.24 ± 0.14 W/m^2, and temperature-SIRF of 0.38 ± 0.11 W/m^2. Analysis by season showed that the change trend of net-SIRF did not differ significantly, while the albedo-SIRF and temperature-SIRF dis-played clear seasonality. Only the effect of the temperature-SIRF was apparent in the DJF and SON periods, and only the effect of the albedo-SIRF change was apparent in the JJA period. During the MAM period, the temperature-SIRF (0.25 ± 0.19 W/m^2) changed more rapidly than the albedo-SIRF (0.16 ± 0.26 W/m^2). The regions where SIRF changed most rapidly differed by season. The monthly change of net-SIRF was largest in June and November, due to the influence of the albedo-SIRF (0.49 ± 0.09 W/m^2) in June and temperature-SIRF (0.51 ± 0.10 W/m^2) in November. In April–June, when the influence of albedo was large, the net-SIRF changed abruptly in the Barents and Kara seas, while in November, when the influence of temperature was large, there was little difference between the regions.

The improved calculation of SIRF will improve our understanding of the physical mechanisms that cause Arctic sea ice loss, shed light on the cause of net TOA flux variability [80], and enable the climate parameters that contribute to Arctic amplification to be determined [5]. Many studies have considered albedo to be the main factor responsible for arctic amplification [28,81,82]. The albedo-SIRF changes in this study displayed a pattern similar to those of previous studies [29,36]. In this study, the net-SIRF was calculated by considering not only the albedo-SIRF, but also the temperature-SIRF. The albedo-SIRF and temperature-SIRF had similar effects on net-SIRF; however, there has been a rapid acceleration of changes in the temperature-SIRF compared to the albedo-SIRF. Thus, more rapid change in the Arctic may be predicted when only albedo is used in estimations. Further research is needed to determine the effects of changes in skin temperature and albedo on Arctic sea ice from a surface perspective.

Author Contributions: Conceptualization, N.-H.S., M.S., H.-C.K. and K.-S.H.; methodology, N.-H.S., K.-S.L. and K.-S.H.; formal analysis, N.-H.S., S.C., D.J. (Donghyun Jin) and M.S.; investigation, N.-H.S., J.W. and N.K.; writing: original draft preparation, N.-H.S.; writing: review and editing, N.-H.S. and K.-S.H.; visualization, N.-H.S., D.J. (Donghyun Jin), D.J. (Daeseong Jung) and S.S.; supervision, K.-S.H.; project administration, H.-C.K. and K.-S.H.; funding acquisition, K.-S.H. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Korea Polar Research Institute, grant number PE22040.

Data Availability Statement: The CLARA-A2 are available at the CM SAF website at https://wui.cmsaf.eu/safira/action/viewDoiDetails?acronym=CLARA_AVHRR_V002_01 (accessed on 28 April 2022). The ECMWF ERA5 data are available at the ECMWF website at https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset (accessed on 28 April 2022). The NSIDC data are available at the NSIDC website at https://nsidc.org/data (accessed on 28 April 2022). The CAM5 and the ECHAM6 data are available at the NCAR website at https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/radiative-kernels-climate-models (accessed on 28 April 2022). The HadGEM2 and the HadGEM3 data are available at the University of Leeds website at http://homepages.see.leeds.ac.uk/~mencsm/kernels.htm (accessed on 28 April 2022). The GFDL data are available at the University of Miami website at https://climate.rsmas.miami.edu/data/radiative-kernels/index.html (accessed on 28 April 2022).

frontiers | Frontiers in Marine Science

TYPE Original Research
PUBLISHED 14 September 2022
DOI 10.3389/fmars.2022.969159

Check for updates

OPEN ACCESS

EDITED BY
Laurent Bertino,
Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Norway

REVIEWED BY
Awnesh Singh,
University of the South Pacific, Fiji
Jiping Xie,
Nansen Environmental and Remote Sensing Center, Norway

*CORRESPONDENCE
Hyun-Cheol Kim
kimhc@kopri.re.kr

SPECIALTY SECTION
This article was submitted to Physical Oceanography, a section of the journal Frontiers in Marine Science

RECEIVED 14 June 2022
ACCEPTED 09 August 2022
PUBLISHED 14 September 2022

CITATION
Park J-E, Kim H-C and Cho K-H (2022) Variability of Near-Surface Salinity in the Nordic Seas Over the Past Three Decades (1991-2019). *Front. Mar. Sci.* 9:969159. doi: 10.3389/fmars.2022.969159

COPYRIGHT
© 2022 Park, Kim and Cho. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Variability of Near-Surface Salinity in the Nordic Seas Over the Past Three Decades (1991-2019)

Ji-Eun Park[1], Hyun-Cheol Kim[1]* and Kyoung-Ho Cho[2]

[1]Center of Remote Sensing and Geographic Information System, Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea, [2]Division of Ocean Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea

The Nordic Seas have been widely implicated by deep water formation as a part of Atlantic Meridional Overturning Circulation. This study explores the spatiotemporal variations in the near-surface salinity over the Nordic Seas associated with surface freshening factors by using monthly TOPAZ4 reanalysis data from 1991 to 2019. We first show that reliability of TOPAZ4 data compared to the salinity products of other reanalysis data, satellite data, and *in-situ* measurements in the Nordic Seas. The salinity variability was larger in the Greenland Sea (GS) than in the Norwegian Sea (NS) on both time scales of seasonal and interannual. The seasonal change of GS salinity was coincident with the seasonality of sea ice extent. The longer-time variations are decomposed by empirical orthogonal function (EOF) analysis. The GS salinity is mainly affected by current advection (29%) and sea ice extent (11%). The interannual response of salinity to the sea ice extent over the GS differs by season. NS salinity variability responds to the strength of the Subpolar Gyre associated with a large-scale atmospheric system that caused the freshening event in the mid-1990s. The propagation of the northward Atlantic Water core is observed over the period of about 3 years from the Faroe Shetland Channel to the Fram Strait at a speed of 2.6-6.5° year^{-1}. Other freshening factors such as sea ice export from the Arctic, freshwater flux at the Fram Strait, and net precipitation are also discussed. For the past three decades, the continuous trend appeared only in the sea ice extent, which might be a signal of climate changes over high latitude. However, there was no significant trend other than the periodic change in a few years to the decadal time scale in the salinity of GS and NS. As preconditioning for deep convection, near-surface salinity within Greenland Sea Gyre was influenced by salinity fluctuation in both GS and NS.

KEYWORDS

near-surface salinity, the Nordic Seas, surface freshening, reanalysis data, deep convection, climate change

narrow coastal currents. All analysis so far indicates that there is no long-term trend in the Nordic Seas upper-layer salinity over the last three decades. The salinity within the GSG is affected by significant changes in GS and NS respectively, which is related to the formation of a mixed layer and leads to the condition for deep convection to occur. Changes in surface salinity on the GSG also do not imply a specific tendency in deep convection over the past 30 years.

Many scientists also insist such a shutdown scenario is not likely because the freshwater formed in the Arctic tends to remain within the Arctic Basin rather than outflow to the GS diluting the AW (Aagaard and Carmack, 1989; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019). Nonetheless, there is always the possibility that certain balances in the Arctic environment suddenly change. If there are rapid changes in atmospheric forcing over the high latitude region or the Arctic's freshwater capacity reaches its limit, much of the freshwater in the Arctic Ocean can suddenly outflow. In conclusion, near-surface salinity in the Nordic Seas has not changed dramatically compared to the concerns of sea ice melt. Rather, various freshening factors related to climate change affect near-surface salinity in the GS and NS respectively, and the appearance of low near-salinity over the GSG by effects from both areas may cause unfavorable conditions for deep convection. This study also emphasized the possibility of using reanalysis data for spatiotemporal analysis as a proxy for near-surface salinity over the Nordic Seas. Further studies should be conducted to understand the linkage processes in detail by adopting other environmental changes including thermohaline structures and air-sea interaction associated with deep convection. The effect of massive land ice discharge on surface salinity relaxation is also worth due consideration. Although the reanalysis salinity data presented reliable ocean state and analysis results, the sparse observational record over the high latitude ocean is still rather short to fully investigate the causes of inter-decal variability in the properties of the Nordic Seas. It is essential to continue monitoring the salinity to assess its role in ongoing and future climate change.

Data availability statement

The original contributions presented in the study are included in the article/supplementary material. Further inquiries can be directed to the corresponding author.

Author contributions

J-EP organized the research, analyzed the datasets, prepared figures, and wrote the manuscript. H-CK contributed project development, ideas, and manuscript reviewing. K-HC develop ideas and revised the manuscript. All authors contributed to the final version of the manuscript.

Funding

This work was supported by the Korea Polar Research Institute (KOPRI) grant funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (KOPRI PE22040).

Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

References

Aagaard, K. (1970). Wind-driven transports in the Greenland and Norwegian seas. *Deep-Sea Res.* 17, 281–291. doi: 10.1016/0011-7471(70)90021-5

Aagaard, K., and Carmack, E. C. (1989). The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *J. Geophys. Res.* 94, 14485–14498. doi: 10.1029/JC094iC10p14485

Aagaard, K., Foldvik, A., and Hillman, R. S. (1987). The West spitsbergen current: Disposition and water mass transformation. *J. Geophys. Res.* 92 (C4), 3778–3784. doi: 10.1029/JC092iC04p03778

Bashmachnikov, I. L., Fedorov, A. M., Golubkin, P. A., Vesman, A. V., Selyuzhenok, V. V., Gnatiuk, N. V., et al. (2021). Mechanisms of interannual variability of deep convection in the Greenland sea. *Deep-Sea Res. Pt. I* 174, 103557. doi: 10.1016/j.dsr.2021.103557

Bendtsen, J., Mortensen, J., Lennert, K., Ehn, J. K., Boone, W., Galindo, V., et al. (2017). Sea Ice breakup and marine melt of a retreating tidewater outlet glacier in northeast Greenland (81 n). *Sci. Rep.* 7 (1), 4941. doi: 10.1038/s41598-017-05089-3

Bersch, M. (2002). North Atlantic oscillation-induced changes of the upper layer circulation in the northern north Atlantic ocean. *J. Geophys. Res.* 107, 3156. doi: 10.1029/2001JC000901

Berx, B., and Payne, M. R. (2017). The Sub-polar gyre index–a community data set for application in fisheries and environment research. *Earth Syst. Sci. Data* 9 (1), 259–266. doi: 10.5194/essd-9-259-2017

Beszczynska-Möller, A., Fahrbach, E., Schauer, U., and Hansen, E. (2012). Variability in Atlantic water temperature and transport at the entrance to the Arctic ocean 1997-2010. *ICES J. Mar. Sci.* 69, 852–863. doi: 10.1093/icesjms/fss056

The Estimation of the Total Freeboard of Arctic Sea Ice in Winter Using Passive Microwave Satellite Measurements

JONG-MIN KIM,[a,b] BYUNG-JU SOHN,[b,c] SANG-MOO LEE,[b,d,e] HOYEON SHI,[b] YOUNG-JOO KWON,[a] SANG-WOO KIM,[b] AND HYUN-CHEOL KIM[a]

[a] *Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea*
[b] *School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, South Korea*
[c] *Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China*
[d] *Department of Electrical, Computer, and Energy Engineering, Center for Environmental Technology, University of Colorado Boulder, Boulder, Colorado*
[e] *National Snow and Ice Data Center, University of Colorado Boulder, Boulder, Colorado*

(Manuscript received 26 July 2021, in final form 21 June 2022)

ABSTRACT: A method for estimating the total freeboard h_f of the sea ice in the Arctic basin was developed in this study. To utilize the dielectric properties of microwave measurements on the sea ice freeboard, we adopted the spectral difference between the microwave frequencies (e.g., the gradient ratio). Satellite lidar altimetry data were utilized as a reference, and two pairs of gradient ratios [GR(36.5, 18.7) and GR(10.7, 6.9)] and an optional brightness temperature for first-year ice [that is, $TB_H(6.9)$] were converted from passive microwave sensors into h_f using the multiple linear regression equation. Using this method, we estimated h_f without direct altimetry measurements. The developed method was evaluated using Operation IceBridge data and the relationship between the regressed h_f and Operation IceBridge h_f had a correlation coefficient R of 0.761 and a nearly unbiased (approximately −0.4 cm) pattern. Because passive microwave measurements are taken in the Arctic daily, the approach presented in this study has the potential to enable daily h_f estimations for the Arctic.

SIGNIFICANCE STATEMENT: Arctic sea ice is one of the most critical indicators when monitoring climate change. Precise and continuous observations of sea ice thickness are essential to understand Arctic sea ice. This study attempts to estimate sea ice thickness using passive microwave satellite data. Passive microwave satellite observations are advantageous because of their wide spatial coverage and long-term records. Therefore, the suggested method in this study can be used for filling in gaps in coverage between sea ice thickness estimates from L-band radiometry and radar/lidar altimetry. The total freeboard is proportional to the thickness of sea ice, which is converted into thickness using the hydrostatic equation. The estimated total freeboard during two winter periods (2018/19 and 2019/20) demonstrates a plausible geographical distribution over the Arctic and indicates good agreement with airborne measurements.

KEYWORDS: Sea ice; Algorithms; Microwave observations

1. Introduction

Arctic sea ice is a critical factor that is key to understanding the Arctic system and the associated global warming (Aagaard and Carmack 1989; Barry et al. 1993; Serreze and Barry 2011). Quantifying sea ice thickness is necessary to evaluate ice volume trends and ice retreats over the Arctic, which is crucial for forecasting the Arctic environment and global climate change (Schweiger et al. 2011; Hodson et al. 2013).

Sea ice thickness has been successfully observed using satellite lidar and radar altimetry. In 2003, the *Ice, Cloud and Land Elevation Satellite* (*ICESat*) carried out the first step in Arctic basin-scale sea ice thickness observations (Zwally et al. 2002; Kwok et al. 2004). Although the *ICESat* reached the end of its operation in 2009, *CryoSat-2* was launched in 2010, and *ICESat-2* (which succeeded *ICESat*), was launched in 2018, allowing continuous Arctic basin-scale ice thickness monitoring up to the present day (Abdalati et al. 2010; Laxon et al. 2013; Parrish et al. 2019). Lidar height measurements of both the surface of the snow-covered sea ice and the water surface in cracks and leads between the floes make it possible to estimate the freeboard. This height difference is referred to as the "total freeboard" (hereafter referred to as h_f). Similarly, the height of the snow–ice interface from the sea surface is referred to as the "ice freeboard," which may be estimated by radar altimetry.

Although passive microwave remote sensing has successfully provided areal information regarding sea ice (i.e., sea ice concentration and extent) since 1978 (Cavalieri and Parkinson 2012; Comiso 1995; Peng et al. 2013), its application to the retrieval of sea ice thickness was limited as the microwave penetration depth of sea ice is at best 0.5 m (Lee et al. 2017; Mathew et al. 2008). Although several approaches have been proposed to retrieve sea ice thickness using L-band radiometry, the ability to estimate sea ice thickness is limited to ice less than 1 m thick (Kaleschke et al. 2012; Paţilea et al. 2019).

Recent studies have shed light on the estimation of Arctic sea ice thickness using passive microwave satellite measurements. Kim et al. (2020) found a systemic bias between *ICESat-* and *CryoSat-2*-estimated sea ice thickness by relating Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E) and

Corresponding author: Hyun-Cheol Kim, kimhc@kopri.re.kr

DOI: 10.1175/JTECH-D-21-0105.1

© 2022 American Meteorological Society. For information regarding reuse of this content and general copyright information, consult the AMS Copyright Policy (www.ametsoc.org/PUBSReuseLicenses).

Brought to you by KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE | Unauthenticated | Downloaded 01/12/26 06:53 AM UTC

the 2018/19 and 2019/20 periods, respectively. Table 4 summarizes the differences and standard deviations between the 2- and 1-yr regressions. A larger difference between two h_f sets (h_f from 2- and 1-yr-based regressions) indicates a larger difference between b_1 values, implying a larger difference in mean h_f between the two years. A larger standard deviation between the two h_f sets indicates a larger difference between a_1, a_2, and a_3 values, implying a larger difference in h_f distribution between the two years. This is because the regression method works statistically and the slope of the regression equation becomes steeper as the fraction of high h_f increases. In this aspect, for example, h_f results in November have less difference in mean h_f but a larger difference in h_f distribution than other months. The maximum difference is 1.1 cm in January 2019. For the standard deviation, the maximum value is 1.3 cm in November 2018. Most values were approximately equal to or less than 1 cm. These statistics show that there is a reasonable level of year-to-year variation in the regression coefficients; therefore, we assumed that the relationship between microwave brightness temperatures and h_f did not change with the year.

There is also the possibility that considerable fluctuations in the correlation between h_f and the input variables may occur in other years; however, this is outside the scope of this study. Although the extension of the analysis period is difficult owing to the limitations of *ICESat-2* data availability, we referenced the results from previous studies that utilized GR over an extended period. For instance, numerous sea ice concentration retrieval studies (e.g., Cavalieri et al. 1984; Markus and Cavalieri 2000; Comiso et al. 2003) have used GR as an input variable. Rostosky et al. (2018) reported an acceptable level of interannual variation in regression coefficients to estimate snow depth using the GR(18.7, 6.9). Therefore, based on the sensitivity test results from this study and previous research using GRs, the regression coefficients provided in Table 2 can be used robustly to estimate h_f.

5. Conclusions

This study estimated the h_f over Arctic sea ice using the AMSR2 brightness temperatures. In doing so, the multiple linear regression equation was applied by relating the GRs [and additionally TB_H (6.9) for the first-year ice] to the *ICESat-2*-measured h_f. The relationships between h_f and the two GRs [GR(10.7, 6.9) and GR(36.5, 18.7)] demonstrated that the combination of the two GRs is linearly correlated with h_f. Multiple linear regressions were performed separately for multiyear [Eq. (2)] and first-year ice [Eq. (3)], and monthly regression coefficients were obtained. To examine the robustness of the regression equation, we determined the standard error of the coefficients, the uncertainties of the input variables, and sensitivity with interannual variability. These results show that the regression equations are statistically significant and may provide stable results regardless of interannual variability. The estimated monthly h_f demonstrated plausible geographical distributions, with time-varying growth of sea ice during the winter–spring season over the Arctic. The regressed h_f was evaluated by comparing it with the OIB-measured h_f in March 2013–15 and 2017, showing reasonable results with a correlation coefficient of 0.761 and RMSE of 10.9 cm. In addition, we attempted to convert h_f information into h_i, demonstrating that it is possible to estimate h_i from h_f, provided that accurate snow depth fields are used in Eq. (4).

Unlike previous h_i estimation methods that use passive microwave radiometers (Kaleschke et al. 2012; Yoshizawa et al. 2018; Paţilea et al. 2019), we attempted to estimate thicker ice ($h_i > 1$ m) using the h_f estimation approach. It provides the Arctic basin-scale distribution of h_f and autumn-to-spring h_f growth, but it cannot yield h_f with very thick or very thin ice because of the limitations of the linear regression method. An ice type–separated estimation was applied to consider the large physical difference between pure first-year ice and mixed-year ice, but it inevitably depends on a priori conditions for ice type data. In addition, the h_f estimation was applied only for winter (November–March) because of concerns about contamination from melt ponds and wet snow. In future work, we will attempt to extend the period to summer a new empirical relationship between summer sea ice conditions and passive microwave brightness temperatures. Furthermore, as daily microwave brightness temperature measurements are available, the suggested approach can be extended to the daily estimation of h_f.

A recent study by Shi et al. (2020) reported that it is possible to simultaneously estimate snow depth and ice thickness by solving a thermodynamic balance equation using freeboard information, snow top temperature, and snow–ice interface temperature. As this method requires freeboard height as input data, the h_f from this study may be used as input, potentially leading to Arctic basin-scale snow depth retrieval.

Acknowledgments. This work was funded by the Korea Polar Research Institute (KOPRI), Grant PE22040, and the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Korea), Grant 20008632 (PN22030). Byung-Ju Sohn, Hoyeon Shi, and Sang-Woo Kim are supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2021R1A4A5032320).

Data availability statement. The *ICESat-2* sea ice freeboard data are available from the NSIDC webpage (https://nsidc.org/data/ATL10/versions/2). AMSR2 level-3 brightness temperatures and sea ice concentration data are available from the G-portal system of the JAXA (https://gportal.jaxa.jp). The OSI SAF global sea ice type data are available from the OSI SAF website (http://www.osi-saf.org/?q=content/global-sea-ice-type-c). OIB data are available from the NSIDC website (https://nsidc.org/data/NSIDC-0708/versions/1). The data for producing tables and figures of this study are available at http://doi.org/10.5281/zenodo.6579817.

APPENDIX

Uncertainty Test Using Gaussian Error Propagation

The Gaussian error propagation can be calculated using the following equations (Rostosky et al. 2018):

Brought to you by KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE | Unauthenticated | Downloaded 01/12/26 06:53 AM UTC

Remote Sensing of Environment 295 (2023) 113662

Contents lists available at ScienceDirect

Remote Sensing of Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rse

Estimation of summer pan-Arctic ice draft from satellite passive microwave observations

Jong-Min Kim [a,b], Sang-Woo Kim [a], Byung-Ju Sohn [a,c], Hyun-Cheol Kim [b], Sang-Moo Lee [a,*], Young-Joo Kwon [b,d], Hoyeon Shi [a], Andrey V. Pnyushkov [e]

[a] School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, South Korea
[b] Center of Remote Sensing & GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea
[c] Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, China
[d] Moon Soul Graduate School of Future Strategy, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, South Korea
[e] International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, AK, USA

ARTICLE INFO

Edited by Menghua Wang

Keywords:
Sea ice thickness
Summer ice draft
Summer sea ice
Passive microwave

ABSTRACT

Pan-Arctic observations of summer sea ice thickness have been a challenging problem despite their global significance in weather/climate analysis and prediction. To solve this problem, this study developed a method for estimating the pan-Arctic ice draft (depth of sea ice below sea surface level) using spaceborne passive microwave-measured brightness temperatures (TBs). This study found that the time series of TBs is highly correlated with the corresponding time series of ice draft (*D*)s measured by three upward-looking sonar (ULS) sites over the Beaufort Sea during the ice melting season. Based on this finding, a *D* estimation equation was derived by relating satellite-measured TBs at microwave frequencies to *D*s. Pan-Arctic *D* distributions from June to August obtained from this study describe well the general thinning process of Arctic sea ice during the summer of 2021. The validation of estimated *D*s with other ULS measurements, which were not used for training data, showed good agreement between them suggesting the robustness of the developed estimation method over the Arctic basin. In addition, validation was made against ice mass balance buoy-measured sea ice thickness, and result shows a good agreement between buoy-measured ice thickness and estimated ice thickness converted from the *D*. Meanwhile, relatively high uncertainty in *D* estimation above 2 m shown in the result and validation suggests the potential for future improvement of *D* estimation in the early melting period. As the proposed method can provide summer pan-Arctic *D* distributions on a daily basis, the *D* from this study can be applied for generating the initial field for the sea ice and global climate models through data assimilation.

1. Introduction

The spatial distribution of Arctic sea ice has been continuously monitored using satellite passive microwave (PMW) observations since 1978 (Cavalieri and Parkinson, 2012; Comiso, 1995; Tonboe et al., 2016), whereas vertical information of sea ice have been difficult to obtain from PMW observations because the microwave emission signals from sea ice are limited to ~50 cm depth at widely used imaging frequencies (Lee et al., 2017; Ulaby et al., 1981). For this reason, most PMW-based algorithms for sea ice thickness (SIT) have been applicable only for thin ice of <1 m even with L-band measurements (Kaleschke et al., 2012; Ricker et al., 2017; Tian-Kunze et al., 2014). Recently, efforts have been made to retrieve the thicknesses of mature sea ice thicker than 1 m by relating the PMW-measured brightness temperature (TB) and SIT. For example, an ensemble convolution neural network was introduced in order for relating SIT to Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR) 2 TBs, revealing that the wintertime Arctic basin-scale SIT can be estimated from AMSR2 (Chi and Kim, 2021). Lee et al. (2020) reported that the ice freeboard (i.e., the height of snow-ice interface from the sea level) can be estimated from AMSR2 measurements based on a finding that the volume scattering-attributed attenuation above the emission layer of sea ice is strongly correlated with ice freeboard. Furthermore, Kim et al. (2022) estimated the total freeboard (i.e., the height of snow surface from the sea level; hereafter, referred to

* Corresponding author.
E-mail address: sangmoolee@snu.ac.kr (S.-M. Lee).

https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113662
Received 28 December 2022; Received in revised form 23 May 2023; Accepted 31 May 2023
Available online 12 June 2023
0034-4257/© 2023 The Authors. Published by Elsevier Inc. This is an open access article under the CC BY-NC license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

is meaningful. Landy et al. (2022) reported that median values of uncertainties in CryoSat-2 summer SIT over the first-year and multiyear ice were ~ 33% and 40%, respectively.

7. Summary and conclusion

This study developed an estimation method for pan-Arctic ice draft D during the melting season by empirically relating AMSR2 TB_{18V} to BGEP ULS-measured D with the conjecture that SIT changes are closely correlated with SIC changes. A comparison between BGEP ULS-measured D and AMSR2 TB_{18V} demonstrated that D decreases exponentially starting from D_{on} as AMSR2 TB_{18V} decreases. Using this relationship between D and TB_{18V}, the equation for D estimation was derived [Eq. (9)] from the radiative transfer equation for satellite PMW-measured TBs emitted from the sea ice. To calculate D in Eq. (9), the necessary parameters (T_I, T_O, and R) were determined, and the melting periods were determined using melt onset and melt end detection algorithms. The pan-Arctic distribution of D_{on} was converted from with the AMSR2-estimated h_f using the constant ratio R. The derived equation was applied to estimate the summer pan-Arctic D on a daily basis with consideration of ice drift.

The spatiotemporal distribution of estimated D over the Arctic (Fig. 8) showed that the thickest D in the western part of the Central Arctic decreased from >3 m to <2 m during summer, while the thickest D in the eastern part of the Central Arctic decreased to <1 m at the end of August. These results show that the proposed method can reproduce the general melting features of the Arctic summer sea ice.

The estimated Ds from this study were validated against independent ULS Ds and IMB buoy-observed SITs. Although the ULS used for validation purposes was deployed in different regions (East Siberian Sea, Laptev Sea, and north coast of Severnaya Zemlya Archipelago) from the BGEP ULS, the AMSR-estimated D values correspond well to the ULS-measured D with a correlation coefficient of 0.69 and an RMSE of 0.41 m. The comparison results with the CRREL IMB buoy SIT showed a correlation coefficient of 0.62, with an RMSE of 0.62 m. However, excluding one exceptional case of large bias (2012L), likely due to differences in spatial representativeness between the one-point and satellite measurements, the statistics were dramatically improved, showing a correlation coefficient of 0.83 and RMSE of 0.38 m. In the comparison with the MOSAiC IMB buoy, an RMSE is 0.34 m and a bias is 0.02 m, but a correlation coefficient is 0.17 due to early termination of measurement. It is worth noting that the retrieved Ds are underestimated over thicker ice (D > 2.0 m) because of the underestimated h_f and/or early detection of melt onset.

It has been reported that there is a substantial gap between observational and reanalysis SIT data in terms of magnitude and spatiotemporal distribution (Ponsoni et al., 2019; Xie et al., 2017). This gap implies that the physics scheme of sea-ice models is still insufficient to reproduce the actual sea-ice state (Stroeve and Notz, 2015). Therefore, assimilating summer SIT data into the sea ice model would improve the reliability of sea ice reanalysis data as well as understanding the complex evolution of the summer sea ice system. Considering D_{on} can be easily allocated to a certain model grid cell, the estimated D from the proposed method can potentially be used for such data assimilation.

As discussed in Section 6, the uncertainties in the estimated D are primarily due to the uncertainties in D_{on}, because of many assumptions (e.g., the usage of monthly h_f in May and constant R) used in the D_{on} estimation procedures. To evaluate uncertainty in D related to D_{on}, the Gaussian error propagation method is introduced in Section 6. The result shows that the uncertain D_{on} is a major error source in D estimation. It is noted that the influences of the uncertain D_{on} on D estimation range from 9%–32%, which indicates that the accuracy level of D_{on} is important to estimate accurate D (Table 4). Although the estimated D and converted SIT from D are well corresponding to in situ-measured D and SIT, the uncertainty analysis gives that an additional improvement in D_{on} estimation process will bring a better D estimation. Since the accuracy of melt-onset detection is closely linked to the uncertainty in D_{on} because the proposed algorithm is applicable only for ice melting condition. Therefore, one way to improve the accuracy of D estimation is to improve the melt-onset detection algorithm. The ratio R is also responsible for the accuracy of D_{on}, which is strongly affected by snow loading and sea ice deformation. However, difficulty in measuring Arctic basin-scale snow depth distribution hampers to use spatially-varying R values for obtaining D_{on}. Accurate information on snow depth will be helpful to improve the suggested D estimation algorithm. In addition, the uncertain ice tracking can be also responsible for uncertain D_{on} estimation. As the summer atmosphere in the Arctic experiences humid conditions, the atmospheric contribution to the observed TB can be one of the error sources in D estimation using Eq. (9). Therefore, we expect an improved performance of the D estimation if a sophisticated atmospheric radiative transfer model is introduced to correct the atmospheric contributions in the calculation of the radiances emitted from sea ice.

CRediT authorship contribution statement

Jong-Min Kim: Conceptualization, Methodology, Writing – original draft. **Sang-Woo Kim:** Supervision, Writing – review & editing. **Byung-Ju Sohn:** Writing – review & editing. **Hyun-Cheol Kim:** Funding acquisition, Data curation, Resources. **Sang-Moo Lee:** Supervision, Methodology, Writing – review & editing. **Young-Joo Kwon:** Writing – review & editing. **Hoyeon Shi:** Writing – review & editing. **Andrey V. Pnyushkov:** Data curation, Resources, Writing – review & editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

AMSR2 data used in this study are available from the G-portal website of the JAXA (https://gportal.jaxa.jp). BGEP ULS data are available from WHOI webpage (https://www2.whoi.edu/site/beaufortgyre/). ULS data from GAM can access at https://ads.nipr.ac.jp/dataset/A20140425-003. ULS data of Transdrift are available from https://doi.org/10.1594/PANGAEA.912927 and https://doi.org/10.1594/PANGAEA.899275. ULS data of NABOS are available at https://doi.org/10.5281/zenodo.7340027. CRREL IMB buoy data are available at http://imb-crrel-dartmouth.org. MOSAiC IMB buoy data are available from https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.938244. NSIDC ice drift motion data and ice age data are downloadable from NSIDC webpage (https://nsidc.org/data/NSIDC-0116/versions/4; https://nsidc.org/data/nsidc-0611/versions/4). ICESat-2 data are downloadable from NSIDC webpage (https://nsidc.org/data/atl10/versions/5). CryoSat-2 summer SIT data are available at the British Antarctic Suvey webpage (https://doi.org/10.5285/D8C66670-57AD-44FC-8FEF-942A46734ECB).

Acknowledgments

This work was supported by the Korea Polar Research Institute (KOPRI), Grant PE23040 and the New Faculty Startup Fund from Seoul National University. The authors would like to thank the G-portal of JAXA for AMSR2 brightness temperatures and sea ice concentrations, the NSIDC for ice drift motion data and ICESat-2 total freeboard data, the CRREL-Dartmouth mass balance buoy program and the MOSAiC expedition for the IMB sea ice thickness data, and the ULS-measured ice draft providers, the WHOI, GRENE, Transdrift, and NABOS.

remote sensing

MDPI

Technical Note

Variability of Surface Radiation Budget over Arctic during Two Recent Decades from Perspective of CERES and ERA5 Data

Minji Seo [1], Hyun-Cheol Kim [1], Noh-Hun Seong [2], Suyoung Sim [2] and Kyung-Soo Han [2,*]

[1] Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea
[2] Division of Earth Environmental System Science (Major of Spatial Information Engineering), Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea
* Correspondence: kyung-soo.han@pknu.ac.kr

Abstract: This study focused on surface radiation budget, one of the essential factors for understanding climate change. Arctic surface radiation budget was summarized and explained using a satellite product, Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Energy Balanced and Filled (EBAF), and reanalysis data, ERA5. Net radiation records indicated an increasing trend only in ERA5, with EBAF indicating a decreasing trend in the Arctic Circle (AC; poleward from 65°N) from 2000 to 2018. The differences in the net radiation trend between product types was due to longwave downward radiation. The extreme season was selected according to the seasonality of net radiation, surface air temperature, and sea ice extent. The surface radiation budget was synthesized for extreme season in the AC. Regardless of the data, net radiation tended to increase in the summer on an annual trend. By contrast, in the winter, trend of surface net radiation was observed in which ERA5 increased and EBAF decreased. The difference in surface radiation is represented in longwave of each data. This comprehensive information can be used to analyze and predict the surface energy budget, transport, and interaction between the atmosphere and surface in the Arctic.

Keywords: Arctic; cryosphere; climate change; surface radiation budget

check for updates

Citation: Seo, M.; Kim, H.-C.; Seong, N.-H.; Sim, S.; Han, K.-S. Variability of Surface Radiation Budget over Arctic during Two Recent Decades from Perspective of CERES and ERA5 Data. *Remote Sens.* **2023**, *15*, 829. https://doi.org/10.3390/rs15030829

Academic Editors: Ulrich Kamp, Dmitry Ganyushkin and Bijeesh K. Veettil

Received: 29 December 2022
Revised: 28 January 2023
Accepted: 30 January 2023
Published: 1 February 2023

Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

The Arctic is experiencing rapid climate change [1–4]. Arctic amplification has been observed with surface air temperatures (SAT) increasing rapidly compared to mid-latitude regions [5]. Arctic amplification is affected by the surface energy budget, which originates from the warming of the surface and atmosphere [6–8].

Especially, the radiation budget is an important factor for understanding the energy balance at the surface [9]. The energy budget controls turbulent fluxes, surface temperature, and several energy variables [9]. Among these, the surface radiation budget is a key climate change parameter and serves to provide energy in various climate feedback mechanisms [10]. Therefore, the surface radiation budget changes play an important role in environmental problems, such as global warming and glacier retreat [11,12].

Various studies on the radiation budget in the Arctic have been conducted. These studies have analyzed the energy budget, using model data and reanalysis data [13–15]. A variety of atmospheric and oceanic data were synthesized to examine the large-scale energy budget of the Arctic. Surface radiation was verified by in situ data and an inter-comparison was performed between different satellite-based radiation data in the Arctic [4,16–18]. Spatiotemporal analyses of the Arctic surface radiation budget have been synthesized using various spatial data [9,19].

The Arctic is a complex area where many feedback mechanisms are intertwined. As such, research into what factors and iterations influence radiative flux is ongoing and is considered essential for polar climate analysis [20–24]. Moreover, the Arctic climate is influenced by different physical parameters by negative or positive feedback [13,15,16]. For

using the different surface radiation budgets. The results can be used as reference data for the validation and development of models [15,36].

Because we analyzed the changes in radiative energy quantitatively, the results can be used in future studies of radiative forcing. They represent a reference point when analyzing the impact of changes in surface radiant energy at the top of the atmosphere.

This study recorded the differences between satellite data and reanalysis data, and analyzed which of the radiative components caused these differences. However, it is difficult to analyze the external factors causing the changes in net radiation. This study could not directly analyze different causes, but previous studies may refer to them. The data may differ due to deviations in the surface product caused by the ERA5 data itself and calibration of the CERES TOA data [42]. A significant difference is indicated in LWD, which is closely related to clouds, so differences may occur depending on the cloud conditions used to generate the data [23,29,32]. In addition, the Arctic Ocean is a region composed of ice and sea ice, and the surface conditions are incredibly different, so there may be differences in radiation depending on the surface conditions [21,25,26,34]. Although the relationship between climatic factors and sub-radiative fluxes, such as longwave and shortwave, has been analyzed, it is difficult to understand the overall processes that drive the surface radiation budget changes. Therefore, studies on the climate factors that increase (or decrease) net radiation and the mechanisms that affect them should be conducted. To resolve these issues, an analysis should be conducted of the connection points affecting climate feedback, such as the role of evaporation, radiative forcing, and clouds in the variability of sea ice [23,24,31,58]. The energy balance of the Arctic region should be analyzed by linking the changes in radiative energy with changes in non-radiative flux components.

Author Contributions: Conceptualization, M.S. and K.-S.H.; methodology, M.S., H.-C.K. and K.-S.H.; formal analysis, M.S. and N.-H.S.; investigation, S.S.; data curation, N.-H.S. and S.S.; writing—original draft preparation, M.S.; writing—review and editing, H.-C.K. and K.-S.H.; visualization, M.S.; supervision, K.-S.H.; funding acquisition, H.-C.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was supported by Korea Polar Research Institute (KOPRI) grant funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (KOPRI project No. PE23040).

Data Availability Statement: CERES EBAF dataset can be found at http://ceres.larc.nasa.gov/order_data.php (accessed on 28 December 2022), hosted at NASA. ERA5 dataset can be found at https://cds.climate.copernicus.eu (accessed on 28 December 2022), hosted at ECMWF. MERRA2 surface air temperature dataset can be found at https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/ (accessed on 28 December 2022), hosted at NASA. Sea ice extent dataset can be found at https://nsidc.org/ (accessed on 28 December 2022), hosted at NSIDC.

Acknowledgments: We would like to thank the anonymous reviewers for providing valuable comments on this study.

Conflicts of Interest: No potential conflict of interest was reported by the authors.

References

1. Maslanik, J.A.; Key, J.; Fowler, C.W.; Nguyen, T.; Wang, X. Spatial and Temporal Variability of Satellite-Derived Cloud and Surface Characteristics during FIRE-ACE. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2001**, *106*, 15233–15249. [CrossRef]
2. Kay, J.E.; L'Ecuyer, T. Observational Constraints on Arctic Ocean Clouds and Radiative Fluxes during the Early 21st Century. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2013**, *118*, 7219–7236. [CrossRef]
3. Christensen, M.W.; Behrangi, A.; L'ecuyer, T.S.; Wood, N.B.; Lebsock, M.D.; Stephens, G.L. Arctic Observation and Reanalysis Integrated System: A New Data Product for Validation and Climate Study. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2016**, *97*, 907–916. [CrossRef]
4. Riihelä, A.; Key, J.R.; Meirink, J.F.; Kuipers Munneke, P.; Palo, T.; Karlsson, K.-G. An Intercomparison and Validation of Satellite-Based Surface Radiative Energy Flux Estimates over the Arctic. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2017**, *122*, 4829–4848. [CrossRef]
5. Serreze, M.C.; Barrett, A.P.; Stroeve, J.C.; Kindig, D.N.; Holland, M.M. The Emergence of Surface-Based Arctic Amplification. *Cryosphere* **2009**, *3*, 11–19. [CrossRef]
6. Laîné, A.; Yoshimori, M.; Abe-Ouchi, A. Surface Arctic Amplification Factors in CMIP5 Models: Land and Oceanic Surfaces and Seasonality. *J. Clim.* **2016**, *29*, 3297–3316. [CrossRef]

IEEE Access
Multidisciplinary ⋮ Rapid Review ⋮ Open Access Journal

Received 23 February 2024, accepted 18 March 2024, date of publication 21 March 2024, date of current version 28 March 2024.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2024.3380201

SURVEY

Directional Wave Scattering Distribution Modes Analysis and Synthesis of Random Ocean Media Roughness for SAR Electromagnetic Interactions Using Feature Fusion in Dynamic Sea States: A Survey

IMAN HEIDARPOUR SHAHREZAEI, (Member, IEEE), AND HYUN-CHEOL KIM, (Member, IEEE)
Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon 21990, South Korea

Corresponding author: Hyun-Cheol Kim (kimhc@kopri.re.kr)

This work was supported by Korea Polar Research Institute (KOPRI) (Study on Remote Sensing for Quantitative Analysis of Changes in the Arctic Cryosphere) under Grant PE24040.

ABSTRACT Ocean waves have long been a research topic, and numerous formulas of the ocean wave spectrum have been widely developed to provide new prospects for ocean experiments and the advancement of radar probing. Nonetheless, the wave spectra developed by researchers fall short of the standards set by remote sensing specialists, mainly due to the limitation of capturing the surface roughness influenced by both short and long waves, prompting ongoing efforts to develop a model covering a diverse scale of wavenumbers in the absence of a generally recognized reference formula. In response, a standard two-scale formulation of wave frequency spectra (WFS) was introduced, where wave height and spectral peak period are determined by sea state. The proposed composite WFS holds the potential to incorporate directional spreading, contributing to the angular distribution of ocean wave energy in the form of directional WFS, making it applicable for ocean modeling. In an effort to investigate directionality effects, an array of well-established spreading functions, including cosine-squared, half-cosine 2s, parameterized half-cosine 2s, hyperbolic secant-squared, and composite structured functions, has been developed here for numerical modeling of random ocean media (ROM) surface roughness and synthesized for their spectral scattering distribution mode, encompassing scattering pattern, scattering orientation, and fractal roughness properties. Nonetheless, the generated ROM models, each varying due to inherent limitations in directional WFS formulation and numerical approximations, demonstrate indeterminacy and unpredictability in surface features, posing challenges for accurately synthesizing ROM roughness patterns. These challenges intensify under varying sea states and different directional WFS formulas, leading to a situation where no single synthesized composite ROM model consistently outperforms the others, rendering them imprecise frameworks for analyzing roughness patterns and investigating texture electromagnetic interactions within the realm of remote sensing. As an approach, a pattern-sensitive fusion method is proposed, employing a multi-scale transform domain (MTD) fusion scheme that leverages the learning potential of a deep super resolution network. The objective is to fuse the reconstructed ROM roughness models, generating an optimal roughness while maintaining their scattering pattern, scattering orientation, and dominant directionality, pivotal for texture consistency and, consequently, the backscattering properties from the synthetic aperture radar (SAR) viewpoint. To validate the reliability of ROM modeling and its roughness synthesis, including the texture fusion and raw data generation, a comprehensive objective quality assessment technique is utilized. These

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Xuebo Zhang.

© 2024 The Authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 License.
For more information, see https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

ROM modeling and the consideration of target detection within SAR images, (b) assessing the motions of both target and platform to facilitate spatiotemporal image reconstruction of ROM, (c) the systematic assessment of the SAR radio link budget analysis to refine ROM observation and IFA, (d) the exploration of methodologies for clutter analysis and its suppression, the optimization of the modeling routine, and (f) the exploration of alternative spreading functions and fusion techniques to further enrich the evaluation process. Consequently, the continuation of this survey endeavors to unravel deeper insights into sea states and composite ROM roughness models, thereby bestowing valuable contributions to the realm of ocean remote sensing and radar probing.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Korea Polar Research Institute (KOPRI) for providing all facilities for this research.

REFERENCES

[1] T. T. Janssen and T. H. C. Herbers, "Nonlinear wave statistics in a focal zone," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 39, no. 8, pp. 1948–1964, Aug. 2009.

[2] S. Elgar, "Waves in oceanic and coastal waters," *Oceanography*, vol. 20, no. 3, pp. 133–135, Sep. 2007.

[3] A. Constantin, "Nonlinear water waves: Introduction and overview," *Phil. Trans. Roy. Soc. A, Math., Phys. Eng. Sci.*, vol. 376, no. 2111, Dec. 2111, Art. no. 20170310.

[4] A. Pecher and J. P. Kofoed, *Handbook Ocean Wave Energy*. Cham, Switzerland: Springer, 2017.

[5] P. A. Hwang, "A note on the ocean surface roughness spectrum," *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 28, no. 3, pp. 436–443, Mar. 2011.

[6] D. V. Chalikov, "Linear and nonlinear statistics of extreme waves," *Russian J. Numer. Anal. Math. Model.*, vol. 32, no. 2, pp. 91–98, Apr. 2017.

[7] S. M. Henderson and A. J. Bowen, "Observations of surf beat forcing and dissipation," *J. Geophys. Res., Oceans*, vol. 107, no. C11, p. 14, Nov. 2002.

[8] A. Hunt-Raby, I. K. Othman, R. Jayaratne, G. Bullock, and H. Bredmose, "Effect of protruding roughness elements on wave overtopping," in *Coasts, Marine Structures and Breakwaters: Adapting to Change*. London, U.K.: Thomas Telford Ltd, Jan. 2010, pp. 574–586.

[9] S. Li, Z. Zou, D. Zhao, and Y. Hou, "On the wave state dependence of the sea surface roughness at moderate wind speeds under mixed wave conditions," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 50, no. 11, pp. 3295–3307, Nov. 2020.

[10] D. T. Resio, C. E. Long, and C. L. Vincent, "Equilibrium-range constant in wind-generated wave spectra," *J. Geophys. Res., Oceans*, vol. 109, no. C1, Jan. 2004, Art. no. C01018.

[11] J. Thomson, E. A. D'Asaro, M. F. Cronin, W. E. Rogers, R. R. Harcourt, and A. Shcherbina, "Waves and the equilibrium range at ocean weather station p," *J. Geophys. Res., Oceans*, vol. 118, no. 11, pp. 5951–5962, Nov. 2013.

[12] R. S. Gibson and C. Swan, "The evolution of large ocean waves: The role of local and rapid spectral changes," *Proc. Roy. Soc. A, Math., Phys. Eng. Sci.*, vol. 463, no. 2077, pp. 21–48, Jul. 2077.

[13] T. Aderinto and H. Li, "Ocean wave energy converters: Status and challenges," *Energies*, vol. 11, no. 5, p. 1250, May 2018.

[14] J. Zhang and M. Benoit, "Wave–bottom interaction and extreme wave statistics due to shoaling and de-shoaling of irregular long-crested wave trains over steep seabed changes," *J. Fluid Mech.*, vol. 912, p. A28, Feb. 2021.

[15] Y. Fan, S.-J. Lin, I. M. Held, Z. Yu, and H. L. Tolman, "Global ocean surface wave simulation using a coupled atmosphere–wave model," *J. Climate*, vol. 25, no. 18, pp. 6233–6252, Apr. 2012.

[16] U. Högström, E. Sahlée, A.-S. Smedman, A. Rutgersson, E. Nilsson, K. K. Kahma, and W. M. Drennan, "Surface stress over the ocean in swell-dominated conditions during moderate winds," *J. Atmos. Sci.*, vol. 72, no. 12, pp. 4777–4795, Nov. 2015.

[17] P. A. Hwang, "Estimating the effective energy transfer velocity at air-sea interface," *J. Geophys. Res., Oceans*, vol. 114, no. C11, Nov. 2009, Art. no. C11011.

[18] A. Iafrati, "Energy dissipation mechanisms in wave breaking processes: Spilling and highly aerated plunging breaking events," *J. Geophys. Res., Oceans*, vol. 116, no. C7, pp. 1–22, Jul. 2011.

[19] I. R. Young and A. V. Babanin, "Spectral distribution of energy dissipation of wind-generated waves due to dominant wave breaking," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 36, no. 3, pp. 376–394, Mar. 2006.

[20] A. Herman, "Spectral wave energy dissipation due to under-ice turbulence," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 51, no. 4, pp. 1177–1186, Apr. 2021.

[21] A. Zavadsky, D. Liberzon, and L. Shemer, "Statistical analysis of the spatial evolution of the stationary wind wave field," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 43, no. 1, pp. 65–79, Jan. 2013.

[22] V. G. Polnikov and F. A. Pogarskiy, "Spectra of long-term series for wind speed and wave height in the Indian ocean area," *J. Geophys. Res., Atmos.*, vol. 122, no. 1, pp. 104–120, Jan. 2017.

[23] V. G. Polnikov, "Spectral description of the dissipation mechanism for wind Waves. Eddy viscosity model," *Mar. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 13–26, May 2012.

[24] J. E. Stopa, F. Ardhuin, A. Babanin, and S. Zieger, "Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models," *Ocean Model.*, vol. 103, pp. 2–17, Jul. 2016.

[25] T. S. Hristov, K. D. Anderson, and C. A. Friehe, "Scattering properties of the ocean surface: The Miller–Brown–Vegh model revisited," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 4, pp. 1103–1109, Apr. 2008.

[26] F. Nouguier, C.-A. Guérin, and B. Chapron, "Scattering from nonlinear gravity waves: The 'choppy wave' model," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 48, no. 12, pp. 4184–4192, Dec. 2010.

[27] P. Janssen, *The Interaction of Ocean Waves and Wind*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, Oct. 2004.

[28] P. P. Sullivan and J. C. McWilliams, "Dynamics of winds and currents coupled to surface waves," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 42, no. 1, pp. 19–42, Jan. 2010.

[29] G. Wu, C. Liu, and Y. Liang, "Comparative study on numerical calculation of 2-D random sea surface based on fractal method and Monte Carlo method," *Water*, vol. 12, no. 7, p. 1871, Jun. 2020.

[30] G. Wu, Y. Liang, and S. Xu, "Numerical computational modeling of random rough sea surface based on JONSWAP spectrum and donelan directional function," *Concurrency Comput., Pract. Exper.*, vol. 33, no. 15, Sep. 2019, Art. no. e5514.

[31] A. W. Fisher, L. P. Sanford, M. E. Scully, and S. E. Suttles, "Surface wave effects on the translation of wind stress across the air–sea interface in a fetch-limited, coastal embayment," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 47, no. 8, pp. 1921–1939, Aug. 2017.

[32] J. P. Grainger, A. M. Sykulski, P. Jonathan, and K. Ewans, "Estimating the parameters of ocean wave spectra," *Ocean Eng.*, vol. 229, Jun. 2021, Art. no. 108934.

[33] H. Mitsuyasu, "Reminiscences on the study of wind waves," *Proc. Jpn. Acad., Ser. B*, vol. 91, no. 4, pp. 109–130, 2015.

[34] A. Bringer, B. Chapron, A. Mouche, and C.-A. Guérin, "Revisiting the short-wave spectrum of the sea surface in the light of the weighted curvature approximation," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, no. 1, pp. 679–689, Jan. 2014.

[35] Z. Huang, "An experimental study of wave scattering by a vertical slotted barrier in the presence of a current," *Ocean Eng.*, vol. 34, nos. 5–6, pp. 717–723, Apr. 2007.

[36] G. Dolcetti, K. V. Horoshenkov, A. Krynkin, and S. J. Tait, "Frequency-wavenumber spectrum of the free surface of shallow turbulent flows over a rough boundary," *Phys. Fluids*, vol. 28, no. 10, Oct. 2016, Art. no. 105105.

[37] K. F. Warnick and W. C. Chew, "Numerical simulation methods for rough surface scattering," *Waves Random Media*, vol. 11, no. 1, pp. R1–R30, Jan. 2001.

[38] Y. He, G. Wu, H. Mao, H. Chen, J. Lin, and G. Dong, "An experimental study on nonlinear wave dynamics for freak waves over an uneven bottom," *Frontiers Mar. Sci.*, vol. 10, pp. 1–13, Mar. 2023.

[39] S. B. Park, S. Y. Shin, D. G. Shin, H. Park, K. H. Jung, S. B. Suh, J. Lee, S. J. Lee, and H. S. Kim, "Experimental study of wave transmission and drift velocity using freely floating synthetic ice floes," *Ocean Eng.*, vol. 251, May 2022, Art. no. 111058.

remote sensing

MDPI

Technical Note

Arctic Greening Trends: Change Points in Satellite-Derived Normalized Difference Vegetation Indexes and Their Correlation with Climate Variables over the Last Two Decades

Minji Seo and Hyun-Cheol Kim *

Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea; seo_mj@kopri.re.kr
* Correspondence: kimhc@kopri.re.kr

Abstract: In this study, we utilized NDVI data from the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) alongside climatic variables obtained from a reanalyzed dataset to analyze Arctic greening during the summer months (June–September) of the last two decades. This investigation entailed a detailed analysis of these changes across various temporal scales. The data indicated a continuous trend of Arctic greening, evidenced by a 1.8% per decade increment in the NDVI. Notably, significant change points were identified in June 2012 and September 2013. A comparative assessment of NDVI pre- and post-these inflection points revealed an elongation of the Arctic greening trend. Furthermore, an anomalous increase in NDVI of 2% per decade was observed, suggesting an acceleration in greening. A comprehensive analysis was conducted to decipher the correlation between NDVI, temperature, and energy budget parameters to elucidate the underlying causes of these change points. Although the correlation between these variables was relatively low throughout the summer months, a distinct pattern emerged when these periods were dissected and examined in the context of the identified change points. Preceding the change point, a strong correlation (approximately 0.6) was observed between all variables; however, this correlation significantly diminished after the change point, dropping to less than half. This shift implies an introduction of additional external factors influencing the Arctic greening trend after the change point. Our findings provide foundational data for estimating the tipping point in Arctic terrestrial ecosystems. This is achieved by integrating the observed NDVI change points with their relationship with climatic variables, which are essential in comprehensively understanding the dynamics of Arctic climate change, particularly with alterations in tundra vegetation.

Keywords: tundra vegetation; temperature; energy budget; MODIS; Bayesian model averaging time-series decomposition algorithm (BEAST)

check for updates

Citation: Seo, M.; Kim, H.-C. Arctic Greening Trends: Change Points in Satellite-Derived Normalized Difference Vegetation Indexes and Their Correlation with Climate Variables over the Last Two Decades. *Remote Sens.* **2024**, *16*, 1160. https://doi.org/10.3390/rs16071160

Academic Editors: Junhu Dai and Chung-Te Chang

Received: 16 January 2024
Revised: 10 March 2024
Accepted: 21 March 2024
Published: 27 March 2024

Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

The Arctic region has experienced rapid climate change in recent decades, most notably a pronounced temperature increase compared to mid-latitude regions, a phenomenon attributed to Arctic amplification [1].

Consequently, various climate change events have occurred in the Arctic region. Vegetation, a key parameter in climate feedback, significantly influences temperature, surface energy budget, and hydrological balance [2–4]. Tundra vegetation dynamics profoundly influence permafrost, mitigating thawing in the summer and increasing soil temperature in snow-related winter [5]. Additionally, variations in atmospheric CO_2 concentrations drive vegetation changes, which impact climate change, primarily through alterations in albedo, evapotranspiration, and carbon stocks. These changes trigger various feedback mechanisms, for instance, the ice–albedo feedback where increased vegetation and increasing absorption of solar radiation accelerate Arctic warming [6]. Regional climate change is represented by different trends, such as cooling and warming, that significantly

Funding: This work was supported by Korea Polar Research Institute (KOPRI) grant funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (KOPRI PE24040).

Data Availability Statement: The MODIS (https://earthdata.nasa.gov, accessed on 20 March 2024) and ERA5 (https://cds.climate.copernicus.eu/, accessed on 20 March 2024) data used in this study are freely available from NASA and ECMWF.

Acknowledgments: We would like to express our gratitude to the anonymous reviewers for their valuable comments on this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Serreze, M.C.; Barry, R.G. Processes and Impacts of Arctic Amplification: A Research Synthesis. *Glob. Planet. Chang.* **2011**, *77*, 85–96. [CrossRef]
2. Blok, D.; Schaepman-Strub, G.; Bartholomeus, H.; Heijmans, M.M.P.D.; Maximov, T.C.; Berendse, F. The Response of Arctic Vegetation to the Summer Climate: Relation between Shrub Cover, NDVI, Surface Albedo and Temperature. *Environ. Res. Lett.* **2011**, *6*, 035502. [CrossRef]
3. Lawrence, D.M.; Swenson, S.C. Permafrost Response to Increasing Arctic Shrub Abundance Depends on the Relative Influence of Shrubs on Local Soil Cooling versus Large-Scale Climate Warming. *Environ. Res. Lett.* **2011**, *6*, 045504. [CrossRef]
4. Bonfils, C.J.W.; Phillips, T.J.; Lawrence, D.M.; Cameron-Smith, P.; Riley, W.J.; Subin, Z.M. On the Influence of Shrub Height and Expansion on Northern High Latitude Climate. *Environ. Res. Lett.* **2012**, *7*, 015503. [CrossRef]
5. Heijmans, M.M.P.D.; Magnússon, R.Í.; Lara, M.J.; Frost, G.V.; Myers-Smith, I.H.; Van Huissteden, J.; Jorgenson, M.T.; Fedorov, A.N.; Epstein, H.E.; Lawrence, D.M.; et al. Tundra Vegetation Change and Impacts on Permafrost. *Nat. Rev. Earth Environ.* **2022**, *3*, 68–84. [CrossRef]
6. Foley, J.A. Tipping Points in the Tundra. *Science* **2005**, *310*, 627–628. [CrossRef]
7. Comiso, J.C. Arctic Warming Signals from Satellite Observations. *WEA* **2006**, *61*, 70–76. [CrossRef]
8. Jia, G.J.; Epstein, H.E.; Walker, D.A. Greening of Arctic Alaska, 1981–2001. *Geophys. Res. Lett.* **2003**, *30*, 2067. [CrossRef]
9. Hassol, S.; Assessment, A.C.I. *Impacts of a Warming Arctic—Arctic Climate Impact Assessment*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2004; ISBN 978-0-521-61778-9.
10. Stow, D.A.; Hope, A.; McGuire, D.; Verbyla, D.; Gamon, J.; Huemmrich, F.; Houston, S.; Racine, C.; Sturm, M.; Tape, K.; et al. Remote Sensing of Vegetation and Land-Cover Change in Arctic Tundra Ecosystems. *Remote Sens. Environ.* **2004**, *89*, 281–308. [CrossRef]
11. Goetz, S.J.; Bunn, A.G.; Fiske, G.J.; Houghton, R.A. Satellite-Observed Photosynthetic Trends across Boreal North America Associated with Climate and Fire Disturbance. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2005**, *102*, 13521–13525. [CrossRef]
12. Raynolds, M.K.; Walker, D.A.; Maier, H.A. NDVI Patterns and Phytomass Distribution in the Circumpolar Arctic. *Remote Sens. Environ.* **2006**, *102*, 271–281. [CrossRef]
13. Pearson, R.G.; Phillips, S.J.; Loranty, M.M.; Beck, P.S.A.; Damoulas, T.; Knight, S.J.; Goetz, S.J. Shifts in Arctic Vegetation and Associated Feedbacks under Climate Change. *Nat. Clim. Chang.* **2013**, *3*, 673–677. [CrossRef]
14. Bhatt, U.S.; Walker, D.A.; Raynolds, M.K.; Comiso, J.C.; Epstein, H.E.; Jia, G.; Gens, R.; Pinzon, J.E.; Tucker, C.J.; Tweedie, C.E.; et al. Circumpolar Arctic Tundra Vegetation Change Is Linked to Sea Ice Decline. *Earth Interact.* **2010**, *14*, 1–20. [CrossRef]
15. Bhatt, U.S.; Walker, D.A.; Raynolds, M.K.; Bieniek, P.A.; Epstein, H.E.; Comiso, J.C.; Pinzon, J.E.; Tucker, C.J.; Steele, M.; Ermold, W.; et al. Changing Seasonality of Panarctic Tundra Vegetation in Relationship to Climatic Variables. *Environ. Res. Lett.* **2017**, *12*, 055003. [CrossRef]
16. Arndt, K.A.; Santos, M.J.; Ustin, S.; Davidson, S.J.; Stow, D.; Oechel, W.C.; Tran, T.T.P.; Graybill, B.; Zona, D. Arctic Greening Associated with Lengthening Growing Seasons in Northern Alaska. *Environ. Res. Lett.* **2019**, *14*, 125018. [CrossRef]
17. Bhatt, U.; Walker, D.; Raynolds, M.; Bieniek, P.; Epstein, H.; Comiso, J.; Pinzon, J.; Tucker, C.; Polyakov, I. Recent Declines in Warming and Vegetation Greening Trends over Pan-Arctic Tundra. *Remote Sens.* **2013**, *5*, 4229–4254. [CrossRef]
18. Myers-Smith, I.H.; Kerby, J.T.; Phoenix, G.K.; Bjerke, J.W.; Epstein, H.E.; Assmann, J.J.; John, C.; Andreu-Hayles, L.; Angers-Blondin, S.; Beck, P.S.A.; et al. Complexity Revealed in the Greening of the Arctic. *Nat. Clim. Chang.* **2020**, *10*, 106–117. [CrossRef]
19. Frost, G.V.; Bhatt, U.S.; Macander, M.J.; Epstein, H.E.; Raynolds, M.K.; Waigl, C.F.; Walker, D.A. Eyes of the World on a Warmer, Less Frozen, and Greener Arctic. *Glob. Chang. Biol.* **2023**, *29*, 4453–4455. [CrossRef] [PubMed]
20. Ji, L.; Fan, K. Regime Shift of the Interannual Linkage between NDVI in the Arctic Vegetation Biome and Arctic Sea Ice Concentration. *Atmos. Res.* **2024**, *299*, 107184. [CrossRef]
21. Frost, G.V.; Bhatt, U.S.; Macander, M.J.; Hendricks, A.S.; Jorgenson, M.T. Is Alaska's Yukon–Kuskokwim Delta Greening or Browning? Resolving Mixed Signals of Tundra Vegetation Dynamics and Drivers in the Maritime Arctic. *Earth Interact.* **2021**, *25*, 76–93. [CrossRef]

Remote Sensing of Environment 318 (2025) 114568

Contents lists available at ScienceDirect

Remote Sensing of Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rse

Long-term prediction of Arctic sea ice concentrations using deep learning: Effects of surface temperature, radiation, and wind conditions

Young Jun Kim [a], Hyun-cheol Kim [b], Daehyeon Han [a], Julienne Stroeve [c], Jungho Im [a,d,e,*]

[a] Department of Civil, Urban, Earth, and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, South Korea
[b] Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea
[c] Centre for Earth Observation Science, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada
[d] Graduate School of Carbon Neutrality, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, South Korea
[e] Graduate School of Artificial Intelligence, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, South Korea

ARTICLE INFO

Editor: Dr. Menghua Wang

Keywords:
SIC prediction
UNet

ABSTRACT

Over the last five decades, Arctic sea ice has been shrinking in area and thickness. As a result, increased marine traffic has created a need for improved sea ice forecasting on seasonal to annual time-scales. In this study, we introduce a novel UNET-based deep learning model to forecast sea ice concentration up to 12 months. Based on yearly hindcast validation, the UNET 3-, 6-, 9-, and 12-month predictions provided more accurate and stable predictions than did the four baseline models: the Copernicus Climate Change Service (C3S), the damped anomaly persistence (DP) forecast, and two deep learning approach, the Convolutional Neural Network (CNN) models and Convolutional Long Short-Term Memory (ConvLSTM). During years with large departures from the long-term trend, the proposed UNET model exhibited promising SIC prediction results with root-mean-square errors (RMSEs), which were reduced from 17.35 to 7.07 % compared to the four baseline models. Our findings also confirmed the relative importance of each predictor variable (temperature, incoming solar radiation, wind speed and direction) in long-term prediction. Past SIC conditions, together with surface temperature emerged as the most important factors for SIC prediction, especially in the marginal ice zone. Incoming solar radiation and wind speed and direction showed greater sensitivity in predicting SICs in areas with thin ice. This model offers the potential to shape Arctic development and management plans and strategies, ensuring extended forecasting periods and enhanced prediction accuracy.

극지연구소

1. Introduction

On September 15, 2020, Arctic sea ice recorded an annual minimum extent of 3.74 million km^2, according to the National Snow and Ice Data Center (NSIDC, 2020). This sea ice extent (SIE) was 50 % below the average, ranking it second-lowest in the 44-year satellite data record. The NSIDC defines "extent" as areas with at least 15 % ice concentration.

The pan-Arctic SIE typically reaches its maximum in March and its minimum in September, reflecting the seasonality of incoming solar radiation (Wei et al., 2022). The significant retreat of sea ice in the Arctic region in recent years has led to an increase in socio-economic activities, requiring the need for accurate sea ice forecasts to support timely planning of shipping routes (Eguíluz et al., 2016; Lee and Song, 2014). While seasonal- to interannual-sea ice predictions are useful for managing policy responses closely related to polar resource development (Meier et al., 2014; Segal et al., 2020; Wei et al., 2022), the maritime industry is increasingly seeking models that offer predictions beyond the seasonal time-scale. Such extended forecasts are crucial for ensuring the safety and security of Arctic waterways (Wagner et al., 2020; Zheng et al., 2022). Furthermore, accurate sea ice forecasting can also improve our understanding of changes in the Arctic and ongoing climate change (Blanchard-Wrigglesworth et al., 2017).

Different approaches, including statistical, numerical, and deep-learning methods, have been used for SIC predictions at various time-scales, from the short-term (sub-monthly scale) to long-term (more than seasonal scale, i.e., over three months). Wayand et al. (2019) compared 16 statistical SIC forecast models and found that averaging multi-model ensembles improved sub-seasonal-to-seasonal predictions.

* Corresponding author at: Department of Civil, Urban, Earth, and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, South Korea.
E-mail address: ersgis@unist.ac.kr (J. Im).

https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114568
Received 29 June 2024; Received in revised form 6 December 2024; Accepted 6 December 2024
Available online 11 December 2024
0034-4257/© 2024 Elsevier Inc. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

Consequently, we selected SEAS5 as a reliable forecast system that can serve as a benchmark.

The use of SEAS5 had a negative effect on prediction accuracy, resulting in an MAE drop of approximately 0.05 % (Figs. 10a and b). However, when considering the forecast data (future ERA5), prediction accuracy exhibited a slight enhancement, with a decrease in MAE of approximately 0.03 % (Figs. 10a and c). In the case of 6-month predictions targeting September 2012 that had the lowest SIE (Fig. 10g), and September 2006 that had the closest median SIE (Fig. 9k), both demonstrated that the incorporation of forecasts leads to a reduction in accuracy (an increase in RMSE of 1.27 and 0.73 % for 2012 and 2006, respectively; Figs. 10d, e, h, and i). In contrast, incorporating future data resulted in a slight improvement in prediction accuracy (a decrease in RMSE of 0.10 and 0.11 % for September 2012 and 2006, respectively; Figs. 10d, f, h, and j).

The decline in prediction accuracy when incorporating forecast data is intriguing. The degradation in accuracy can be attributed to the inherent uncertainties present in the SEAS5 dataset. The SEAS5 has large uncertainties, particularly in the high latitude region, including the Arctic, even though the forecast skill has improved when compared to its predecessor, SEAS4 (Johnson et al., 2019). Therefore, the use of seasonal forecasts in the long-term SIC prediction is challenging at this stage. Further, the utilization of future ERA5 data, considered as reference data in future conditions, exhibited a marginal contribution to enhancing prediction skills. The limited improvement might be due to the biases in ERA5 wind (Graham et al., 2019b), temperature (Graham et al., 2019a; Graham et al., 2019b; Herrmannsdörfer et al., 2023), and radiation (Graham et al., 2019a; Herrmannsdörfer et al., 2023) over the Arctic region, although they are the best estimates among reanalysis systems. With an accurate forecasting system, we expect that a more accurate SIC prediction would be possible.

5. Conclusions

We aimed to develop a novel long-term (up to 12 months) SIC prediction model using an image-to-image UNET approach. The UNET model demonstrated higher predictability and relatively stable prediction accuracy in terms of lead time (RMSE of 5.98, 5.93, 5.90, and 5.91 % for 3-, 6-, 9-, and 12-month predictions, respectively) than did the other four models (C3S, DP, CNN, and ConvLSTM) in every prediction period from 3 to 12 months. Through spatiotemporal analysis, the UNET model also showed higher predictability in past anomalous cases that recorded significant retreats of sea ice, such as those in the summers of 2007, 2012, 2019, and 2020, with RMSEs $<$10.0 %. In addition, the variable sensitivity analysis showed that the variables regarding sea ice patterns were the most important in predicting SIC in general, while solar radiation and wind contributed more to the prediction in the MIZ, which is thin ice or low-concentration regions. The suggested SIC prediction model can contribute to establishing Arctic development and management plans with long-term and stable prediction accuracy. Given the acceleration of global warming, we anticipate an earlier opening of Arctic sea routes. The long-term prediction of SIC would serve as a reference for establishing cost-effective maritime route plans. A more accurate SIC forecast would be useful to assess risks regarding the operation of icebreakers. To provide more useful long-term SIC forecast information, it is necessary to provide a more fine spatio-temporal resolution in the future, such as long-term daily prediction with sub-kilometer scales. By utilizing the larger computation capacity in the future, the more useful SIC prediction model could be developed. Moreover, it is necessary to offer more accurate long-term forecasts of sea ice thickness (SIT), which are challenging due to the scarcity of available SIT observation data, especially during the melting season. However, it is anticipated that more accurate predictions will be possible if multi-band observations of the Arctic region are conducted in the future using next-generation satellites, such as the Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CMIR).

Funding

This study was supported by the Korea Polar Research Institute (KOPRI) Grant (PE23040) and by Korea Institute of Marine Science & Technology (KIMST) funded by the Ministry of Oceans and Fisheries Grant (RS-2023-00256330).

CRediT authorship contribution statement

Young Jun Kim: Writing – original draft, Visualization, Validation, Methodology, Investigation, Formal analysis, Conceptualization. **Hyuncheol Kim:** Writing – review & editing, Funding acquisition. **Daehyeon Han:** Writing – review & editing, Methodology, Data curation. **Julienne Stroeve:** Writing – review & editing, Investigation. **Jungho Im:** Writing – review & editing, Supervision, Resources, Methodology, Investigation, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

References

Alkama, R., Koffi, E.N., Vavrus, S.J., Diehl, T., Francis, J.A., Stroeve, J., Forzieri, G., Vihma, T., Cescatti, A., 2020. Wind amplifies the polar sea ice retreat. Environ. Res. Lett. 15, 124022.

Andersson, T.R., Hosking, J.S., Pérez-Ortiz, M., Paige, B., Elliott, A., Russell, C., Law, S., Jones, D.C., Wilkinson, J., Phillips, T., 2021. Seasonal Arctic Sea ice forecasting with probabilistic deep learning. Nat. Commun. 12, 5124.

Årthun, M., Eldevik, T., Smedsrud, L.H., Skagseth, Ø., Ingvaldsen, R.B., 2012. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. J. Clim. 25 (13), 4736–4743.

Asadi, N., Lamontagne, P., King, M., Richard, M., Scott, K.A., 2022. Probabilistic spatiotemporal seasonal sea ice presence forecasting using sequence-to-sequence learning and ERA5 data in the Hudson Bay region. Cryosphere 16 (9), 3753–3773.

Baccouch, W., Oueslati, S., Solaiman, B., Labidi, S., 2023. A comparative study of CNN and U-net performance for automatic segmentation of medical images: application to cardiac MRI. Procedia Comput. Sci. 219, 1089–1096.

Ballinger, T., Overland, J., Wang, M., Bhatt, U., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., Kim, S.-J., Thoman, R., Walsh, J., 2020. Arctic Report Card 2020: Surface Air Temperature.

Batté, L., Välisuo, I., Chevallier, M., Acosta Navarro, J.C., Ortega, P., Smith, D., 2020. Summer predictions of Arctic Sea ice edge in multi-model seasonal re-forecasts. Clim. Dyn. 54, 5013–5029.

Bhuyan, K., Meena, S.R., Nava, L., van Westen, C., Floris, M., Catani, F., 2023. Mapping landslides through a temporal lens: an insight toward multi-temporal landslide mapping using the u-net deep learning model. GISci. Remote Sens. 60, 2182057.

Bitz, C.M., Holland, M., Hunke, E., Moritz, R., 2005. Maintenance of the sea-ice edge. J. Clim. 18, 2903–2921.

Blanchard-Wrigglesworth, E., Bitz, C., Holland, M., 2011. Influence of initial conditions and climate forcing on predicting Arctic Sea ice. Geophys. Res. Lett. 38.

Blanchard-Wrigglesworth, E., Barthélemy, A., Chevallier, M., Cullather, R., Fučkar, N., Massonnet, F., Posey, P., Wang, W., Zhang, J., Ardilouze, C., 2017. Multi-model seasonal forecast of Arctic Sea-ice: forecast uncertainty at pan-Arctic and regional scales. Clim. Dyn. 49, 1399–1410.

Bonan, D.B., Bushuk, M., Winton, M., 2019. A spring barrier for regional predictions of summer Arctic Sea ice. Geophys. Res. Lett. 46, 5937–5947.

Botvinick, M.M., Plaut, D.C., 2006. Short-term memory for serial order: a recurrent neural network model. Psychol. Rev. 113 (2), 201.

Bourke, R.H., Garrett, R.P., 1987. Sea ice thickness distribution in the Arctic Ocean. Cold Reg. Sci. Technol. 13 (3), 259–280.

Budikova, D., 2009. Role of Arctic Sea ice in global atmospheric circulation: a review. Glob. Planet. Chang. 68 (3), 149–163.

Bushuk, M., Giannakis, D., Majda, A.J., 2014. Reemergence mechanisms for North Pacific Sea ice revealed through nonlinear Laplacian spectral analysis. J. Clim. 27, 6265–6287.

Bushuk, M., Msadek, R., Winton, M., Vecchi, G.A., Gudgel, R., Rosati, A., Yang, X., 2017. Skillful regional prediction of Arctic Sea ice on seasonal timescales. Geophys. Res. Lett. 44 (10), 4953–4964.

Bushuk, M., Winton, M., Bonan, D.B., Blanchard-Wrigglesworth, E., Delworth, T.L., 2020. A mechanism for the Arctic Sea ice spring predictability barrier. Geophys. Res. Lett. 47 e2020GL088335.

Sea-Ice Surface Types Characterization and SAR Volume Backscattering Properties in Response to Sea States Interactions Using Structural Feature Fusion

Iman Heidarpour Shahrezaei, *Member, IEEE*, and Hyun-Cheol Kim, *Member, IEEE*

***Abstract*—Despite extensive research in polar remote sensing, there is still no consensus on how sea-ice evolves in response to interactions with ocean waves, nor is there agreement on the most effective way to characterize it based on fluctuations in height profile, both of which compromise interpretations of its texture properties when observed by synthetic aperture radar (SAR). This study aims to address these knowledge gaps by investigating the sea-ice modeling, marginal ice zone (MIZ) categorization and identifying an optimal approach to extract its freeboard profile and relevant backscattering properties under varying sea state conditions. To accomplish this, a numerical approach for modeling random polar media (RPM) is proposed, benefiting from transform-domain fusion method decompositions in conjunction with a convolutional neural network to jointly reconstruct a reference MIZ model in response to wind waves. To ensure consistency in surface structure, the fusion scheme incorporates a point-wise processing principle technique. The reconstructed reference sea-ice model is then subjected to an inverse problem solution analysis to generate the SAR volume backscattering dataset. The simulation results show that the entire routine, encompassing RPM modeling, MIZ characterization, structural fusion, and SAR raw data generation, yields promising results in the realm of sea-ice remote sensing. It reduces dependence on empirical methods, which typically necessitate polar field experiments that are limited by access constraints, or incorporate nonuniform and time-varying media characteristics into large-scale theoretical observation.**

***Index Terms*—Random polar media (RPM), raw data, sea state, synthetic aperture radar (SAR), transform-domain fusion, volume backscattering.**

I. Introduction

REMOTE sensing provides a reliable and thorough records of Earth surface changes, which are crucial for global climate change studies, especially in harsh and data-scarce polar regions [1], [2]. Changes in the distribution and shapes of ice floes have implications for the interaction levels of sea-ice that determine the exchanges of heat momentum between the atmosphere, ice, and ocean, referred to as random polar media (RPM) [3], [4], [5]. The vast majority of polar studies have focused on the empirical properties of solitary thin ice layer in the form of dissipative elements [6], [7], [8], [9], and the distribution mechanism of ice floes by ocean wave interactions while their energy is being scattered within the media has been overlooked [10], [11], [12], [13]. To overcome theoretical limitations and provide validation for experimental methods [14], [15], [16], RPM numerical modeling have been proposed [17], [18], [19], [20], [21], [22]. In this context, the RPM surface is modeled using sea-ice energy balance formulation that relies on statistical contributions from the physical state, extent, and dynamics of media in relation to the stochastic distribution and concentration of ice floes [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]. Nonetheless, in RPM modeling, a distinction exists between a surface realization [19], [21], [30], [31], [32], [33], describing the physical scattering properties of sea-ice, including floes of all sizes induced by wind or breaking interactions through a height profile [29], [34], [35], [36], [37], and a surface characterization [35], [38], [39], [40], [41], [42], which investigates textural characteristics to describe the structure in terms of fractal features [42], [43], [44], [45], [46]. Notably, the characterization of RPM surface structure has implications for the design of radar instrumentation for polar observation [47], particularly synthetic aperture radar (SAR), regarding sea-ice backscattering properties for the development of their image formation algorithms (IFAs) [48], [49]; however, considering the stochastic characteristics of the media, it necessitates RPM models obtained under dynamic wind-wave generation scenarios, such as changes in wind speed and direction, known as sea state conditions [25], [31], [33], [40], [42], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56].

Sea states, on the other hand, are categorized differently, ranging from smooth states with a maximum speed of 7 kt and a maximum wave height of 1 ft to very-high states with a maximum speed of 45 kt and a maximum height of 40 ft [35], [56], which complicates the RPM modeling as wind speed and direction change [17], [56], [57]. Given that, the problem becomes even more complex when characterizing RPM in the presence of ice floes with different structural properties and geometries, involving phenomena related to media momentum

Received 17 July 2024; revised 15 November 2024, 24 December 2024, and 5 February 2025; accepted 27 February 2025. Date of publication 5 March 2025; date of current version 25 March 2025. This work was supported in part by Korea Polar Research Institute (KOPRI) under Grant PE25040 and in part by the title of study on remote sensing for quantitative analysis of changes in the arctic cryosphere. *(Corresponding author: Hyun-Cheol Kim.)*

Iman Heidarpour Shahrezaei is with the Center of Remote Sensing and GIS, KOPRI, Incheon 21990, South Korea, and also with Applied Microwave Technology Laboratory, National Korea Maritime and Ocean University (KMOU), Busan 49112, South Korea (e-mail: heidarpour.iman@kmou.ac.kr).

Hyun-Cheol Kim is with the Center of remote sensing and GIS, KOPRI, Incheon 21990, South Korea, and also with the Serves as the unit director of Center of Remote Sensing and GIS, KOPRI, Incheon 21990, South Korea (e-mail: kimhc@kopri.re.kr).

Digital Object Identifier 10.1109/JSTARS.2025.3548597

© 2025 The Authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License. For more information, see https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

[55] X. Wu, K. C. Jezek, E. Rodriguez, S. Gogineni, F. Rodriguez-Morales, and A. Freeman, "Ice sheet bed mapping with airborne SAR tomography," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 10, pp. 3791–3802, Oct. 2011.
[56] I. H. Shahrezaei and H.-C. Kim, "Directional wave scattering distribution modes analysis and synthesis of random ocean media roughness for SAR electromagnetic interactions using feature fusion in dynamic sea states: A survey," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 44351–44382, 2024.
[57] L. Jakobson, T. Vihma, and E. Jakobson, "Relationships between sea ice concentration and wind speed over the arctic ocean during 1979–2015," *J. Climate*, vol. 32, no. 22, pp. 7783–7796, Oct. 2019.
[58] H. Zhang, H. Lin, and Y. Li, "Impacts of feature normalization on optical and SAR data fusion for land use/land cover classification," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 12, no. 5, pp. 1061–1065, May 2015.
[59] N. Liu, W. Li, X. Sun, R. Tao, and J. Chanussot, "Remote sensing image fusion with task-inspired multiscale nonlocal-attention network," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 20, 2023, Art. no. 5502505.
[60] W. Li, L. Liu, and J. Zhang, "Fusion of SAR and optical image for sea ice extraction," *J. Ocean Univ. China*, vol. 20, no. 6, pp. 1440–1450, Mar. 2021.
[61] K. C. Partington, "A data fusion algorithm for mapping sea-ice concentrations from special sensor microwave/imager data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 38, no. 4, pp. 1947–1958, Jul. 2000.
[62] C. Pohl and J. van Genderen, *Remote Sensing Image Fusion*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.
[63] H. Kaur, D. Koundal, and V. Kadyan, "Image fusion techniques: A survey," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 28, no. 7, pp. 4425–4447, Jan. 2021.
[64] X. Li, X. Guo, P. Han, X. Wang, H. Li, and T. Luo, "Laplacian redecomposition for multimodal medical image fusion," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 9, pp. 6880–6890, Sep. 2020.
[65] Y. Gao, F. Gao, J. Dong, and S. Wang, "Transferred deep learning for sea ice change detection from synthetic-aperture radar images," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 16, no. 10, pp. 1655–1659, Oct. 2019.
[66] I. de Gélis, A. Colin, and N. Longépé, "Prediction of categorized sea ice concentration from sentinel-1 SAR images based on a fully convolutional network," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 14, pp. 5831–5841, 2021.
[67] X. X. Zhu et al., "Deep learning meets SAR: Concepts models pitfalls and perspectives," *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, vol. 9, no. 4, pp. 143–172, Dec. 2021.
[68] X. X. Zhu et al., "Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources," *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 8–36, Dec. 2017.
[69] I. H. Shahrezaei and H. Kim, "Resolutional analysis of multiplicative high-frequency speckle noise based on SAR spatial de-speckling filter implementation and selection," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 9, May 2019, Art. no. 1041.
[70] Y. Liu, X. Chen, H. Peng, and Z. Wang, "Multi-focus image fusion with a deep convolutional neural network," *Inf. Fusion*, vol. 36, pp. 191–207, Jul. 2017.
[71] K. Nakamura, H. Wakabayashi, K. Naoki, F. Nishio, T. Moriyama, and S. Uratsuka, "Observation of sea-ice thickness in the sea of Okhotsk by using dual-frequency and fully polarimetric airborne SAR (Pi-SAR) data," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 43, no. 11, pp. 2460–2469, Nov. 2005.
[72] T. Moore, J. Paden, C. Leuschen, and F. Rodríguez-Morales, "Nonparametric array manifold calibration for ice sheet tomography," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 60, 2022, Art. no. 4303520.
[73] I. H. Shahrezaei, M. Kazerooni, and M. Fallah, "A complex target terrain SAR raw data generation and evaluation based on inversed equalized hybrid-domain algorithm processing," *Waves Random Complex Media*, vol. 27, no. 1, pp. 47–66, Jun. 2016.
[74] I. H. Shahrezaei and H.-C. Kim, "A monostatic forward-looking staring spotlight SAR raw data generation and hybrid-domain image formation modifications based on extended azimuth nonlinear chirp scaling autofocusing," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 59, no. 3, pp. 2329–2358, Jun. 2023.
[75] D. Masson and P. H. Leblond, "Spectral evolution of wind-generated surface gravity waves in a dispersed ice field," *J. Fluid Mech.*, vol. 202, pp. 43–81, May 1989.
[76] T. H. C. Herbers, N. R. Russnogle, and S. Elgar, "Spectral energy balance of breaking waves within the surf zone," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 30, no. 11, pp. 2723–2737, Nov. 2000.
[77] Q. Liu, W. E. Rogers, A. Babanin, J. Li, and C. Guan, "Spectral modeling of ice-induced wave decay," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 50, no. 6, pp. 1583–1604, Jun. 2020.
[78] A. Herman, "Spectral wave energy dissipation due to under-ice turbulence," *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 51, no. 4, pp. 1177–1186, Apr. 2021.
[79] J. P. Grainger, A. M. Sykulski, P. Jonathan, and K. Ewans, "Estimating the parameters of ocean wave spectra," *Ocean Eng.*, vol. 229, Jun. 2021, Art. no. 108934.
[80] L. Romero, "Distribution of surface wave breaking fronts," *Geophysical Res. Lett.*, vol. 46, no. 17–18, pp. 10463–10474, Sep. 2019.
[81] C. Guan, W. Hu, J. Sun, and R. Li, "The whitecap coverage model from breaking dissipation parametrizations of wind waves," *J. Geophysical Res., Oceans*, vol. 112, no. C5, American Geophysical Union, pp. 1–9, May 2007.
[82] I. V. Lavrenov and A. V. Novakov, "Numerical simulation of the interaction of gravity waves with elastic ice floes," *Fluid Dyn.*, vol. 35, no. 3, pp. 414–420, May 2000.
[83] G. Yang, H.-C. Li, W. Yang, K. Fu, T. Celik, and W. J. Emery, "Variational bayesian change detection of remote sensing images based on spatially variant Gaussian mixture model and separability criterion," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, vol. 12, no. 3, pp. 849–861, Mar. 2019.
[84] J. C. Landy, A. A. Petty, M. Tsamados, and J. C. Stroeve, "Sea ice roughness overlooked as a key source of uncertainty in cryosat-2 ice freeboard retrievals," *J. Geophysical Res., Oceans*, vol. 125, no. 5, May 2020, Art. no. e2019JC015820.
[85] I. H. Shahrezaei, M. Kazerooni, and M. Fallah, "A total quality assessment solution for synthetic aperture radar NLFM waveform generation and evaluation in a complex random media," *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–25, Jan. 2017.
[86] S. Sharma et al., "Establishment of SAR calibration site at Antarctica: Pre-NISAR calibration activity," *Adv. Space Res.*, vol. 69, no. 4, pp. 1715–1725, Feb. 2022.



Iman Heidarpour Shahrezaei (Member, IEEE) was born in Isfahan, Iran, in 1985. He received the B.Sc. degree in electrical and telecommunication engineering, the M.Sc. degree in electrical and telecommunication engineering majored in fields and waves from the University of Urmia, Urmia, Iran, in 2007 and 2011, respectively, and the Ph.D. degree in electrical and telecommunication engineering majored in fields and waves from Malek-Ashtar University of Technology (MUT), Tehran, Iran, in 2017.

Since 2018, he has been a Postdoctoral Researcher with the Korea Polar Research Institute (KOPRI), the Center for Remote Sensing and Geospatial Information Systems (GIS). The center specializes in numerical remote sensing modeling and satellite signal processing. He is currently serving as a Research Professor with the Applied Microwave Technology (AMT) Laboratory, National Korea Maritime and Ocean University (KMOU), where his research focuses on electromagnetic theories and antenna design for remote sensing applications. His research interests encompass radar remote sensing, target terrain modeling, data fusion, backscattering theories, and the development of synthetic aperture radar (SAR) sensors, including image formation algorithms.



Hyun-Cheol Kim (Member, IEEE) received the Ph.D. degree in earth and environmental sciences with a major in satellite oceanography from Seoul National University, Seoul, Republic of Korea, in 2006.

Since 2007, he has been working with the Korea Polar Research Institute (KOPRI) using satellite and unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing data for the purpose of Arctic and Antarctic research. He established a Remote Sensing Group in KOPRI, in 2016. He leads the Center for Remote Sensing and Geospatial Information Systems (GIS) as a Director. The center consists of many specialized fields of satellite remote sensing, ocean color, SAR, passive microwave, optical remote sensing, and UAVs. The group mainly studies the cryosphere for climate change using remote sensing data. Notably, he is the first scientist to use Korea Multipurpose Satellite for polar science. He is also actively involved in many international programs.

Dr. Kim was a recipient of a Korea Prime Ministerial Citation for Excellence in Ocean Science in 2019.

remote sensing

MDPI

Technical Note

Spatial Regionalization of the Arctic Ocean Based on Ocean Physical Property

Joo-Eun Yoon, Jinku Park and Hyun-Cheol Kim *

Center of Remote Sensing & GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea; jeyoon@kopri.re.kr (J.-E.Y.); jinku_park@kopri.re.kr (J.P.)
* Correspondence: kimhc@kopri.re.kr

Abstract: The Arctic Ocean has a uniquely complex system associated with tightly coupled ocean–ice–atmosphere–land interactions. The Arctic Ocean is considered to be highly susceptible to global climate change, with the potential for dramatic environmental impacts at both regional and global scales, and its spatial differences particularly have been exacerbated. A comprehensive understanding of Arctic Ocean environmental responses to climate change thus requires classifying the Arctic Ocean into subregions that describe spatial homogeneity of the clusters and heterogeneity between clusters based on ocean physical properties and implementing the regional-scale analysis. In this study, utilizing the long-term optimum interpolation sea surface temperature (SST) datasets for the period 1982–2023, which is one of the essential indicators of physical processes, we applied the K-means clustering algorithm to generate subregions of the Arctic Ocean, reflecting distinct physical characteristics. Using the variance ratio criterion, the optimal number of subregions for spatial clustering was 12. Employing methods such as information mapping and pairwise multi-comparison analysis, we found that the 12 subregions of the Arctic Ocean well represent spatial heterogeneity and homogeneity of physical properties, including sea ice concentration, surface ocean currents, SST, and sea surface salinity. Spatial patterns in SST changes also matched well with the boundaries of clustered subregions. The newly identified physical subregions of the Arctic Ocean will contribute to a more comprehensive understanding of the Arctic Ocean's environmental response to accelerating climate change.

Keywords: Arctic Ocean; sea surface temperature; ocean physical property; spatial clustering

check for updates

Academic Editor: Jorge Vazquez

Received: 27 January 2025
Revised: 10 March 2025
Accepted: 14 March 2025
Published: 18 March 2025

Citation: Yoon, J.-E.; Park, J.; Kim, H.-C. Spatial Regionalization of the Arctic Ocean Based on Ocean Physical Property. *Remote Sens.* **2025**, *17*, 1065. https://doi.org/10.3390/rs17061065

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

1. Introduction

The Arctic Ocean exhibits unique features and complex dynamics characterized by a confluence of various water masses, circulation dynamics, and seasonal ice cover (Figure 1) [1]. In recent decades, the Arctic has warmed almost four times faster than the rest of the globe, referred to as Arctic amplification [2–4]. It is believed that this amplification is caused by complex physical mechanisms, including local feedback (e.g., temperature and sea ice-related feedback) and changes in poleward energy transport (e.g., poleward ocean heat transport through the Atlantic and Pacific Ocean gateways) [5]. In particular, a reduction in sea ice has been shown to be a primary cause of spatial disparities in Arctic warming [6,7], with maximum warming in the Barents–Kara Seas where the sea ice loss was most pronounced [8,9]. Advection of anomalous Atlantic and Pacific waters into the Arctic Ocean (called atlantification and pacification, respectively) has also contributed to warming and contrasting regional differences in stratification, with the strengthening of stratification in the Amerasian Basin but weakening in the Eurasian Basin, potentially altering nutrient

4. Conclusions

Because of the complex environmental system over the Arctic Ocean, a robust regionalization based on the physical characteristics of the ocean is an essential step in understanding and predicting the response of the Arctic Ocean environment to accelerated warming. SST is a fundamental physical property that can directly or indirectly affect the climate and marine ecosystems. Based on the long-term annual mean NOAA OISST data for 1982–2023, we aimed to address a spatial regionalization of the Arctic Ocean that describes physical characteristics using the unsupervised K-means++ clustering algorithm. The 12 spatial subregions have been identified by different SST regimes based on the CH index. Using minimum and maximum SIC distribution, we showed that OISST-derived regionalization captured more of the physical characteristics on a regional scale compared to IHO and NSIDC. Using the climatological values of reanalysis-derived ocean surface current, SST, and SSS that represent significant physical properties for winter and summer seasons, we also presented that the subregions defined with OISST changes were effective at a clear and distinct suite of physical conditions over the Arctic Ocean, indicating distinct regional dynamics in surface current, SST, and SSS by each region. Additionally, this regionalization captured unique spatial differences in the summer SST changes, matching well with the boundaries of subregions clustered in this study. Further investigation is needed for the detailed integration of the physical and biological characteristics and their underlying mechanisms in each region of the Arctic Ocean. The application of this regionalization will also aid in achieving a more comprehensive understanding of the spatial and temporal heterogeneity in climate change effects on the Arctic Ocean environments.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at https://www.mdpi.com/article/10.3390/rs17061065/s1, Tables S1–S4: Multiple comparison results of the climatological mean SST and SSS during winter and summer seasons.

Author Contributions: Conceptualization, J.-E.Y. and H.-C.K.; Data curation, J.-E.Y.; Funding acquisition, H.-C.K.; Investigation, J.-E.Y.; Methodology, J.-E.Y., J.P. and H.-C.K.; Visualization: J.-E.Y.; Supervision, H.-C.K.; Writing—Original draft, J.-E.Y.; Writing—review and editing, J.-E.Y., J.P. and H.-C.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the Korea Polar Research Institute, grant number PE25040.

Data Availability Statement: All data used in this study can be obtained by contacting the corresponding author via email.

Acknowledgments: We thank the editor and reviewers for their comments on this paper.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Timmermans, M.-L.; Marshall, J. Understanding Arctic Ocean Circulation: A Review of Ocean Dynamics in a Changing Climate. *J. Geophys. Res. Ocean.* **2020**, *125*, e2018JC014378. [CrossRef]
2. Rantanen, M.; Karpechko, A.Y.; Lipponen, A.; Nordling, K.; Hyvärinen, O.; Ruosteenoja, K.; Vihma, T.; Laaksonen, A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth Environ.* **2022**, *3*, 168. [CrossRef]
3. England, M.R.; Eisenman, I.; Lutsko, N.J.; Wagner, T.J.W. The Recent Emergence of Arctic Amplification. *Geophys. Res. Lett.* **2021**, *48*, e2021GL094086. [CrossRef]
4. Jansen, E.; Christensen, J.H.; Dokken, T.; Nisancioglu, K.H.; Vinther, B.M.; Capron, E.; Guo, C.; Jensen, M.F.; Langen, P.L.; Pedersen, R.A.; et al. Past perspectives on the present era of abrupt Arctic climate change. *Nat. Clim. Chang.* **2020**, *10*, 714–721. [CrossRef]
5. Previdi, M.; Smith, K.L.; Polvani, L.M. Arctic amplification of climate change: A review of underlying mechanisms. *Environ. Res. Lett.* **2021**, *16*, 093003. [CrossRef]
6. Dai, A.; Luo, D.; Song, M.; Liu, J. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO_2. *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 121. [CrossRef]

Advanced Algorithm for Continuous Melt Onset Detection on Arctic Sea Ice

Jong-Min Kim, Hyun-Cheol Kim, *Member, IEEE*, Jeong-Won Park, *Member, IEEE*, Jinku Park, Minji Seo, and Sang-Moo Lee, *Member, IEEE*

***Abstract*— Expansion of the Arctic melting season with an earlier melt onset date (MOD) is a well-known indicator of Arctic warming. Since 1979, the pan-Arctic MOD distributions usually have been estimated using passive satellite microwave radiometer observations. However, there is a poor agreement in MOD between previous MOD detection algorithms based on passive microwave measurements, raising doubts regarding the accuracy of their MOD products. Thus, this study developed a new MOD algorithm, namely TB_{max} algorithm, to improve the estimation accuracy of continuous melt onset. The TB_{max} algorithm utilizes the microwave radiation characteristics of sea ice, and the daily brightness temperature time series shows their maximum brightness temperature on MOD. By using AMSR2 brightness temperature data, the pan-Arctic MOD distributions estimated from 2013 to 2021 using the TB_{max} algorithm successfully reproduced a feature of sea ice melting that mainly during May or June over the Arctic, including the late melting tendency of ice at high latitudes and multiyear ice (MYI). Validation with independent dataset (ice mass balance (IMB) buoy data) suggested that the TB_{max} MODs showed superior performance compared to other previous algorithms (biases of 0.1 days versus −2.7 and 13.9 days). As MOD can provide information about surface emissivity and the energy budget of the sea ice, the improved MOD may contribute to a more precise analysis of Arctic environment change and enhanced estimation of sea ice parameters.**

***Index Terms*— Arctic melting season, melt onset date (MOD), passive microwave, sea ice melt.**

I. Introduction

As ARCTIC sea ice extent broke significantly its minimum record in 2007 and 2012, the decline in Arctic sea ice has been spotlighted as a crucial indicator of Arctic climate change [1], [2], [3]. This unprecedented decrease in Arctic sea ice is closely related to the early melting of sea ice [4], [5]. Since there is a significant reflectance difference between melting snow and dry snow [6], [7], the early melt of snow on sea ice causes more and faster absorption of solar radiation on sea ice, accelerating the melting process of sea ice [1], [8], [9]. Thus, the early melting of sea ice plays an important role in the variations of the Arctic radiation budget and the resultant climate change [10], [11], [12]. This mechanism (so-called "ice albedo feedback") is a main driver of the rapid warming trend of the Arctic compared to the global-averaged temperature trend [13], [14].

To digitize the melt onset timing of sea ice, the "melt onset date (MOD)" is widely used as a daily scale parameter. Various satellite-based MOD detection attempts have been made using passive microwave radiometers. In particular, Special Sensor Microwave Imager (SSMI) and SSMI Sounder (SSMIS) have been widely used owing to their prolonged observation duration [10], [15], [16], [17], [18], while some studies used Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR) due to its better spatial resolution [19], [20]. There are also MOD detection methods based on synthetic radar aperture (SAR) measurements [21], [22], [23], [24] and even infrared sensors [25]. However, owing to the limited spatial/temporal coverage of SAR and incapability of infrared satellites on night and cloudy conditions, passive microwave radiometer data have been most widely used to estimate pan-Arctic MOD distributions since 1979 [10], [16], [26], [27], [28] and to generate land–sea integrated MOD data by combining active microwave measurements [29]. Since the significant differences in dielectric constants between liquid water and solid water (i.e., ice) at microwave frequencies [30], [31], radiometer-measured brightness temperature (TB) from sea ice system changes sharply when sea ice melts [32], [33]. To capture the melt onset signal, microwave radiometer-based MOD detection methods utilize the large TB difference between dry, cold snow and wet, and warm snow [10], [15].

However, the definition of the MOD depends on its estimation algorithm. For example, Bliss [26] compared two widely used different MOD datasets: the Advanced Horizontal Range Algorithm (AHRA) [16]) and the passive microwave (PMW) algorithm [10]. A melt onset event in the sea ice can persist during the remaining summer (continuous melt onset) or a subsequent refreeze event can occur shortly after (early melt onset). The AHRA finds MOD as the first MOD regardless of whether this melt onset is early melt or continuous melt. On the other hand, the PMW finds MOD and early MOD (EMOD) separately. If the first melt onset is continuous melt onset, then this case is regarded as no EMOD case.

Moreover, these two algorithms show large differences in their Arctic MOD distributions even after adjustments

Received 7 November 2024; revised 13 March 2025; accepted 8 April 2025. Date of publication 15 April 2025; date of current version 24 April 2025. This work was supported by Korea Polar Research Institute (KOPRI) under Grant PE25040. *(Corresponding author: Hyun-Cheol Kim.)*

Jong-Min Kim, Hyun-Cheol Kim, Jeong-Won Park, and Jinku Park are with the Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea (e-mail: jmkim@kopri.re.kr; kimhc@kopri.re.kr; jeong-won.park@kopri.re.kr; jinku_park@kopri.re.kr).

Minji Seo was with the Center of Remote Sensing and GIS, Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Republic of Korea. She is now with the National Forest Satellite Information and Technology Center, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Republic of Korea (e-mail: seomj1610@korea.kr).

Sang-Moo Lee is with the School of Earth and Environmental Sciences and the Institute for Data Innovation in Science, Seoul National University, Seoul 08826, Republic of Korea (e-mail: sangmoolee@snu.ac.kr).

Digital Object Identifier 10.1109/TGRS.2025.3560261

1558-0644 © 2025 IEEE. All rights reserved, including rights for text and data mining, and training of artificial intelligence and similar technologies. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.
See https://www.ieee.org/publications/rights/index.html for more information.
Authorized licensed use limited to: Hyun-Cheol Kim. Downloaded on April 25,2025 at 00:47:01 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

[68] R. Kwok, "Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: Losses and coupled variability (1958–2018)," *Environ. Res. Lett.*, vol. 13, no. 10, Oct. 2018, Art. no. 105005.
[69] A. Bliss and M. Anderson, "Daily area of snow melt onset on Arctic sea ice from passive microwave satellite observations 1979–2012," *Remote Sens.*, vol. 6, no. 11, pp. 11283–11314, Nov. 2014.
[70] A. Bliss, J. Miller, and W. Meier, "Comparison of passive microwave-derived early melt onset records on Arctic sea ice," *Remote Sens.*, vol. 9, no. 3, p. 199, Feb. 2017.
[71] G. Spreen, L. de Steur, D. Divine, S. Gerland, E. Hansen, and R. Kwok, "Arctic sea ice volume export through fram strait from 1992 to 2014," *J. Geophys. Res., Oceans*, vol. 125, no. 6, p. 2019, Jun. 2020.
[72] Y. Wang, H. Bi, and Y. Liang, "A satellite-observed substantial decrease in multiyear ice area export through the fram strait over the last decade," *Remote Sens.*, vol. 14, no. 11, p. 2562, May 2022.
[73] C. Polashenski, D. Perovich, and Z. Courville, "The mechanisms of sea ice melt pond formation and evolution," *J. Geophys. Res., Oceans*, vol. 117, no. C1, Jan. 2012, Art. no. C01001.
[74] J.-M. Kim et al., "Estimation of summer pan-Arctic ice draft from satellite passive microwave observations," *Remote Sens. Environ.*, vol. 295, Sep. 2023, Art. no. 113662.



Jong-Min Kim received the B.S. and Ph.D. degrees in Earth and environmental sciences from Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2015 and 2023, respectively.

He is currently working as a Post-Doctoral Researcher with Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon, Republic of Korea. His research interests include sea ice thickness retrieval and relevant sea ice parameters using passive microwave satellite.



Hyun-Cheol Kim (Member, IEEE) received the Ph.D. degree in Earth and environmental sciences (with a major in satellite oceanography) from Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2006.

Since 2007, he has been with Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon, South Korea, using satellite and unmanned aerial vehicle (UAV) remote sensing data for the purpose of Arctic and Antarctic research. He established a remote sensing group at KOPRI in 2016. He leads the Center of Remote Sensing and Geospatial Information Systems as the Director. The center consists of many specialized fields of satellite remote sensing, ocean color, synthetic aperture radar (SAR), passive microwave, optical remote sensing, and UAVs. The group mainly studies the cryosphere for climate change using remote sensing data. Notably, he is the first Scientist to use Korea Multipurpose Satellite for polar science. He is also actively involved in many international programs.

Dr. Kim was a recipient of Korea Prime Ministerial Citation for Excellence in Ocean Science in 2019.



Jeong-Won Park (Member, IEEE) received the B.S. and Ph.D. degrees in Earth system sciences from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2006 and 2013, respectively.

He was a Post-Doctoral Researcher with Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon, South Korea, from 2014 to 2015, and subsequently worked with the Nansen Environmental and Remote Sensing Center (NERSC), Bergen, Norway, from 2016 to 2018, where he continued his research as a Researcher in 2019. He is currently a Principal Researcher with KOPRI, where his research focuses on areas such as sea ice dynamics and classification, synthetic aperture radar (SAR) signal processing, radiometric correction, and Doppler applications.



Jinku Park received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from the Department of Oceanography, Busan National University, Busan, Republic of Korea, in 2014 and 2020, respectively.

He has been working as a Senior Researcher at Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon, Republic of Korea. His research focuses on ocean remote sensing, particularly on understanding the interactions between sea ice and ocean–atmospheric environments in the polar regions. Recently, his work has expanded to include studies on the vulnerability and adaptability of polar marine organisms to climate change.



Minji Seo received the B.S. and Ph.D. degrees in geoinformation engineering from the Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea, in 2016 and 2021, respectively.

She was a Post-Doctoral Researcher at Korea Polar Research Institute (KOPRI), Incheon, Republic of Korea, from 2021 to 2024. She is currently a Research Officer with the National Forest Satellite Information and Technology Center, National Institute of Forest Science (NIFOS), Seoul, Republic of Korea. Her research interests include satellite remote sensing, the preprocessing (calibration/validation) of satellite products, and the development of analysis ready data (ARD).



Sang-Moo Lee (Member, IEEE) received the B.S. and Ph.D. degrees in Earth and environmental sciences from Seoul National University, Seoul, Republic of Korea, in 2011 and 2018, respectively.

From 2018 to 2019, he was a Post-Doctoral Research Scientist with the Satellite Meteorology Laboratory, Seoul National University, where he was an Assistant Research Professor of the Brain Korea 21 Plus Project in 2019. From 2019 to 2022, he was a Post-Doctoral Research Fellow with the Center for Environmental Technology, Department of Electrical, Computer, and Energy Engineering, University of Colorado Boulder (CU Boulder), Boulder, CO, USA, where he was a Visiting Scholar with the National Snow and Ice Data Center, Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences. He is currently an Assistant Professor with the School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University. His research interests include satellite remote sensing, the utilization of satellite measurements for the study of oceanic and atmospheric processes, and the modeling of atmospheric radiative transfer and surface emissivity.

KOPRI 극지연구소

Authorized licensed use limited to: Hyun-Cheol Kim. Downloaded on April 25,2025 at 00:47:01 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

KOPRI 극지연구소