

(뒷면)

(측면)

(앞면)

<p>주 의</p>	<p>B S P E 2 2 0 4 0 0 6 1 1 2</p> <p>북 극 빙 권 변 화 정 량 분 석 을 위 한 원 격 탐 사 연 구</p> <p>한 국 해 양 연 구 원</p> <p>부 설 극 지 연 구 소</p>	<p>BSPE22040-061-12</p> <p>북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구</p> <p>A study on remote sensing for quantitative analysis of changes in the Arctic cryosphere</p> <p>2023. 02. 28</p> <p>한국해양과학기술원 부설 극지연구소</p>
------------	---	---

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구”과제의 1단계 최종보고서로 제출합니다.

2023. 2. 28.

연구책임자 : 김현철

참여연구원 : 강성호, 권영주, 김고홍, 김나영,
김승희, 김재인, 김종민, 김주홍,
문채은, 박정원, 박지은, 박진구,
서민지, 신형철, 이나미, 이성재,
정용식, 주동찬, 지준화, 최용한,
하선용, 한향선, 현창욱,
Iman Heidarpour Shahrezaei 외

위탁연구기관명 : 부경대학교,
세종대학교,
울산과학기술원,
한국해양과학기술원

위탁연구책임자 : 한경수, 홍성욱, 임정호, 손영백

보고서 초록

과제관리번호	PE20080 PE21040 PE22040	해당단계 연구기간	2020.01.01. ~ 2022.12.31.	단계 구분	1 / 2
연구사업명	중 사업명	기관목적사업 (2020년 이후)			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구			
연구책임자	김현철	해당단계 참여연구원수	총 : 61 명 내부 : 25 명 외부 : 36 명	해당단계 연구비	정부: 4,752,547천원 기업: 천원 계: 4,752,547천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소 원격탐사빙권정보센터		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 독일	상대국연구기관명 : Alfred Wegener Institute			
	상대국명 : 노르웨이	상대국연구기관명 : Nansen Environmental and Remote Sensing Center			
	상대국명 : 미국	상대국연구기관명 : International Arctic Research Center			
위탁연구	연구기관명 : 부경대학교	연구책임자 : 한경수			
	연구기관명 : 세종대학교	연구책임자 : 홍성욱			
	연구기관명 : 울산과학기술원	연구책임자 : 임정호			
	연구기관명 : 한국해양과학기술원	연구책임자 : 손영백			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	315
<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 연구는 북극 빙권 변화 파악을 위한 위성 원격탐사 산출물 개발과 북극 빙권 변화 정량 분석을 통한 기후인자와의 상관관계 분석을 목적으로 함. ○ 연구개발은 2단계로 구성하며, 1단계는 원격탐사 기반 빙권 정량적 변화 광역 탐지 (산출물 개발), 2단계는 빙권 시공간 변화와 기후 요소별 상관관계 분석 (기후인자 영향 평가)으로 구성함. ○ 북극 빙권 구성요소 특성 변화 파악을 위한 원격탐사 산출물 개발을 통해, 다음의 성과를 달성함. <ul style="list-style-type: none"> - 해빙 두께, 이동, 유형의 3종에 대해서 시공간 해상도 대폭 개선 - 굽힘강도, 거칠기의 2종에 대해 기존에 없던 신규 산출물 개발 - 변형, 리드, 융빙호의 3종에 대해 시기적으로 단절된 산출물을 지속 개발 ○ 또한 해빙 분석 대상 확대 및 분석 가능 스케일(해상도)의 개선 달성으로 2단계에서 수행할 다각적/종합적인 빙권 변화 양상 분석의 기반을 마련함. 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	해빙, 동토, 인공위성, 무인기, 원격탐사			
	영 어	Sea ice, Permafrost, Satellite, Unmanned Aerial Vehicle, Remote Sensing			

요 약 문

I. 제 목

- 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구

II. 연구개발의 목적

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

III. 연구개발의 내용 및 범위

- [1단계] 원격탐사 기반 빙권 정량적 변화 광역 탐지 (산출물 개발)
 - 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)
 - 해빙/해양/(동토)의 기후환경 요소별 상호 관련성 이해
 - 빙권 변동의 기후/환경변화에의 영향 분석
 - 현장관측을 통한 원격탐사자료 검보정

IV. 연구개발결과

- 북극 빙권 구성요소 특성 변화 파악을 위한 원격탐사 산출물 개발
 - 해빙 두께, 이동, 유형의 3종에 대해서 시공간 해상도 대폭 개선
 - 굽힘강도, 거칠기의 2종에 대해 기존에 없던 신규 산출물 개발
 - 변형, 리드, 융빙호의 3종에 대해 시기적으로 단절된 산출물을 지속 개발
- 해빙 분석 대상 확대 및 분석 가능 스케일(해상도)의 개선 달성으로 2단계에서 수행할 다각적/종합적인 빙권 변화 양상 분석의 기반 마련

V. 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
 - 조선/물류 분야 극지 운항 선박 지원 프로그램 공동 개발



S U M M A R Y

I. Title

- A study on remote sensing for quantitative analysis of changes in the Arctic cryosphere

II. Purpose of R&D

- Development of satellite remote sensing products for Arctic cryosphere monitoring
- Assessment influence on Arctic cryosphere by global warming using quantitative analysis

III. Contents and Extent of R&D

- [Phase I] Quantitative cryosphere variability detection by remote sensing
 - Quantify Arctic sea ice and deep analysis on spatio-temporal variations
 - Permafrost monitoring using UAV and satellite data
 - CAL-VAL remote sensing data by field-expedition
- [Phase II] Analysis of spatio-temporal variations and influence by climate factors
 - Understand interrelationships among sea ice and ocean (and potentially permafrost) with climate factors
 - Mutual influence analysis of changes in cryosphere to climate/environment variations
 - CAL-VAL remote sensing data by field-expedition

IV. R&D Results

- Development of satellite remote sensing products for Arctic cryosphere monitoring
 - Enhancements in spatio-temporal resolution of sea ice thickness, drift, and

type

- New product developments for sea ice flexural strength and roughness
- Continuous productions of sea ice deformation, lead, and melt pond
- Laying the foundation for comprehensive analysis on changes in the cryosphere by increasing the number of analyzable variables and their spatio-temporal resolutions

V. Application Plans of R&D Results

- Contribution to the improvement of climate prediction system through the production of precise sea ice input data
- Contribution to the development of the Arctic route prediction system through the continuous production of precise Arctic sea ice data



목 차

제 1 장 서론	8
제 1 절 연구개발의 개요 및 필요성	8
제 2 절 연구개발의 목표 및 범위	10
제 3 절 연구개발 추진체계	25
제 2 장 국내외 기술개발 현황	30
제 1 절 연구개발대상의 국외 기술, 산업동향	30
제 2 절 연구개발대상의 국내 기술, 산업동향	31
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	35
제 1 절 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 고도화 및 산출물 개발 ...	35
제 2 절 동토 모니터링을 위한 위성 및 무인기 자료 분석 기반기술 개발	221
제 3 절 북극 빙권요소 위성 관측 검보정을 위한 현장조사, 자료 수집 및 분석	232
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	258
제 1 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성	258
제 2 절 연구개발 성과 및 의의	287
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	289
제 1 절 연구결과의 활용방안	289
제 2 절 기대성과 및 파급효과	291
제 6 장 참고문헌	293

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 개요 및 필요성

1. 연구개발의 개요

- ✓ 북극해빙의 감소 및 영구동토 용해와 관련한 이상기후 현상에 과학적 대응을 위한 위성정보 확보 연구개발.
- ✓ 인공위성 관측은 북극 빙권의 광범위한 변화 감시에 최적이나, 현재 해빙 특성을 지시하는 위성정보의 종류와 정량화가 제한적이므로, 극지연구소 자체 연구개발을 통해 신뢰도 있는 해빙 산출물 개발.
- ✓ 기후/환경 변화에 적극적으로 대응하기 위해서는 관측과 예측이 연계되어야 하며, 기후 모델에 직접 접목시킬 수 있는 원격탐사 산출물의 개발 및 지속적인 생산, 그리고 다학제간 융합 활용 분야 확대를 위한 연구개발.
- ✓ 위성/무인기를 활용한 빙권 특성을 정량화한 산출물을 기반으로 빙권의 시공간적 변화와 기후요소와의 상호 영향 분석을 통해 근미래 북극 활용 시대에 선제적으로 대응하기 위한 연구개발.

2. 연구개발의 필요성

- 북극 이사회 영구 옵서버 진출('13.5), 북극정책 기본계획('14.5), 신(新) 북방정책 로드맵('17.9), 북극활동 진흥 기본계획('18.9), 2050극지비전('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 중요성이 강조됨.
- '해양수산과학기술육성법('20.3)' 제 8조, 제 28조의 2. '극지활동진흥법('21.10)'제8조 (연구개발 등의 지원) 2항 의 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 전략사항을 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 표명함.

- 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.
- 위성공동 활용을 위한 국내외 협력체계 구축 및 국제기구에 적극적으로 참여를 위한 전략적인 국제협력 강조함.
- 인공지능 기반의 첨단 위성영상 분석 능력 확보 및 한국형 빅데이터 처리 기술개발 등 위성영상 분석 처리 능력 고도화 등은 정부의 전략적 기초임.
- 지구온난화에 의한 미래 기후변화 예측을 위해 전 지구 에너지 평형 변화의 원인인 북극 빙권 변화에 대한 연구 필요성이 증대됨.
- 특히, 빈번하게 발생하고 있는 중위도권 이상기상 현상의 원인 분석 및 예측을 위해서는 북극 해양/해빙-육상빙권/동토의 시공간적 특성 변화에 대한 분석 연구가 중요 이슈화 됨.
- 북극권 해양 및 육상 얼음의 감소는 신 북극항로 개척과 미답지역 자원개발을 가능하게 하며, 이에 능동적인 대비를 위한 연구 활동이 필요함.
- 쇄빙연구선 아라온/차세대쇄빙선 및 육상 활동을 통한 현장관측과 연계한 북극 규모 빙권 변화 연구가 필요함.
- 북극권 인공위성 국제 공동관측망에 대한 능동적인 참여와 국내 아리랑위성의 활용을 통한 위성기반 북극 빙권변화 관측 기술력 확보가 필요함.

제 2 절 연구개발의 목표 및 범위

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 (2020~2022)

- ✓ 북극 빙권 구성요소 위성산출물 개발

월별 위성산출물 구축 (4종 48건) :

해빙 이동 (2km 급 12건), 해빙 변형 (2km 급 12건),
해빙 강도 (500m 급 12건), 해빙 두께 (25km 급 12건)

주별 위성산출물 구축 (2종 156건) :

해빙 이동 (2km 급 52건), 해빙 유형 (2km 급 104건)

연 2회 위성산출물 구축 (1종 4건) :

해빙 강도 (500m 급 4건, 1~2차년도 프로토타입)

- ✓ 북극 빙권 현장조사 및 자료수집

해빙 특성 (두께, 굽힘강도, 이동벡터, 표면지형) 현장자료 2건

동토지역 고해상도 무인기 정밀영상 및 수치표면모델 / 1m 급 1건, 10cm 급 1건

- ✓ 표준화된 영향력 지수

mrnIF 90 이상 논문 1건, mrnIF 80 이상 논문 4건, mrnIF 40 이상 논문 5건, 총 10건

(2) 2단계 성과목표 (2023~2025)

<p>✓ 북극해 해빙 특성 시공간 변동성 분석</p> <p>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</p> <p>이종 산출물간 상관성 분석도 1건</p>
<p>✓ 북극해 해양 요소 시공간 변동성 분석</p> <p>해양 요소 시공간 정보도, 2종 요소, 요소별 2건, 총 4건 해빙-수온 상호 작용 모식도 1건 해빙-생태 영향 분석도 1건</p>
<p>✓ 북극해 해빙-해양 변동과 기후변화와의 상관관계 분석</p> <p>해빙-기후요소 상관관계 분석도 1건 해양-기후요소 상관관계 분석도 1건 해양-해빙 환경의 기후 연동성 모사 인공지능 모델 1건</p>
<p>✓ 표준화된 영향력 지수</p> <p>mrnIF 90 이상 논문 1건, mrnIF 80 이상 논문 4건, mrnIF 40 이상 논문 5건, 총 10건</p>

2. 상세 성과목표 및 내용

가. 정량적 성과목표 및 평가 기준

(1) 1단계 정량적 성과목표 및 평가 기준

표 1-2-1. 1단계 정량적 성과목표 및 평가 기준

구분	년도	성과목표	지표	세계최고 수준주 (보유국/보유기관)	목표치	가중치 (%)	평가기준	설정근거
1단계 성과목표	2020 ~ 2022	북극 빙권 구성요소 특성 변화 파악을 위한 원격탐사 산출물 개발	해빙유지도	미국/ NIC	104건	10%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 2km 공간해상도의 해빙 유형 분포도 위성산출물
			해빙이동지도	미국/ NSIDC	64건 (월별12건, 주별52건)	5%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 2km 공간해상도의 해빙 이동 벡터 위성산출물

1차 년도	2020	해빙강도 지도	없음	16건	5%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	북극해 전 지역에 대한 500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물	
			미국/ NSIDC	12건	5%	위성산출물 메타데이터기 록 (KPDC 등록)	북극해 지역에 대한 25km 공간해상도의 해빙 두께지도 산출물	
			미국/ NASA	12건	5%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	북극해 지역에 대한 25km 공간해상도의 해빙 두께지도 산출물	
		현장조사를 통한 북극성 권측 결과 검보정	해빙 코어	미국/ University of Alaska	6개	10%	북극해 해빙 코어 개수 확인	해빙 코어 사진 및 얼음 특성 기록
			현장 관측을 위한 고해상 영상물 산출물	없음	2건	10%	북극 해빙에 대한 표면 특성 관측 목적 10 cm 공간해상도의 무인기 영상 산출물, 1 m 공간해상도의 위성 영상 산출물	영상 산출물 메타데이터 기록
			무인기 영상 및 수 표면 모델	없음	2건	10%	동토 지역에 대한 10 cm 공간해상도의 영상 모자이크 및 수치 표면 모델 산출물	영상 산출물 메타데이터 기록
		관련 논문	mrnIF 40 이상 논문 수	대학기관	5건	계재 건수	설 정 근 거 조 건 을 충 족 하 는 논 문 계 제	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
			mrnIF 80 이상 논문 수	대학기관	4건	계재 건수		
			mrnIF 90 이상 논문 수	대학기관	1건	계재 건수		
		북극 빙권 구성요소 위성 모니터링을 위한 기술 구축	해빙 유지 지도	미국/ NIC	52건	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	12건	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	2건	10%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	북극해 현장조사 자료가 존재하는 지역에 대한 500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물
과거 현장조사 및 고해상 위성자료 분석 북극	현장 관측을 통한 고해상 영상물 산출물		없음	1건	10%	영상 산출물 메타데이터 기록	북극해 해빙에 대한 표면특성 관측 목적 10 cm 공간해상도의 영상 산출물	

		위성 관측 결과	위성 영상 및 수치표면모델	없음	1건	10%	영상 산출물 메타데이터 기록	동토 지역에 대한 1m 공간해상도의 영상 및 수치표면모델 산출물		
			관련 논문	mrnIF 40 이상 논문 수	대학기관	3건	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 소빙구성 위성 모니터링 기술 고도화	해빙 유형 지도	미국/NIC	52건	8%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	다양한 유형의 해빙이 혼재하는 Fram Strait 지역에 대한 2km 공간해상도의 5종(해수, 단년빙, 다년빙) 분포도 위성 산출물		
			해빙 이동 지도	미국/NSIDC	52건	8%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	해빙의 이동이 빠르고 방향이 일정한 Fram Strait 지역에 대한 2km 공간해상도의 해빙 이동벡터 위성산출물		
			해빙 강도 지도	없음	2건	7%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	북극해 현장조사 자료가 존재하는 지역에 대한 500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물		
			해빙 두께 지도	미국/NSIDC	12건	7%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	북극해 지역에 대한 25km 공간해상도의 해빙 두께지도 산출물		
		현장 조사가 기반된 관측 결과	해빙 코어	미국/University of Alaska	3개	10%	해빙 코어 사진 및 얼음 특성 (두께, 염도, 온도) 기록	북극해 해빙 코어		
			현장을 통한 공해상 영상 산출물	없음	1건	10%	영상 산출물 메타데이터 기록	북극해 또는 연안 해빙에 대한 표면특성 관측 목적 10cm 공간해상도의 영상 산출물		
			무인기 영상 및 수치표면모델	없음	1건	10%	영상 산출물 메타데이터 기록	동토 지역에 대한 10cm 공간해상도의 영상 및 수치표면모델 산출물		
		관련 논문	mrnIF 40 이상 논문 수	대학기관	2건	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	1건	20%				
		3차 년도	2022	북극 빙권 특성 분석	해빙 변형 지도	미국/NASA	12건	20%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 2km 공간해상도의 변형률 위성산출물
					해빙 강도 지도	없음	12건	10%	위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	북극해 전 지역에 대한 500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물
				현장조사	해빙	미국/	3개	20%	해빙 코어	북극해 해빙 코어

	기본권추진 북극성과 위결과	코어	University of Alaska			사진 및 얼음 특성 (두께, 염도, 온도) 기록	
	관련 논문	mrnIF 40 이상 논문 수	대학기관	3년 누적 5건	10%	설정근거조건 을 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 4건	30%		
		mrnIF 90 이상 논문 수	대학기관	3년 누적 1건	10%		

(2) 2단계 정량적 성과목표 및 평가 기준

표 1-2-2. 2단계 정량적 성과목표 및 평가 기준

구분	년도	성과목표	지표	세계 최고 수준주 (보유국/ 보유기관)	목표치	가중치 (%)	평가기준	설정근거
2단계 성과 목표	2023 ~ 2025	북극해 특성 산출물 의 시공간 변동성 정량 분석	해빙 요소 시공간 변동성 분석도	미국 / NSIDC	12건	6	KPDC 등록 메타데이터 건수	위도 60도 이상 북극해 전역 에 대한 해빙 유형, 이동/변 형, 두께, 강도의 계절성 변동 분석도, 장기 변동 추이 분석 도, 변동 모드 분석도 각 1건 씩을 생산
			이종 산출물 간 상관성 분석도	없음	1건	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙 유형-이동/변형-두께-강 도 산출물 간 변동 상관성 분 석도 1건 생산
			환경 변위 상관성 분석도	없음	4건	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙 산출물의 해역별 변동 상관성 분석도 각 1건씩을 생 산
		북극해 해양 산출물 의 시공간 변동성 정량 분석	해양 요소 시공간 변동성 분석도	미국/ NOAA	4건	6	KPDC 등록 메타데이터 건수	북극해 결빙해역에 대한 20년 이상의 해양 수온, 클로로필의 장기적 변동의 시계열 분석 결과, 공간분포도 각 1건씩을 생산
			해빙- 수온 상호 작용 모식도	미국/ NOAA	1건	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙-수온 피드백 이해를 위 한 상호 작용 모식도
			해빙 변화의 해양생 태계 영향 분석도	미국/ NASA	1건	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	식물플랑크톤 생물량 및 대번 성 시기 변화에 대한 분석도 1건 생산
		북극해 해빙-해양 변동과 기후변화 의 상관관계	해빙- 기후 요소 상관 관계 분석도	없음	1건	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙 산출물과 기온, 강수/적 설, 바람 등 기후요소 간의 상 호 영향력 분석도 1건 생산 및 기존 연구결과(있을시)와 의 비교평가 보고서 생산

1차년도	2023	분석	해양-기후요소상관계 분석도	없음	1건	5	KPDC 등록 메타데이터 건수	북극해 해양 수온 변동 메커니즘 분석 및 온난화에 의한 북극해 해양환경 변화 상관계 분석도 1건 생산 및 기존 연구결과(있을시)와의 비교평가 보고서 생산
			해양-해빙의 기후연동성 모사공능지 모델	없음	1건	6	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 및 기존 연구결과(있을시)와의 비교평가 보고서 생산
		산출물 검증	현장시료 분석 보고서	없음	3건	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙 캠프에서 다중센서 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 논문 수	대학기관	3년 누적 5건	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 논문 수	대학기관	3년 누적 4건	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 1건	10	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
		북극해 결빙해역의 시공간 변화 연구	해빙 유형시공간성 분석도	미국/NIC	3건	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/변형시공간성 분석도	미국/NSIDC	3건	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 두께시공간성 분석도	미국/NSIDC	3건	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 해빙 두께 계절성 변동 분석도, 장기 변동 추이 분석도, 변동 모드 분석도 각 1건씩을 생산
			해빙 강도시공간성 분석도	없음	3건	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 해양요소시공간 변동성	해양수온의 시공간 변동성		미국/NOAA	2건	8	KPDC 등록 메타데이터 건수	북극해 결빙해역에 대한 30년 이상의 장기적 변동의 시계열 분석 결과 및 공간분포도 각 1건씩을 생산	

2차년도	2024	장기 변화 연구	분석도 해양 클로로필의 시공간 변동 분석도	미국/NASA	2건	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	1건	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	아라온호 북극해 하계 항차중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다중센서 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 논문 수	대학기관	2건	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 논문 수		대학기관	1건	20	설정근거조건을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출	
	2024	북극해 해빙 시공간 변동성의 해역/산출물 분석	이중 산출물 간 상관성도 분석도	없음	1건	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙 유형-이동/변형-두께-강도 산출물 간 변동 상관성 분석도 1건 생산
			환경변의성과 수 상관성도	없음	4건	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	1건	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	해빙-수온 피드백 이해를 위한 상호 작용 모식도 1건 생산
			해빙의 해양생태계 영향도	미국/NASA	1건	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	식물플랑크톤 생물량 및 대변성 시기 변화에 대한 분석도 1건 생산
		산출물 검증	현장 시료 분석 보고서	없음	1건	12	KPDC 등록 메타데이터 건수	아라온호 북극해 하계 항차중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다중센서 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 논문 수	대학기관	2건	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		대학기관	2건	20	설정근거조건을 충족하는 논문 게재	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는		

			논문 수				건수	SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
3차 년도	2025	북극해 해빙-해양 변동과 기후변화 의 상관관계 분석	해빙- 기후요 상관 관계 분석도	없음	1건	16	KPDC 등록 메타데이 터 건수	해빙 산출물과 기온, 강수/적설, 바람 등 기후요소간의 상호영향력 분석도 1건 생산 및 기존 연구결과(있을시)와의 비교평가 보고서 생산
			해양- 기후요 상관 관계 분석도	없음	1건	16	KPDC 등록 메타데이 터 건수	북극해 해양 수온 변동 메커니즘 분석 및 온난화에 의한 북극해 해양환경 변화 상관연구결과(있을시)와 기존 연구결과(있을시)와의 비교평가 보고서 생산
			해양- 해빙- 환경의 기후 연동성 모사 인공지능 모델	없음	1건	16	KPDC 등록 메타데이 터 건수	인공지능을 활용해 상기 연관성들을 모사하는 모델을 하고 그 모사결과를 기 분석될 수치적 상관성과 비교 분석하여 최적화 및 검증된 종 모델 1건 생성 및 기존 연구결과(있을시)와의 비교평가 보고서 생산
	2025	산출물 검증	현장 시료 분석 보고서	없음	1건	12	KPDC 등록 메타데이 터 건수	아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다중센서 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
			mrnIF 40 이상 논문 수	대학기관	3년 누적 5건	15	설정근거조건 을 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 논문 수	대학기관	3년 누적 4건	15	설정근거조건 을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출
	2025	관련 논문	mrnIF 90 이상 논문 수	대학기관	3년 누적 1건	10	설정근거조건 을 충족하는 논문 게재 건수	연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출

나. 연차별 연구목표 및 내용

(1) 1단계 연차별 연구목표 및 내용

표 1-2-3. 1단계 연차별 연구목표 및 내용

(단위 : 천원)

구분	년도	성과목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비)
1차 년도	2020	북극 빙권 구성 요소 위성 모니	빙권 구성요소 특성에 적합한	✓ 능동/수동형 마이크로파 위성 관측 자료를 이용한 북극권 해빙 특성 인자 산출 기술 개	550,000

		터링을 위한 기반기술 구축	다중위성자료 분석 기반기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> 발 및 원형 알고리즘 개발 광학 원격탐사 기술 기반 해빙 표면 용빙호 특성화 무인기 기반 초분광/라이다 데이터 전처리 기술 개발 	
		과거 현장조사 및 고해상도 자료 분석 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검증	인공위성 관측 결과 검보정을 위한 과거 북극 현장조사 및 고해상도 위성영상 분석	<ul style="list-style-type: none"> 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
2차년도	2021	북극 빙권 구성요소 위성 모니터링 기술 고도화	빙권 구성요소에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 고도화 및 산출물 개발	<ul style="list-style-type: none"> 능동/수동형 마이크로파 위성 관측 자료를 이용한 북극권 해빙 특성 인자 산출 알고리즘 고도화 및 산출물 개발 다중 광학 원격탐사 센서 기반 해빙 표면 용빙호 분포 분석 무인기 기반 초분광/라이다 데이터 융합분석 기술 개발 	550,000
		현장조사 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검증	인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 현장조사	<ul style="list-style-type: none"> 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 기 확보 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
3차년도	2022	북극 빙권 구성요소 변화 특성 분석	북극 빙권 구성요소 특성의 시공간 변화 분석	<ul style="list-style-type: none"> 기 개발물인 해빙 이동 산출물을 기반으로 신규 해빙 변형을 산출물 개발 대표적 북극해 용빙호 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 검증	인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 현장조사	<ul style="list-style-type: none"> 아라온호 하계 북극해 현장탐사를 통해 북극 해수 광 특성 계측, 해빙 코어 확보, 해빙 이동 위치추적 실측자료 확보 후 분석 진행중 알래스카 카운실 동토지역 현장탐사를 통해 초분광/라이다 매핑 자료 구축 후 분석 진행중 	176,000

(2) 2단계 연차별 연구목표 및 내용

표 1-2-4. 2단계 연차별 연구목표 및 내용

(단위 : 천원)

구분	년도	성과목표	연구내용	연구범위	연구비 (직접비)
1차년도	2023	북극해 결빙해역의 해빙 요소 시공간 장기 변화 연구	1단계 수행으로 기 개발된 해빙 특성 산출기술을 적용하여 장기	<ul style="list-style-type: none"> 해빙 유형, 해빙 이동/변형, 해빙 두께, 해빙 강도에 대한 계절성 변동 분석, 장기 변동 추이, 변동 모드를 분석 수행 	300,000

		산출물을 생산하고 시공간적 변동 특성 분석을 수행			
	북극해 결빙해역의 해양 요소 시공간 장기 변화 연구	해양 요소의 장기적 변동 추세 산출 및 비선형적 변동 파악	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 북극해 해양 요소에 대한 위성 기반 산출물 확보 ✓ 해양 요소 시계열 자료 구축 및 장기변화 추세 정량화 ✓ 해양 요소 변화율에 대한 공간적 분포 특성 산정 	200,000	
	산출물 검증	현장 시료 취득 및 분석과 위성 자료와의 대조를 통해 산출물의 품질을 유지하고 해빙/해양 특성 추출 결과를 검증	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다중센서 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	
2차년도	2024	북극해 해빙 시공간 변동성의 해역/산출물간 관계 분석	1차년도에서 분석된 각 해빙 특성의 시공간적 변동 특성들간의 이중 상관성 분석과 환경변수장과의 해역별 변동 연관성 분석	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 해빙 유형-이동/변형-두께-강도 산출물간 변동 상관성 분석 수행 ✓ 해빙 산출물의 해역별 변동 상관성 분석 수행 	300,000
		북극해 해빙-해양 상호관계 규명	북극해 해양 요소와 해빙의 상호작용 이해에 근거한 북극해 환경변화 전망	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 해빙 요소와 해양 요소간의 상관성 분석 및 역학관계 규명 ✓ 해빙 요소 변화와 연관된 해양 요소 시공간 변동 특성 분석 	200,000
		산출물 검증	현장 시료 취득 및 분석과 위성 자료와의 대조를 통해 산출물의 품질을 유지하고 해빙/해양 특성 추출 결과를 검증	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다중센서 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
3차년도	2025	북극해 해빙-해양 변동과 기후변화의 상관관계 분석	2차년도에서 분석된 상관성/연동성을 바탕으로 통합된 관계 모델을 생성하고 기후요소와의 상관관계를 정량화하여 분석	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 연관성들을 모사하는 모델을 생성하고 그 모사결과를 기 분석될 수치적 상관성과 비교 분석하여 최적화 및 검증된 최종 모델 생성 수행 	500,000
		산출물 검증	현장 시료 취득 및 분석과 위성 자료와의 대조를 통해 산출물의 품질을 유지하고 해빙/해양 특성 추출 결과를 검증	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 아라온호 북극해 하계 항차 중 해양에서 광학계 계측, 해수 샘플 분석 수행, 해빙캠프에서 다중센서 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

다. 연차별 연구 상세내용

(1) 1단계 연차별 연구 상세내용

표 1-2-5. 1단계 연차별 연구 상세내용

1단계 1차년도 (2020년) 연구개발 내용 상세기술
<p>○ 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 개발</p> <p>— 북극권 해빙 :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류를 위한 자료 구축 및 자료 산출을 위한 원형 알고리즘 개발 • 수동형 마이크로파 원격탐사/딤러닝 기반 북극 해빙 두께 산출을 위한 자료 구축 및 자료 산출을 위한 원형 알고리즘 개발 • 다중편파 영상레이더 후방산란 및 편파분석 자료와 북극 현장자료 사이의 상관 분석을 통한 북극 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개발 • 해빙 표면 용빙호 분포 광학 원격탐사 자료 구축 및 해빙 표면 용빙호 면적과 형태 특성화 기술 개발 <p>— 동토 :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 동토의 지형 및 식생변화 모니터링을 위한 무인기 기반 초분광/라이다 데이터 전처리 기술 개발 <p>○ 인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 과거 현장조사 자료 분석</p> <p>— 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해석위성 관측 자료의 검보정 자료 확보</p> <p>— 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집</p> <p>— 북극해 해빙 굽힘강도 산출 결과 검증을 위한 과거 해빙 코어 자료 분석과 해빙 두께 정보를 이용하여 간접적으로 해빙 강도 결과를 검증</p> <p>— 위성 초분광/광학 자료와 기 구축된 무인기 자료를 이용한 처리 기법 개발 및 현장조사 지역 사전 조사</p>
1단계 2차년도 (2021년) 연구개발 내용 상세기술
<p>○ 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 고도화 및 산출물 개발</p> <p>— 북극권 해빙</p> <ul style="list-style-type: none"> • 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류 알고리즘의 고도화 • 수동형 마이크로파 원격탐사/딤러닝을 이용한 해빙 두께 산출 기술 고도화 • 다중편파 영상레이더 후방산란 및 편파분석 자료와 북극 현장자료 사이의 상관 분석을 통한 북극 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 고도화 • 다중 광학 원격탐사 센서 자료 기반 해빙 표면 용빙호 분포 탐지 및 매핑 <p>— 동토 :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 동토의 지형 및 식생변화 모니터링을 위한 무인기 기반 초분광/라이다 데이터 융합분석 기술 개발 <p>○ 인공위성 관측 결과 검보정을 위한 북극 현장조사</p> <p>— 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해석위성 관측 자료의 검보정 자료 확보</p> <p>— 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집</p> <p>— 북극해 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개선 및 산출물 검증을 위한 해빙 코어 자료 확보 및 얼음 특성 자료수집</p> <p>— 현장조사를 통한 동토지역 초분광/라이다 자료 구축</p>

1단계 3차년도 (2022년) 연구개발 내용 상세기술

- 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 용빙호 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

(2) 2단계 연차별 연구 상세내용

표 1-2-6. 2단계 연차별 연구 상세내용

2단계 1차년도 (2023년) 연구개발 내용 상세기술

- 북극해 결빙해역의 해빙 요소 시공간 장기 변화 연구
 - 1단계 수행으로 개발된 해빙 특성 산출기술을 적용하여 장기 산출물 생산
 - 해빙유형, 해빙이동/변형, 해빙두께, 해빙강도: 해상도 25km급, 기간 10년 이상 산출물 생산 (이 중 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 비교 분석 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 다중센서 기반 저고도 및 지상 스캔 자료 획득

2단계 2차년도 (2024년) 연구개발 내용 상세기술

- 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-다중 상관성 분석을 통한 산출물간 상호 피드백 관계 분석
- 해빙 특성 해역간 관계 분석
 - 각 해역 환경에 맞는 해빙 생성 기작 분석
 - 해빙 산출물들의 해역간 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 다중센서 기반 저고도 및 지상 스캔 자료 획득

2단계 3차년도 (2025년) 연구개발 내용 상세기술

- 북극해 해빙-해양 변동의 기후변화에의 상관관계 분석
 - 북극해 해빙/해양 환경 변화에 대한 온난화 상관관계 산정 및 상호 피드백에 대한 연구
 - 북극해 환경 변화를 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 기후 변수의 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

3. 연구개발 로드맵

가. 총 연구기간 로드맵 (2020~2025)

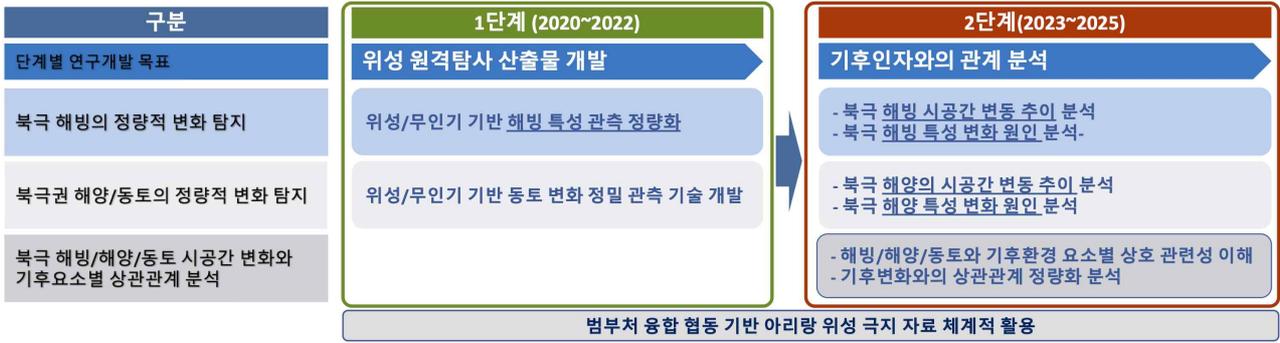


그림 1-2-1. 총 연구기간 로드맵

나. 1단계 로드맵 (2020~2022)

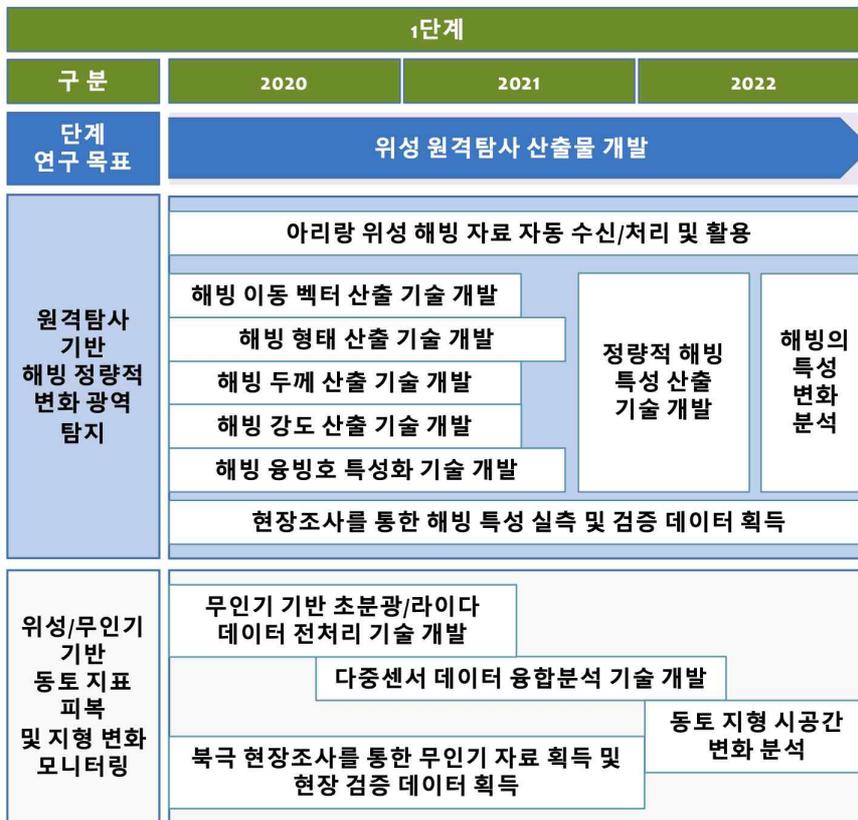


그림 1-2-2. 1단계 로드맵

다. 2단계 로드맵 (2023~2025)

2단계			
구분	2023	2024	2025
2단계 연구 목표	위성 산출물 기반 해빙-해양 특성과 기후인자와의 관계 분석		
북극 해빙의 정량적 변화 탐지	해빙 특성 장기 산출물 생산/수집	시공간 평균 변동 특성 분석	이종 산출물간 관계 분석 해빙 특성-해역간 관계 분석
	현장조사를 통한 원격탐사 산출물 보정 및 검증		
북극 해양의 정량적 변화 탐지	해양 특성 장기 산출물 생산/수집	계절/지역 변동 패턴 분석	시공간 변동 특성 분석 해양-해빙 요소간 관계 분석
	북극 해빙/해양 시공간 변화와 기후요소별 상관관계 분석 해빙-해양환경 변화와 기후 요소/지수간 상관관계 분석 인공지능 기반 온난화 예측 모델 개발		

그림 1-2-3. 2단계 로드맵

극지연구소

제 3 절 연구개발 추진체계

1. 추진체계



그림 1-3-1. 연구개발 추진체계

○ 본 과제는 “온난화에 의한 북극 빙권 변화 특성 이해 및 변화량 산정” 이라는 최종 목표 달성을 위해 1단계 “북극 빙권 변화 파악을 위한 위성 원격탐사 산출물 개발”과 2단계 “북극 빙권 변화 정량 분석을 통한 기후인자와의 상관관계 분석”으로 분리된 단계별 목표를 가짐.

○ 1단계 “북극 빙권 변화 파악을 위한 위성 원격탐사 산출물 개발”은 다음과 같은 연구 요소들을 포함하여 추진함.

가. 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 고도화 및 산출물 개발

(1) 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류 기술 개발

- “해외 유수의 해빙 연구 기관에서 제공하는 이동 벡터는 25 km급 저해상도로 이는 부빙간 상대적 운동(발산, 수렴, 보존)에 의한 해빙의 변형상(pressure ridge, lead)을

관측할 수 없고, 고해상 영상레이더 기반으로 북극해 전체의 해빙 이동 벡터를 제공하는 정기 산출물은 존재하지 않으므로, 최신 알고리즘을 활용하여 이동 벡터 추출, 모자이킹, 수동형 마이크로파 관측 결과와의 검교정, 현장관측 GPS 트래커를 이용한 결과 검증을 수행하고, 시험 산출물을 생성.

- 해빙의 유형은 생성환경 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 안전운항 지원을 위해 해빙 경계 위치가 실제 위치보다 보수적으로 표기되어 있으므로, 영상레이더 자료의 텍스처 분석을 기반으로 NIC 해빙 지도를 활용한 기계학습/딥러닝 알고리즘을 개발하고, 자동화된 처리과정을 통해 주기적인 산출물을 생성.

(2) 수동형 마이크로파 원격탐사 기반 북극해 유년빙 두께 산출 기술 개발

- 해빙의 두께 추정에 가장 많이 이용되는 인공위성 고도계는 프리보드 측정에 있어 얇은 유년빙에서는 상대적인 오차가 크고 환북극 매핑에 1달의 시간이 소요되므로, 넓은 공간 관측 범위를 통해 짧은 재관측 주기를 가지는 수동 마이크로파 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.

(3) 딥러닝 기반 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발

- 해빙의 시공간적 변화가 심한 북극에서 두꺼운 해빙에 대한 인공위성 고도계 기반 관측 주기인 1개월과 얇은 해빙에 대한 수동 마이크로파 기반 관측 주기인 1일의 간극이 커서 종합적인 분석이 어려우므로, 인공지능 기법인 딥러닝을 이용하여 해빙두께와 수동마이크로파 데이터의 상관관계를 분석하여 초년생뿐 아니라 다년생 해빙두께를 산출할 수 있는 모델을 개발.

(4) 영상레이더를 활용한 북극 해빙 굽힘강도 산출 연구

- 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 다중편파비(depolarization ratio, HV/HH)는 해빙 내 염분(brine)이나 공기방울(air bubble)에서 발생하는 다중산란(volume scattering)의 세기를 추정하고 이를 해빙 내 산란체 비율을 대표할 수 있는 염수부피비 산출 알고리즘에 적용하여 해빙의 굽힘강도를 추정하는 기술을 개발.

(5) 광학 원격탐사 기술 기반 해빙 표면 용빙호 특성화 연구

- 해빙 표면에 분포하는 용빙호(melt pond) 분포는 해빙 용융을 가속함으로써 해빙의

진화에 큰 영향을 미치나 주로 중-저해상도 광역 인공위성 데이터 기반의 분포 면적 (fraction) 연구가 주를 이루므로, 용빙호의 분포 면적과 단년빙/다년빙별 공간 분포 정량화 및 영상 기반 깊이 추정을 위해 북극해 해빙 표면 용빙호 분포 지역에 대한 고해상도 원격탐사 자료 구축과 객체(object) 기반 형태 특성화 기술을 개발.

나. 동토 모니터링을 위한 위성 및 무인기 자료 분석 기반기술 개발

(1) 동토지역 분석자료 구축을 위한 관측 센서별 기하보정 기술 개발

- 무인기 관측 대상지역의 특성을 정성적 및 정량적으로 분석하기 위해서는 관측 센서에서 얻은 자료의 정밀한 기하보정이 선제되어야 하며, 초분광 및 LiDAR 센서들의 활용으로 확장하기 위해 센서모델을 정확하게 수립하고 이를 기반으로 한 기하보정 기술을 개발.

(2) 동토 모니터링을 위한 다중센서자료 융합 기술 개발

- 동일지역을 촬영한 이종의 다중 센서자료들을 통합하여 사용하기 위해 공간적 불일치를 잘 정렬해야하며, 이를 위해 data-to-data와 data-to-reference 방식의 정렬 기술을 개발.

(3) 동토층의 지형 및 식생 변화 모니터링

- 초분광센서는 연속된 파장대역에서 분광 이미지를 획득할 수 있어 식생의 풍부도를 나타내는 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)를 비롯하여 다양한 원격탐사 지수 개발이 가능하므로, 이를 이용하여 동토층의 환경변화에 대한 정량적 관측 및 비교를 수행.

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

- 해색위성자료의 신뢰성 확보를 위해 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해 연구정점에서 해수 시료를 채취하고 HSAS를 이용한 해수 광 특성을 측정하여 생물-광 특성 자료수집 및 분석 수행.

라. 국제공동연구를 통한 연구 역량 강화

- 겨울과 봄철의 북극 중앙의 관측이 절대적으로 부족하지만, 이 계절의 해빙 조건이 매우 위험하여 최고 사양의 쇄빙연구선 조차 진입이 곤란하여 북극 기후의 프로세스에 대한 이해가 부족하나, 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 수행.

- 주요 빙권 요소 중 하나인 해빙의 결빙-성장-용빙-소멸의 연속적인 프로세스에 대한 현장관측 없이는 원격탐사 기반의 분석 결과를 검증할 수 없으나, MOSAiC 참여를 통해 원격탐사 분과에서 수행한 현장관측 자료를 연구 주체 간 상호협의하에 우선적으로 받을 수 있음.

2. 산학연 협력 체계

- 해빙특성요소 중 주관기관보다 연구전문성이 있는, 또는 분담개발이 필요한 요소에 대해서 위탁기관에서 담당함.
- 주관기관과 위탁기관의 분담개발 관계는 다음 그림과 같음.



그림 1-3-2. 주관기관과 위탁기관의 분담개발 관계

극지연구소

- 분담개발 수행을 위한 위탁연구과제의 목록은 다음 표와 같음.

표 1-3-1. 위탁연구과제 목록

위탁과제명		연구기관	연구책임자	총연구기간	총연구비 (백만원)	비고
1	위성관측을 통한 북극 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출 및 분석	부경대학교	한경수	'20.01.01.~'22.12.31.	120	
2	마이크로파 위성을 이용한 북극 해빙 거칠기와 해빙두께 변화 연구	세종대학교	홍성욱	'20.01.01.~'22.12.31.	120	
3	위성 기반 북극 해빙 특성 분석 알고리즘 개발	울산과학기술원	임정호	'20.01.01.~'22.12.31.	120	
4	위성기반 해빙 이동 추적 기술 개발	한국해양과학기술원	손영백	'20.01.01.~'22.12.31.	130	

○ 위탁과제 수행기관의 본과제에 대한 연구 기여는 다음과 같음.

가. 부경대학교

- 위성 해빙 산출물들의 특성 조합으로부터 정량화될 수 있는 해빙의 복사강제력을 분석, 활용하는 연구를 선제적으로 함으로써 현재 진행되는 산출물 개발이 목표로 해야 할 달성조건에 대한 검토 및 2단계 최종목표 달성을 위한 분석방법 개발을 수행하는 독자적 임무를 가짐

나. 세종대학교

- 이론적 모델을 기반으로 해빙 두께를 추정하고 본과제에서는 딥러닝 기반의 실험적 모델로부터 두께 추정을 시도하기 때문에 상호 검증에 활용 가능함. 또한 세종대학교는 이론모델을 확장하여 해빙의 거칠기라는 새로운 해빙 특성 변수를 개발하는 독자적 임무를 가짐.

다. 울산과학기술원

- 본과제 수행 인력이 전문성을 가지지 않은 위성 고도계의 자료 해석에 있어 전문적인 지식을 가지고 있으며, 이를 활용해 수~수십 cm 수준의 고도 변화로부터 해빙 표면 특성을 분리해야 하는 용빙호 및 리드, 리지의 탐지 기술을 개발하는 독자적 임무를 가짐.

라. 한국해양과학기술원

- 본과제의 개발 요소 중 하나인 해빙 이동에 있어 그 변동성과 환경적 요인을 해양 요소와 접목시켜 보다 전문적인 분석을 수행함은 독자적 임무를 가짐.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 연구개발대상의 국외 기술, 산업동향

- 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 용빙으로 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 연구개발대상의 국내 기술, 산업동향

○ 북극정책 기본계획 수립

- 2013년 12월, 정부차원의 북극분야에 대한 정책기조를 담은 기본계획인 “북극정책 기본계획”이 발표
- 북극이사회의 영구오피서버 진출을 계기로 2013년 7월 대외경제장관회의에서 의결한 “북극 종합정책 추진계획”의 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 오피서버 국가로서의 책무 수행과 더불어 북극권 자원개발 시대에 대비할 필요성 제시

○ 해양수산 R&D 중장기계획 발표

- “2014년 4월, 국가과학기술심의회에서는 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 신 북방정책 중 아시아에서 유럽까지 가는 데 걸리는 시간을 10일 단축할 수 있는 북극항로에 대한 관심 고조
- 해운업계에서는 유럽과의 교역 거리를 30% 이상 줄일 수 있기 때문에 북극항로를 이용가

치가 높은 항로로 보고 있으며, 대통령도 러시아와의 경제협력을 언급하며 구체적인 협력 실행방안을 논의함에 따라 북극 해빙 연구의 필요성 제시

- 북극항로의 개척과 북극권 자원개발 등 다양한 산업 분야에서 양국 간 협력방안을 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 위성 정보 활용 사용자 그룹을 육성하고, 공공기관·대학 등의 위성정보 활용 학술·연구 활동 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 선도국가’라는 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 강화”의 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 기본계획”의 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 미래 세대 계승 의지를 담아 향후 30년의 극지 정책방향을 도출함. 특히 향후 30년을 내다본 비전 및 청사진을 공식적으로 발표한 나라는 한국이 세계적으로 유일함
- 2050 북극 활동 전략 수립
 - 2021년 11월, 해양수산부에서 중장기 북극 활동 방향 정립 및 북극 활동 역량 강화를 위한 “2050 북극 활동 전략”을 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, 데어터담 구축 검토, 미답지 관측과 북극해 기후 연구 등 국제 공동연구 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 산업 혁명 시대의 위성정보서비스 산업 창출을 위한 국가적 전략 마련을 목표로함
 - 국내외 협력체계를 마련해 위성을 공동으로 운영하고 국제기구에 적극적으로 참여해 전략 적인 국제협력을 만들어가기 위한 대책 마련 필요
 - 인공지능 기반의 첨단 위성영상 분석 능력 확보, 한국형 빅데이터 처리 기술개발 등 위성 영상 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 세계 적인 수요증가 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 경제 활동 진흥을 위한 항로 개척, 극지활동 관련 정보 체계적 관리를 위한 통합정보시스템 구축 및 운용 등에 관한 사항을 포함

- 제정안의 관리 및 확대를 위해 '남북극 기본계획'과 '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 80일 간의 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
- 기존 아라온호의 2배 이상 큰 규모의 차세대쇄빙선 건조를 예상하며, 각종 연구 장비를 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 기후시스템간 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

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 고도화 및 산출물 개발

1. 해빙 유형

- 영상레이더 관측 기반 북극해 해빙 유형 분류 기술 개발
 - 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.
 - 해빙 유형 지도는 다양한 위성과 실측자료를 결합하여 주 1회 벡터 지도의 형태로 제공되나, 해상도가 낮아 해빙 가장자리 MIZ 영역에 대한 세부 정보가 부족하며 선박의 안전한 항 지원을 위해 해빙 경계 위치가 실제 위치보다 보수적으로 표기되어 있음.
 - 영상레이더는 수십 미터급 해상도로 북극해 전역을 수 일 주기로 관측할 수 있으나, 영상레이더 기반의 해빙 유형 구분은 기초 연구 단계에 머무르고 있어 산출물이 존재하지 않음.
 - 이 연구에서는 영상레이더 자료의 텍스처 분석을 기반으로 NIC 해빙 지도를 활용한 기계학습 알고리즘을 개발하고, 자동화된 처리과정을 통해 시험 산출물을 생성함.
 - 영상레이더에서 해빙 유형 분류를 위해 이용할 수 있는 파라미터로는 크게 세 가지로, 후방 산란 강도 (낮음, 높음, 범위 등), 편파특성 (편파비, 간섭 위상차, 간섭 긴밀도), 텍스처 (매끄러움/거침, 가늠/굽음, 균질함/불균질함)이 있음.
 - 후방 산란 강도는 단일 편파 (HH/VV)와 교차 편파 (HV/VH) 모두에서 각 해빙 유형에 해당하는 대푯값의 분포 범위가 많이 겹치므로 (Liu et al., 2015) 활용성이 낮음.
 - 편파특성은 시스템 파라미터로서 수백 km의 광대역을 관측하면서도 전체 편파 조합 (HH, HV, VH, VV)을 제공하는 위성 시스템은 존재하지 않음. 현실적으로 이중 편파 (HH+HV 또는 VV+VH)를 제공하는 시스템은 두 개로, 유럽연합의 Sentinel-1A/1B와 캐나다의 RADARSAT-2이며, 이 중 반복 관측 주기가 더 짧고 (6일 vs. 24일) 자료 접근성이 좋은 (무료 vs. 유료) Sentinel-1A/1B를 이용하는 것이 비용경제성 측면에서 타당함.
 - 영상 텍스처는 특정 공간 관계에서 특정 명암값을 가지는 픽셀 쌍의 개수를 세는 GLCM

(Gray Level Co-occurrence Matrix) 계산을 기반으로 하며, 이는 기준픽셀값, 상대픽셀값, 거리, 방향을 각각 축으로 하는 4차원 행렬이고, 이를 13개의 텍스처 피쳐로 확장할 수 있음 (Haralick et al., 1973).

- 따라서 Sentinel-1A/1B의 이중 편파 시스템의 각 편파 영상으로부터 13개씩, 도합 26개의 텍스처 피쳐를 추출 가능.
- 기존의 텍스처 기반 해빙 유형 분류 (Aldenhoff et al., 2018; Hong and Yang, 2018 등)는 다음의 그림과 같이 훈련기와 적용기의 두 페이즈(phase)로 구성되며, 훈련기에서는 해빙 영상 분석 전문가가 수동으로 분류한 레이더 영상과 분류 지도의 쌍을 기계학습 시키기 때문에, i) 훈련에 사용하는 샘플의 수가 제한되고, ii) 전문가의 자질 및 분류 결과에 대한 객관적 신뢰도 확보의 어려움이 있음.

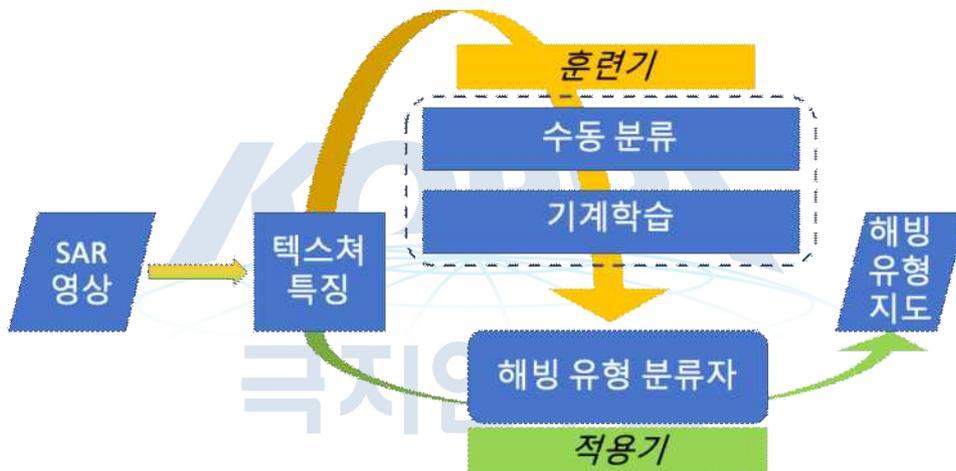


그림 3-1-1. 기존 텍스처 기반 해빙 유형 분류 알고리즘의 작업 흐름도

- 이에 이 연구에서는 상기의 단점들을 극복하고 분류 과정을 반자동화 하기 위해 공신력 있는 미국 빙 정보 센터 (National Ice Center, NIC)의 주간 해빙 유형 지도를 도입한 새로운 알고리즘을 개발하였으며, 이는 다음 그림과 같이 구성됨.

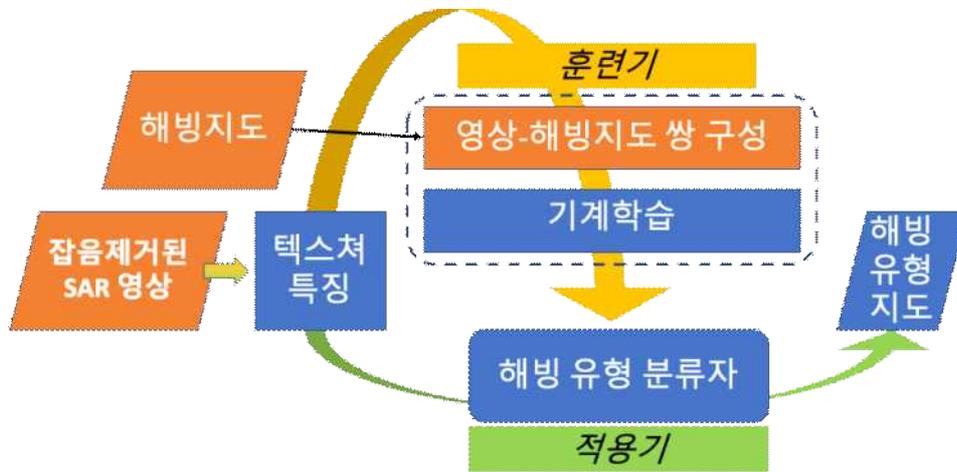


그림 3-1-2. 이 연구에서 개발한 텍스처 기반 해빙 유형 분류 알고리즘의 작업 흐름도

- 전처리 과정 1: Sentinel-1A/1B는 RADARSAT-2 대비 상대적으로 강한 영상노이즈를 포함하고 있으며, 이 노이즈는 텍스처에 그대로 영향을 미치기 때문에 사전에 제거해야함. 이 연구에서는 기존에 개발한 가산 잡음 제거 방법 (Park et al., 2018)과 증가 잡음 제거 방법 (Park et al., 2019)를 적용함.
- 전처리 과정 2: 영상레이더의 특성상 후방산란강도는 입사각에 의존하여 변하기 때문에 다양한 궤도/입사각/촬영시기의 영상을 모두 활용하여 결과를 만들기 위해서는 이 의존도에 대한 보정을 수행해야하며, 이 연구에서는 4,485장의 Sentinel-1A/1B 영상과 동시기에 해당하는 NIC 해빙 유형 지도를 분석하여 다음의 그림과 같이 의존도 월별로 분석함.

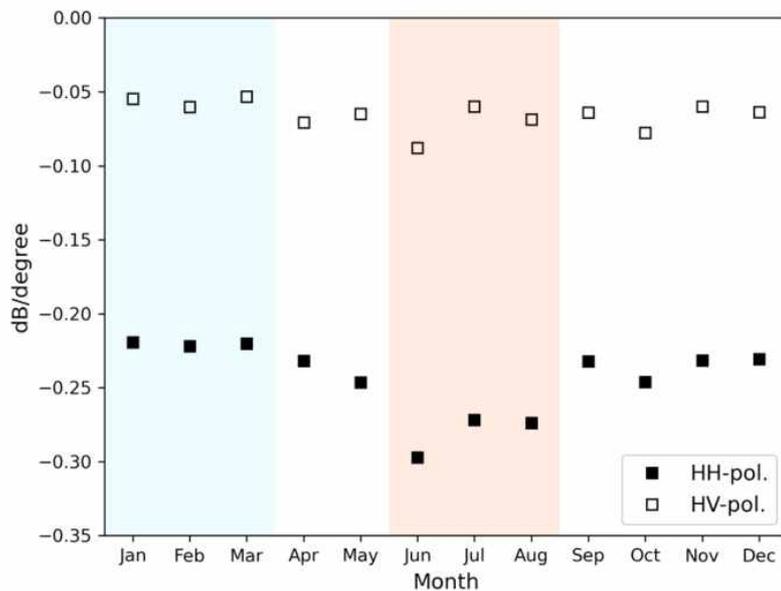


그림 3-1-3. 편파별, 시기별 입사각에 대한 후방 산란 계수의 의존도

- 전처리 과정 3: NIC 해빙 지도는 다양한 종류의 위성 자료 및 실측 자료를 종합하여 제작되므로 영상레이더 단독으로는 분류하기 힘든 다양한 해빙 유형을 포함하고 있기에, 유사한 특성을 가지는 세분류를 묶어 중분류로 통합하는 과정 필요. 다음의 그림은 낮은 해빙 농도 (20% 미만)를 가지는 영역에 대한 제거, 두께에 따른 초년빙 세분류의 단일 초년빙으로의 통합 과정을 보이는 예시임.

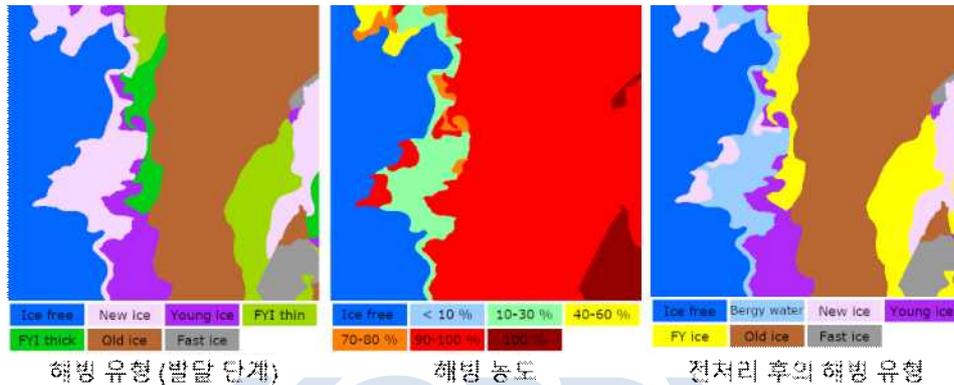


그림 3-1-4. 원본 NIC 해빙 유형 지도를 훈련용으로 단순화시켜 가공하는 과정

- 전처리가 끝나면, Sentinel-1A/1B의 후방산란강도 영상과 가공한 NIC 해빙 유형 지도를 중첩하여 해수/해빙 경계선의 일치도가 높은 영상만을 선별하여 훈련시킴. 이 과정은 전체 알고리즘에서 유일한 수동 작업이지만, 영상 취득일과 해빙 유형 지도의 갱신일을 이용한 후보군 압축, 경계선 추출 알고리즘을 통한 해수/해빙 경계선의 추출 자동화 등을 통해 작업량을 최소화시킴.
- 2017년과 2018년의 1~3월(겨울철)에 획득된 419장의 Sentinel-1 EW-GRDM 모드 영상을 랜덤포레스트 기계학습 및 종속검증 (훈련 샘플과 검증 샘플이 같은 소스를 가짐)에 사용, 2019년 1~3월에 획득된 281장의 영상을 독립검증 (훈련 샘플과 검증 샘플이 다른 소스를 가짐)에 사용하여 다음 두 개의 표와 같이 정확도 평가를 수행함.

표 3-1-1. 겨울철 5종 분류 정확도 평가 결과 (종속검증)

종속검증		예측				
		Open water	New ice	Young ice	First-year ice	Old ice
실제	Open water	90.1	1.3	1.6	6.9	0.0
	New ice	30.0	21.9	27.1	16.7	4.2
	Young ice	3.7	5.1	58.8	24.3	8.1
	First-year ice	5.0	1.7	18.7	64.4	10.1
	Old ice	0.1	0.3	3.1	6.4	90.1

표 3-1-2. 겨울철 5종 분류 정확도 평가 결과 (독립검증)

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

- 전반적으로 종속검증과 독립검증의 결과값 차이가 유의하므로 훈련과정에서의 과적합 (overfitting) 문제는 없는 것으로 판단됨. 해수(open water)와 다년빙(old ice)에 대해서는 90% 수준의 높은 정확도를 보이나 단년빙의 세분류 유형들 (new ice, young ice, 두께 80cm 이상 first-year ice)은 서로 구분이 모호한 것으로 나타남.
- 다음 그림은 주간 NIC 해빙 유형 지도와 높은 공간적 일치도를 보이는 2019년 2월 5일에 대한 Sentinel-1A/1B 이중 편파 모자이크 영상과 개발된 알고리즘의 적용을 통해 분류한 해빙의 유형을 도시함. 전반적인 해수/해빙 경계는 거의 일치하고 다년빙의 분포 범위 또한 양호하지만, 단년빙의 세분류에 있어 차이를 보임.

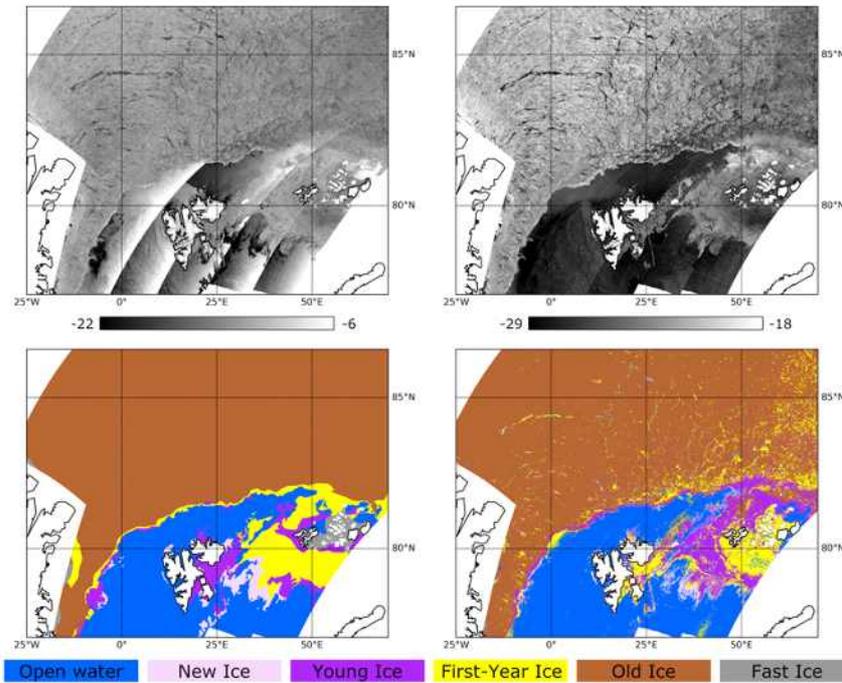


그림 3-1-5. 2019년 2월 5일의 Sentinel-1A/1B 모자이크 영상(왼쪽 위: HH편파, 오른쪽 위: HV편파)과 분석된 해빙 분류 지도 (오른쪽 아래), 그리고 주간 NIC 해빙 유형 지도 (왼쪽 아래)

- 다음 그림은 동일한 NIC 해빙 유형 지도가 커버하는 기간 내 실제 해빙의 분포가 상이한 날짜에 대해서도 영상레이더 기반으로 해빙 유형을 분류할 수 있음을 보이는 예시임. 주간 NIC 해빙 분류 지도는 후방산란강도 영상에서 확인할 수 있는 3일간의 해빙 이동이 반영되지 않아 준실시간 해빙 분석에 부적합함. 반면 영상레이더 기반의 해빙 분류를 통해 일단위의 변화를 추적할 수 있음.

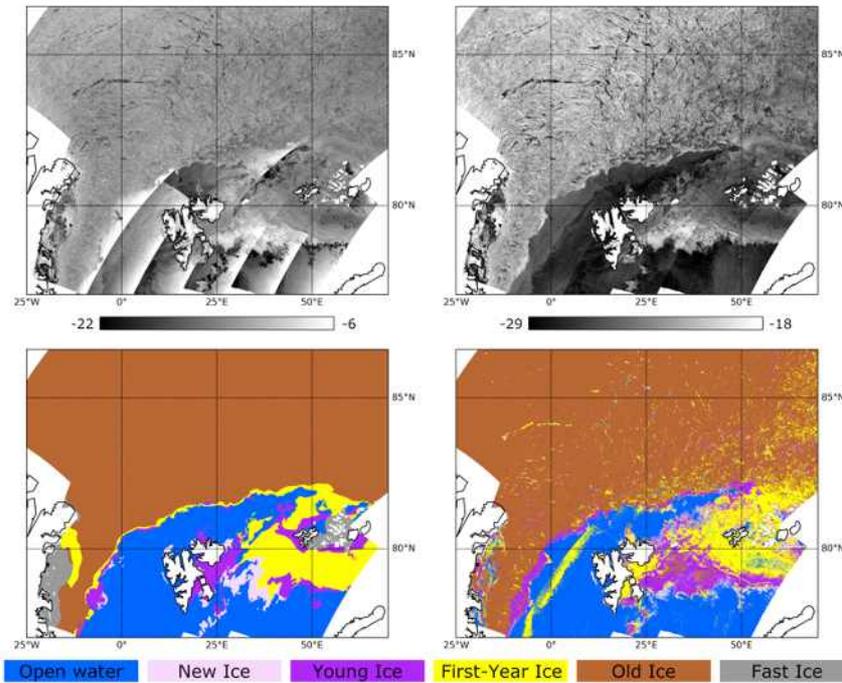


그림 3-1-6. 2019년 2월 8일의 Sentinel-1A/1B 모자이크 영상(왼쪽 위: HH편파, 오른쪽 위: HV편파)과 분석된 해빙 분류 지도 (오른쪽 아래), 그리고 주간 NIC 해빙 유형 지도 (왼쪽 아래)

- 2016년과 2017년의 6~8월(여름철)에 획득된 421장의 Sentinel-1 EW-GRDM 모드 영상을 랜덤포레스트 기계학습 및 종속검증 (훈련 샘플과 검증 샘플이 같은 소스를 가짐)에 사용, 2018년 6~8월에 획득된 232장의 영상을 독립검증 (훈련 샘플과 검증 샘플이 다른 소스를 가짐)에 사용하여 다음 두 표와 같이 정확도 평가를 수행함. 여름철의 경우, 해빙 표면의 융빙에 의해 단년빙의 세분류가 어렵기때문에 (AARI에서 발행하는 주간 해빙 지도는 아예 해빙 유형 분류를 제공하지 않음), 단년빙 전체를 혼합단일종으로 분류하여 평가함.

표 3-1-3. 여름철 3중 분류 정확도 평가 결과 (종속검증)

종속검증		예측		
		Open water	Mixed first-year ice	Old ice
실제	Open water	99.0	0.9	0.1
	Mixed first-year ice	4.7	60.6	34.7
	Old ice	0.6	7.7	91.7

표 3-1-4. 여름철 3종 분류 정확도 평가 결과 (독립검증)

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

- 겨울철 결과와 마찬가지로 해수와 다년빙에 대해서는 90% 수준의 높은 정확도를 보였으나, 단년빙의 경우는 55% 수준으로 낮음. 오분류는 주로 단년빙과 다년빙 사이에서 발생하므로, 여름철 분류는 현실적으로 해빙 유형 분류보다는 해수/해빙 분류에 가까운 성능을 보이는 것으로 판단됨.
- 겨울철 분류 또한 단년빙의 세분류를 하나의 혼합단년빙으로 통합하면 그 결과는 다음의 두 표와 같음. 혼합단년빙에 대한 분류 정확도는 75% 이상으로 양호하며, 영상레이더를 통한 세분류의 최적은 5종이 아닌 3종임을 시사함.

표 3-1-5. 겨울철 3종 분류 정확도 평가 결과 (종속검증)

종속검증		예측		
		Open water	Mixed first-year ice	Old ice
실제	Open water	92.2	7.8	0.0
	Mixed first-year ice	6.4	83.8	9.8
	Old ice	0.2	8.9	90.9

표 3-1-6. 겨울철 3종 분류 정확도 평가 결과 (독립검증)

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

- 다음 그림은 주간 NIC 해빙 유형 지도와 높은 공간적 일치도를 보이는 2018년 8월 13일에 대한 Sentinel-1A/1B 이중 편파 모자이크 영상과 개발된 알고리즘의 적용을 통해 분류한 해빙의 유형을 도시함. 여름철에도 전반적인 해수/해빙 경계는 거의 일치하지만, 단년빙과 다년빙의 분포에 있어 NIC 해빙 유형 지도와는 확연한 차이를 보임.

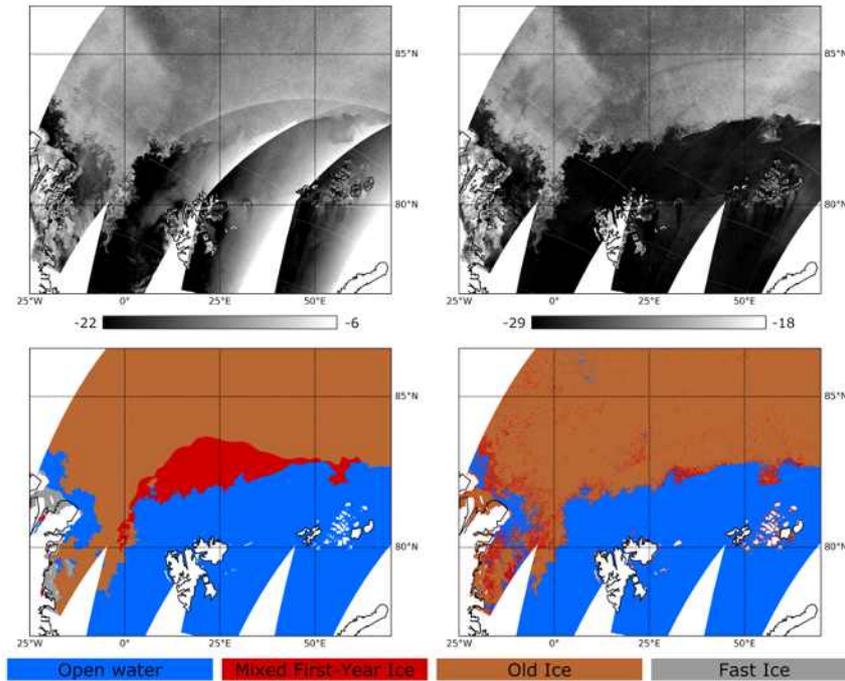


그림 3-1-7. 2018년 8월 13일의 Sentinel-1A/1B 모자이크 영상(왼쪽 위: HH편파, 오른쪽 위: HV편파)과 분석된 해빙 분류 지도 (오른쪽 아래), 그리고 주간 NIC 해빙 유형 지도 (왼쪽 아래)

- 이 연구에서는 분류 정확도를 고려할 때, 영상레이더를 기반으로 겨울철 3종 분류, 여름철 해수/해빙 분류 (2종 분류)가 가능한 기술을 개발 완료하고, 시험 산출물을 KPDC에 등록 하였음.

2. 해빙 이동

○ 영상레이더 관측 기반 북극해 해빙 이동 벡터 산출 기술 개발

- 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.

- 영상레이더는 다음 그림과 같이 수십 미터급 해상도로 북극해 전역을 수 일 주기로 관측할 수 있으며, 영상 페어를 이용하여 해빙의 상대적 움직임을 수 km 해상도로 계산 가능함 (R. Kwok, 1996).

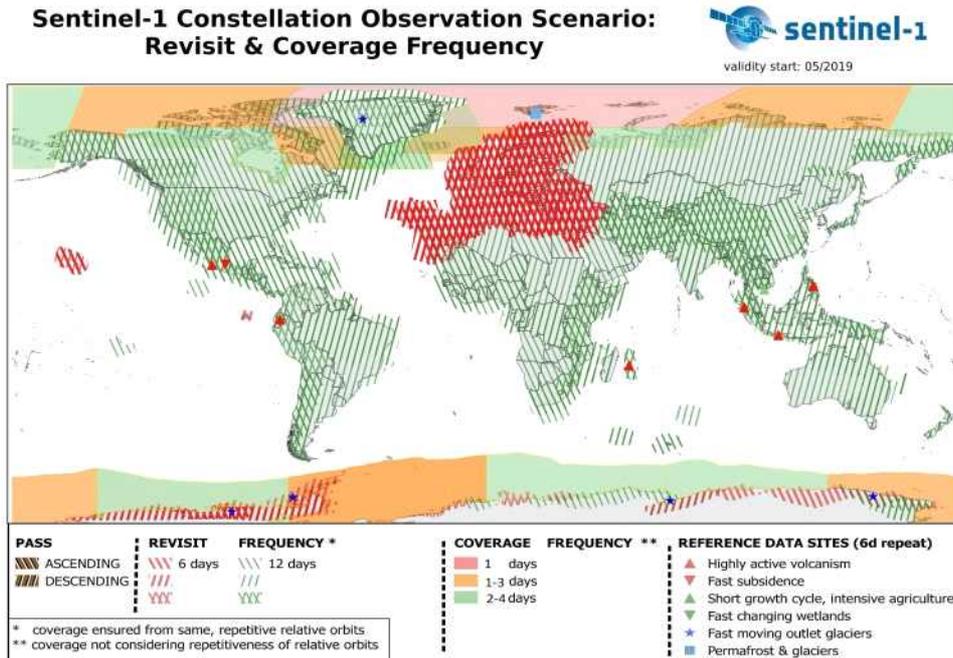


그림 3-1-8. Sentinel-1 영상레이더의 전지구 자료 획득 주기

- 영상 페어의 매칭은 1) 특이점 (feature) 추출과 매칭을 통한 coarse coregistration, 2) 서브셋 상관계수 최적화를 통한 fine coregistration의 두 단계를 거치기 때문에 위성 궤도 및 비행방향에 의한 영상 회전 및 상하/좌우 반전에 큰 영향을 받지 않고 빠른 연산이 가능함 (Korosov and Rampal, 2017).
- 현재 영상레이더 기반으로 북극해 전체의 해빙 이동 벡터를 제공하는 정기 산출물은 존재하지 않으며, 이 연구에서는 기존 알고리즘을 활용하여 이동 벡터 추출, 모자이크, 현장관측 GPS 트래커를 이용한 결과 검증을 수행하고, 시험 산출물을 생성함.
- 국제공동연구인 MOSAiC을 통해 MOSAiC 연구선인 Polarstern을 중심으로 반경 40km 이내에 설치된 100여개의 표면 속도 부이 (Surface Velocity Profiler (SVP) buoy)는 영상레이더 기반으로 해빙 이동 벡터를 추출하는 기술을 검증하는데 최적의 자료를 제공할 수 있으므로, 이 연구에서는 MOSAiC 프로그램과 동시기에 획득된 Sentinel-1A/1B 영상을 수집함.

- 유럽연합의 Sentinel-1A/1B 영상레이더 위성은 400km 폭의 광역 모드인 Extra Wide-swath (EW)로 북극해 전역을 관측하며, 위도 80도 이상의 북극해 중심지역에 대해서는 일평균 약 2회의 영상을 촬영함.
- MOSAiC 연구선은 북위 85도, 동경 135도의 북극해 해빙 한가운데서 무동력 표류를 시작하여 북극점 근처를 지나 프람 해협으로 빠져나가는 경로로 설계되었으며, 실제 표류 궤적은 다음 그림과 같이 당초 예상과 크게 다르지 않았음.

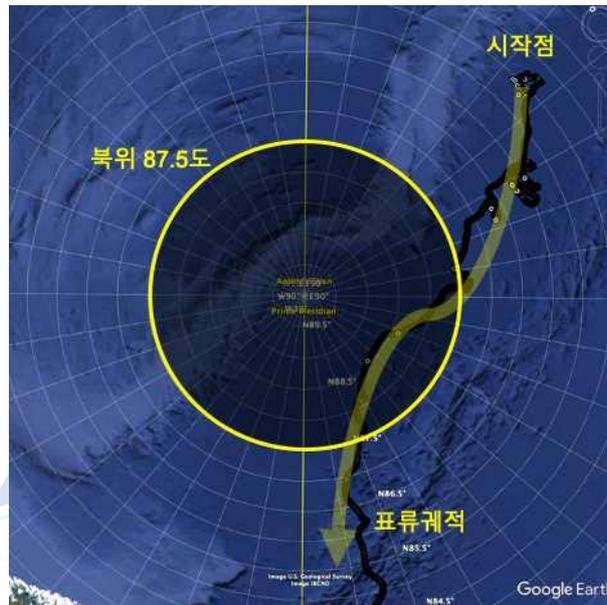


그림 3-1-9. MOSAiC 연구선인 Polarstern의 무동력 표류 궤적

- 다만 비행방향의 우측을 스캔하는 극궤도 영상레이더 위성 시스템의 특성상 북위 87.5도 이상은 관측이 불가능하기 때문에, 이 연구에서는 MOSAiC 미션 시작인 10월 초부터 관측 불능 지역에 들어가기 시작한 1월 중순까지 약 100일간의 자료만을 사용함.
- 이 연구에서는 Korosov and Rampal (2017)이 개발한 알고리즘을 다음과 같이 개조하여 이용함. i) 마이크로파 입사각에 대한 해빙 후방 산란 강도의 의존성을 보정하기 위해, 입사 표면적에 대한 물리량인 σ 대신 입사직교면에 대한 물리량인 γ 를 이용, ii) 영상 페어 선발 및 Polarstern의 반경 20km 지역에 대한 서브셋 구성을 위한 GPS 좌표 기반 데이터셋 필터링, iii) 이동 벡터 추출에 실패한 격자 공간에 대한 kriging 보간.
- 다음 그림은 해빙 이동 벡터 추출의 두 단계인 feature tracking과 pattern matching에 의해 각각 추출한 해빙 이동 벡터를 나타냄. Feature tracking은 특징점 (keypoint)을 객체 기반으로 추출하므로 계산이 빠르지만 공간적으로 불균질한 벡터수 분포의 결과를 얻기

때문에, 이후 pattern matching을 적용하기 위한 coarse coregistration 용도로 사용함. 반면, pattern matching은 궤도각이 크게 차이나는 경우에 탐색에 실패하기 때문에 앞서 feature tracking을 통한 결과를 이용해 affine 변환된 영상에서 출발하고, 탐색창을 통한 영상 전구간 계산을 통해 상대적으로 계산은 느리지만 공간적으로 균질한 벡터수 분포의 결과를 얻을 수 있음.

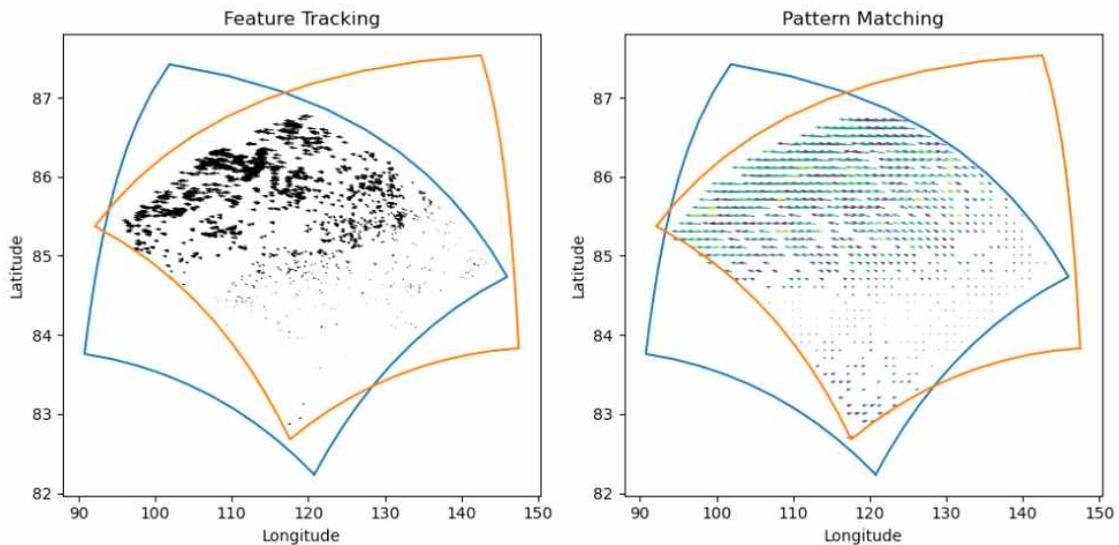


그림 3-1-10. Feature tracking과 Pattern matching에 의해 추출한 해빙 이동 벡터의 예

극지연구소

- 다음 그림은 알고리즘 적용을 통해 추출된 이동 벡터와 추출에 실패한 지점에 대한 kriging 보간을 통해 얻은 이동 벡터를 같이 도시한 예시임. 중앙의 해빙 조각을 기준으로 좌상단에서 우하단 방향으로 크랙이 발생하여 좌수향 방향의 상대적 움직임이 발생하였음을 보임. 도시한 이동 벡터는 Polarstern이 위치한 영상 중앙의 해빙 조각의 움직임을 전체 영역에서 보정한 결과임.

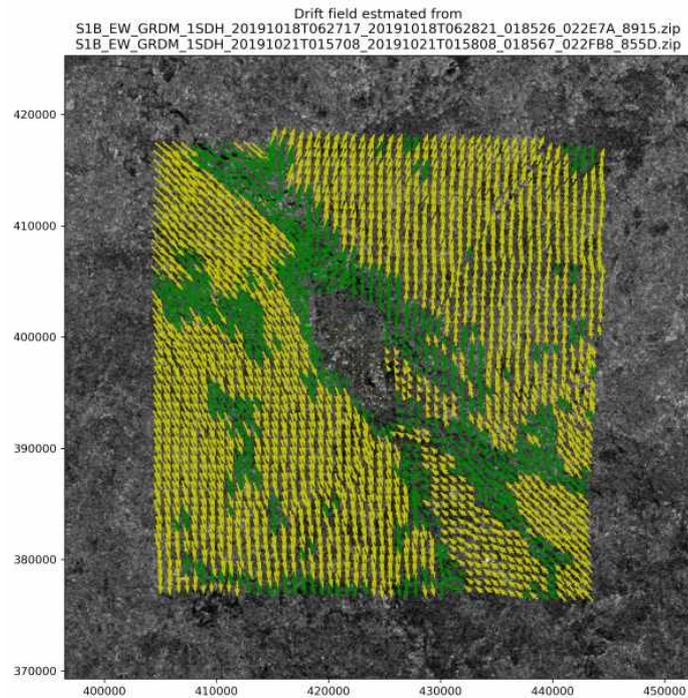


그림 3-1-11. 추출된 이동 벡터(노랑)와 보간된 이동 벡터(초록)의 예시

- 2019년 10월 6일부터 2020년 1월 10일까지의 기간 중, 약 3일간의 시간 간격을 가지는 영상 33장을 사용하였으며, 영상 페어는 이들 영상들의 전/후를 순차적으로 이용함. 즉, 1-2, 2-3, 3-4, ..., (N-1)-N의 순으로 페어가 됨.
- 총 32개 페어에서 각각 Polarstern을 중심으로 반경 20km 범위에 해당하는 해빙 이동 벡터를 추출 후, 영역 내에 포함되는 MOSAiC SVP 부이 클러스터의 측정값과 비교함. 다음 그림은 32개 페어 중, 영상의 사선방향으로 특징적인 두 개의 파쇄선을 따라 해빙 조각들이 서로 다른 움직임을 보이는 경우를 예시로 보이며, 영상레이더에서 추출한 벡터를 검은색으로, 부이의 벡터를 빨간색으로 도시함.

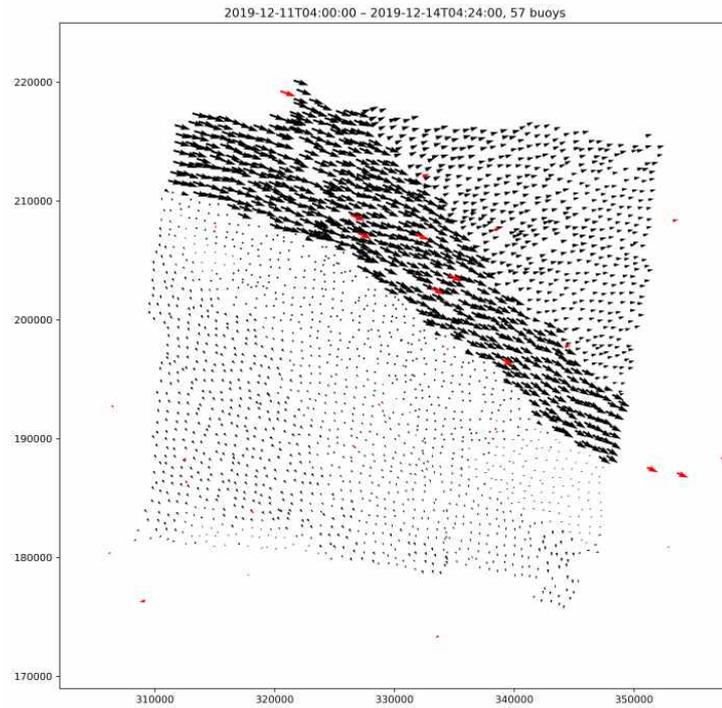


그림 3-1-12. 영상레이더 추출 해빙 이동 벡터(검은색)와 SVP 부이의 이동 벡터(빨간색)의 비교

- 다음 그림은 32개 페어 전체의 영상레이더 추출 해빙 이동 벡터와 SVP 부이의 이동 벡터를 각각 Polar Stereographic 투영 평면상의 X, Y 방향에 대해 일대일로 비교한 산포도임. SVP 부이의 이동 벡터에 대한 3일 간격 영상레이더 페어 추출 벡터의 상대적 오차는 RMSE를 기준으로 X 방향으로 132.9 m, Y 방향으로 190.2 m로 나타남.

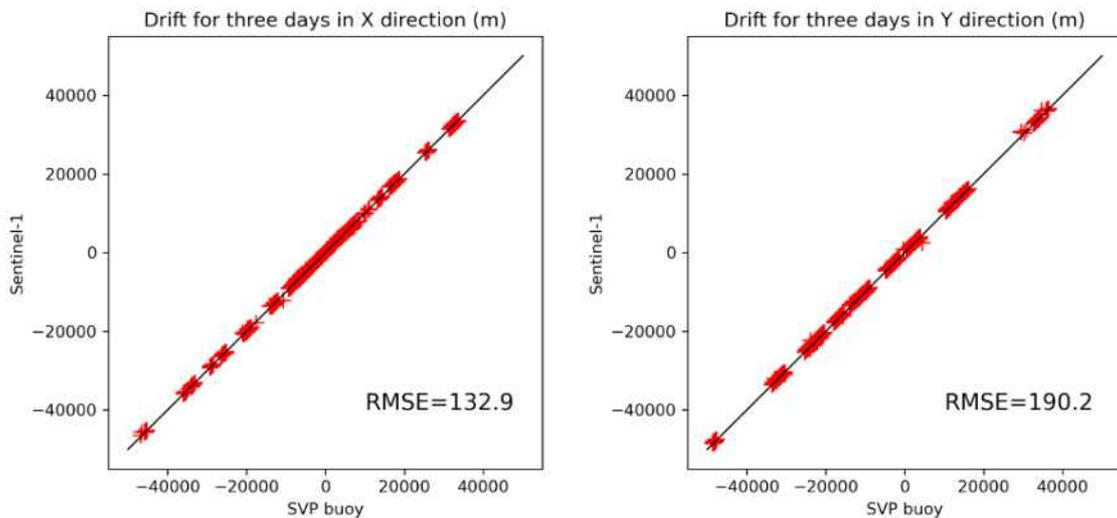


그림 3-1-13. 영상레이더 추출 해빙 이동 벡터와 SVP 부이 이동 벡터의 일대일 산포도

- 다음 그림은 32개 페어 전체의 영상레이더 추출 해빙 이동 벡터와 SVP 부이의 이동 벡터를 각각 Polar Stereographic 투영 평면상의 속도 성분 U, V에 대해 일대일로 비교한 산포도임. SVP 부이의 이동 속도에 대한 3일 간격 영상레이더 페어 추출 속도의 상대적 오차는 RMSE를 기준으로 X 방향으로 0.051 cm/s, Y 방향으로 0.073 cm/s 로 나타남.

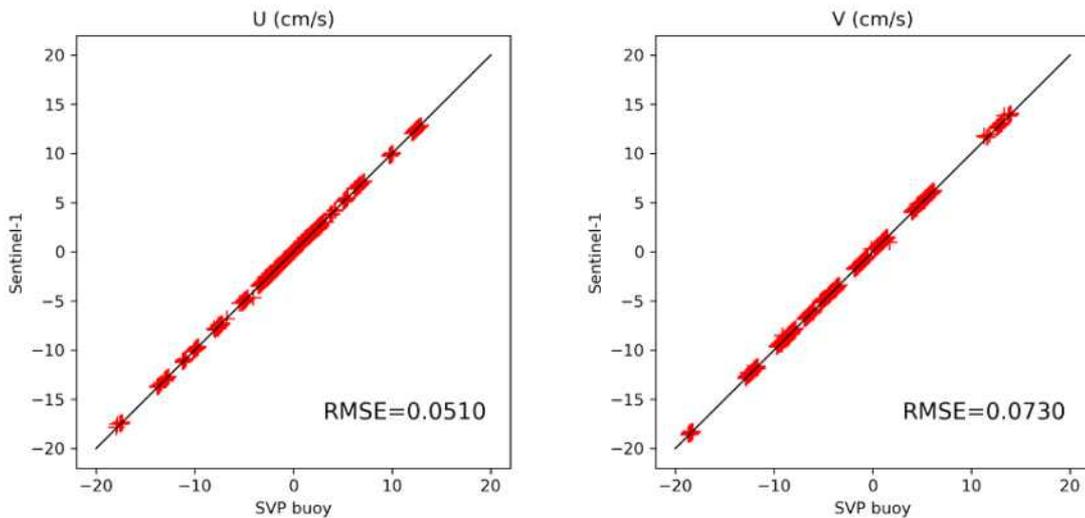


그림 3-1-14. 영상레이더 추출 해빙 이동 속도와 SVP 부이 이동 속도의 일대일 산포도

- 이 속도 오차는 북극해 해빙의 평균 이동 속도인 4~10 cm/s에 비해 훨씬 낮은 값으로, 영상레이더를 이용한 해빙 이동 정보 추출은 매우 높은 정확도를 가지는 것으로 판단됨.
- 이 연구에서는 영상레이더를 기반으로 해빙 이동 벡터를 추출하는 기존 기술의 개선 및 성능 검증을 완료하고, 시험 산출물을 KPDC에 등록하였음.

○ 영상레이더 관측 기반 북극해 해빙 이동 벡터 산출 기술 개발의 고도화

- 기존의 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

백터를 제공하는 정기 산출물은 유럽 Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)에서 C-밴드인 Sentinel-1만을 이용해서 시험적으로 제공되는 것이 유일함.

- X-밴드 영상레이더 또한 광역 관측 모드를 운영하고 있으나, 관측 폭이 100~200 km로 좁고, 기본 운영 계획에서 촬영 대상지가 대부분 육지여서 해빙에 대한 주기적 관측 자료가 거의 없기에 해빙 이동 추출에 대한 연구가 거의 이루어지지 않음. 그러나 X-밴드 위성의 수는 폭발적으로 증가하는 추세이며, 비록 관측 폭이 좁더라도 다수의 위성을 혼합하여 사용한다면 시공간적 해상도의 제약을 극복할 여지가 있음.
- 이 연구에서는 기존 C-밴드 영상레이더 외에 고해상 X-밴드 영상레이더로부터 이동 백터 추출, 모자이킹, 현장관측 GPS 트래커를 이용한 결과 검증을 수행하고, 시험 산출물을 생성함. 또한 이중센서의 혼합 사용을 통해 시공간적 해상도를 향상시킬 수 있음을 보임.
- 영상 페어의 매칭은 1) 특이점 (feature) 추출과 매칭을 통한 coarse coregistration, 2) 서브셋 상관계수 최적화를 통한 fine coregistration의 두 단계를 거치기 때문에 위성 궤도 및 비행방향에 의한 영상 회전 및 상하/좌우 반전에 큰 영향을 받지 않고 빠른 연산이 가능함 (Korosov and Rampal, 2017).
- 국제공동연구인 MOSAiC을 통해 MOSAiC 연구선인 Polarstern을 중심으로 반경 40km 이내에 설치된 100여개의 표면 속도 부이 (Surface Velocity Profiler (SVP) buoy)는 영상레이더 기반으로 해빙 이동 백터를 추출하는 기술을 검증하는데 최적의 자료를 제공할 수 있으므로, 이 연구에서는 MOSAiC 프로그램과 동시기에 획득된 X-밴드 위성 자료인 KOMPSAT-5 (이하 K5)와 COSMO-SkyMed (이하 CSK) 영상을 수집함. 다음 그림은 2019년 10월 4일부터 2020년 5월 16일까지의 두 위성 자료의 획득 범위와 Polarstern의 표류 궤적을 나타냄.

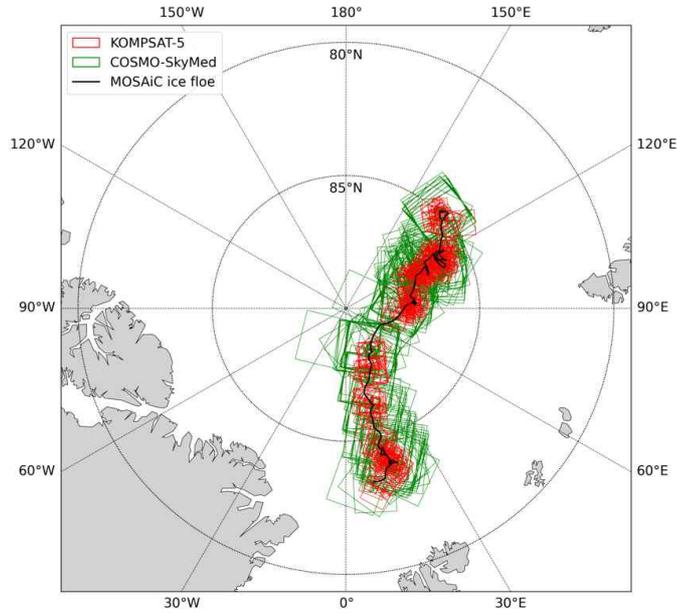


그림 3-1-15. Polarstern의 표류 궤적 (검은색 실선), KOMPSAT-5 촬영 범위(빨간색 사각형) 및 COSMO-SkyMed 촬영 범위 (초록색 사각형)

- 두 위성 모두 표준 관측 모드와 광역 관측 모드를 혼합하여 촬영했으며, 센서 재원 및 원본 영상 프로덕트의 비교는 다음의 표와 같음.

표 3-1-7. 사용된 SAR 센서와 영상 프로덕트 파라미터

파라미터	KOMPSAT-5	COSMO-SkyMed
중심주파수	9.66 GHz (X-밴드)	9.6 GHz (X-밴드)
편파	HH	VV
촬영 모드	Stripmap (ES), ScanSAR (EW)	Stripmap (HI), ScanSAR (HR)
촬영 폭	30 km (ES), 100 km (EW)	40 km (HI), 200 km (HR)
GEC 픽셀 간격	1.11 m (ES), 6.25 m (EW)	2.5 m (HI), 50 m (HR)

- K5는 단일 위성으로, MOSAic 미션 기간중에 총 215장의 Stripmap 영상, 101장의 ScanSAR 영상을 촬영함. 연구에 사용한 Geocoded Ellipsoid Corrected (이하 GEC) 프로덕트의 위치정확도는 CE90 (Circular Error at the 90th percentile) 기준으로 Stripmap과 ScanSAR를 합쳐 2.6±1.5 m로 알려져 있음.
- CSK는 4대의 편대 비행 위성으로, 동 기간중에 총 374장의 Stripmap 영상, 342장의 ScanSAR 영상을 촬영함. 마찬가지로 연구에 사용한 GEC 프로덕트의 위치정확도는 3-σ

기준으로 Stripmap에서 11.1 m, ScanSAR에서 6.4 m로 알려져 있음.

- K5와 CSK의 위치정확도의 기준이 달라 정확한 비교는 할 수 없으나, 위치오차의 분포를 정규분포로 가정하고 CSK의 $3\text{-}\sigma$ 를 CE90으로 변환하면 그 값은 Stripmap과 ScanSAR에서 각각 4.7 m, 2.7 m 임. 이는 해빙의 평균 이동 속도가 10 cm/s 이하임을 생각하면, 수 시간 이상의 촬영 시간 차이를 가지는 영상쌍에서의 실제 해빙의 이동 거리인 수 km에 비하면 미미한 수준임. 따라서 GEC 프로덕트 자체의 위치정확도는 해빙 이동 속도에 거의 영향을 주지 않음.
- 부이 자료는 MOSAiC 연구선이자 중심관측소인 Polarstern을 기준으로 반경 40 km 범위에 분포된 다수의 Surface Velocity Profiler 타입의 부이를 사용했으며, 이 부이들은 매 10분 ~ 매 1시간마다 GPS에 기반하여 자신의 위치를 기록함.
- 해빙 이동 벡터 추출 알고리즘은 Korosov and Rampal (2017)의 방법을 따르되, 이 연구에서는 GDAL 기반의 오픈소스 영상 처리 패키지인 Nansat (Korosov et al., 2016)에서 원본영상을 읽어들이 수 있도록 import 모듈인 mapper를 작성함.
- 또한 기존 방법의 feature tracking 기반 초기장 계산을 개선하고, 이상점 필터링을 강화하기 위해 1) feature tracking - pattern matching 프로세스 체인의 반복연산, 2) Maximum Cross Correlation (이하 MCC)의 피크값 및 함수형태를 복합적으로 고려한 이상점 탐지를 추가하여 기존 방법보다 개선된 성능의 알고리즘을 개발, 적용함.
- 해빙 이동 벡터 추출을 위해서는 촬영 시기가 다른 두 장의 영상쌍을 구성해야 하는데, 시간순으로 정렬한 목록에서 다음의 두 조건을 만족하는 경우의 영상쌍만을 선택함. 1) 두 영상의 시간 차이가 6시간 이상, 72시간 이하일 것. 2) 주영상, 부영상 모두에서 Polarstern이 포함될 것.
- Stripmap과 ScanSAR를 혼합하여 사용하므로, 픽셀 간격을 50 m × 50 m 로 통일시키는 전처리 수행. GEC 프로덕트의 경우 기본적인 방사특성 균일화가 이루어진 상태이고, 알고리즘 구조상 sigma nought으로 변환이 필요하지 않으므로 추가적인 방사보정은 적용하지 않음. 또한 K5와 CSK 모두 GEC 프로덕트는 Universal Polar Stereographic 투영된 형태로 제공되기에, 전처리 과정에서 주영상과 부영상간의 재투영은 필요하지 않음. Feature tracking과 pattern matching 모두에서 매칭값 계산을 위한 템플릿 크기는 40 × 40 픽셀로, 이는 공간상으로 2 km × 2 km에 해당함.
- 실험은 총 세 가지 경우로, 각각 K5 1기 단독 활용, CSK 4기 단독 활용, K5와 CSK의 혼합 활용의 경우에 대해 해빙 이동 벡터를 추출하고 부이 자료와 비교하여 그 정확도를 평가함. 비교를 위한 부이의 위치에서 영상 기반 추출이 실패한 경우는 주변의 격자값을 이용하지 않고 제외함. 정확도 평가를 위한 지표는 이동 속도와 방향 각각에 대한 편차 (평균값과 표준편차에 기반; 이하 Bias), 표준화된 평균제곱근 편차 (Normalized Root Mean

Squared Error; 이하 NRMSE), 피어슨 상관계수 (ρ ; 속도의 경우; 최대치=1), 벡터 상관계수 (ρ^2 ; 방향의 경우; 최대치=2) 임.

- 아래의 두 그림은 각각 K5와 CSK의 Stripmap-Stripmap (좌), ScanSAR-ScanSAR (중), Stripmap-ScanSAR (우) 영상쌍에서의 해빙 이동 벡터 추출의 예를 보임. 각 그림에서 상단은 주영상, 하단은 부영상이며, 검은색 실선은 영상쌍의 촬영 범위, 노란색 화살표는 영상 기반으로 추출한 해빙 이동 벡터, 빨간색 화살표는 부이 기록으로부터 계산한 해빙 이동 벡터를 나타냄. 참고로 영상 기반 결과는 50 m 격자 단위이나, 가시편의성을 위해 일부만을 도시함.

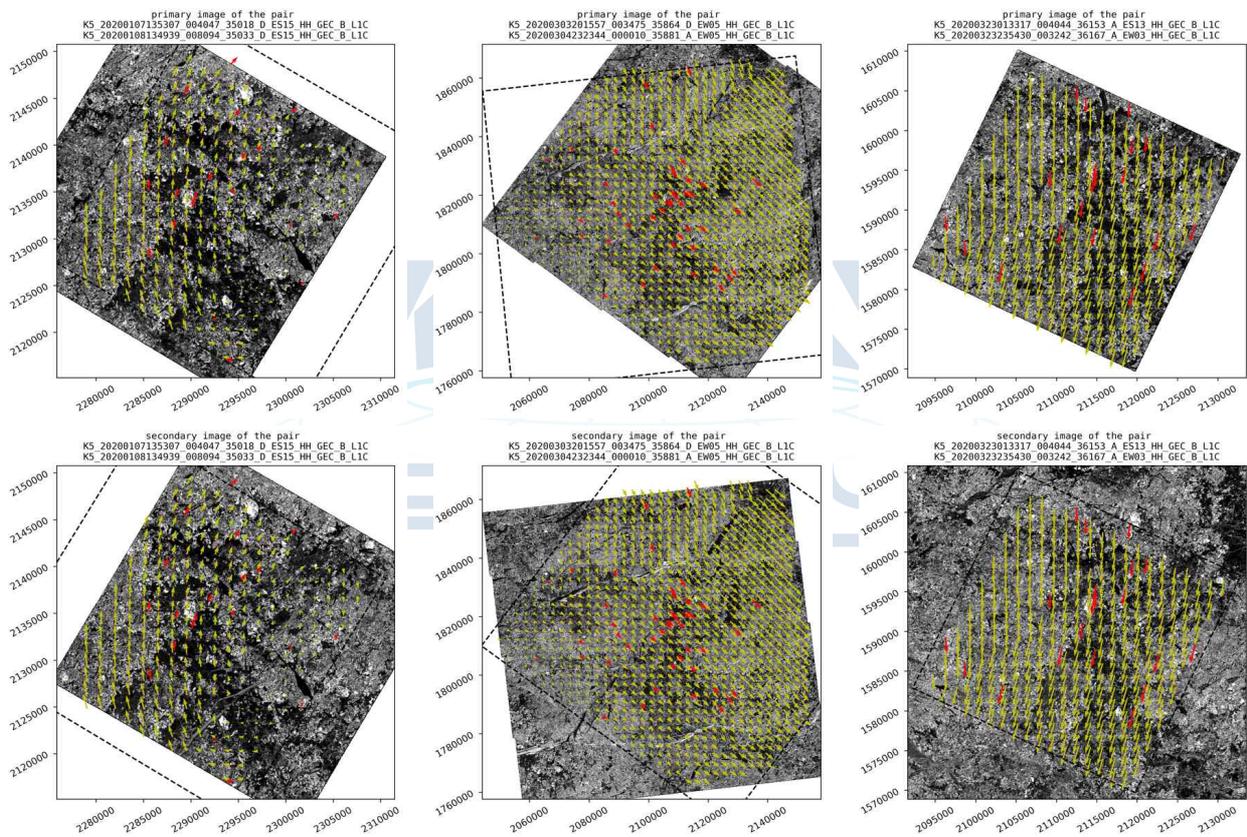


그림 3-1-16. KOMPSAT-5 영상을 이용한 해빙 이동 벡터 추출 예시

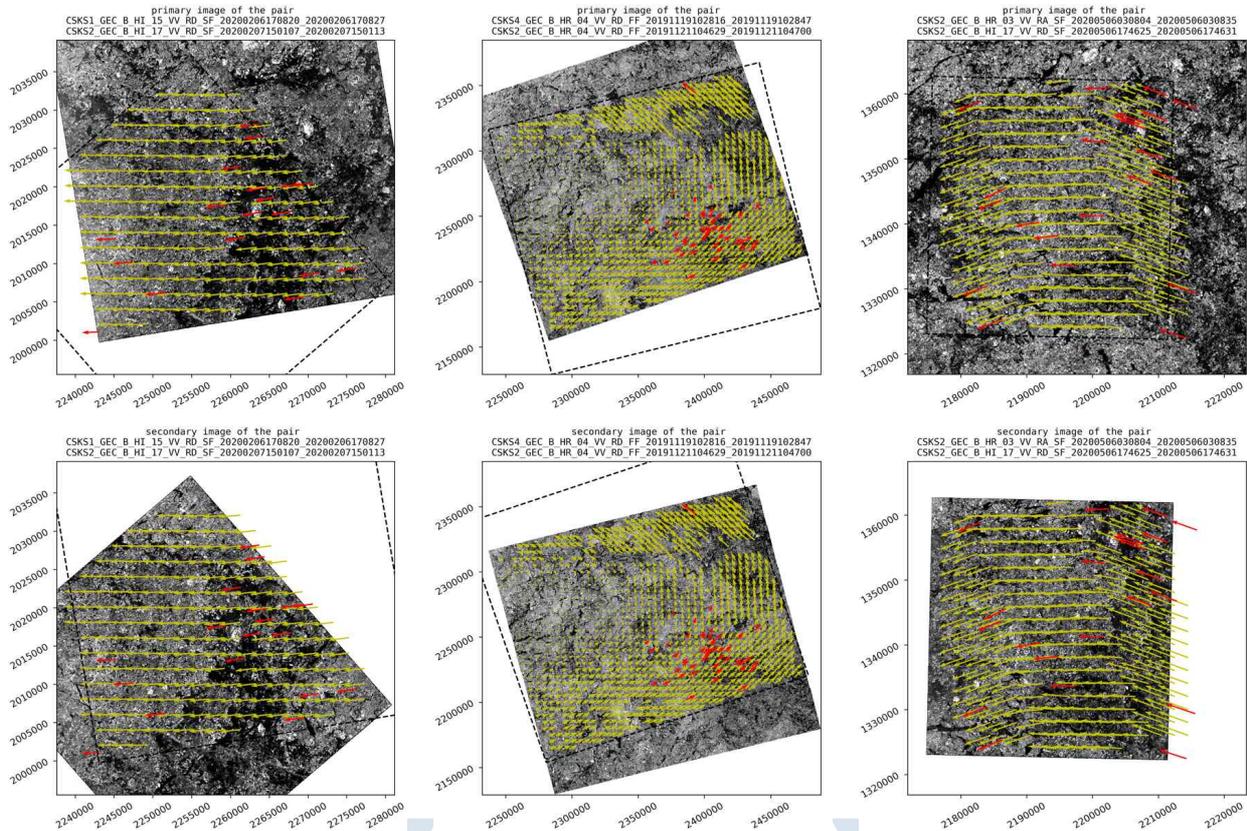


그림 3-1-17. COSMO-SkyMed 영상을 이용한 해빙 이동 벡터 추출 예시

- K5 1기 단독 활용 실험에서는 총 66개의 영상쌍이 가용하였고, 쌍을 이루는 영상간의 시간 차이의 평균은 36.7시간이었음. Stripmap-Stripmap, ScanSAR-ScanSAR, Stripmap-ScanSAR 조합의 수는 각각 27, 20, 19로 비교적 고른 분포이며, 도합 1,069개의 벡터셋(영상기반-부이기반 1:1 비교셋)에 대한 평가 결과는 아래의 그림 및 표와 같음. 속도 산포도에서 대부분이 등치선(identity line 또는 line of equality)상에 분포하고 특히 MCC가 높을수록 두 값의 차이가 적어짐. 방향차 도수분포도에서도 0에 가까운 곳에 집중되어 나타남. 표에서 MCC 0.3 이상에서 안정된 성능을 보이며, MCC 0.3으로 이상치 제거를 한 경우의 손실률은 2.5%에 불과함.

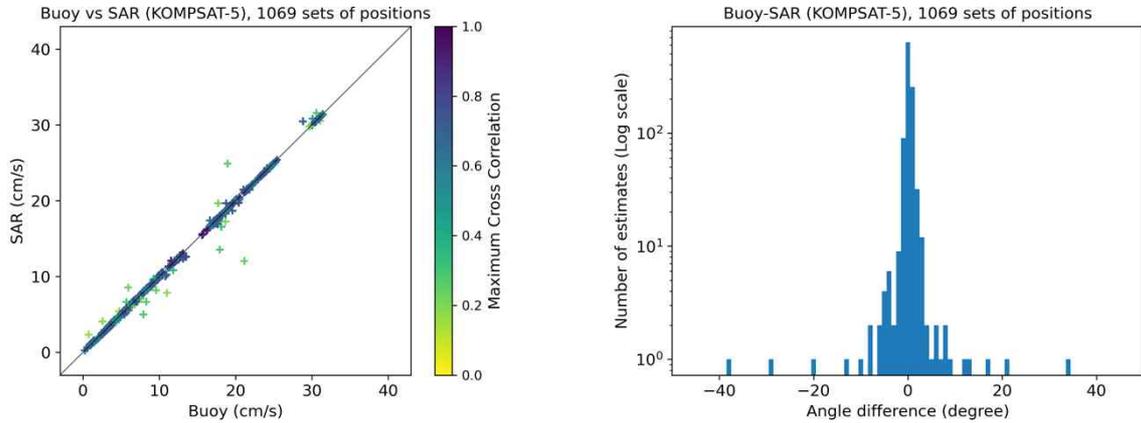


그림 3-1-18. KOMPSAT-5 기반 해빙 이동 벡터 추출의 검정 결과. (좌) 속도 산포도 (우) 방향차도 수분포도

표 3-1-8. KOMPSAT-5 기반 해빙 이동 벡터 추출의 검정 결과

MCC 제한	벡터 수	속도			방향		
		Bias (cm/s)	NRMSE (%)	ρ	Bias (degree)	NRMSE (%)	ρ^2
0.0	1069	-0.052 ± 0.434	1.402	0.998	0.141 ± 3.720	2.068	1.994
0.2	1061	-0.053 ± 0.418	1.352	0.998	0.266 ± 2.180	1.220	1.994
0.3	1042	-0.043 ± 0.142	0.476	0.999	0.275 ± 1.499	0.846	1.999
0.4	1032	-0.042 ± 0.130	0.440	0.999	0.267 ± 1.476	0.833	1.999
0.5	1000	-0.042 ± 0.128	0.433	0.999	0.276 ± 1.495	0.845	1.999

- CSK 4기 단독 활용 실험에서는 총 167개의 영상쌍이 가용하였고, 쌍을 이루는 영상간의 시간 차이의 평균은 24.7시간이었음. Stripmap-Stripmap, ScanSAR-ScanSAR, Stripmap-ScanSAR 조합의 수는 각각 11, 94, 62로 광역관측이 추가된 분포이며, 도합 5,339개의 벡터셋에 대한 평가 결과는 아래의 그림 및 표와 같음. K5의 경우와 마찬가지로 속도 산포도에서 대부분이 등치선상에 분포하고 특히 MCC가 높을수록 두 값의 차이가 적어짐. 방향차도 수분포도에서도 0에 가까운 곳에 집중되어 나타남. 표에서 MCC 0.3 이상에서 안정된 성능을 보이며, MCC 0.3으로 이상치 제거를 한 경우의 손실률은 0.6%에 불과함. 전반적으로 K5와 유사하거나 좀 더 좋은 결과임.

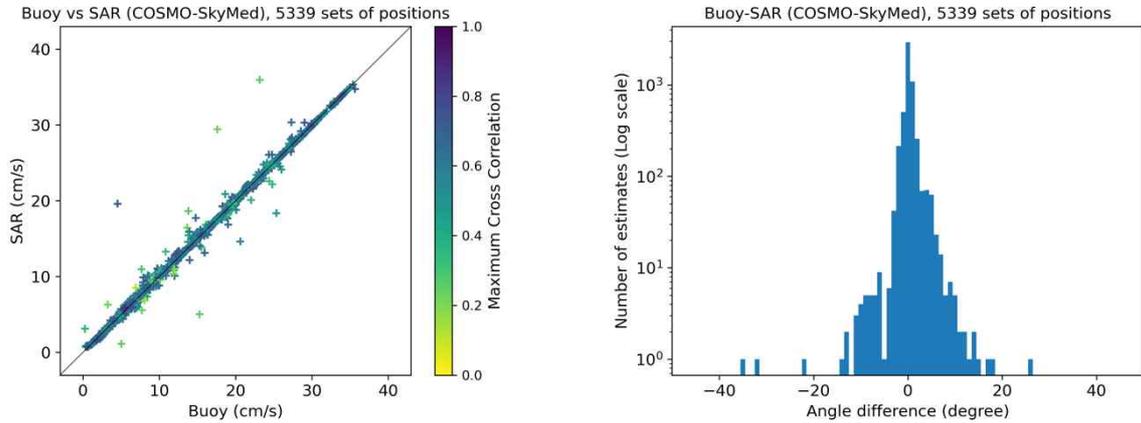


그림 3-1-19. COSMO-SkyMed 기반 해빙 이동 벡터 추출의 검정 결과. (좌) 속도 산포도 (우) 방향차 도수분포도

표 3-1-9. COSMO-SkyMed 기반 해빙 이동 벡터 추출의 검정 결과

MCC 제한	벡터 수	속도			방향		
		Bias (cm/s)	NRMSE (%)	ρ	Bias (degree)	NRMSE (%)	ρ_2
0.0	5339	-0.009 ± 0.444	1.257	0.998	0.305 ± 3.127	1.745	1.996
0.2	5335	-0.009 ± 0.443	1.254	0.998	0.302 ± 3.120	1.741	1.996
0.3	5305	-0.012 ± 0.329	0.932	0.999	0.335 ± 1.630	0.924	1.998
0.4	5214	-0.012 ± 0.317	0.898	0.999	0.333 ± 1.491	0.849	1.998
0.5	4878	-0.011 ± 0.304	0.862	0.999	0.339 ± 1.458	0.832	1.998

- K5와 CSK 혼합 활용 실험에서는 총 82개의 영상쌍이 가용하였음. 이는 K5-K5 또는 CSK-CSK 조합의 영상쌍을 제외했기 때문에 실제 가용한 전체 영상쌍보다 적은 숫자임. 쌍을 이루는 영상간의 시간 차이의 평균은 20.1시간으로, 각 위성의 단독 활용의 경우보다 낮아진 수치임. Stripmap-Stripmap, ScanSAR-ScanSAR, Stripmap-ScanSAR 조합의 수는 각각 5, 30, 47로 CSK의 경우처럼 광역관측이 추가 된 분포이며, 도합 1,651개의 벡터 셋에 대한 평가 결과는 아래의 그림 및 표와 같음. 앞서 두 센서의 단독 활용의 경우와 마찬가지로 속도 산포도에서 대부분이 등치선상에 분포하고 MCC가 높을수록 두 값의 차이가 적어짐. 방향차 도수분포도에서도 0에 가까운 곳에 집중되어 나타남. 표에서 MCC 0.5 이상에서 안정된 성능을 보이며, 이는 앞서 두 센서의 단독 활용의 경우보다는 높은 수치임. MCC 0.5로 이상치 제거를 한 경우의 손실률은 11.8%임. 그러나 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 촬영함).

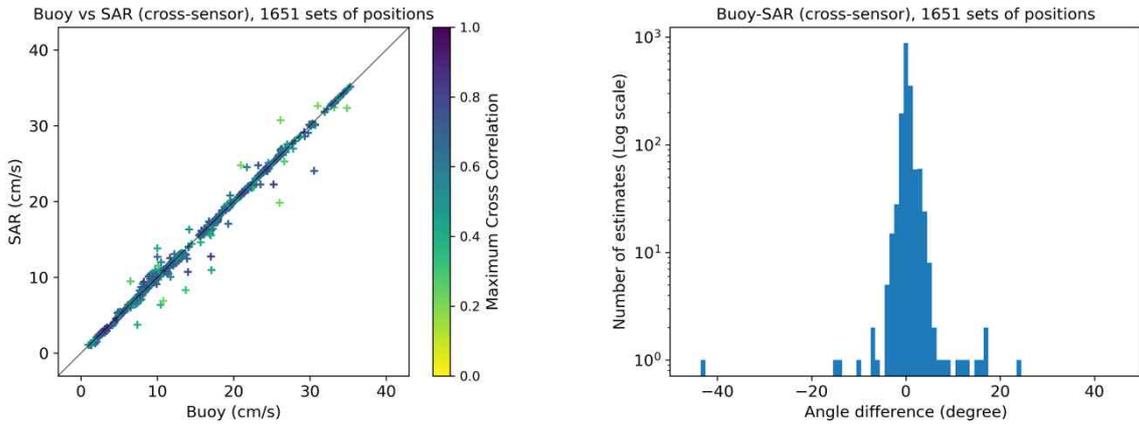


그림 3-1-20. KOMPSAT-5와 COSMO-SkyMed 혼합 기반 해빙 이동 벡터 추출의 검정 결과. (좌) 속도 산포도 (우) 방향차 도수분포도

표 3-1-10. KOMPSAT-5와 COSMO-SkyMed 혼합 기반 해빙 이동 벡터 추출의 검정 결과

MCC 제한	벡터 수	속도			방향		
		Bias (cm/s)	NRMSE (%)	ρ	Bias (degree)	NRMSE (%)	ρ^2
0.0	1651	-0.076 ± 0.505	1.489	0.997	0.257 ± 4.455	2.479	1.995
0.2	1651	-0.076 ± 0.505	1.489	0.997	0.257 ± 4.455	2.479	1.995
0.3	1629	-0.077 ± 0.435	1.289	0.998	0.297 ± 4.301	2.395	1.996
0.4	1595	-0.071 ± 0.403	1.195	0.998	0.305 ± 4.320	2.406	1.997
0.5	1455	-0.068 ± 0.356	1.059	0.998	0.457 ± 1.522	0.883	1.998

- 위의 세 경우 모두에서 영상 기반 측정치와 부이 기반 측정치가 거의 일치하였으며, 속도와 방향에 대한 평균 bias는 각각 0.08 ± 0.51 cm/s, 0.46 ± 4.46 도에 불과하였음. NRMSE 또한 센서 혼합 결과에서 제일 나빴음에도 불구하고 속도와 방향에 대해서 각각 1.06%, 0.89%에 불과했으며, 상관계수는 각각 0.99, 1.99 이상이었음.
- 다음 표는 기존 C-밴드 위성의 성능과 비교하기 위해 과거 다른 연구들에서 제시했던 RMSE 기준 위치 오차 값으로 변환한 결과임. 이 연구에서 분석한 X-밴드 센서의 세 가지 실험 결과의 평균치는 거리와 방향에서 각각 202.74 m, 1.63도로, 286~1,020 m, 3도에 이르는 기존 C-밴드 위성의 결과보다 크게 향상된 결과임. 이는 1차적으로는 X-밴드의 더 높은 공간해상도에 기인할 것으로 판단되나, 실험에 사용한 데이터셋이 비교적 상이 뚜렷

한 고위도 다년빙으로 구성된 영향도 있을 것으로 사료됨.

표 3-1-11. 기존 연구들에서 수행된 C-밴드 기반 결과와의 성능 비교

파라미터	KOMPSAT-5	COSMO-SkyMed	KOMPSAT-5, COSMO-SkyMed 혼합	RADARSAT-2 (Komarov and Barber, 2014)	Sentinel-1 (Korosov and Rampal, 2017)	ENVISAT (Farooq et al., 2020)
위치 RMSE (m)	211.53	210.43	164.11	428	286	1020
방향 RMSE (degree)	1.53	1.67	1.59	미제시	미제시	3.17

- 영상쌍을 구성하는 시간 간격에 따른 성능을 검토하고자 시간간격-위치오차와 시간간격-속도오차의 경향을 12시간 단위의 시간간격 평균치 결과를 이용하여 분석함. 위치편차는 외부요인을 제외하면 원본프로덕트의 위치정확도와 사용 알고리즘의 성능에만 영향을 받기 때문에 시간간격에 독립적이어야 함. 다음 그림은 사용한 데이터셋에서 이 관계가 실험적으로 사실임을 보임.

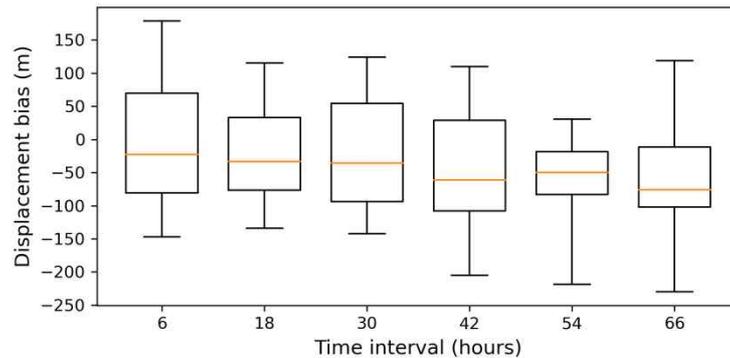


그림 3-1-21. 시간간격 대비 위치오차의 분포

- 그러나 속도는 영상쌍을 이루는 두 영상에서의 실제 해빙의 이동거리를 시간간격 로 나눈 값이기 때문에, 시간간격이 짧을수록 오차가 커져야 함. 이 관계는 다음과 같이 간단한 수식으로 묘사할 수 있음.

$$E(t) = A/\Delta t + B$$

- 위 모델식을 아래 그림과 같이 실제 데이터에 피팅 시킴으로써 A , B 를 구할 수 있으며, 이들은 각각 3.47 ± 0.29 , -0.01 ± 0.02 였음. 이는 속도오차 $E(t)$ 의 기대값이 0.5 cm/s 이하이기 위해서는 영상쌍을 구성하는 두 영상의 시간간격 Δt 가 6.9시간보다 커야 함을 의미함.

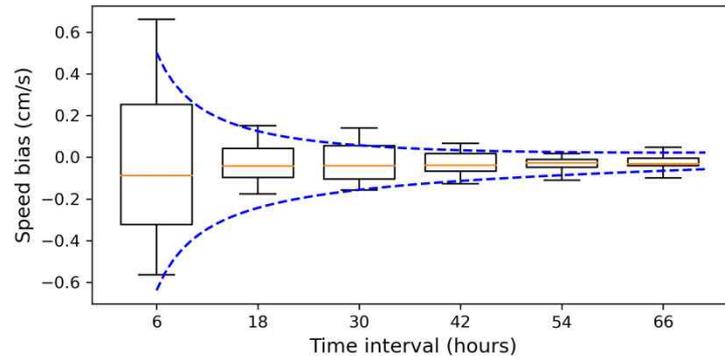


그림 3-1-22. 시간간격 대비 속도오차의 분포와 모델식 피팅 결과 (파란색 점선)

- 이 연구에서는 고해상도 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 이중 센서 활용의 유용함을 확인함.

○ 고해상도 해빙장 추출 기술 개발 (위탁)

가. 고해상도 영상 자료 처리

1) 고해상도 해빙 이동 속도 분석 과정

- 북극 해빙의 이동 특성은 북극의 환경 변화를 지시하는 중요한 요인 중 하나로 평가되고 있고, 이는 북극의 환경 변화뿐만 아니라 전지구적인 기후 변화를 분석하는 데도 영향을 줄 것으로 사료됨
- 본 연구에서는 북극 해빙의 이동 특성을 세밀히 구현하기 위해 40 m급 공간 해상도의 위성 관측 자료인 Sentinel-1 SAR 자료를 사용하여 고해상도 해빙 이동장을 구현하는 것임
- 본 연구에서 사용된 해빙 이동장 추출 알고리즘은 Dual-polarization SAR image를 기반으로 기존에 사용되던 방법을 보완하여 보다 세밀하고 정확한 해빙 이동장 제작
- 다음 그림에 나타내듯이 알고리즘은 총 3가지 방법으로 구성되었으며, 각각 (A) Data Processing, (B) Feature tracking, (C) Outlier detection and correction 과정을 통하여

해빙 이동 속도 산출을 통한 해빙 이동장 제작

- 자료 처리 과정은 기존 MCC이 가지는 문제점을 개선하여 지역해에 최적화된 방법으로 개선

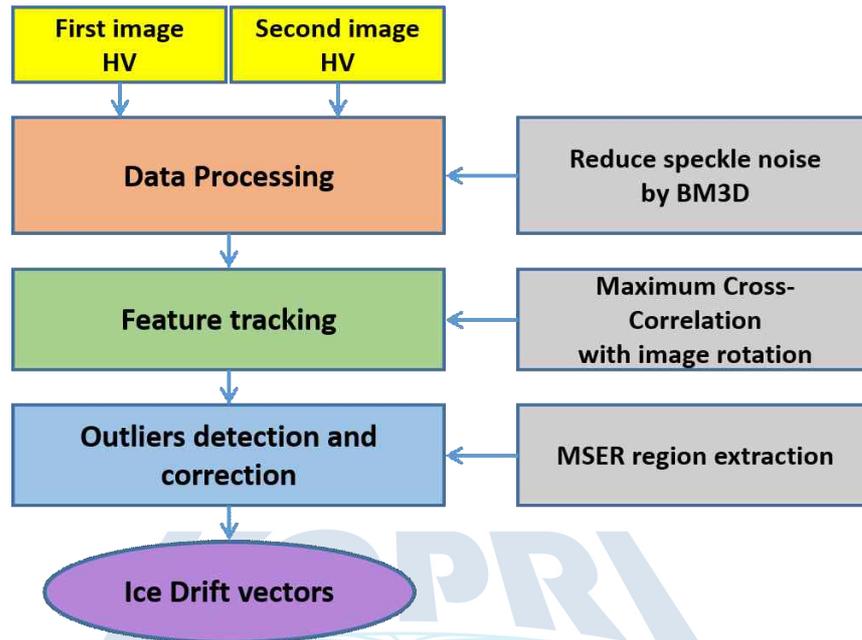


그림 3-1-23. 북극해 고해상도 해빙 이동 속도 산출 및 이동장 제작 방법 모식도

2) 자료 처리

- SNAP을 활용한 자료의 border noise, thermal noise 이후 calibration 과정 수행, 이후 기후보정을 위한 과정 수행
- 초기 자료 처리가 완료된 SAR 자료를 대상으로 speckle 제거를 위한 de-noising을 수행
- BM3D(block matching 3-D) 방법은 원 영상에 white Gaussian noise을 추가한 noise 영상을 통해 원 영상에 noise를 제거하는 방법(Zhang et al., 2020)
- 본 연구에 사용된 SAR 영상에 포함된 speckle과 같은 noise를 제거하기 위해 사용
- 다음 그림은 원 영상과 원 영상에서 추출한 noise, 그리고 원 영상에서 noise를 제거한 영상이며, 적색 선으로 표시된 영역에서의 back-scattering 자료의 변화를 나타냄

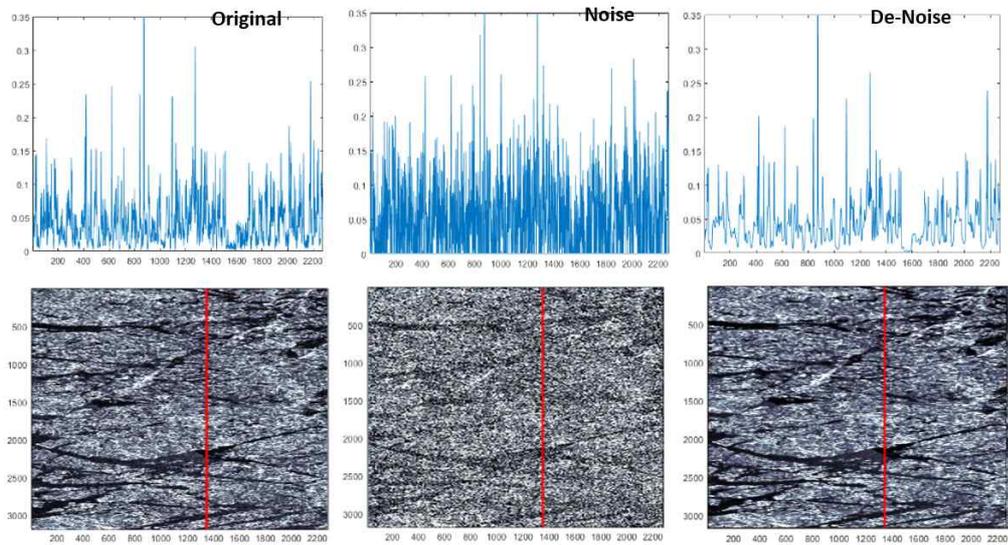


그림 3-1-24. BM3D 방법을 통한 SAR 영상의 de-noising

- 기존 Maximum Cross-Correlation(MCC) 방법에서 발견된 문제를 해결하기 위해 SAR 영상은 회전 통하여 자료 처리
- MCC 알고리즘은 두 영상 간의 상호상관계수를 토대로 이미지를 매칭, 이동거리를 역산하는 방법으로, 다음 그림에서 영상 1 내의 source template과 영상 2 내의 여러 위치에서 source template과 동일한 크기의 target template들 간의 2차원 상호상관관계를 계산하여 source template이 영상 2의 어느 위치에 있는 것이 가장 적합한지에 대한 확률을 구할 수 있으며, 이 중 가장 높은 확률을 보이는 위치를 추출하여 최대상호상관을 갖는 template가 얼마나 이동했는지에 따라 해빙의 이동거리를 계산하는 방법

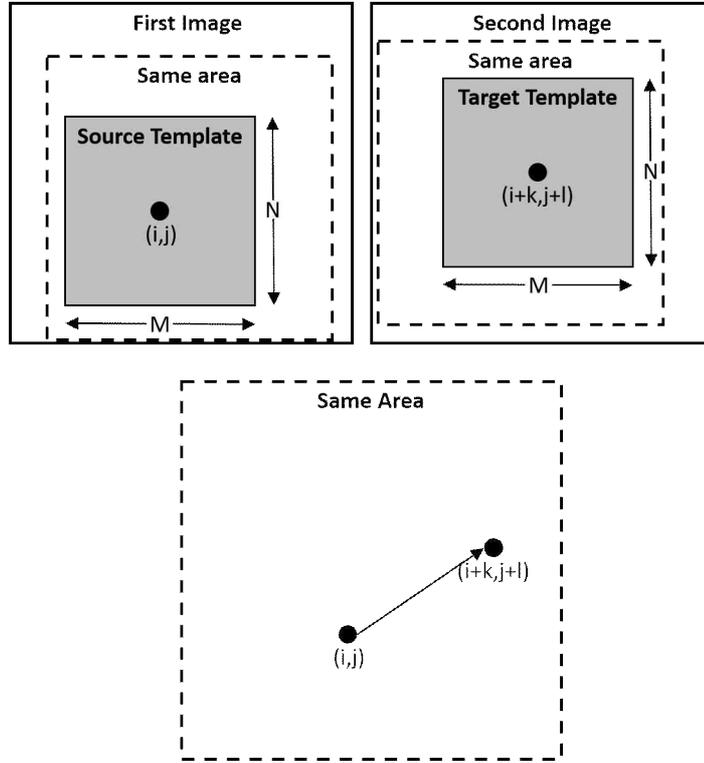


그림 3-1-25. MCC 자료 처리 방법

- 비교할 두 이미지에서 크기가 동일하고 같은 위경도 좌표를 공유하는 영역을 설정하여 (i, j) 가 중심인 $M \times N$ 크기의 source template 가 first image 내에 포함되어있고, 마찬가지로 $(i+k, j+l)$ 가 중심인 $M \times N$ 크기의 target template 가 second image 내에 포함되어있을 때, source template와 target template 사이의 상대적인 이동거리 (k, l) 와 상호상관계수 $r(k, l)$ 은 다음 식과 같이 나타냄

$$r(k, l) = \frac{\sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} [p(i+m, j+n) - \bar{p}(i, j)] \times [q(i+k+m, j+l+n) - \bar{q}(i+k, j+l)]}{\sqrt{\sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} [p(i+m, j+n) - \bar{p}(i, j)]^2 \times \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} [q(i+k+m, j+l+n) - \bar{q}(i+k, j+l)]^2}}$$

$$\bar{p}(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} p(i+m, j+n)$$

$$\bar{q}(i, j) = \frac{1}{MN} \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} q(i+k+m, j+l+n)$$

- $\bar{p}(i,j)$ 는 first image의 source template의 중앙인 (i, j)에서의 평균 확률, $\bar{q}(i,j)$ 는 second image의 target template의 중앙인 (i+k, j+1)에서의 평균 확률로 나타낼 수 있음
- 본 연구에 사용된 MCC 알고리즘은 pair를 이루는 두 SAR 자료에 나타나는 source와 target의 상관관계를 계산하여 이동 거리를 추출
- 자료 내 추적 대상의 회전 등 수평적 이동 외의 rigid motion을 탐지하는 것에 취약함
- 이를 보완하기 위해 다음 그림에서와 같이 SAR 자료의 rotation을 통해 가장 높은 상관계수를 보이는 회전된 자료에서의 해빙 이동벡터 추출을 수행

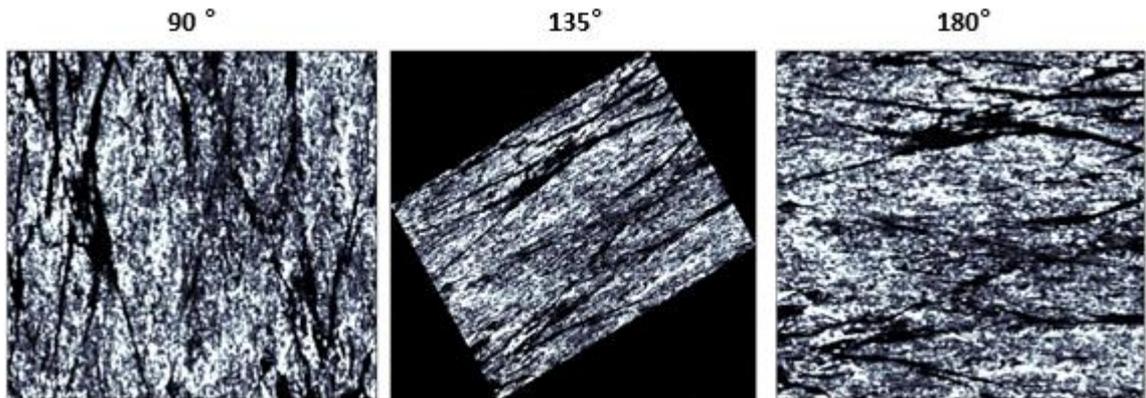


그림 3-1-26. de-noising된 SAR 영상 자료 처리

- 위에서 수행된 과정 이후에 영상 내에 존재하는 outlier 제거 및 자료 보정 과정 필요
- 본 연구에서 개선된 MCC 알고리즘을 통해 계산된 해빙 이동벡터에서 현장 관측 자료와 유사하지 않은 일부 벡터들이 발견됨
- 이상값을 보이는 벡터들은 대부분 영상의 가장자리에 존재하여 적합한 영상 매칭이 이루어지지 않았거나 영상 내 많은 영역과 유사성이 높은 곳에서 발생
- 고해상도 해빙 이동장의 1 × 1 km(25 × 25 pixel) 범위의 벡터의 zonal과 meridional components의 평균 및 표준편차를 통해 outlier에 해당하는 벡터들을 평가하고 추출하는 과정 수행
- 추출된 이상 벡터들의 보정을 위해 feature tracking 기법 중 MSER(Maximally Stable Extremal Region) tracking 방식 사용(Han et al., 2020)

- MSER regions 추출은 영상 내 feature의 edge 부분을 추출하여 feature를 인식하는 방식(Donosser et al., 2010)
- 본 연구에 사용된 SAR 자료의 경우 관측하는 시간 및 영역에 따라 back-scattering index가 달라지며, 시간에 따라 변화하는 sea ice의 형태가 sea ice drift vector의 추출을 위한 상호상관계수 계산에 영향을 미치는 것이므로 MSER tracking 방식 사용
- 다음 그림의 보정 이전의 해빙 이동벡터에서는 다른 곳에서 측정된 feature를 추적하여 주변의 해빙의 이동 경향과 다른 이동벡터를 나타냄

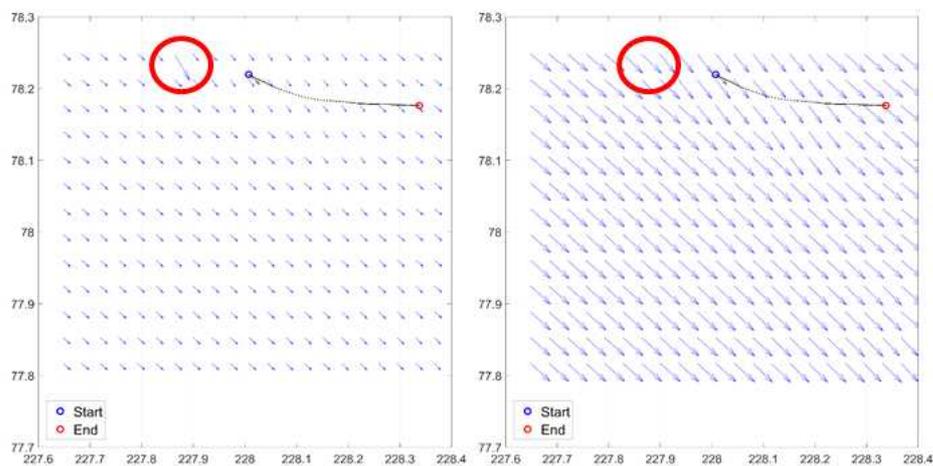


그림 3-1-27. 보정된 해빙 이동벡터의 변화 plot 및 주변 해빙이동벡터와의 관계

- 해당 영역에서 MSER을 사용하여 해빙 이동벡터를 추출했을 때, 보정된 해빙 이동벡터는 주변의 이동벡터와 거의 유사한 이동 특성을 보임

나. 지역해 최적화 MCC 알고리즘 개발

1) 개선된 해빙 이동 벡터 추출

- 북극해에서 해빙 이동 특성을 추출하기 위해 사용된 MCC 알고리즘은 선행연구에서 그 효용성이 입증된 pattern matching 방법이며, 이미지 기반의 환경 변화 및 원하는 대상을 추출하는 수많은 연구에 사용하고 있음
- 그러나, MCC 알고리즘을 적용하여 북극의 해빙의 이동 특성을 추출하기에는 MCC 알고리즘 고유의 약점이 존재했으며, 이를 보완하기 위하여 normalizing, de-noising 등

의 data pre-processing을 비롯한 image rotation, outlier detection and correction 등과 같은 단계를 추가적으로 적용

- 특히 geometric transformation이나 intensity change 등의 자료 간의 차이에도 불변하는 MSER의 특성을 활용한 feature tracking의 경우, 북극 해빙의 특성에 의한 outlier를 보정하여 개선된 결과 도출
- 본 연구에서 고해상도 위성 영상 기반 해빙 이동 속도 개선을 위해서 MCC 방법과 ROF(Robust Optical Flow) 방법을 이용하여 수행되었고, 2020년 관측 SAR image를 기반으로 개선된 MCC과 ROF 알고리즘을 통한 해빙이동벡터 계산했고, 해빙관측부이(IABP, ITP)의 이동궤적과 비교 검증 수행
- 초기에는 82개 case에 대한 개선된 MCC 및 ROF 알고리즘을 이용하여 산출된 결과와 해빙 관측 부이 매칭 자료와 비교하였고, 개선된 MCC 방법의 정확도를 검증하기 위해 총 732개 현장 관측 부이 자료와 비교 과정 수행
- 보정 이전의 두 방법 모두에서 해빙의 이동속도는 계산이 되었지만, 다음 그림과 같이 위도 방향에 오차 발생

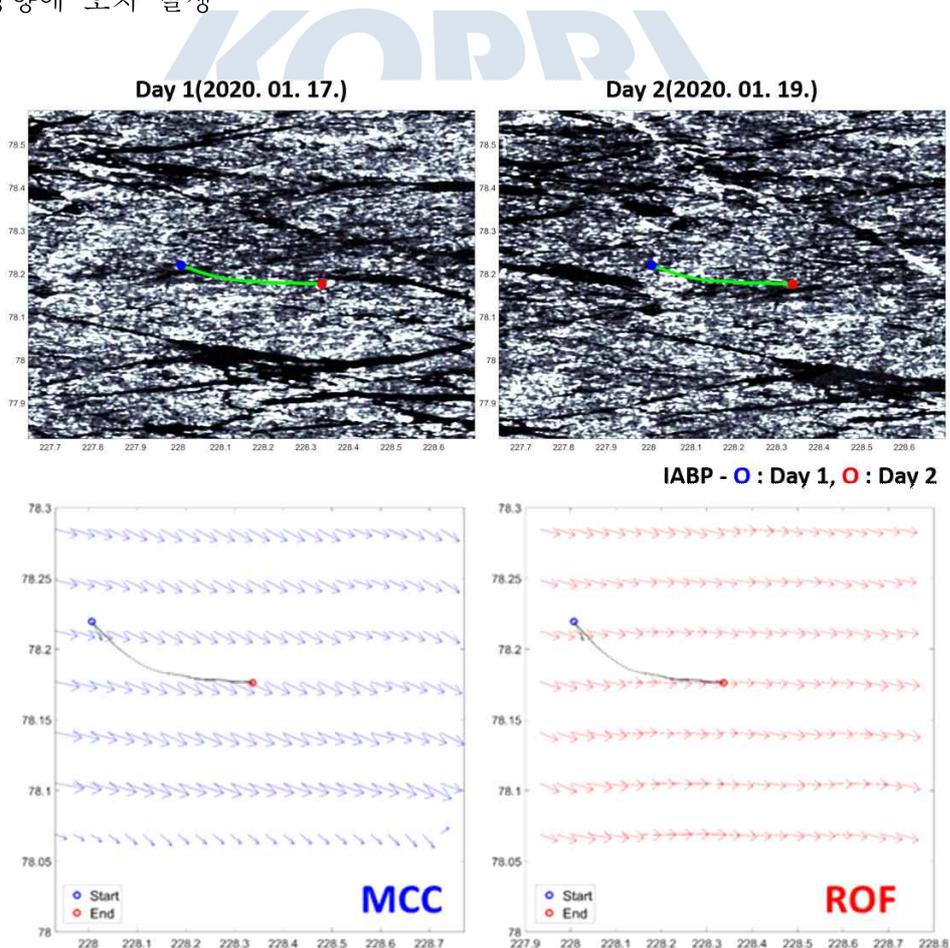


그림 3-1-28. 서로 다른 시기(Day 1,2)에 관측된 동일 영역의 SAR Image와 Day 1-2 동안 해빙관측부이의 이동 경로(녹색 궤적)

- 최종적으로 위와 같은 오차가 발생하기 때문에 그림 3-3-7 과 같은 방법을 통하여 오차 제거 과정을 통해 개선된 결과 산출
- 다음 그림은 동일 영역의 SAR 자료 pair와 부이 자료의 움직임, 개선된 MCC 알고리즘에 의해 추출된 해빙 이동장으로 앞서 언급한 보정 방법을 통해 획득한 해빙 이동장의 경우, 기존의 MCC만을 활용하여 추출한 해빙 이동장에 비해 현장 관측 부이의 움직임과 더 유사한 이동 특성을 나타냄

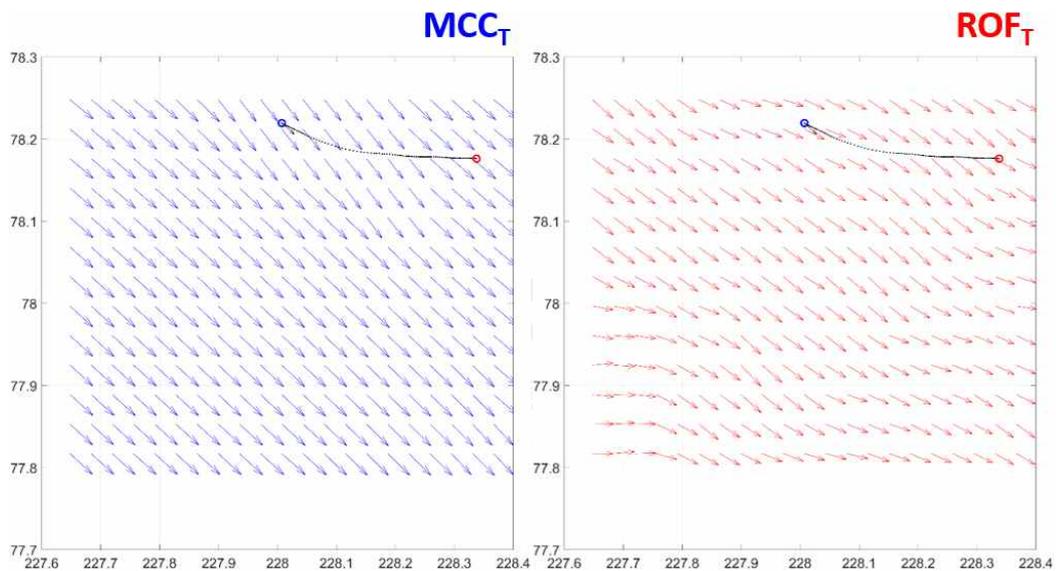


그림 3-1-29. 개선된 MCC과 ROF 방법을 사용해 구축한 해빙 이동장(MCCT: 좌측 청색, ROFT: 우측 적색) 및 해빙관측부이(흑색 궤적)의 이동거리와의 비교

- IABP의 부이 이동 특성을 통한 해빙의 움직임을 SAR 자료에서 확인하고, MCC를 통해 SAR 자료 pair의 일부분에 대한 상관관계를 계산, 가장 높은 확률을 보인 위치까지의 이동거리를 산출하여 위치에 따른 해빙 이동장을 구성.
- 다음 표와 같이 개선된 자료는 부이관측 자료와 유사한 경향을 나타냄.

표 3-1-12. 개선된 MCC과 ROF 방법을 사용해 구축한 해빙 이동장 및 해빙관측부이의 이동거리와의 비교

Using Data	X-Component [km]	Y-Component [km]	Distance [km]
Buoy	4.34	-2.79	5.16
MCCT	4.18	-2.82	5.04
ROFT	3.97	-1.55	4.26

2) 개선된 MCC 및 ROF 알고리즘 기반 해빙이동벡터와 해빙관측부이 자료의 매칭 비교

- 초기과정에서는 총 82개 case에 대한 매칭 자료 비교 과정 수행, 각 알고리즘에 의한 해빙이동벡터의 이동거리와 해빙관측부이의 이동거리의 차이 비교 분석. 이후 다음 그림과 같이 이동거리 차이의 평균(μ_X : 경도방향, μ_Y : 위도방향), 표준편차(σ_X : 경도방향, σ_Y : 위도방향), RMSE, Bias, Mean Ratio 계산

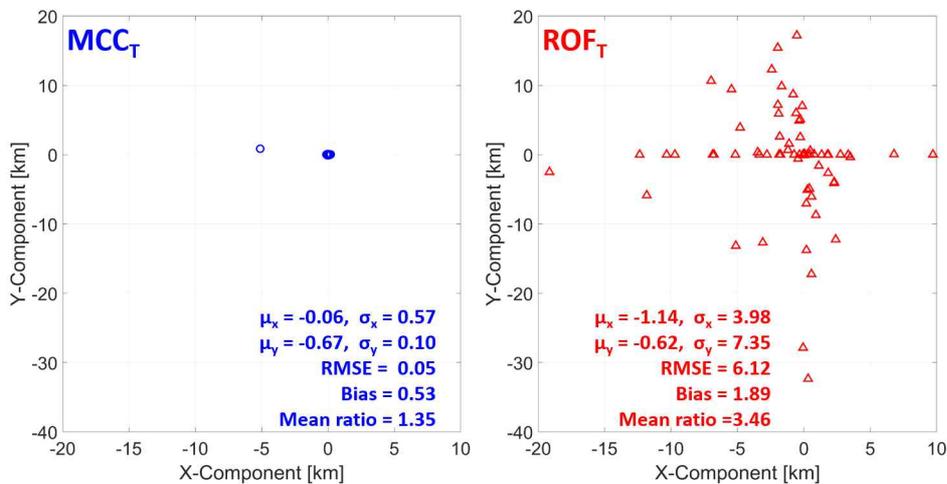


그림 3-1-30. 82개 경우를 대상으로 개선된 MCC 및 ROF 방법을 통한 해빙 이동거리와 해빙관측부이의 이동거리 비교

- 해빙관측부이와 이동거리 차이 비교 분석에서, 개선된 MCC가 ROF 보다 높은 정확도를 나타냄. 각 알고리즘에 의한 해빙이동속도와 해빙관측부이의 이동속도의 비교 분석한 결과, 다음 그림과 같이 개선된 MCC ROF 보다 해빙관측부이와 더 유사한 이동속도를 나타냄

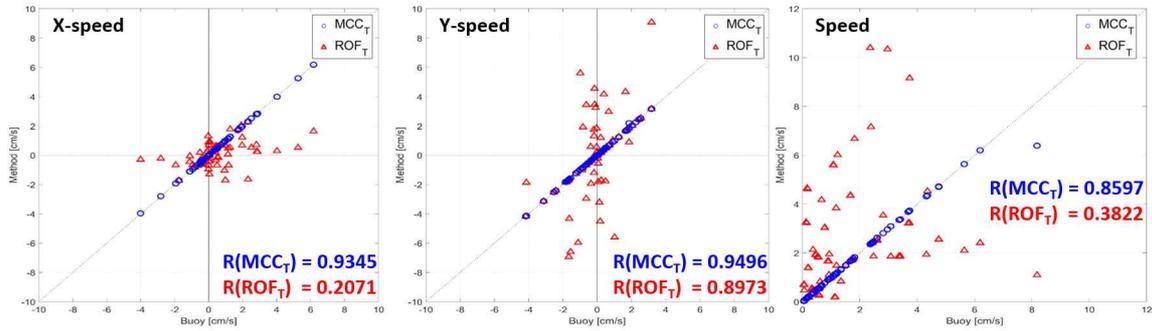


그림 3-1-31. 개선된 MCC 및 ROF 방법을 통한 해빙 이동속도와 해빙관측부이의 이동속도의 비교(좌측: 경도 방향 이동속도, 중앙: 위도 방향 이동속도, 우측: 총 이동속도)

3) 개선된 MCC 알고리즘을 통한 해빙 이동장 추출

- 알고리즘 개발 단계에서 개선된 MCC와 ROF 방법을 이용하여 알고리즘 개발을 수행되었지만, ROF 방법은 MCC 방법보다 자료 처리 속도가 느리고 개선된 방법을 적용했지만 상대적으로 낮은 정확도를 나타냄
- 개선된 MCC 방법을 이용하여 실제 해빙의 이동 특성을 얼마나 잘 모의하였는지를 평가하기 위해, 고해상도 해빙 이동장과 해빙 관측 부이 자료를 비교하였고, 지역해 최적화 방법으로 개선
- 다음 그림은 동일 영역의 SAR 자료 pair와 부이 자료의 움직임, 개선된 MCC 알고리즘에 의해 추출된 해빙 이동장을 나타냄

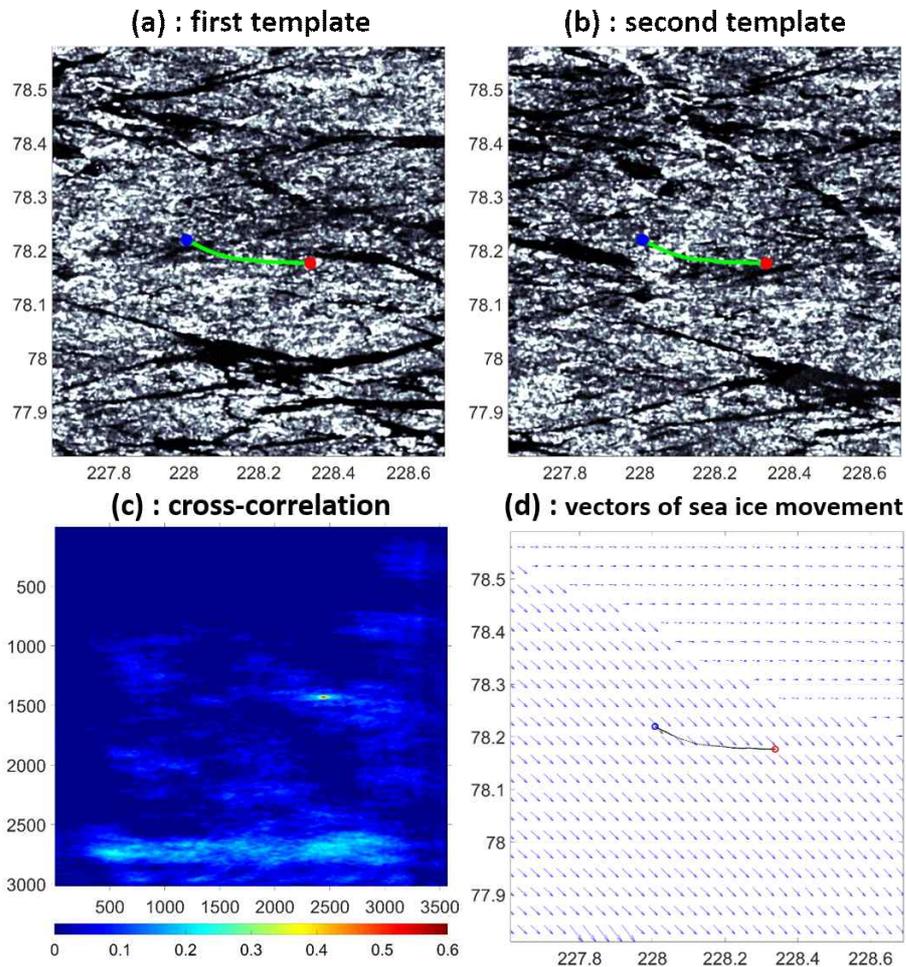


그림 3-1-32. SAR 이미지 쌍을 이용한 MCC 알고리즘에 의한 해빙 드리프트 벡터. (a)와 (b)는 동일한 영역을 갖는 제1 및 제2 SAR 이미지를 이용한 템플릿 쌍, 파란색과 빨간색 원은 각각의 SAR 이미지를 촬영할 때 부표 궤적의 위치, 교차 보정 결과(c)는 영상 쌍에서 계산. MCC(d)의 벡터는 해빙 이동으로 표시.

- 앞서 언급한 보정 방법을 통해 획득한 해빙 이동장의 경우, 기존의 MCC만을 활용하여 추출한 해빙 이동장에 비해 부이의 움직임과 더 유사한 이동 특성을 나타냄
- IABP의 부이 이동 특성을 통한 해빙의 움직임을 SAR 자료에서 확인하고 (그림 a, b), MCC를 통해 SAR 자료 pair의 일부분에 대한 상관관계를 계산 (그림 c), 가장 높은 확률을 보인 위치까지의 이동거리를 산출하여 위치에 따른 해빙 이동장을 구성함 (그림 d)
- 다음 그림은 732개의 부이 자료를 통해 얻어지는 해빙의 실제 이동속도와 부이와 가장 근접한 위치에서의 해빙 이동장의 속도를 비교하여 나타냄. MCC 방법과 현장 관측 부이 자료의 차이를 기반으로 한 통계적인 분석을 통해 MCC를 통한 해빙 이동 벡터가 해빙관측부이에 의해 관측된 해빙의 이동과 유사한 이동 특성을 나타내는 것으

로 분석됨

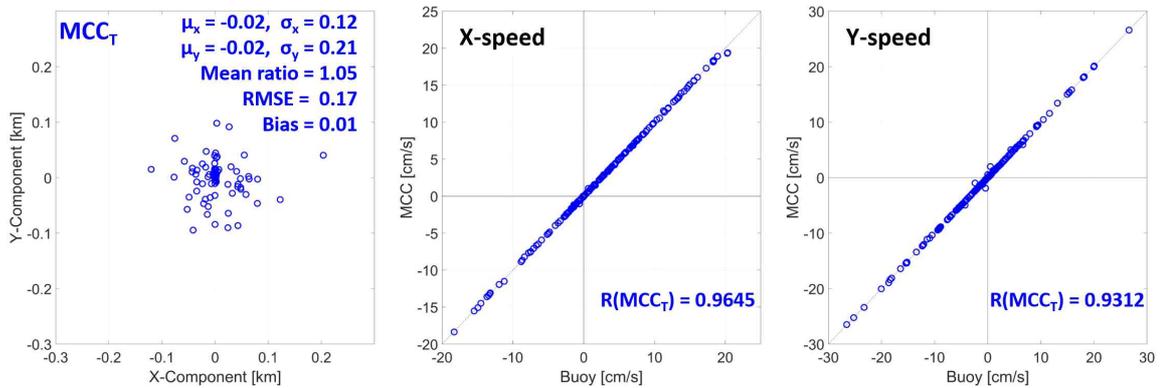


그림 3-1-33. 독립 매치업에 대한 유효성 검사 결과. 산점도는 MCC와 부이(왼쪽), 부이와 MCC가 검출한 얼음 운동의 X-(중앙)와 Y-속도(오른쪽) 차이의 X-와 Y-성분을 비교

4) NSIDC 해빙 이동장 자료와 비교

- 개선된 MCC 방법으로 제작된 고해상도 해빙 이동장 자료와 다른 공간해상도를 가진 자료와의 차이를 분석하기 위해 NSIDC에서 제공하는 sea ice motion 자료 비교
- 다음 그림은 만들어진 고해상도 해빙 이동장 자료와 NSIDC 자료를 동시에 나타냈으며, NSIDC 자료를 기준으로 MCC algorithm이 빠른 이동속도(그림 상단, 8 cm/s 이상)와 느린 이동속도(그림 하단, 1 cm/s 근처) 모두 유사한 이동속도를 구현함

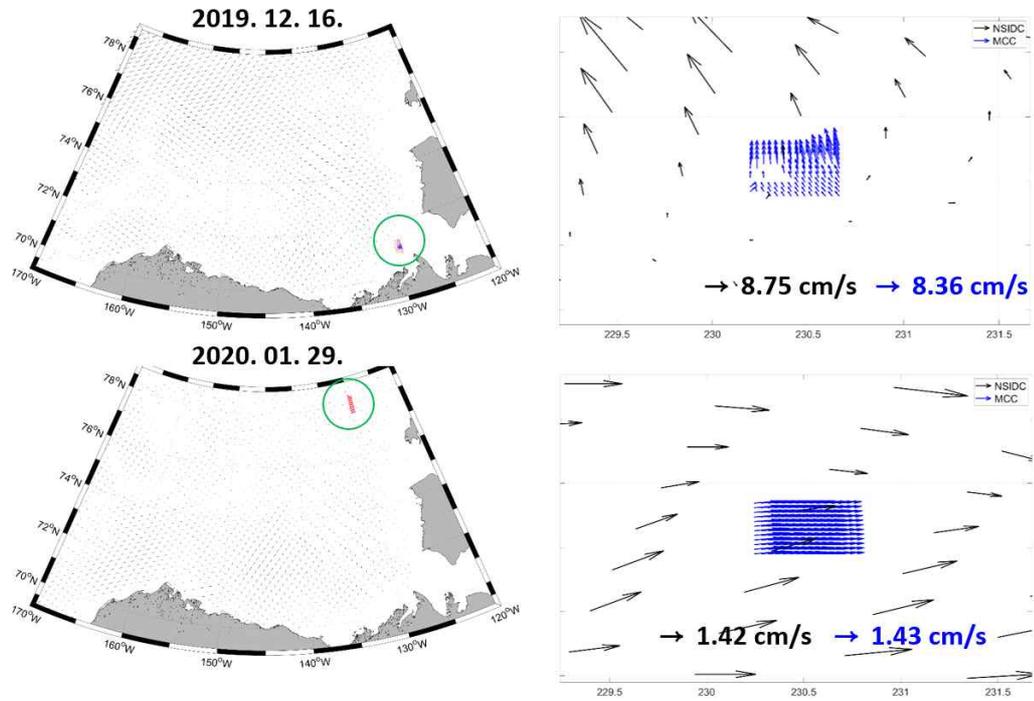


그림 3-1-34. NSIDC 및 MCC의 MCC 알고리즘 및 해빙 움직임 벡터에 의한 결과 위치

- 부이 자료와 마찬가지로 NSIDC 자료를 가장 가까이 있는 MCC algorithm 결과와 비교 수행. 다음 그림과 같이 NSIDC 자료와의 비교 결과 또한 0.9 이상의 R-value을 나타냄

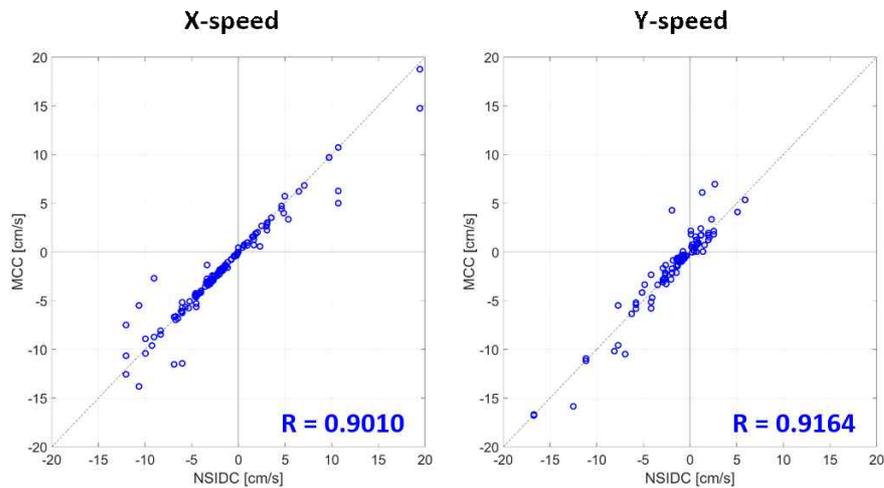


그림 3-1-35. NSIDC와 MCC에서 검출한 해빙 유동의 X-(중심)와 Y-속도(오른쪽) 비교 결과

- 본 연구를 통해 개발된 고해상도 해빙 유동 자료와 NSIDC 자료 비교에서 이동 속도

상대적 작은 경우에는 두 위성에서 추정된 값이 유사하게 나타나지만, 속도가 증가하면 상대적으로 정확도가 낮아지고 이런 현상들은 해상도 차이에서 영상간 이동 추적이 달라지면서 차이 발생

- 북극해에서 해빙의 이동 속도가 증가되는 계절이나 해역에서는 저해상도 영상을 활용하기 보다는 고해상도 영상을 활용하여 해빙 유동을 추적하는 것이 효과적인 것으로 사료됨
- 개선된 MCC 방법은 기존 위성 NSIDC 위성 자료와 높은 상관을 보이는 경우도 있지만, 다음 그림에서와 같이 NSIDC 위성 자료와 정확도가 감소하는 경우로 정확도 낮은 경우도 발생

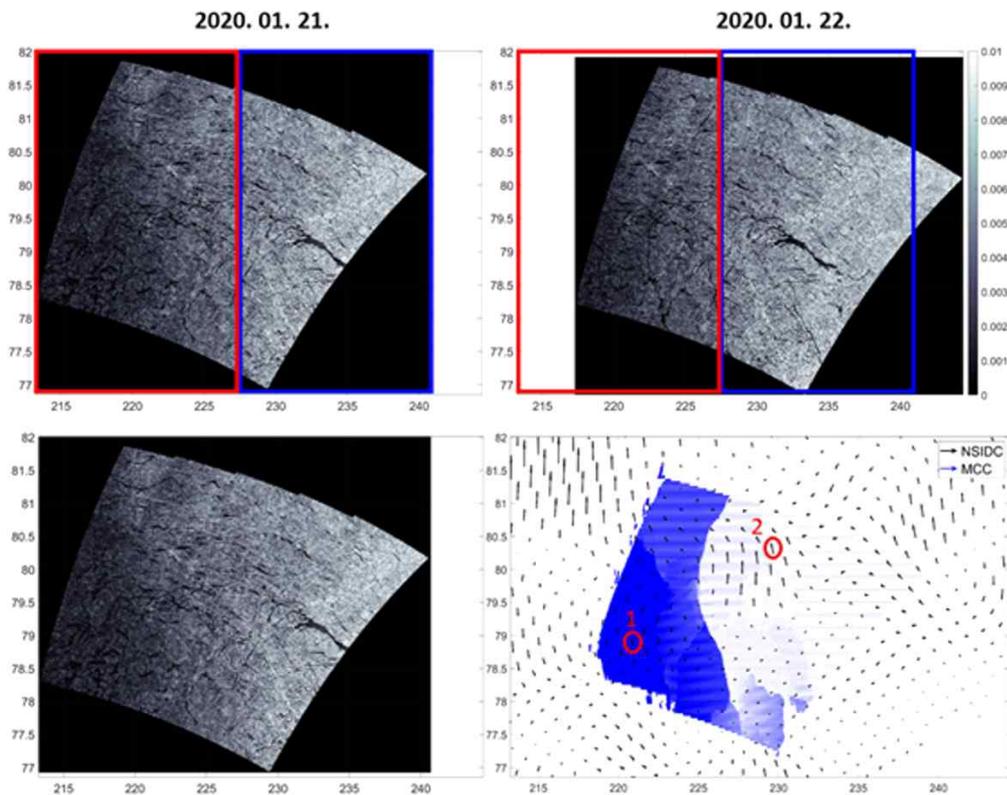


그림 3-1-36. NSIDC와 MCC에서 검출한 해빙 유동 결과 비교

5) 고해상도 위성자료 기반 저해상도 유빙 이동장 계산

- 북극해 관측 부이 자료와 높은 상관관계를 나타내는 MCC 방법을 이용하여 Beaufort Sea에서 고해상도 영상을 활용하여 북극해 해빙 이동장 제작
- 2020년 1월 22일과 24일에 관측된 영상을 기반으로 해빙의 움직임을 추출

- 해빙의 움직임은 크게 고위도에는 움직임이 적은 해빙과 연안 가까이에서 빠르게 움직이는 해빙을 포착하여 유동장 제작
- 다음 그림과 같이, 고해상도 영상을 기반으로 10 km, 25 km, 62.5 km 해상도를 제작을 시도했고, 고해상도 기반으로 사용했기 때문에 저해상도 해빙 이동장 제작은 적합한 것으로 사료됨. 25 km 해상도는 NSIDC 제공하는 해상도이고, 62.5 km는 OSI SAF에서 제공되는 해상도 각각 제작함

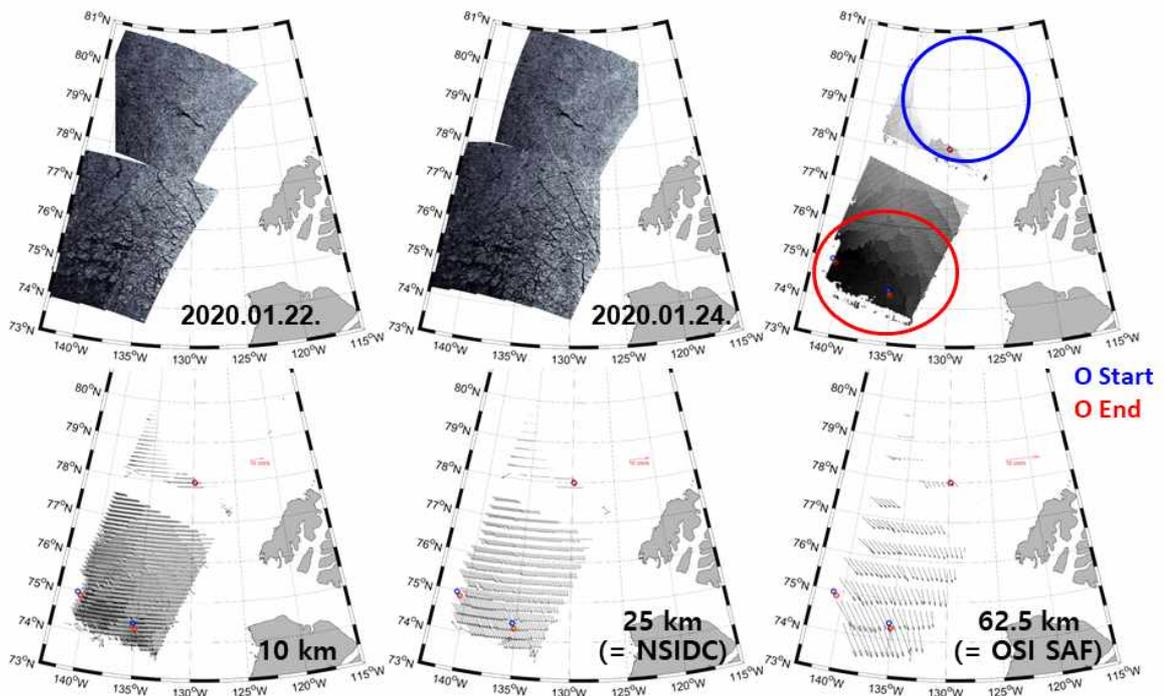


그림 3-1-37. Beaufort 해역에서 서로 다른 해상도 해빙 이동장 생산

- 북극 해빙의 이동 특성은 북극의 환경 변화를 지시하는 중요한 요인 중 하나로 평가되고 있고, 이는 북극의 환경 변화뿐만 아니라 전 지구적인 기후 변화를 분석하는데도 영향을 줄 것으로 사료됨
- 본 연구에서는 북극 해빙의 이동 특성을 세밀히 구현하기 위해 40 m 급 공간 해상도의 위성 관측 자료인 Sentinel-1 SAR 자료를 사용하여 고해상도 해빙 이동장을 구현하고 검증 연구 수행
- 북극해에서 총 732개의 결과를 토대로 IABP의 부이자료 및 NSIDC 자료와의 validation 및 비교를 수행
- Beaufort Sea에서 MCC algorithm에 의해 추출된 고해상도 sea ice motion 자료는

validation을 위한 부이 자료와의 비교에서 0.9 이상의 R-value를 보임

- NSIDC 위성자료와 비교에서 시계 방향의 gyre에 의해 연안에서의 강한 서쪽 흐름이 많이 나타나는 Beaufort Sea에서 이동하는 해빙의 움직임이 잘 재현되었고, 북극해 전 해역에서 해빙의 움직임을 잘 모의한 것으로 사료됨
- MCC algorithm을 사용한 고해상도 sea ice motion와 각 자료의 높은 상관성은 기존에 제공되는 저·중해상도 sea ice motion 자료의 공간적 한계를 보충할 수 있을 것으로 됨
- 본 연구에서는 NSIDC 자료와의 비교를 위해 일별로 계산된 MCC algorithm 결과만을 사용하여 대조군의 수가 감소하였지만(121 cases) NSIDC 자료를 사용한 particle tracking 등을 통해 구현된 수 일 간의 이동거리를 바탕으로 한다면 보다 많은 비교 자료를 획득할 수 있으며, 더 정확한 해빙 이동벡터를 추출할 수 있을 것으로 사료됨
- 그러나 시간에 따라 용해되거나 non-rigid motion을 보일 수 있는 북극 해빙의 특성상 잘못된 해빙 이동벡터 추출을 보완하기에는 좀 더 많은 연구를 수행해야 할 것으로 사료됨

○ 북극해 장기 해빙 유동장 구축 (위탁)

가. 북극해 해빙 유동장 변화 분석

1) 위성과 현장관측 부이 자료 활용 월별 시계열 자료 분석

- 북극해에서 해빙 이동 속도 분석을 위해 위성과 현장관측 부이에서 관측된 일일 자료를 이용하여 월별 평균 합성장을 계산하여 분석 수행
- 각각의 월평균 자료는 1980년부터 최근까지 평균 자료에 대해서 시/공간 합성장에서 평균값과 detrend한 자료를 이용하여 선형경향 분석 수행

2) 북극해 해빙의 평균 이동속도 변화

- 북극해의 해빙 이동 속도는 지속적으로 증가 경향을 나타내고, 특히 현장 부이 관측 자료에서 상대적으로 높게 나타남
- 다음 그림과 같이 위성에서 관측된 해빙 월평균 자료에서 이동속도는 +0.41 cm/s/decade 이고, detrend한 자료에서 + 0.41 cm/s/decade로 유사한 결과를 나타냄

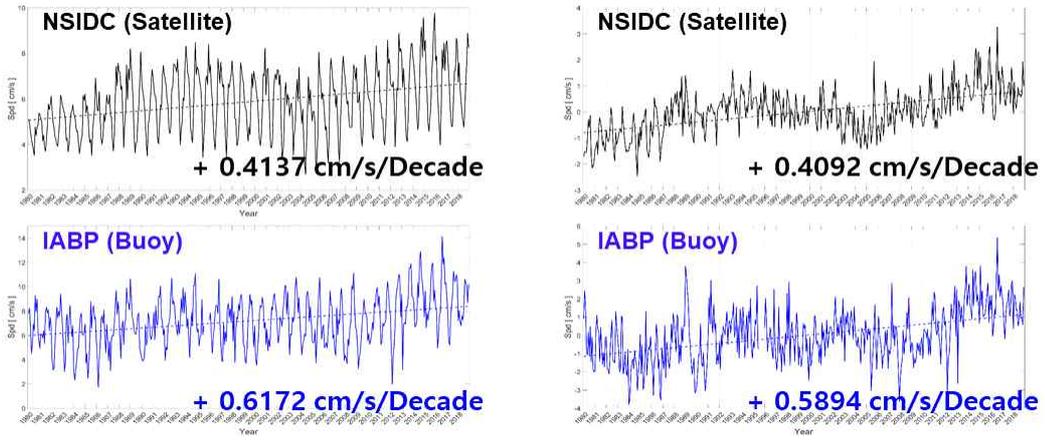


그림 3-1-38. 북극해 위성 및 현장자료의 유빙 이동속도 변화. (오른쪽) 선형경향 변화, (왼쪽) detrend한 자료의 경향 변화

- 다음 그림은 위성과 현장 관측 부이 자료에서 5개월 running-mean한 자료를 이용하여 20년, 15년 그리고 10년 전/후의 이동속도 변화 결과임

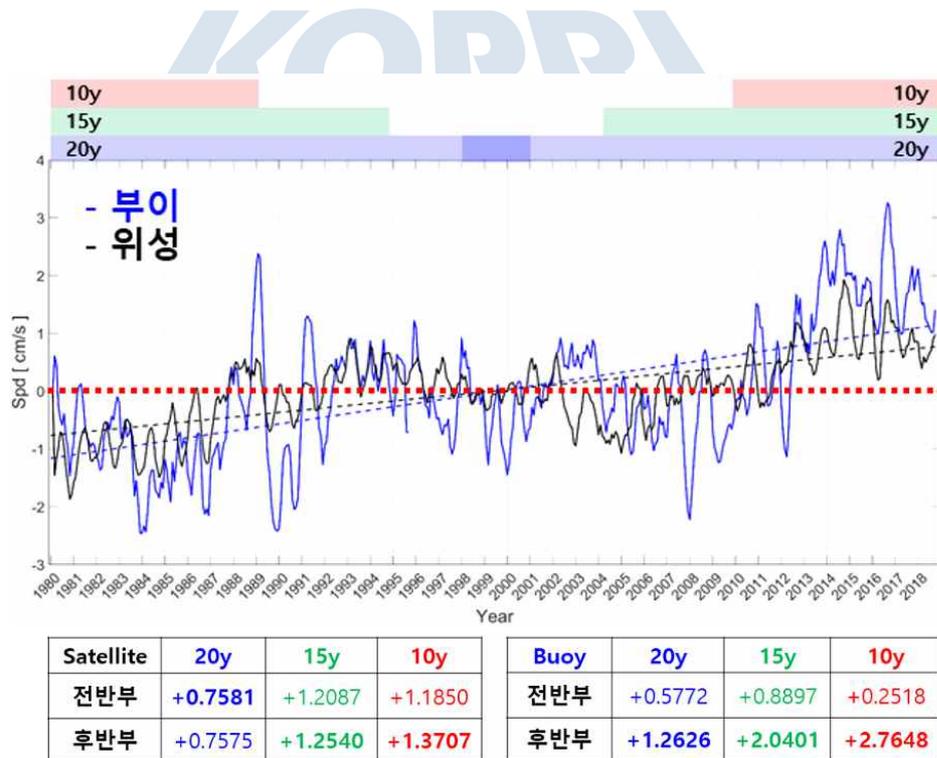
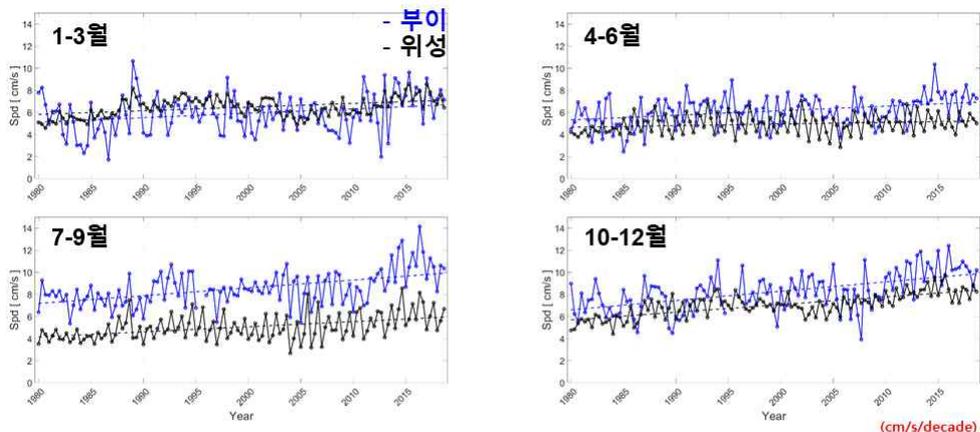


그림 3-1-39. 위성과 현장 관측 부이 자료의 시계열 선형 경향 분석

- 위성 관측 자료는 과거 20년 평균속도는 +0.76 cm/s/decade, 최근 20년 평균속도는 +0.76 cm/s/decade로 유사한 증가를 경향을 보였고, 과거 15년 평균속도는 +1.21 cm/s/decade, 최근 15년 평균속도는 +1.25 cm/s/decade로 상대적으로 최근에 증가하

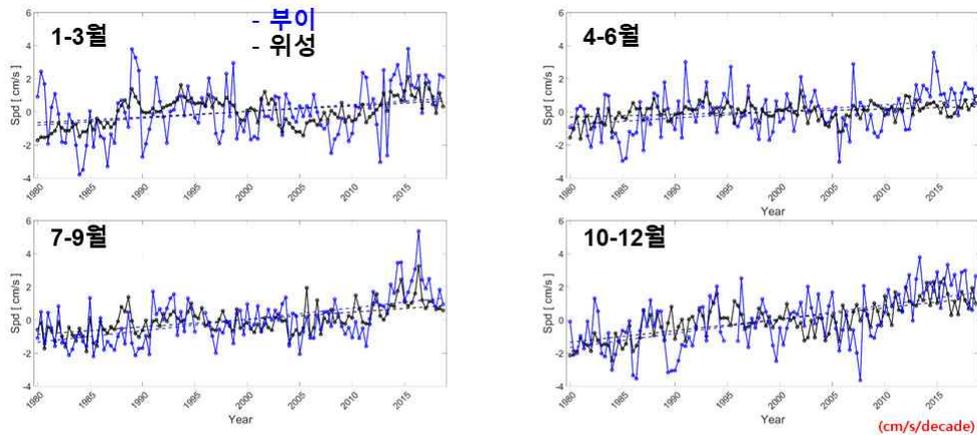
는 경향을 나타내고, 과거 10년 평균속도는 +1.16 cm/s/decade, 최근 10년 평균속도는 +1.37 cm/s/decade로 상대적으로 최근에 해빙의 이동속도가 증가한 경향을 나타냄

- 현장 관측 부이 자료는 과거 20년 평균속도는 +0.58 cm/s/decade, 최근 20년 평균속도는 +1.26 cm/s/decade로 최근에 급격한 이동속도 증가를 나타냈고, 과거 15년 평균속도는 +0.89 cm/s/decade, 최근 15년 평균속도는 +2.04 cm/s/decade로 상대적으로 최근에 증가하는 경향을 나타내고, 과거 10년 평균속도는 +0.25 cm/s/decade, 최근 10년 평균속도는 +2.76 cm/s/decade로 최근에 해빙의 이동속도가 급격하게 증가한 경향을 나타냄
- 위성과 현장관측 자료 모두에서 연구기간 전반부보다는 후반부에서 해빙의 이동속도가 급격한 증가를 나타냄
- 본 연구에서 분석된 위성과 현장 관측 자료의 해빙 이동 속도 차이가 발생하고 이런 문제점은 계절별 이동속도 차이가 발생하는 것으로 분석됨
- 다음 두 그림과 같이 위성과 부이에서 관측된 해빙 월평균 이동속도를 이용하여 계절별 속도 비교를 위해 계절별 변화를 분석하기 위해 1월부터 시작하여 3개월씩 분리하여 해빙의 이동속도를 계산했고, 평균 자료 역시 detrend한 자료도 동일하게 계절별 해빙 이동 속도 변화를 분석함



선형경향	1월~3월	4월~6월	7월~9월	10월~12월
부이	+0.53	+0.55	+0.94	+1.12
위성	+0.44	+0.20	+0.62	+0.93

그림 3-1-40. 북극해에서 위성과 현장 관측 부이에서 관측된 해빙 이동 속도의 계절 변화 분석



선형경향	1월~3월	4월~6월	7월~9월	10월~12월
부이	+0.55	+0.53	+0.92	+1.14
위성	+0.45	+0.22	+0.59	+0.92

그림 3-1-41. 북극해에서 위성과 현장 관측 부이에서 관측된 해빙 이동 속도의 detrend한 계절 변화 분석

- 위성에서 관측된 계절별 해빙 이동 속도 변화는 1월-3월: +0.44 cm/s/decade, 4월-6월: +0.24 cm/s/decade, 7월-9월: +0.64 cm/s/decade, 10월-12월: +0.93 cm/s/decade로 4월-6월 동안 해빙 이동 속도가 가장 낮고, 10월-12월에 해빙 이동속도가 증가됨
- 현장 관측 부이에서 관측된 계절별 해빙 이동 속도 변화는 1월-3월: +0.53 cm/s/decade, 4월-6월: +0.55 cm/s/decade, 7월-9월: +0.94 cm/s/decade, 10월-12월: +1.12 cm/s/decade로 1월-6월 동안 해빙 이동 속도가 상대적으로 감소하고, 10월-12월 동안 해빙 이동 속도는 증가됨
- 결과적으로 하계의 해빙 이동 속도는 위성 자료가 부이 자료보다 평균이하로 감소되고 동계의 해빙 이동속도는 역시 부이 자료보다 높아짐
- 위성에서 관측된 detrend한 계절별 해빙 이동 속도 변화는 1월-3월: +0.45 cm/s/decade, 4월-6월: +0.22 cm/s/decade, 7월-9월: +0.59 cm/s/decade, 10월-12월: +0.92 cm/s/decade로 4월-6월 동안 해빙 이동 속도가 가장 낮고, 10월-12월 동안 해빙 이동 속도는 증가됨
- 부이에서 관측된 detrend한 계절별 해빙 이동 속도 변화는 1월-3월: +0.55 cm/s/decade, 4월-6월: +0.53 cm/s/decade, 7월-9월: +0.92 cm/s/decade, 10월-12월: +1.14 cm/s/decade로 1월-6월 동안 해빙 이동 속도가 상대적으로 감소하고, 10월-12월 동안 해빙 이동속도는 증가됨
- 북극해에서 위성과 현장 관측 부이에서 관측된 해빙의 계절별 이동 속도 변화는 평균

변화와 detrend한 평균 변화에서 유사한 변화를 나타냈지만, 위성에서 관측된 해빙 이동 속도 변화에서 4월-9월 동안 해빙 이동 속도는 현장 관측 부이 자료와 비교하여 상대적으로 낮게 추정되는 되면 위성에서 발견된 해빙의 이동 속도의 과소 추정은 하계의 문제로 추정됨

- 북극해에서 현장 관측 부이에서 관측된 해빙의 계절별 이동속도 변화는 4월-6월 동안 해빙 이동 속도는 상대적으로 증가되었고, 7월-9월 동안에는 1.5-2배 이상의 높은 평균 이동속도를 나타내고, 이런 위성과 현장 관측 부이간 차이는 1월-3월 동안에 감소되어짐
- 위성과 현장 관측 부이의 detrend한 해빙의 평균 이동속도 변화에서 위성자료는 상대적으로 낮은 증/감소 경향을 나타내고 있지만, 부이자료는 상대적으로 극값이 증가 경향으로 높은 증/감소 경향을 나타냄
- 북극해에서 위성과 현장 관측 부이 모두 자료에서 해빙의 이동 속도는 1월-6월 동안은 상대적으로 감소하고 10월-12월 동안 동계 시기에 증가하는 것으로 분석됨
- 이런 결과는 Rampal et al.(2009) 연구에서 제시된 하계(6월-9월)가 동계(12월-5월)보다 이동 속도가 증가하는 연구 결과와 비교 차이를 나타내지만, Spreen et al.(2011) 연구에서 제시된 동계(10월-5월)의 해빙 이동 속도 증가 경향과는 유사한 결과를 보임

나. 북극해 해빙 유동장 정확도 분석

1) 북극해 위성과 현장 관측 부이간 이동 속도 차이 분석

- 위성과 현장 관측 부이 자료에서 이동 속도의 차이를 분석하기 위해 1980년부터 연구 기간 동안 이동속도 차이를 구분하여 어떤 변화를 보이는지 분석
- 다음 그림과 같이 전체 자료 중에서 현장 관측 부이 자료가 높게 나타나는 월 자료는 315개이고, 위성 자료가 높게 나타나는 것은 153개로, 현장 관측 부이 자료가 위성 관측 자료보다 높게 나타남

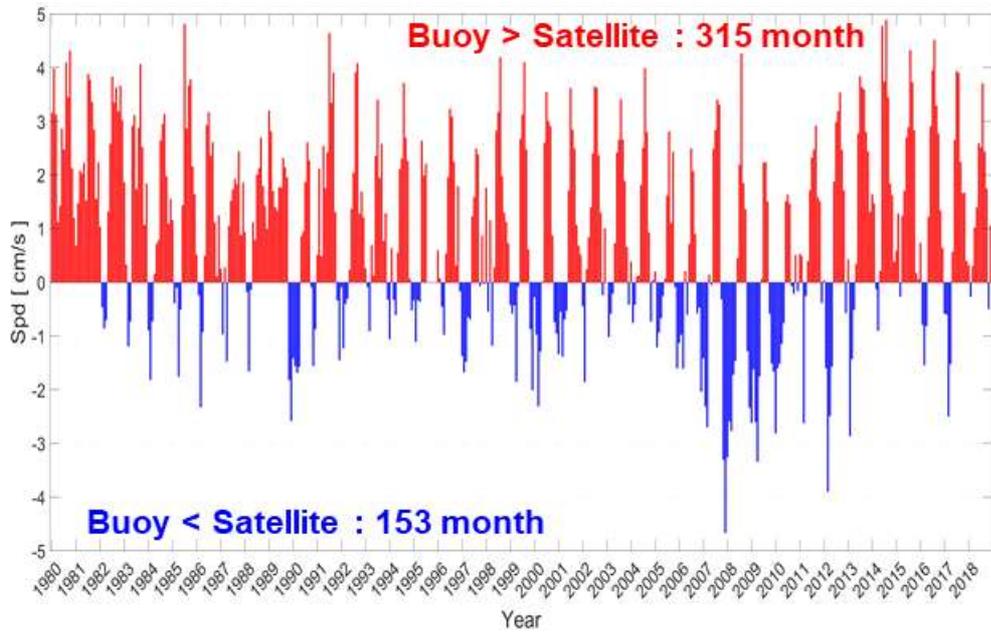


그림 3-1-42. 위성관측 자료와 현장 관측 부이 자료에서 상대적으로 높게 발생하는 시기 비교

- 현장 관측 부이 자료가 높게 나타난 시기의 해빙의 평균 이동 속도는 1.98 cm/s이고, 위성 자료가 높게 나타난 시기의 해빙의 평균 이동 속도는 1.11 cm/s로, 부이 관측 자료가 상대적으로 높게 나타남
- 위성과 현장 관측 부이 자료간 해빙 평균 이동 속도 차이가 발생하는 원인을 분석하기 위해 계절별 발생 차이를 분석
- 다음 그림과 같이 위성과 현장 관측 부이 자료간 계절별 차이는 4월부터는 현장 관측 부이의 자료수가 증가되고 6월부터는 위성 관측 자료가 높아지는 것은 없으며, 9월부터 점진적으로 위성에서 관측된 자료수가 증가됨

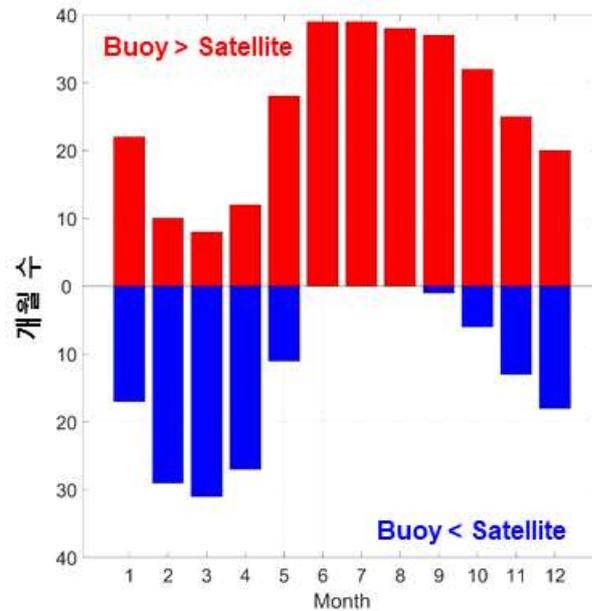


그림 3-1-43. 위성 자료와 현장 관측 부이 자료간 계절별 차이 발생 비교

- 이런 결과는 북극해에서 해빙농도가 감소되는 시기에 상대적으로 부이에서 관측된 해빙 이동속도는 증가되지만 위성에서 관측된 해빙 이동속도는 상대적으로 낮아지는 것으로 보임
- 위성과 현장 관측 부이 자료간 문제점을 파악하기 위해 2017년부터 2018년까지 부이 관측 영역에서 두 위성(NSIDC, OSISAF)에서 관측된 해빙의 평균 이동 속도를 비교함
- NSIDC 위성은 25 km 공간해상도이고, OSISAF 자료는 62.5 km 공간해상도를 가지는 자료이고, 부이 관측 자료는 2017년은 167개 자료와 2018년은 270개 자료를 이용하여 북포트 해역을 대상으로 분석함
- 다음 그림과 같이 위성과 현장 관측 부이 자료에서 해빙의 이동속도는 3월과 4월에 감소하고 하계 및 추계에 증가하는 경향을 나타냄

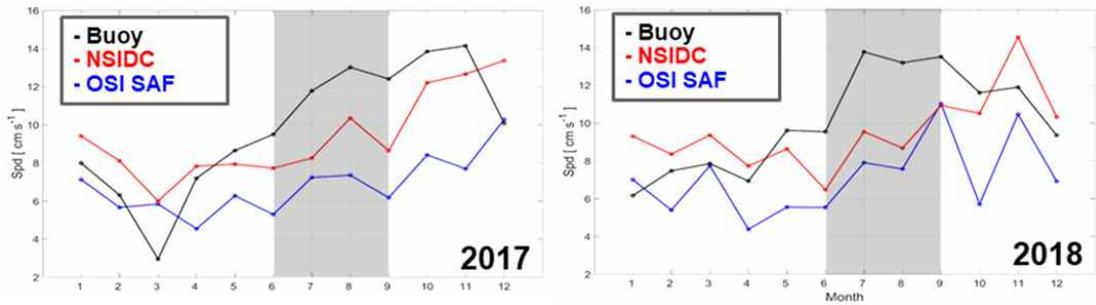


그림 3-1-44. 실측자료와 위성관측자료(NSIDC와 OSISAF)간 비교

- 1월부터 4월까지는 현장 관측 부이 자료가 NSIDC 위성 자료보다 상대적 감소하고, 4월 이후에는 현장 관측 부이의 이동 속도는 상대적으로 증가되어짐
- OSISAF 자료는 연구기간 전반에 걸쳐 현장 관측 부이나 NSIDC 자료보다 상대적으로 낮게 계산됨
- 위성과 현장 관측 부이 자료에서 계절적으로 6월부터 9월까지 해빙 이동 속도 변화는 현장 관측 부이에서 관측된 값이 두 위성 자료보다 상대적으로 높게 계산되고, NSIDC 관측값이 OSISAF 자료보다 높게 추정됨
- 특히 NSIDC 해빙 이동속도는 11월-12월 동안에 현장 관측 부이보다 빠른 해빙 이동 속도를 나타냄
- 위성에서 관측된 해빙 이동 속도 변화 중에서 하계 위성에서 관측된 자료의 감소 현상을 분석하기 위해 다음 그림과 같이 부이, 위성 및 해빙농도 월평균 자료를 이용하여 변화를 분석함

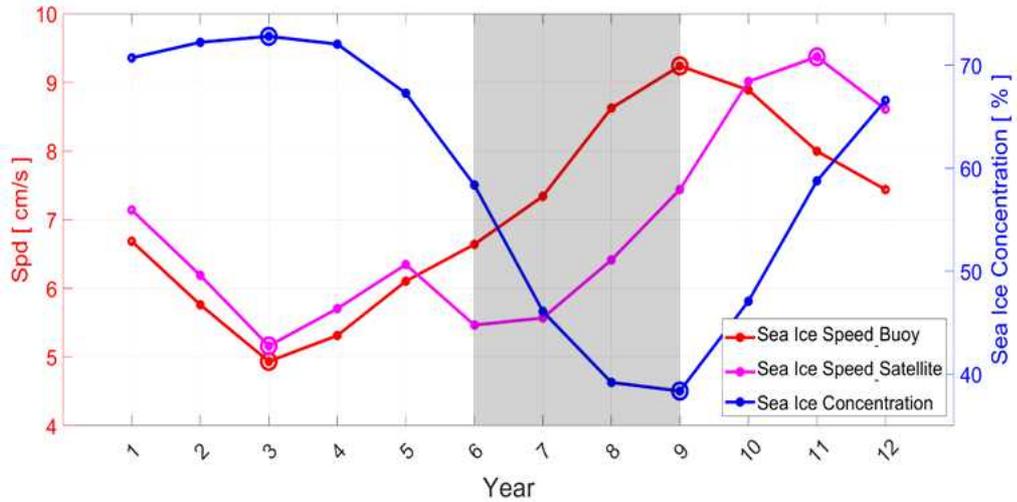


그림 3-1-45. 월별 위성, 현장 및 SIC 간의 관계(위성자료에서 하계 이동속도 감소 현상 발생)

- 북극해에서 해빙 이동 속도 변화는 해빙농도 감소 시기에 위성에서 관측된 자료에서 문제점 발생(과소추정) 했고, 해빙의 감소로 경계면 구분을 위한 정확도가 낮아짐(위성 해상도 문제, ~25 km)
- 월평균 해빙 이동속도 자료에서 1월-5월 동안 위성과 현장 관측 부이 자료는 유사한 경향을 나타내지만, 해빙농도가 감소하는 6월부터 현장 관측 부이의 해빙 이동 속도는 점진적으로 증가하지만 위성 해빙 이동 속도는 감소하여 다시 증가하는 경향을 보임
- 특히 해빙농도가 낮아지는 시기에 위성과 현장 관측 부이간 해빙 이동속도 차이는 크게 발생하고, 이런 차이는 해빙농도가 증가하면서 감소됨
- 이런 차이를 발생시키는 원인으로 현장 관측 자료의 경우 공간적 분포가 위성자료보다 낮기 때문으로 예를 들면 2014년 경우 IABP 부이 관측 자료는 530개 이지만 북극 전역을 대표하기는 힘들지만 위성 자료의 경우 2014년 전체 평균 결과는 북극 전체를 나타내고 있기 때문으로 사료됨
- 부이 관측 자료는 지해역 연구에 유용하지만 다음 그림에서 보이듯이 북극해 전해역에 대한 자료를 이용하기에는 공간적 분포의 한계가 있음

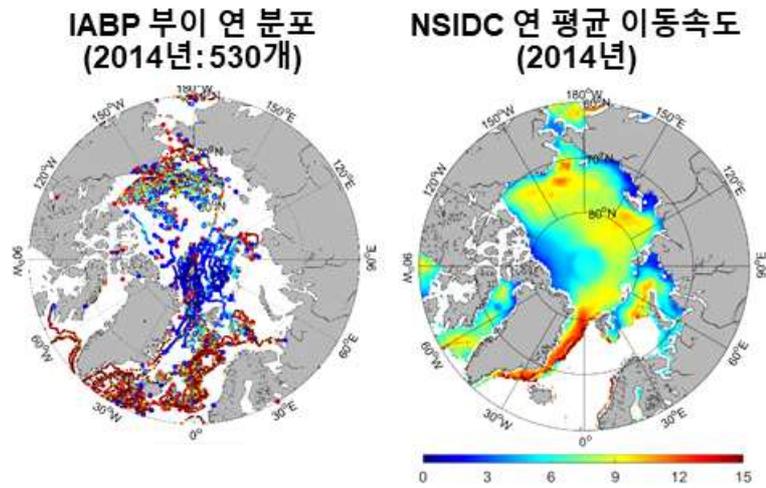


그림 3-1-46. 위성과 부이 관측 자료간 공간적 차이

- 위성 자료 역시 실측 관측 자료와 비교하여 감소하는 경향을 보이는 문제점이 있기 때문에 북극해 전역 연구에도 문제점이 있지만, 최근 연구에서 장기 자료 분석을 위해 활용되고 있음(Dai et al., 2006; Miller et al., 2006; Sumata et al., 2014)
- 최근 연구들은 위성관측 자료가 가지는 한계에도 불구하고 모델 검증자료 및 입력 자료로 사용되고, 장기 변화 분석 및 이동속도에 영향을 미치는 외부 요인 분석에 사용되고 있음

다. 북극해 해빙 유동장 변화 요인 분석

1) 북극해 위성활용 해빙 이동속도 주제도 제작 및 경향 분석

- 해빙 이동 속도 계절 변화에서 1월-4월 기간은 해빙의 이동 속도는 대서양에서 증가되어 지고, 5월-8월 기간은안 전해역에서 균일하게 증가되어 지고, 9월-12월 기간은 태평양으로 유출되는 보퍼트 해과 대서양으로 유출되는 Fram Strait에서 해빙 이동속도 증가
- 북극해 전해역의 유빙 이동 속도(+0.32 cm/s/decade)이지만 Beaufort Sea는 평균 +1.12 cm/s/decade로 평균보다 3배 이상 높은 것으로 분석됨
- 북극해 해빙 이동 속도는 태평양과 대서양으로 유출되는 두 해역을 제외하면 gyre가 존재하는 보퍼트 해에서 상대적으로 높게 나타남
- 위성 관측 자료에서 해빙의 이동속도 변화는 3월에 최소가 되고, 11월에 최대를 나타냄

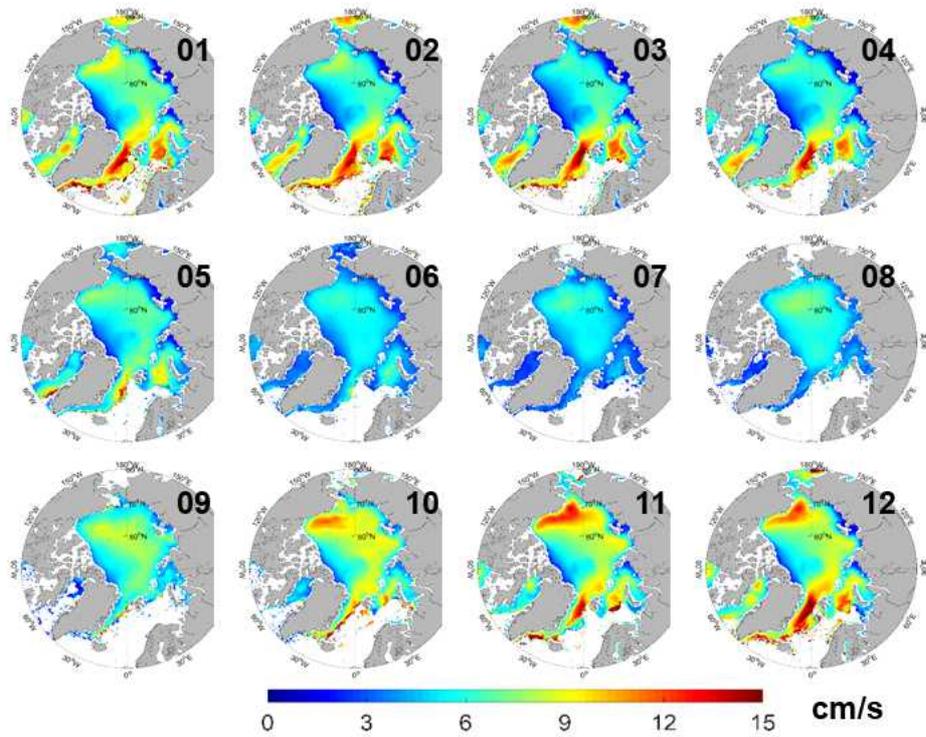


그림 3-1-47. 북극해 계절별 해빙 이동 속도 변화

- 북극해 평균 해빙 이동 속도 변화 분석 결과 전반부보다 후반부로 갈수록 유빙 이동 증가 현상 발생
- 북극해 해빙 이동 속도 최대 증가 해역은 보퍼트 해, Fram Strait, Barents Sea로 나타남
- 과거 10년 평균과 최근 10년 평균 해빙 이동 속도 비교에서 북극해는 전 해역에서 해빙 이동속도가 증가한 것으로 분석됨
- 이런 변화는 최근 지구 온난화에 따른 해빙농도 감소와 밀접한 연관이 있는 것으로 사료됨

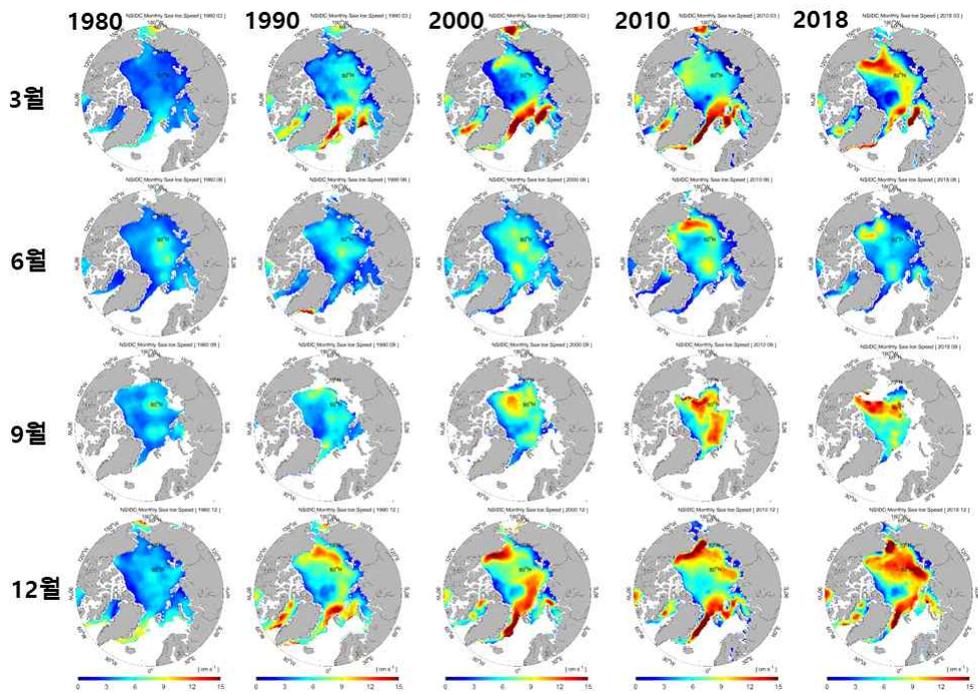


그림 3-1-48. 북극해 1980년부터 10년 단위 해빙 이동 속도 변화

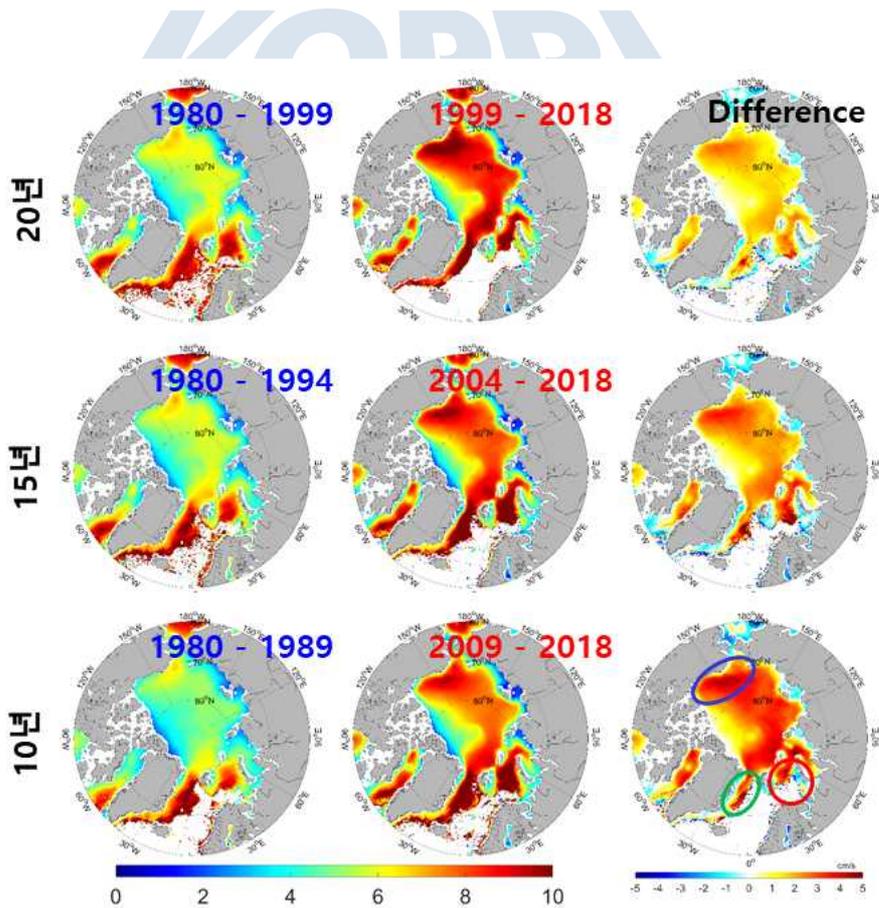


그림 3-1-49. 북극해 평균 해빙 이동속도 변화(20/15/10년 기준)

2) 북극해 위성활용 해빙 이동속도 변화 요인

- 북극해에 분포하는 해빙은 점점 얇아지고 있으며, 해빙의 이동 속도는 지속적으로 빨라지고 있으며, 지난 30년 간 북극의 하계 해빙 면적은 6,000,000 km² 이상에서 4,000,000 km² 이하로 감소했으며, Fram Strait를 통해 대서양으로 유출되는 해빙의 양이 증가하는 등 과거에서 현재로 갈수록 북극해 해빙이 감소하는 경향이 증가되고 뚜렷한 변화를 보임
- 다음 그림과 같이 북극해의 해빙 이동 속도 변화에서 월평균 자료를 이용하여 선형경향을 계산한 결과에서 북극해 전 해역에서 평균 +0.32 cm/s/Decade 증가 현상을 나타냈고, 80°N 이북의 해역보다 저위도인 연안역에서 해빙의 이동 속도가 증가되어 나타남

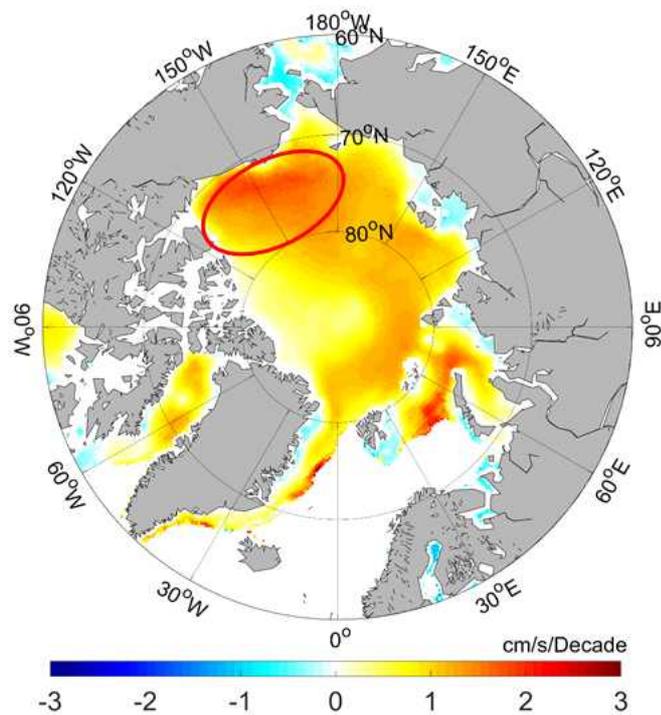


그림 3-1-50. 북극해 해빙 이동속도 선형경향 변화

- 특히 보퍼트 해는 북극해 전역 중에서 가장 빠르게 증가한 해역 중 하나로 평균 +1.23 cm/s/Decade로 평균보다 4배 이상 증가됨
- 북극해에서 해빙의 감소 및 이동 속도 증가는 북극해 환경 변화의 지표로 1950년대부터 현장 관측 자료 분석에서 북극해의 해빙 이동 속도 변화는 지속적으로 증가하는 경향을 나타냈고(Hakinen et al., 2008), 1990년대 이후에 더욱 심화되는 양상을 보였

으며, 1979년부터 2007년까지 동계와 하계의 해빙 이동속도는 각각 +17%/decade, +8.5%/decade의 이동속도 증가율을 보인 것으로 조사됨

- 다음 그림과 같이 1980년부터 관측된 IABP 부이 관측 자료에서 북극해 해빙 이동 속도 변화는 1980년-1989년 기간에 평균 +6.9 cm/s이고, 1990년-1999년 기간에 평균 +7.2 cm/s이고, 2000년-2009년 기간에 평균 +7.6 cm/s 이지만, 그러나 2010년-2019년 기간에는 평균 +10.5 cm/s으로 최근 10년 동안 급격한 상승을 나타냄

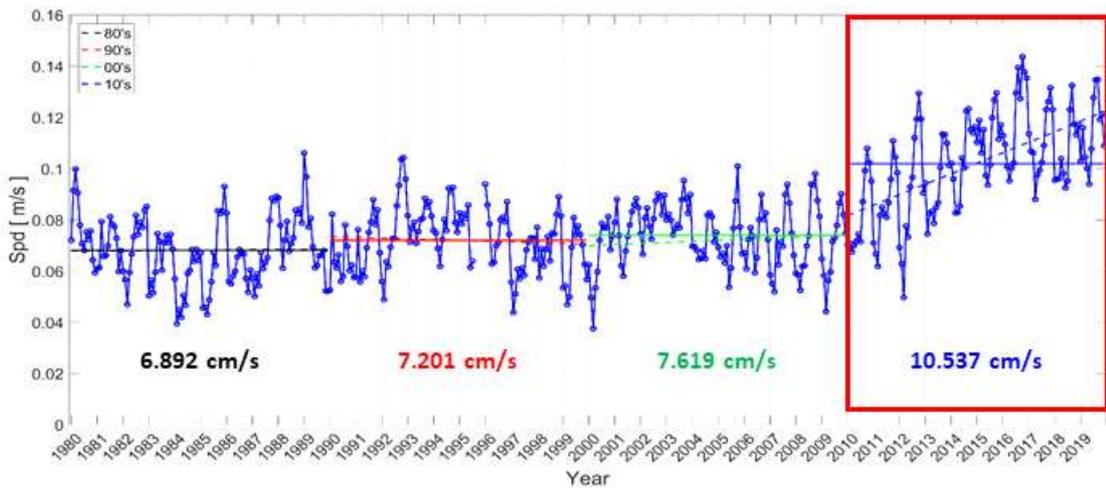


그림 3-1-51. 북극해 부이관측자료를 이용한 해빙 이동속도 변화 분석

극지연구소

- Olason and Notz(2014)는 해빙의 이동 속도 증가는 해빙의 재생성 감소 및 fracture 증가와 연관성이 있는 것으로 분석했으며, Hongwei et al.(2020) 또한 표류부이 관측 자료에서 획득된 결과에서 표면온도(skin temperature)의 상승이 해빙의 이동 속도 증가와 상관성이 있다고 분석됨
- NSIDC 등의 위성 관측 결과에서 추정된 해빙 이동장 분석 결과에서 지난 수십 년간 북극해는 전 해역에 걸쳐 해빙 이동속도가 증가하는 경향을 보이며(+0.6846 cm/s/decade), 특히 보퍼트 해에서 가장 높은 상승세를 보이는 것으로 분석됨
- 원인으로 태평양에서 북극해로 해류가 유입되는 척치 해에서 기온이 낮을수록 해빙의 이동속도가 빨라지는 경향을 냈고, 특히 극점 인근에서는 대부분의 연도에서 기온이 낮을수록 해빙의 이동 속도가 빨라지는 경향을 보이지만, 특정 시기인 2013년에서 2016년에는 보퍼트 해의 캐나다 연안에서 기온이 증가할수록 해빙의 속도가 증가됨
- 본 연구에서 해빙이동 속도와 해빙 밀도간의 상관관계를 살펴보면, 다음 그림과 같이 2010년에서 2012에는 북극해의 극점 인근 해역에서는 상관관계가 음의 값을 나타내지만, 이후에는 극점 인근 해역에서 양의 상관관계를 나타냄

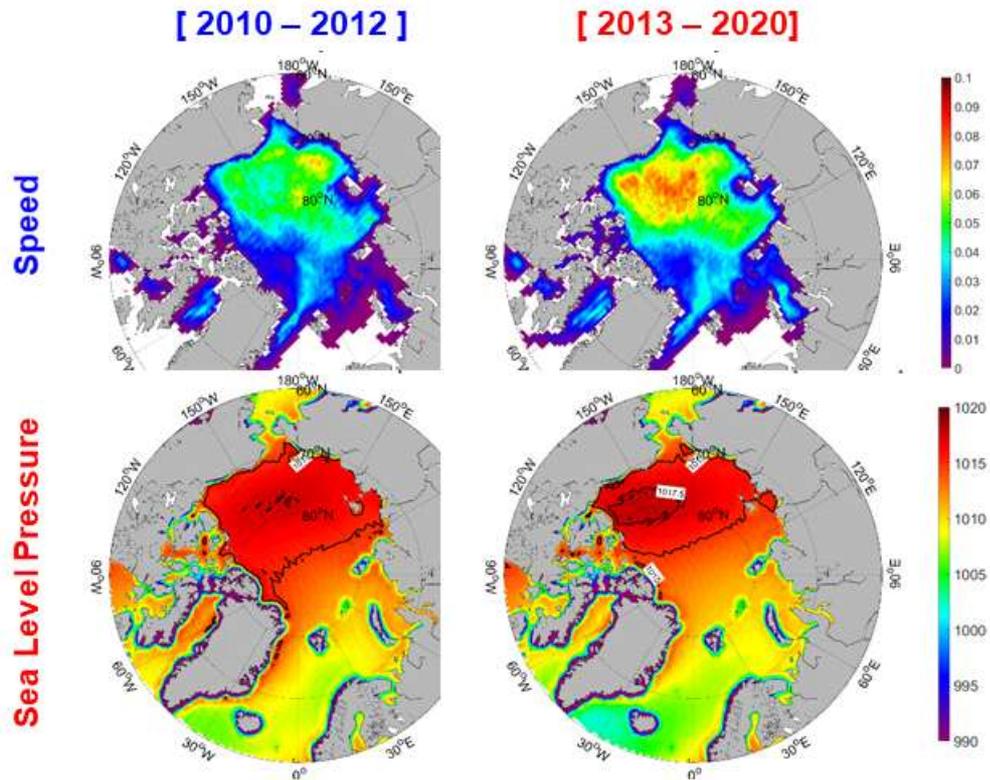


그림 3-1-52. 북극해 해빙 이동속도 변화와 SLP 상관관계 분석

- 북극해의 해빙이 존재하는 해역 중 연안에서의 상관관계가 높게 나타났고, 태평양과의 통로인 척치해에서는 지속적으로 음의 상관관계를 나타냄
- 본 연구에서는 북극진동지수와 해빙 이동속도 변화의 관계를 통해 북극해에서의 해면 기압이 해빙의 이동속도를 변화시키는 요인 중 하나로 분석됨

3. 해빙 리드 (위탁)

○ IceBridge 자료를 활용한 리드 샘플 추출

- ICESat-2를 활용한 리드 탐지를 위하여 고해상도 샘플이 필요하다. 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 리드 육안탐지 및 샘플링을 수행. 해당 영

상은 지난 2019년 4월 및 9월 총 7회에 걸쳐 북극 Greenland 및 남극 지역의 해빙, 고찰빙 등을 관측하였으며, 총 76,397장의 현장사진자료를 기하보정하여 제공 (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 리드를 육안탐지하고, red band의 반사도 특성을 활용하여 샘플링함.
- CAMBOT 항공영상을 육안 판독한 결과, 리드와 해빙을 쉽게 구별할 수 있었으며, 이를 활용하여 RGB영상에 경험적인 임계값을 적용하여서 자동화된 샘플 추출을 수행함. 8비트 RGB 밴드 모두에 75의 임계값을 적용하여 리드에 대한 샘플을 추출함. CAMBOT 광학 영상에서 추출한 리드 분류 영상과 ICESat-2를 중첩시킨 뒤, 총 6,718개의 리드 샘플, 26,541개의 해빙 샘플을 추출함.

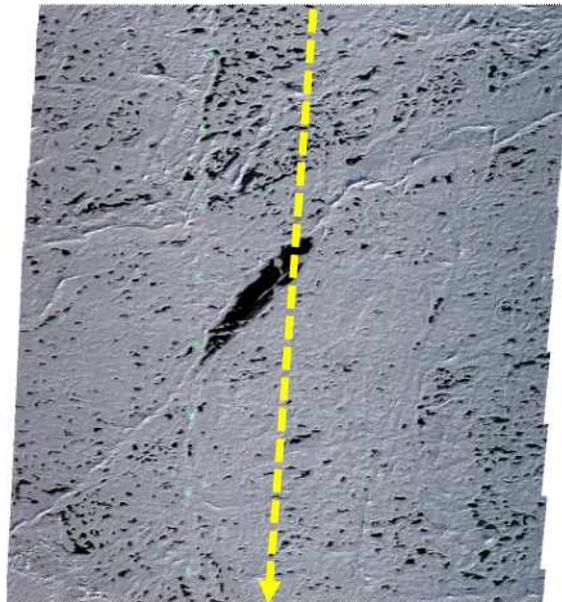


그림 3-1-53. 본 연구에서 활용한 IceBridge의 CAMBOT 항공영상. 노란색 점선은 ICESat-2의 관측 경로

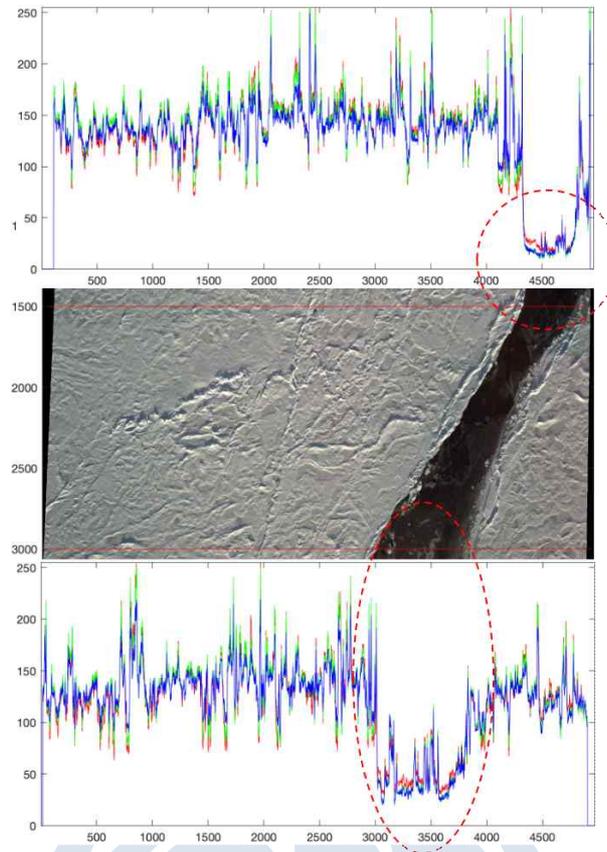


그림 3-1-54. CAMBOT 광학영상의 리드 및 해빙에 따른 RGB 밴드 값 분석. 가운데) CAMBOT 광학영상. 위, 아래) 위도별 RGB 값의 수평 평균값. 각 그림의 빨강, 파랑, 초록 그래프는 각각 8비트의 RGB 밴드 값을 나타냄.

극지연구소

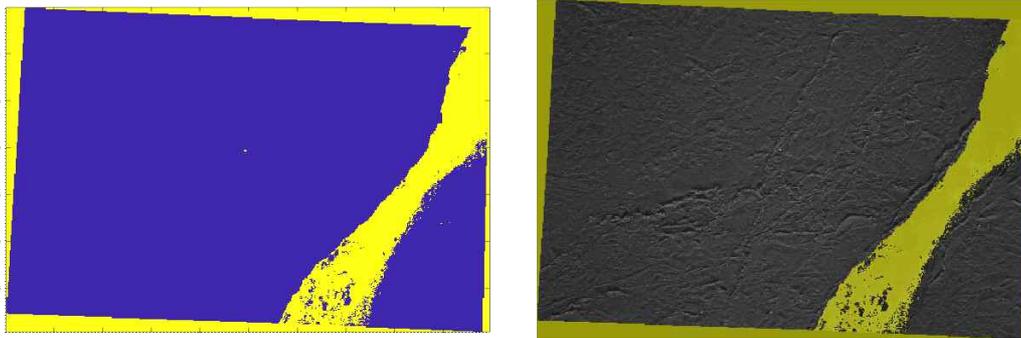


그림 3-1-55. CAMBOT 광학위성으로부터 추출한 리드 레이블. 노란 색은 리드, 파란 색은 해빙을 나타냄.

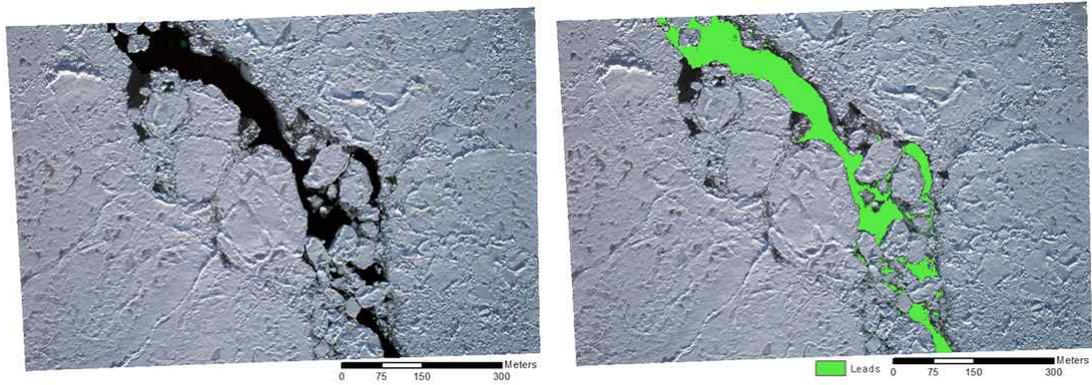


그림 3-1-56. 해빙 리드 육안 탐지 및 샘플링 예시 (CAMBOT 관측자료, 2019. 09. 09. 14:31)

○ 기계학습 기반 리드 탐지 모델 개발

- 북극 해빙 리드 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 리드 탐지에 많이 활용되고 있는 랜덤포레스트(Random Forest) 이진 분류 모델을 활용하여 리드 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 다음 그림과 같으며, 해당 지점의 높이 자체의 값이 가장 낮은 기여도를 보임. 이를 통해 해당 지점 이외의 주변 값을 함께 활용한 변수가 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 보여줌. 이를 통해 긴 길이에 걸쳐 계속 낮은 높이 값을 가지는 것이 리드 탐지에 중요한 지표임을 추측할 수 있음.

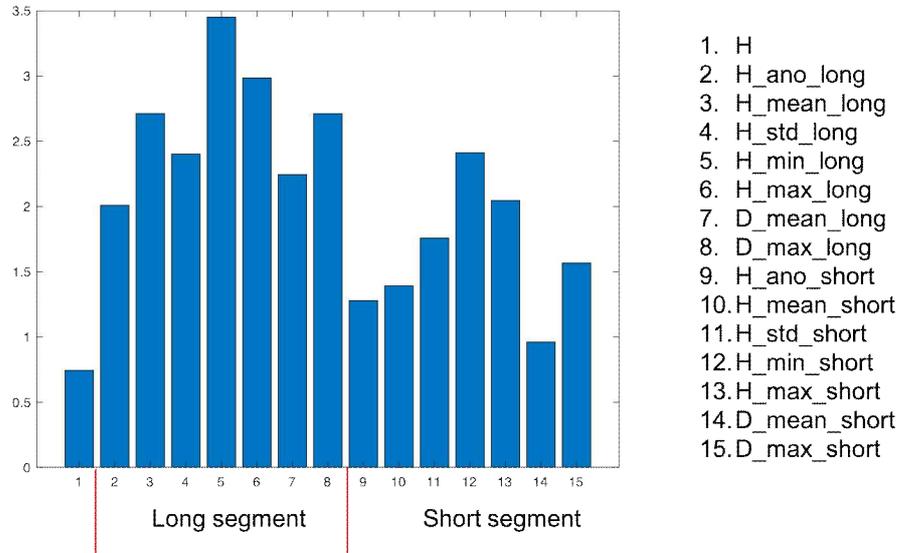


그림 3-1-57. 랜덤 포레스트 모델의 변수 중요도 분석 결과

- 주어진 샘플을 약 1:1 비율로 calibration, validation 샘플로 나눠서 랜덤 포레스트 모델의 분류 정확도를 측정함. Calibration 샘플에 대한 분류 정확도는 100%이며, validation 분류 정확도는 리드 및 해빙에 대해 각각 97%, 99% 이상을 보임. 이를 통해 획득한 샘플에 대해 랜덤 포레스트 모델의 분류 정확도는 매우 높음을 알 수 있음.

RF model performance						
Calibaration			Validation			
Reference		ice	water		ice	water
	ice	13203	0	ice	13310	28
	water	0	3426	water	75	3217
Prediction						

그림 3-1-58. 랜덤 포레스트 모델의 calibration, validation 샘플에 대한 정확도 분석 결과

- 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 달라지는 것으로 나타남. 이는 절대적인 분류 및 오분류된 절대값보다는 그 비율에 따라 달라지는 탐지율 및 오탐지율의 특성상, 영상 내의 리드 비중에 따라 정확도가 크게 달라지는 특성 때문으로 판단됨. 따라서 영상별 탐지

을 및 오탐지율은 참고 자료로만 확인하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 10개의 영상 중 정확도가 높은 영상과 낮은 영상들에 대한 사례 분석을 실시함.

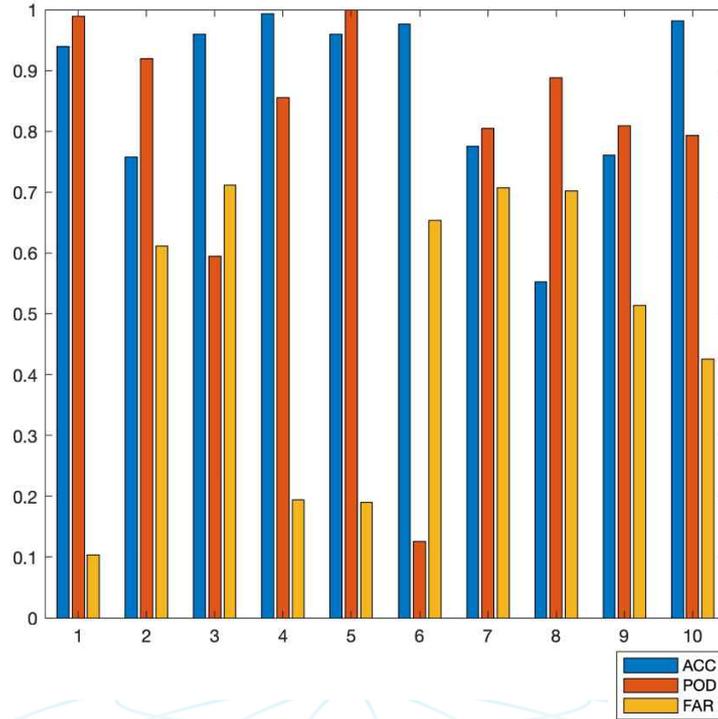


그림 3-1-59. 10개의 CAMBOT 영상에 대응하는 ICESat-2 위성의 리드 탐지 정확도

○ ICESat-2의 리드 및 해빙에서의 특성 분석

- 리드 및 해빙에서의 ICESat-2의 특성을 확인하기 위해 10개의 CAMBOT 영상 중 3가지를 추출하여 분석함. 위에서 분석에 활용한 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.
- 다음 그림은 1번 CAMBOT 영상에 대한 분석으로, 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.

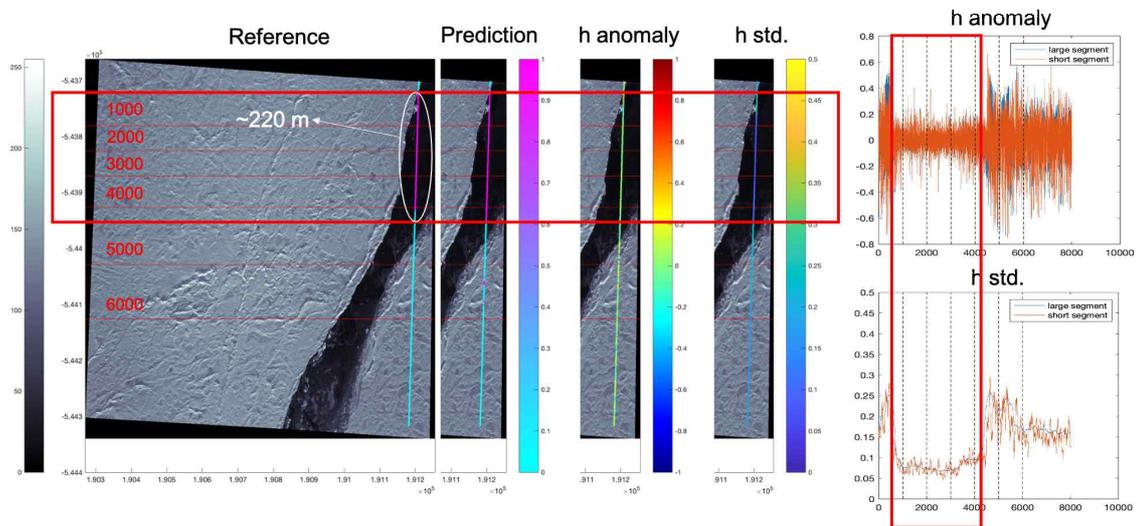


그림 3-1-60. CAMBOT 영상 1번에서의 리드 탐지 및 분석 결과

- 다음 그림은 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 표준 편차가 적은 특성을 보임.

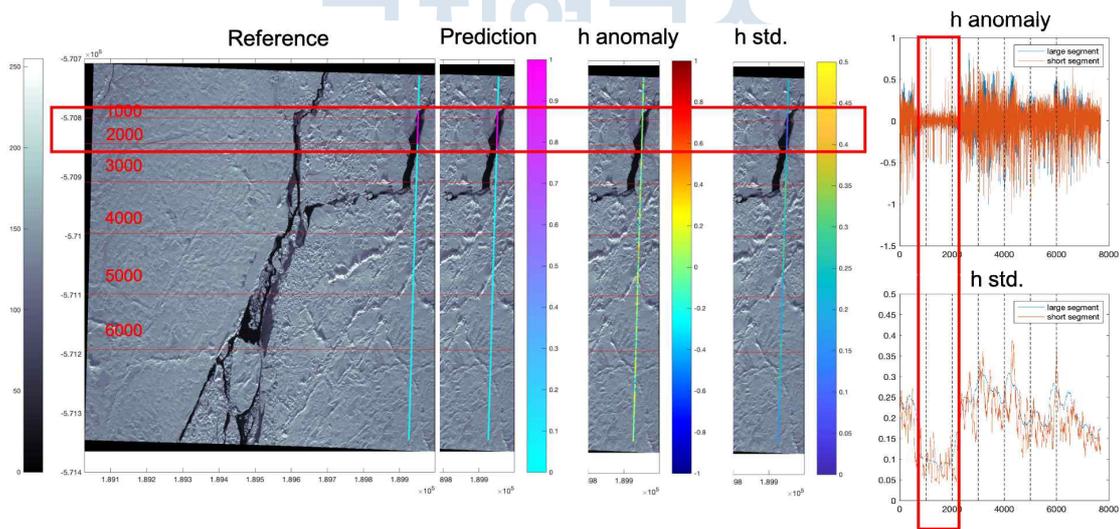


그림 3-1-61. CAMBOT 영상 5번에서의 리드 탐지 및 분석 결과

- 다음 그림은 6번 CAMBOT 영상에 대한 분석 결과로, 해당 영상은 ICESat-2가 지나가는 경로에서 매우 적은 리드 부분을 가지고 있어, 일부의 미탐지 및 오탐지로 인해 낮은 탐지율과 높은 오탐지율이 나타남. 비교적 큰 규모의 리드는 안정적으로 탐지하는 반면, 작

은 규모의 리드에 대해 정확도가 낮으므로 추가적인 작업이 필요할 것으로 보임.

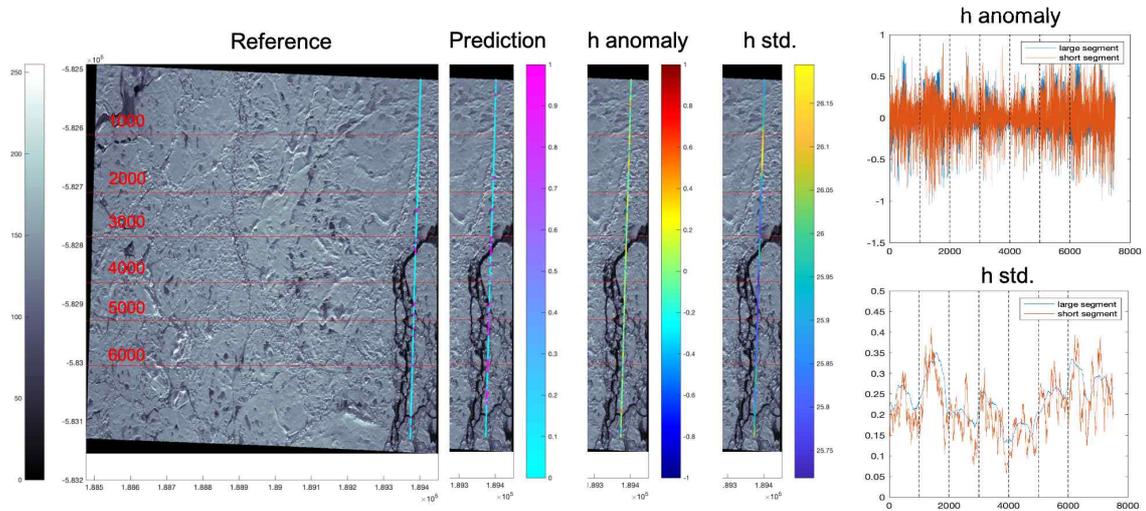


그림 3-1-62. CAMBOT 영상 6번에서의 리드 탐지 및 분석 결과

4. 해빙 변형

○ 해빙 변형 산출, 해빙 유형과의 연동성

- 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 영상레이더 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.

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

- 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.

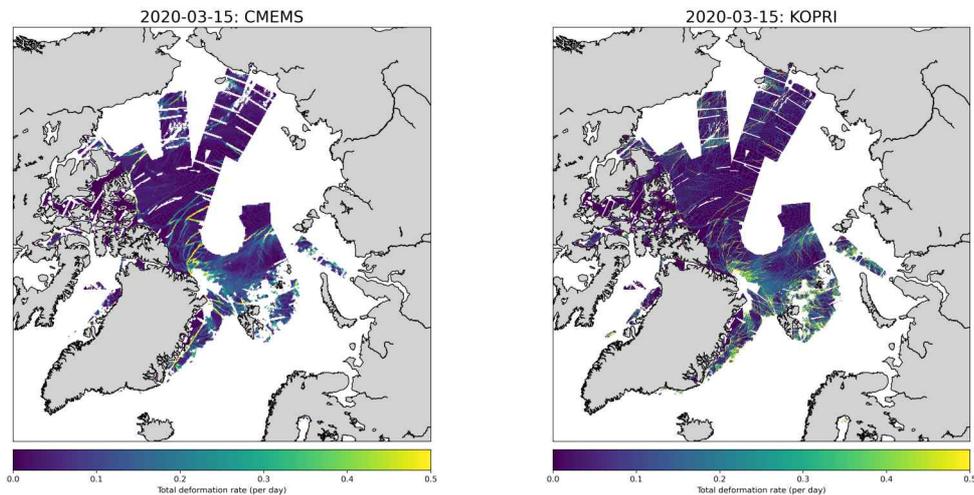


그림 3-1-63. 총 변형율 계산 결과 예시. (좌) CMEMS 기반, (우) 이 연구의 산출물 (KOPRI) 기반

- 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.

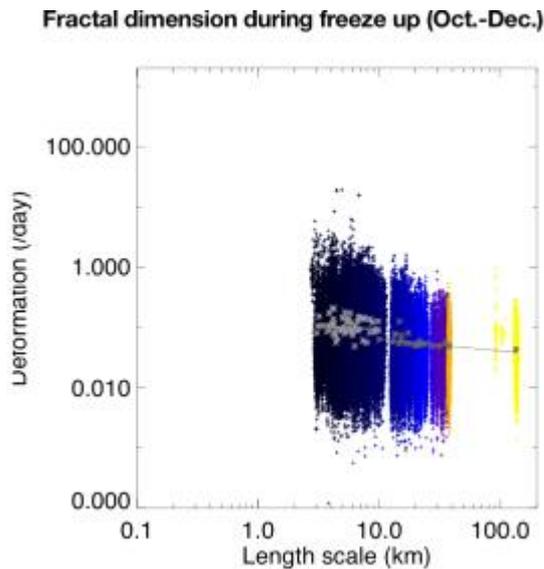


그림 3-1-64. 해빙 총 변형량의 프랙탈적 특성

극지연구소

- 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 구성된 라그랑지안 격자상의 누적 총 변형율을 계산하여 레이더 후방산란과 비교함.

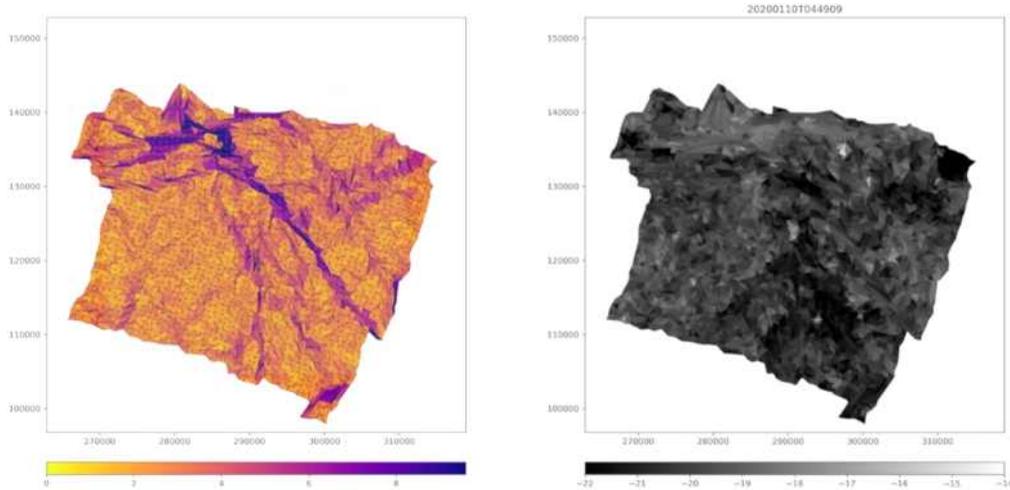


그림 3-1-65. 라그랑지안 격자상에서의 누적 총 변형율(좌)과 변형을 거친 해빙의 레이더 후방산란계수(우)

- 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 부합되지 않는 것으로 판단됨.
- 이는 또한 후방산란의 공간적 배치 특성을 기술하는 텍스처(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 유형도 나타나야 함. 그러나 아래 예시에서는 다년빙 입자가 이동했을 다수의 위치에서 단년빙으로 분류된 결과가 관측되며, 이는 OSI-SAF의 해빙 유형 분류가 시기에 따라 일관적이지 않음을 시사함.

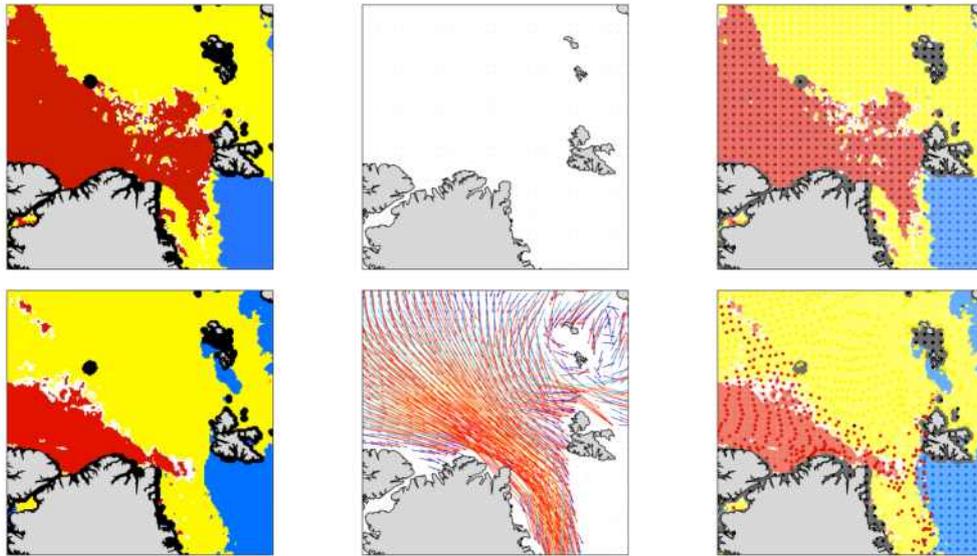


그림 3-1-66. 해빙 이동과 유형의 입자추적 결과에서 나타나는 해빙 유형 분류 결과의 불합리성 예시. (상단) 초기장, (하단) 8주간의 입자 추적 후, (좌) 해빙 유형 분류도, (중) 추적 해빙 이동 벡터장, (우) 입자 추적을 통한 해빙 유형의 분포도. 붉은 색은 다년빙, 노란색은 단년빙, 파란색은 개빙수역을 나타냄.

5. 해빙 두께

○ 수동형 마이크로파 위성 저주파 밴드에서의 해빙 방출율 특성

- 수동형 마이크로파 위성에서 관측한 밝기온도는 지표 방출율에 강하게 영향받고, 지표 방출율의 지표를 구성하는 매질의 물리 특성의 함수임.
- 극지 해빙 방출율 특성에 영향을 미치는 주요 물리 특성 인자로 해빙 두께, 해빙 온도, 염분 농도 및 해빙 농도 (Sea ice concentration) 등이 있음.
- 해빙의 물리 특성을 표현하는 인자 파라미터로 활용한 방출율 모형을 수립하고, 관측된 방출율과 비교함으로써 해빙 두께를 비롯한 다양한 물리 인자의 산출 가능성을 실험함.
- 위성 밝기온도 자료에는 지표 특성 뿐 아니라 대기 특성이 포함되어 있으며, 대기 분포 특성과 지표면 특성을 알아야 방출율로 계산할 수 있음. 이를 위해 대기 수치모델 재분석 자료 (ECMWF) 자료를 활용하여 복사전달모델 (RTTOV, Radiative Transfer for TOVS, TOV = TOVS = TIROS Operational Vertical Sounder) 계산을 수행함.
- 복사전달모형의 입력 자료를 생산하기 위해 2012년 1월부터 2019년 12월까지 ECMWF 재분석장 자료를 수집함.

- 또한, 수동형 마이크로파 위성 GCOM (Global Change Observation Mission)-W1 의 AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) 센서로 관측한 밝기온도 자료와 JAXA에서 산출한 해빙 농도 자료 (SIC)를 수집하여 연구에 필요한 자료 구축을 완료함.

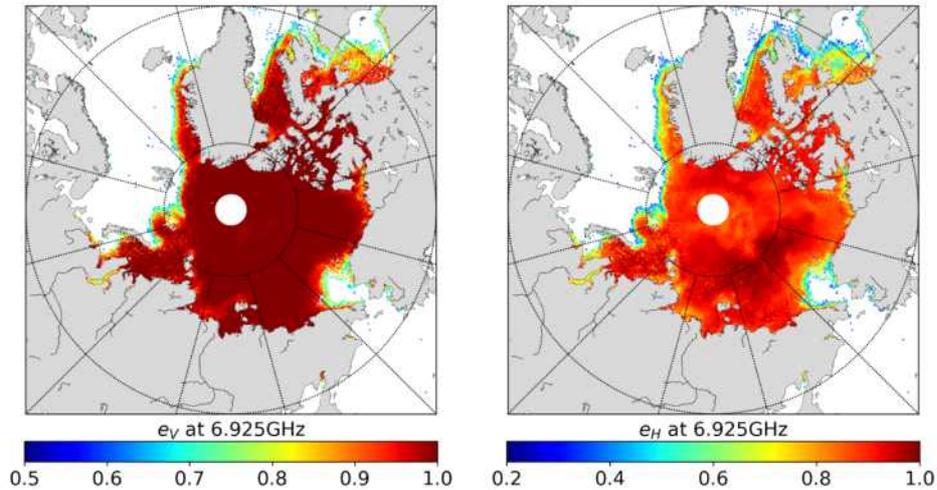


그림 3-1-67. 수동형 마이크로파 위성 GCOM-W1/AMSR2에서 관측한 밝기온도와 복사 전달모델 (RTTOV)를 활용하여 얻은 6.9GHz 밴드에서의 수직편파 방출율 (왼쪽)과 수평편파 방출율 (오른쪽)의 예

- 관측 자료에서 추정된 6.9GHz 밴드 해수의 방출율은 일 년 동안 큰 변동 없이 일정하게 유지되어 상수처럼 취급할 수 있음. 다음의 그림은 2018년 1년 동안 일 단위 최소 및 최대 방출율의 표시한 그래프로, 최소 방출율이 고요한 바다의 방출율에 해당함. 청녹색 원이 해수의 수직편파, 녹색 네모가 수평 편파의 방출율을 의미함.

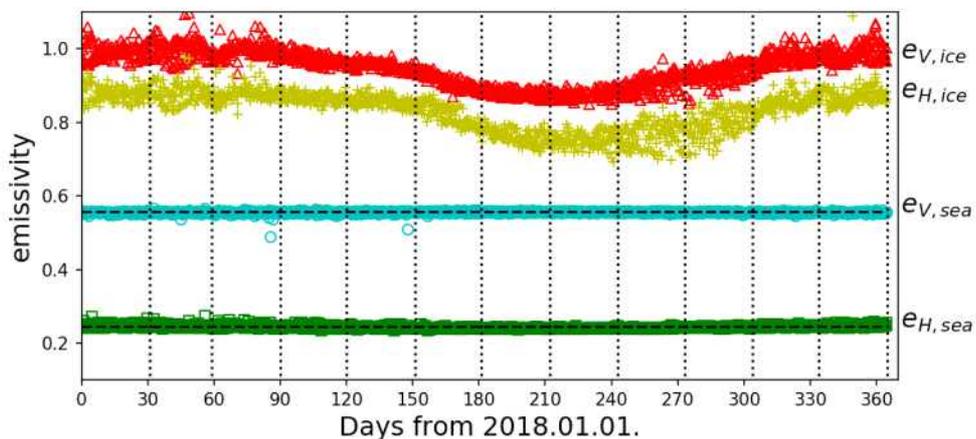


그림 3-1-68. 2018년 1년간 일정한 해수의 방출율을 보여주는 그래프

- AMSR2 6.9GHz 밴드 관측 및 이론 방출율의 비교를 위해 새로운 파라미터로, 정규화된 선형 편파 방출율비를 의미하는 PR (Polarization Ratio)과 선형 편파 반사도비를 의미하는 RR (Reflectance Ratio)을 도입.

$$PR = \frac{e_V - e_H}{e_V + e_H}$$

$$RR = \frac{1 - e_V}{1 - e_H} = \frac{R_V}{R_H}$$

- 새롭게 도입한 파라미터는 방출율에 더 민감할 뿐만 아니라, 해빙 표면의 거칠기 효과를 최소화하는 효과가 있음. PR 은 GR (spectral Gradient Ratio)과 함께 대표적인 해빙 농도 산출 알고리즘 (NASA Team Algorithm)에 활용되는 파라미터임.
- 해빙의 수직, 수평 편파 방출율은 강한 선형 상관성으로 대부분의 값이 가까이 늘어서는 분포를 보이지만, 새 파라미터 PR 과 RR 로 표현한 방출율 분포는 넓게 퍼져 차이 및 변화 탐지에 유리함.
- 다음 그림은 2018년 11월 3일의 PR 과 RR 지도로 해빙 경계쪽의 또렷한 대비와 다양한 특성 변화를 확인할 수 있음.

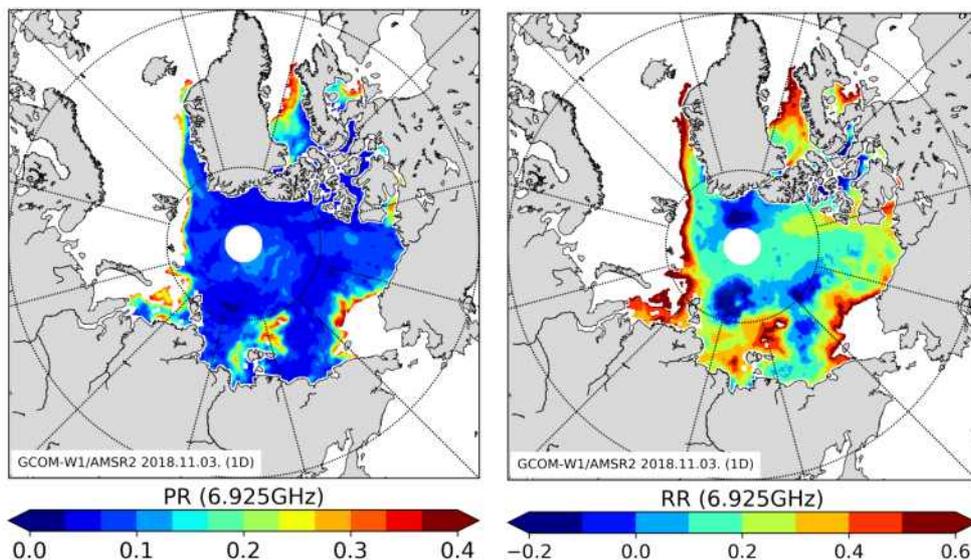
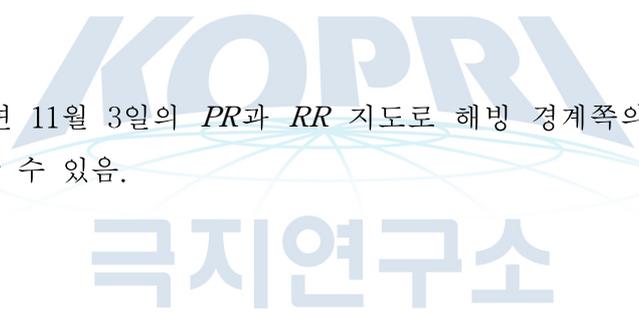


그림 3-1-69. 산출된 수직(V) 및 수평(H) 편파 방출율에서 계산된 PR 과 RR 지도의 예 (2018년 11월 3일)

- 관측 자료에서 추정된 방출율은 시간에 따라 변화하는데 특히 용융 시기와 결빙 시기에 방출율 특성의 변화가 두드러짐.

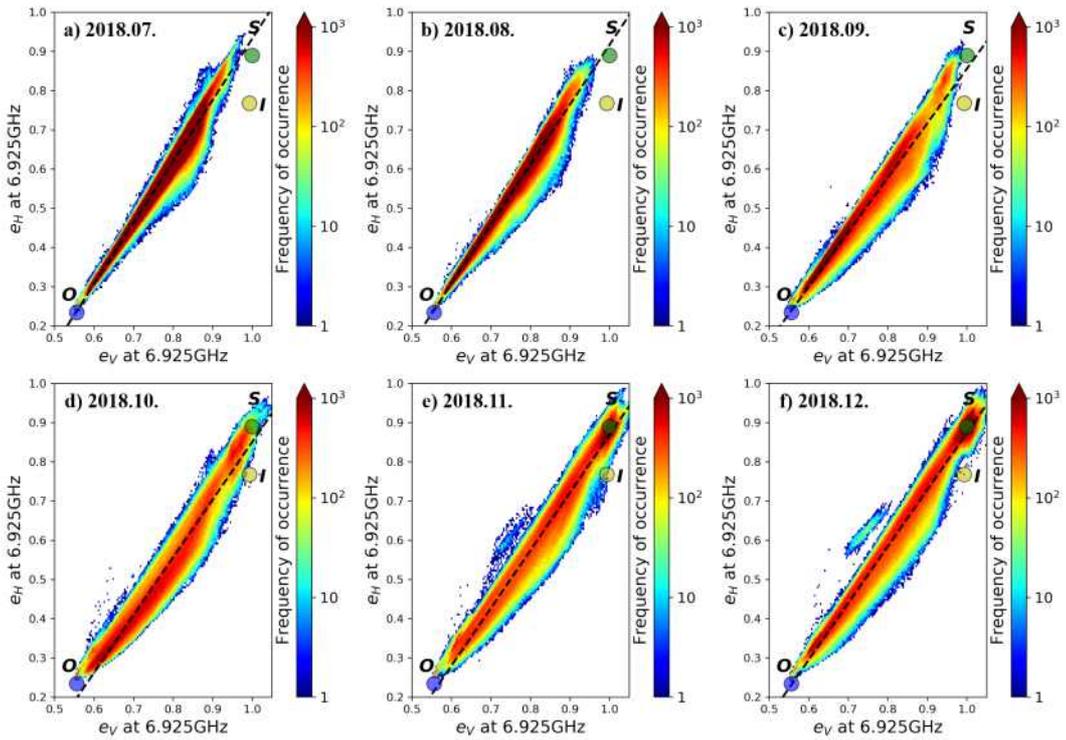


그림 3-1-70. 관측 자료에서 추정된 방출율의 월별 분포 특성

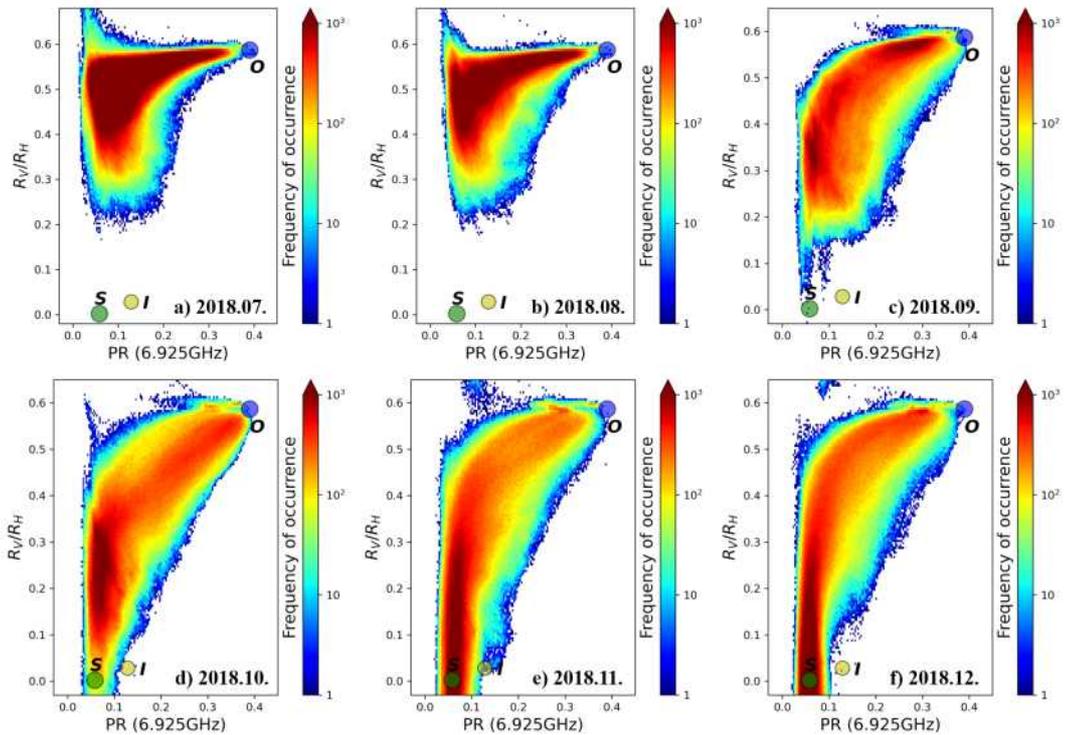


그림 3-1-71. 관측 자료에서 추정된 방출율의 PR과 RR의 월별 분포 특성

- 이론 기반 방출율 모형은 열역학적 평형 상태의 두께가 일정한 관형 매질의 흡수율을 통해 추정할 수 있음. 특히, 해빙의 경우 대기-해빙-해수, 혹은 대기-눈-해빙의 3개 층으로 이루어진 매질에서의 흡수율을 추정하여 추정했음.
- 각 층에서의 전자기파 전파 특성은 매질의 유전 특성과 입사광의 입사 각도에 따라 변함. 매질의 유전 특성을 알고 위해 필요한 물리 변수와 변수들 사이 특성은 다음과 같음.

표 3-1-13. 매질의 유전 상수 및 방출율을 계산에 필요한 변수들과 특성

Type	Variables	Unit	Description	Value	Variable Type	Note
Sensor	θ_i	degree	Incidence angle	55°	Constant	
	f	GHz	Central frequency of the observation band	6.925 GHz	Constant	
	C	-	Ice-water spatial fraction	0 ~ 1	Independent	
Atmosphere	T_a	°C	Temperature at surface (2m air)	-35 ~ 0	Independent	
Ocean	T_o	°C	Sea surface temperature	-1.75 °C	Constant	Freezing temperature
	S_o	‰	Sea surface salinity	32 ‰	Constant	
Sea ice	T_i	°C	Sea ice temperature	-35 ~ -1.5	Dependent	$T_i = T_a(\text{sea-ice})$ or $T_{sii}(\text{snow})$
	S_i	‰	Sea ice salinity, $S_i = f(d_i)$	5.49 ~ 14.24	Dependent	Cox & Weeks (1974)
	V_a	cm ³ /cm ³	Volume fraction of air inclusions, $V_a = f(T_i, S_i, \rho_i)$		Dependent	Cox & Weeks (1983)
	V_b	cm ³ /cm ³	Volume fraction of brine, $V_b = f(T_i, S_i)$		Dependent	Cox & Weeks (1983)
	ρ_i	g/cm ³	Density of sea ice sample ($\rho_i \leq \rho_{ice} = 0.917\text{g/cm}^3$, $\bar{\rho}_i = 0.91$)	0.72 ~ 0.94	Independent	Timco & Frederking (1996)
	d_i	cm	Sea ice thickness	0 ~ 150 cm	Independent	
	K_i	W/m/K	Thermal conductivity of sea ice, $K_i = f(S_i, T_i)$	~2.1 W/m/K	Dependent	Mayhut & Untersteiner (1971)
Snow	T_s	°C	Snow temperature ($T_i = T_a$)	-35 ~ 0	Dependent	
	T_{sii}	°C	Snow-ice interface temperature	-35 ~ 0	Dependent	$T_{sii} = f(d_i, K_i, d_s, K_s)$
	ρ_s	g/cm ³	Density of sea ice ($\rho_s \leq \rho_{ice} = 0.917\text{g/cm}^3$)	0.1 ~ 0.5	Independent	
	d_s	cm	Snow depth	0 ~ 50	Independent	
	K_s	W/m/K	Thermal conductivity of snow, $K_s = f(\rho_s)$	0.024 ~ 0.8	Dependent	Sturm et al. (1997)
	V_w	cm ³ /cm ³	Liquid water volume fraction in the snow	0.01 ~ 0.12	Independent	(Wet snow only)

- 이론 기반 방출율은 입력 자료로 사용된 물리 변수에 따라 민감하게 변하며 물리 변수에 따른 방출율 변화를 관측 자료에서 추정된 방출율과 비교함.

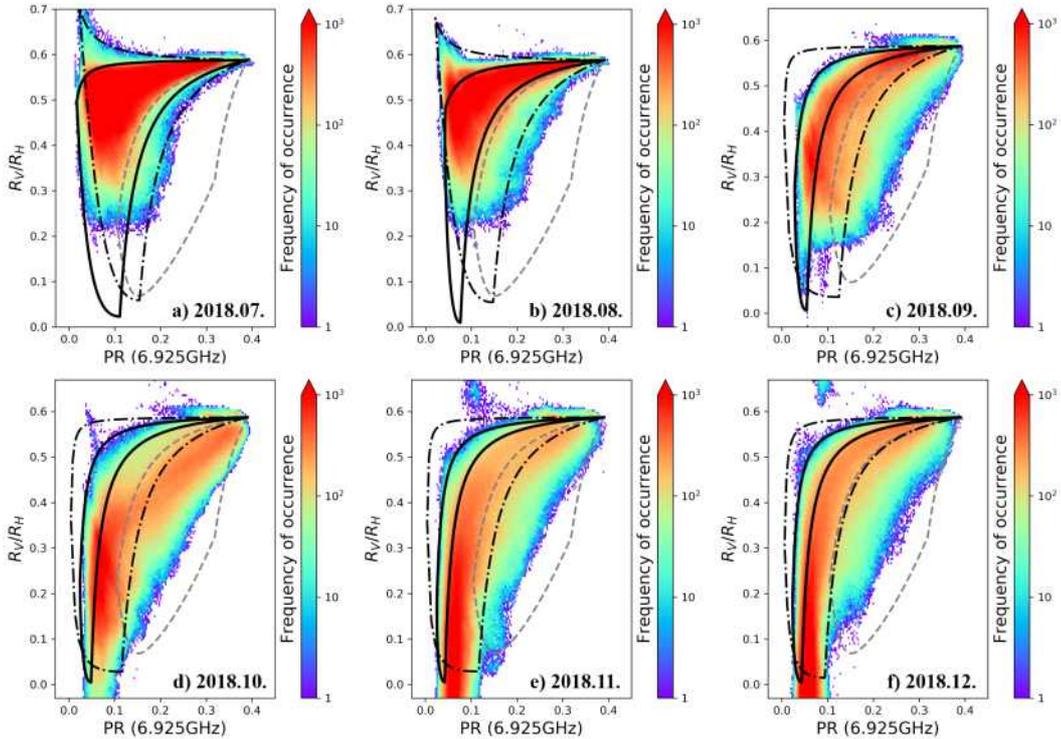


그림 3-1-72. 월별 방출율의 PR 및 RR의 분포와 이론 기반 방출율 비교

극지연구소

- 여름철 북극 해빙의 특성을 모형은 높은 수분 함량 (6 ~ 12 %)과 높은 표면 온도 (-2 ~ -0.9 °C)를 가진 눈의 방출율 모형과 잘 어울리는 반면, 겨울철 해빙의 방출율 모형은 낮은 수분 함량 (약 3 %)의 눈 및 새롭게 만들어진 (얇고 고염분 함량) 해빙에 의한 방출율 모형과 잘 어울림.
- 북극 해빙의 이론 기반 방출율 특성 연구를 통해 해빙 두께 산출 알고리즘 개발에 고려해야 할 물리 변수와 특성을 파악할 수 있었으며, 다양한 북극해 환경 요소의 정성적 특성을 파악하고 변화 과정을 이해하는데 도움될 방출율 모형 기술을 확보함.
- 수동형 마이크로파 위성에서의 해수 밝기 온도 추정 및 변화 원인 분석
 - 해빙 두께는 해빙 농도와 함께 북극 해빙의 상태를 알려주는 중요한 파라미터 중 하나이며, 지구 온난화 등의 영향으로 북극 해빙 두께는 감소하고, 다년빙의 비율은 계속 줄어들고 있음.

- 북극해의 환경 변화는 다양한 해빙 관련 위성 산출물에 산출 정확도에 영향을 미칠 수 있음. 특히 해수의 밝기 온도는 해빙 농도 및 두께 산출에 필요한 하나의 기준값으로 많이 활용되고 있음. 해수의 밝기 온도는 온도와 해상풍에 영향을 받으며, 해빙보다 방출율이 낮아 북극해에서 최소 밝기온도를 보임.
- 이 연구에서는 수동형 마이크로파 위성 AMSR2의 6.925 GHz 밴드에서 관측된 해수의 최저 밝기 온도를 추정하고 그 변화 원인을 파악함으로써 북극 증폭의 증거를 찾음.
- 북극해 해수의 저주파 밴드 밝기 온도는 해수면 온도 (SST), 해상풍 (SSW), 대기 중 수증기량 (IWV) 3가지 변수에 가장 큰 영향을 받음. 산출된 해수의 최소 밝기 온도의 연간 변동성을 남극과 북극에서 모두 유사한 값을 유지했지만, 월별 분포에서 변동성이 확인됨.

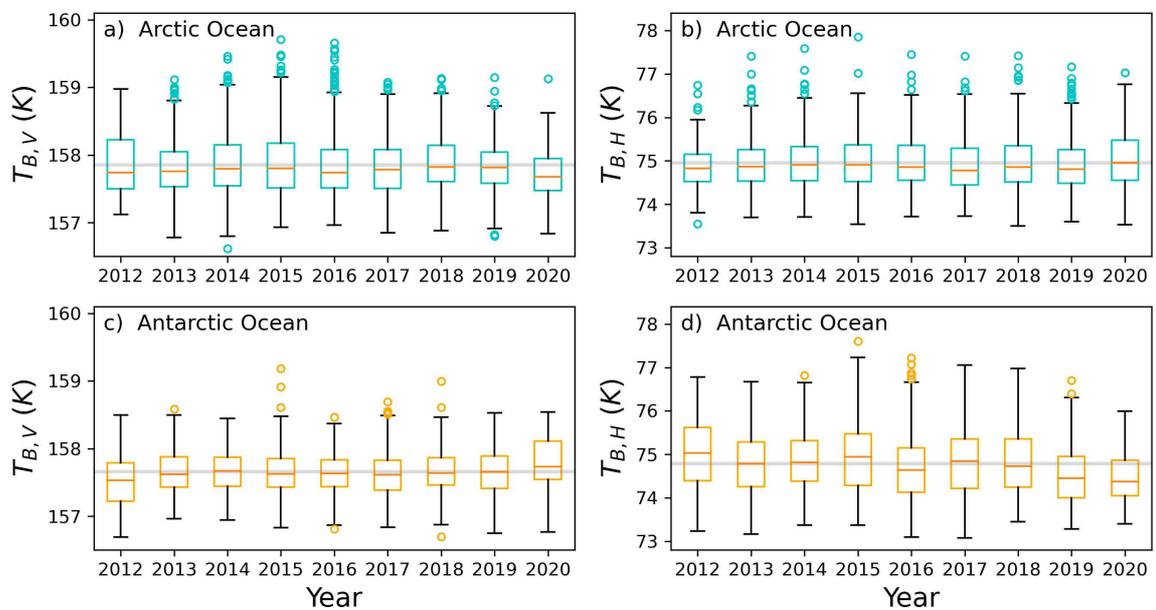


그림 3-1-73. 해수 최소 밝기온도의 연간 변동성과 계절 변동성

- 다음 그림은 복사전달모형을 이용한 이론적 해수의 밝기 온도와 비교 그래프로, 해수의 최소 밝기 온도는 온도의 영향을 많이 받으며, 특히 북극해 여름철의 해수 온도의 상승을 확인 할 수 있음.

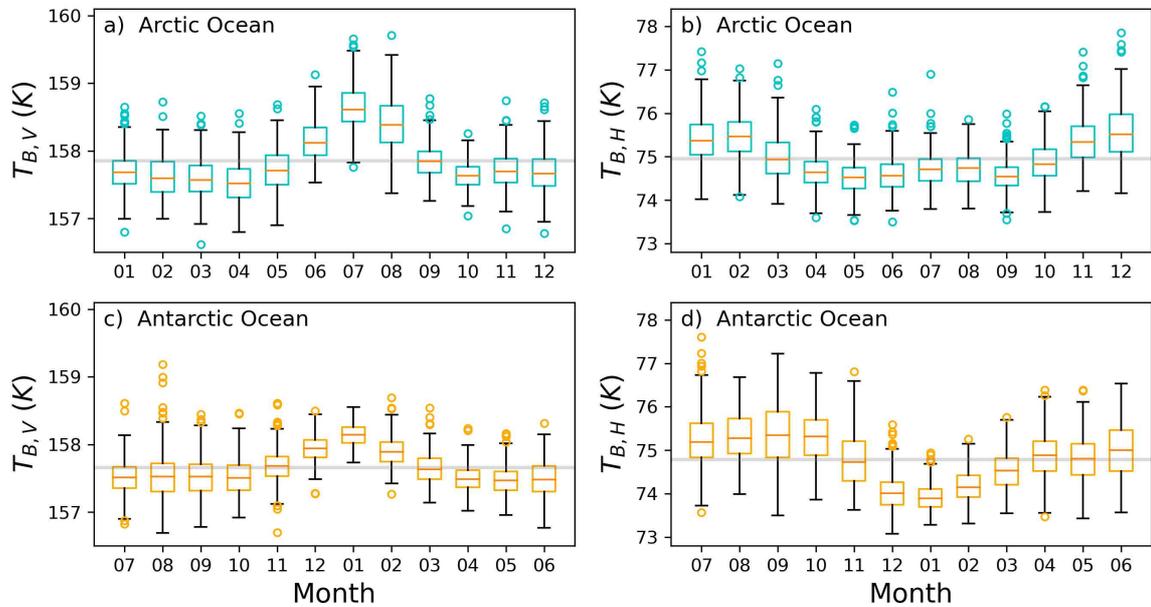


그림 3-1-74. 복사전달모델과 해수의 최소 밝기온도의 계절 변동성 비교

- 남극의 해수 온도 변화와 대조적으로 북극해 여름철의 높은 해수 온도는 북극 증폭으로 표현되는 특히 빠르게 진행되는 북극해 온난화 경향의 결과로 여겨짐. 이는 북극해 해빙 농도 산출물 및 해빙 관련 변수 추정 of 정확도 개선을 위해서 강화된 북극해 해수면 온도를 고려해야 함을 시사함.
- 해빙 두께의 정확한 모니터링은 해빙 분포의 예측 및 북극 항로 개발 등에 중요한 입력 자료로 사용할 수 있음. 그러나 정확한 해빙 두께의 추정은 제한적인 상황임.
- 정확도 높은 북극 해빙 두께는 위성 고도계 (CryoSat-1/2; ICESat-1/2 등)를 통해 얻어지고 있지만, 관측 가능한 공간 영역이 좁아 북극 전체의 해빙 두께 분포를 파악하지 위해서는 약 한 달의 기간이 필요함. 또한 해빙 두께가 1m 이하의 얇은 해빙의 경우 추정 오차가 증가한다는 단점이 있음. 반면, 기존에 개발된 수동형 마이크로파 위성 (SMOS) 기반 해빙 두께 자료는 매일 북극해 전 지역을 관측할 수 있으나, 수십 cm 규모의 얇은 해빙의 두께만 산출이 가능함.
- 이 연구에서는 수동형 마이크로파 위성 (AMSR2) 월 단위 다중 채널의 밝기온도와 ICESat-2의 건현 높이 (total freeboard height)를 비교해 해빙 두께 산출 기술을 개발함.
- 채널별 밝기 온도비 (GR, Gradient Ratio)는 다음과 같이 정의됨.

$$GR(f_1, f_2) = \frac{TB_V(f_1) - TB_V(f_2)}{TB_V(f_1) + TB_V(f_2)}$$

- AMSR2의 18.7GHz와 36.5GHz 채널을 이용한 $GR(36.5, 18.7)$ 을 통해 눈 두께 산출 알고리즘을 개발한 기존의 연구들이 존재하며, 선행 연구로 수행한 Kim et al., 2020에서는 6.9, 10.7, 18.7GHz와 수면 위 해빙높이의 연관성에 대한 가능성을 제시함. 따라서, 수면 위 건현 높이와 눈 두께 정보를 반영할 수 있는 지표로 $GR(36.5, 18.7)$ 과 $GR(10.7, 6.9)$ 의 조합을 활용하여 ICESat-2 관측이 산출하는 건현 높이를 수동마이크로파 자료로 효과적으로 산출하는 다중선형회귀식 개발.

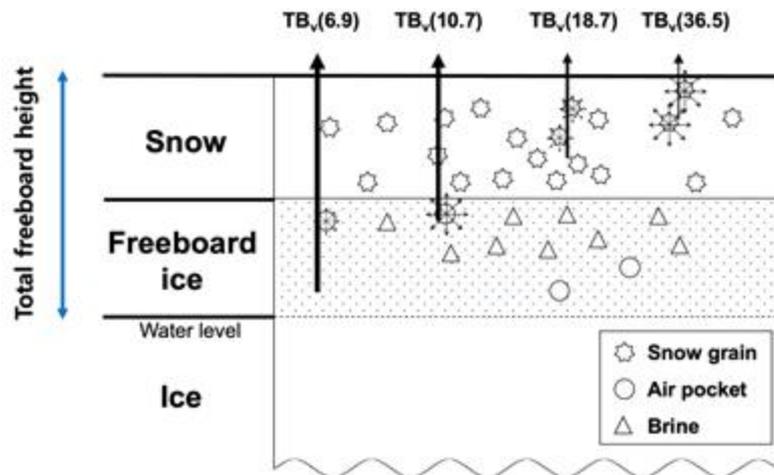


그림 3-1-75. 수동마이크로파 밴드별 해빙 레이어에서의 방출 에너지 분포

- 다음 표는 본 연구에서 사용한 자료의 개략적인 소개임.

표 3-1-14. 실험에 사용한 자료 목록

자료 출처	수집 자료	분석 기간	특징
AMSR2	밝기 온도, 해빙 농도	ICESat-2와 OIB의 관측기간	
ICESat-2	건현 높이	2018-2019, 2019-2020년도 11-3월	
OIB	검증용 건현 높이	2013, 2014, 2015, 2017년도 3월	항공기 관측 자료
OSISAF	해빙 유형	2018-2019, 2019-2020년도 11-3월	

- 건현 높이(Freeboard, 이하 FB)는 AMSR2에서 얻은 $GR(10.7, 6.9)$ 및 $GR(36.5, 18.7)$ 와 다음의 다중선형 관계가 있다고 가정함.

$$FB = a_1 \times GR(10.7, 6.9) + a_2 \times GR(36.5, 18.7) + b_1$$

- 이 식에서 a_1 , a_2 , b_1 은 ICESat-2의 건현 높이와 비교해 결정함.
- 다음 그림에서 월별로 결정된 계수를 이용해 얻은 AMSR2 건현 높이 산출 결과와 ICESat-2의 건현 높이를 비교함.

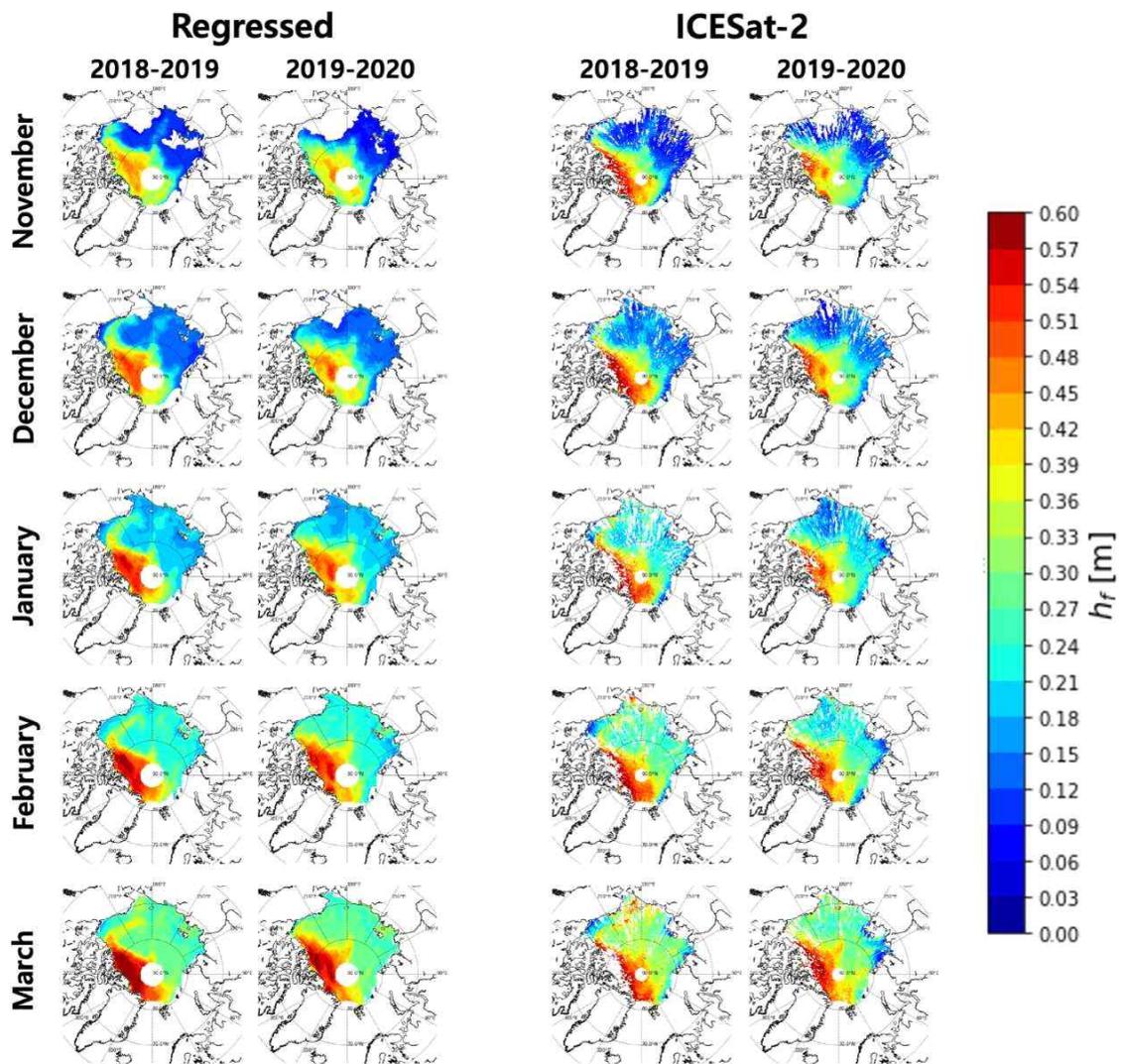


그림 3-1-76. AMSR2 기반 건현 높이와 ICESat-2 건현 높이의 비교

- 연구 결과는 OIB에서 얻은 건현 높이와 비교했을 때 상관성 ($R=0.764$)을 확인했으며, RMSE는 10.9 cm임.
- 이 연구는 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 활용될 수 있음.

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

- CryoSat과 ICESat의 altimeter 센서는 관측 정확도가 높으나, 작은 footprint로 인해 약 한 달간의 자료의 융합을 통해서 북극 전체에 대한 해빙 두께 맵핑이 가능
- SMOS와 AMSR와 같은 수동마이크로파 센서는 수-수십 km의 footprint로 인해 매일 북극 전체에 대한 자료 확보가 가능하나, 50 cm 이하의 얇은 해빙에 대한 두께 정보만 산출 가능
- 모든 해빙 종류에 대한 해빙두께 정보를 제공하는 일간 산출물은 AWI에서 제공하는 CryoSat-2와 SMOS 자료의 1주일 합성 자료가 유일함.
- 이 연구에서는 수동마이크로파자료의 밝기온도값과 CryoSat-2에서 산출된 해빙두께와의 물리적으로 설명이 힘든 알려지지 않은 숨겨진 상관 관계를 딥러닝 기법을 이용해 모델화 하여, 수동마이크로파 기반의 북극전체에 대한 일간 해빙두께 맵핑을 함.
- 일반적으로 2차원 이미지의 특징을 추출하는 커널을 학습하는 CNN과 달리 1차원 벡터 데이터에 적용 가능한 1D-CNN을 기본 모델로 선정
- 일반적으로 1D-CNN은 입력 feature의 선후관계가 있는 시계열 자료에 사용. 첫 번째와 마지막 feature간의 연산이 이루어지지 않을 확률이 있음
- 일반적인 딥러닝 모델은 입력 feature들과 커널 또는 가중치를 이용해 출력값을 결정하는데 있어 “합” 연산만 발생
- Feature들간의 “곱” 연산을 임의로 만들어줌으로써 모델의 산출 정확도를 높일 수 있을 것으로 기대. 또한 딥러닝에서 일반적으로 많은 feature들이 모델 정확도를 향상시키는데 도움을 주는 것으로 알려져 있음
- Feature들간의 6가지의 “곱” 연산을 통해 feature augmentation을 다음 그림과 같이 시도 하여, 14개의 AMSR2 채널을 357개로 확장

표 3-1-15. Feature들간의 “곱” 연산을 통한 augmentation

Input feature	Description	Number of features
$TB(v, p)$	Original p polarized TB at a single frequency v	14
$1/TB(v, p)$	Inverse of $TB(v, p)$	14
$\log TB(v, p)$	Logarithm of $TB(v, p)$	14
$1/\log TB(v, p)$	Inverse-logarithm of $TB(v, p)$	14
$TB(v_1, p) \circ TB(v_2, p)$	Hadamard product of two frequency channels (v_1, v_2) for p polarization	105
$1/(TB(v_1, p) \circ TB(v_2, p))$	Inverse of $TB(v_1, p) \circ TB(v_2, p)$	105
$\frac{TB(v_1, p) - TB(v_2, p)}{TB(v_1, p) + TB(v_2, p)}$	Normalized difference TB between two different frequencies (v_1, v_2) for the polarization p	91

- 또한 357개의 feature들의 길이가 길어짐으로 인한 1D-CNN의 성능저하와 효율적 계산을 위해 각 augmentation 그룹들별로 모델 학습을 시작하여 그 결과들을 합치는 앙상블 방식을 제안

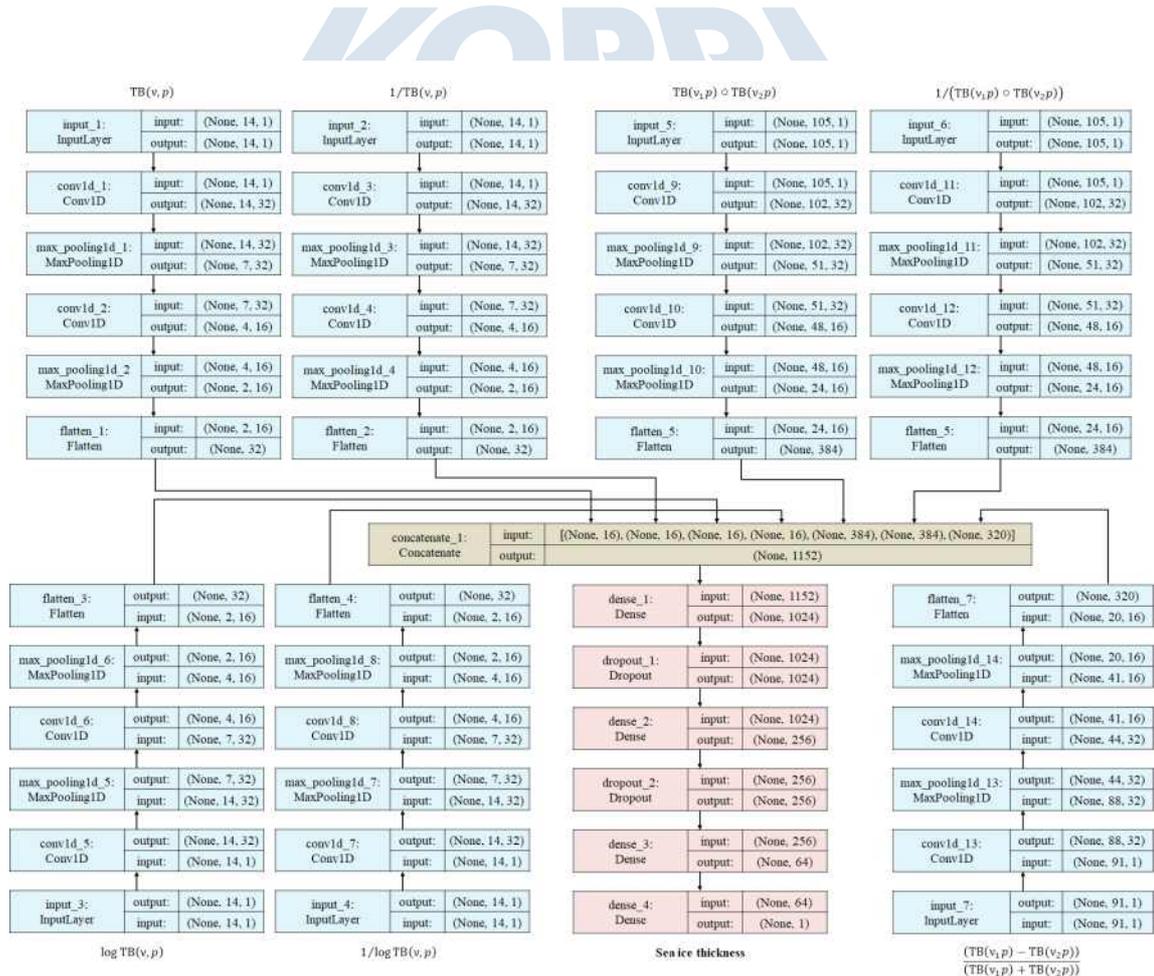


그림 3-1-77. 해빙두께 산출을 위해 제안된 앙상블 합성곱 신경망 구조

- 기본 비교 모델로 Random Forest와 1D-CNN을 사용. 14개의 기본 feature들과 357개의 확장된 feature들을 사용했을 경우 산출 정확도를 검증
- 2015년 10월 ~ 2016년 4월, 2016년 10월 ~ 2017년 4월 자료를 모델 훈련자료로 사용했고 2017년 10월 ~ 2018년 4월 자료를 모델 검증자료, 모델에 노출되지 않은 2018년 10월 ~ 2019년 4월 자료를 최종적으로 모델 성능 테스트용으로 사용
- 다음 그림은 모델간 입력 feature들의 개수간 검증자료의 평균 절대 오차값을 학습률에 따라 비교 한 그래프로, 본 연구에서 제안된 앙상블 기반 모델과 357개의 확장 feature를 사용했을 경우 가장 낮은 오차를 보임

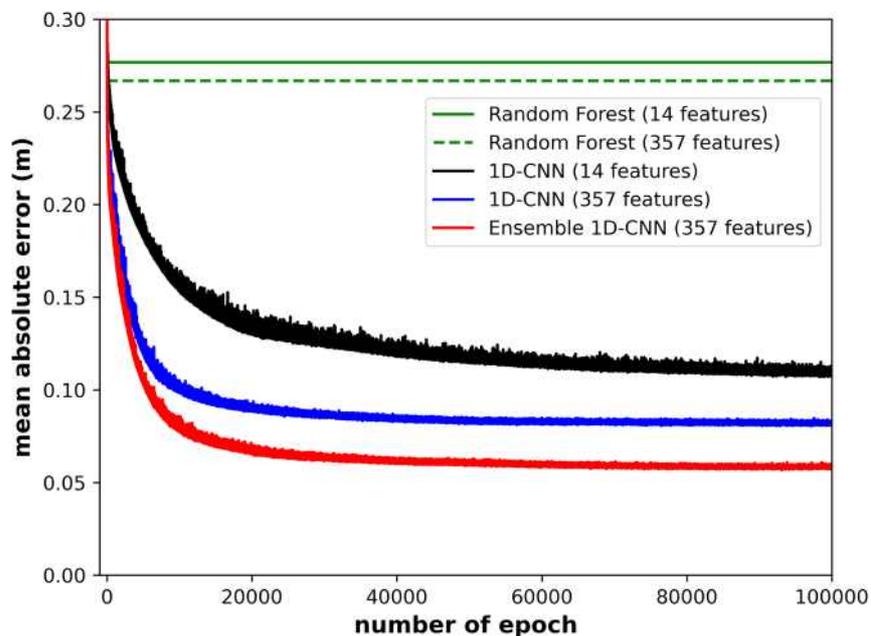


그림 3-1-78. 모델 종류별, 입력 feature들별 오차 비교

- 다음 그림은 테스트 자료에 대해 CryoSat-2에서 산출된 해빙두께와 본 연구에서 제안한 AMSR2에서 산출된 해빙두께 자료를 비교한 산포도로 매우 높은 상관 관계를 보여줌

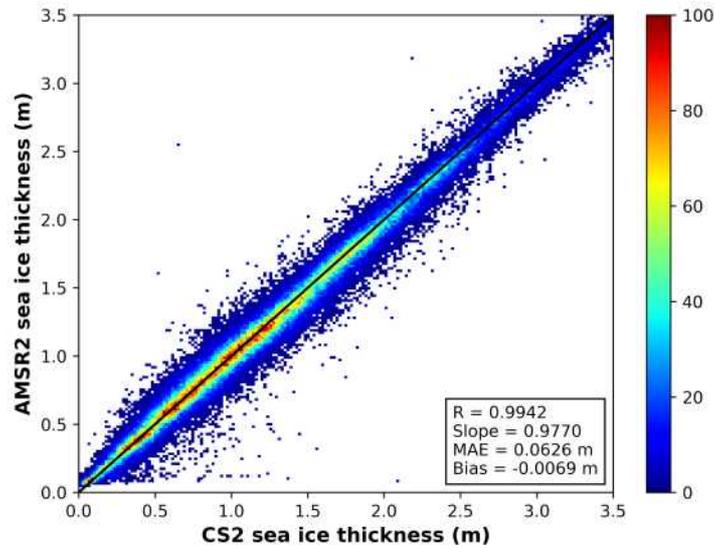


그림 3-1-79. CryoSat-2와 AMSR2에서 산출된 해빙두께 값 비교

- 다음 그림은 AMSR2에서 산출된 일간 해빙두께 지도와 같은 기간 CS2SMOS 주간 해빙 두께 지도로 일간, 주간 자료의 차이를 고려했을 경우 매우 높은 시각적 유사성을 보여줌

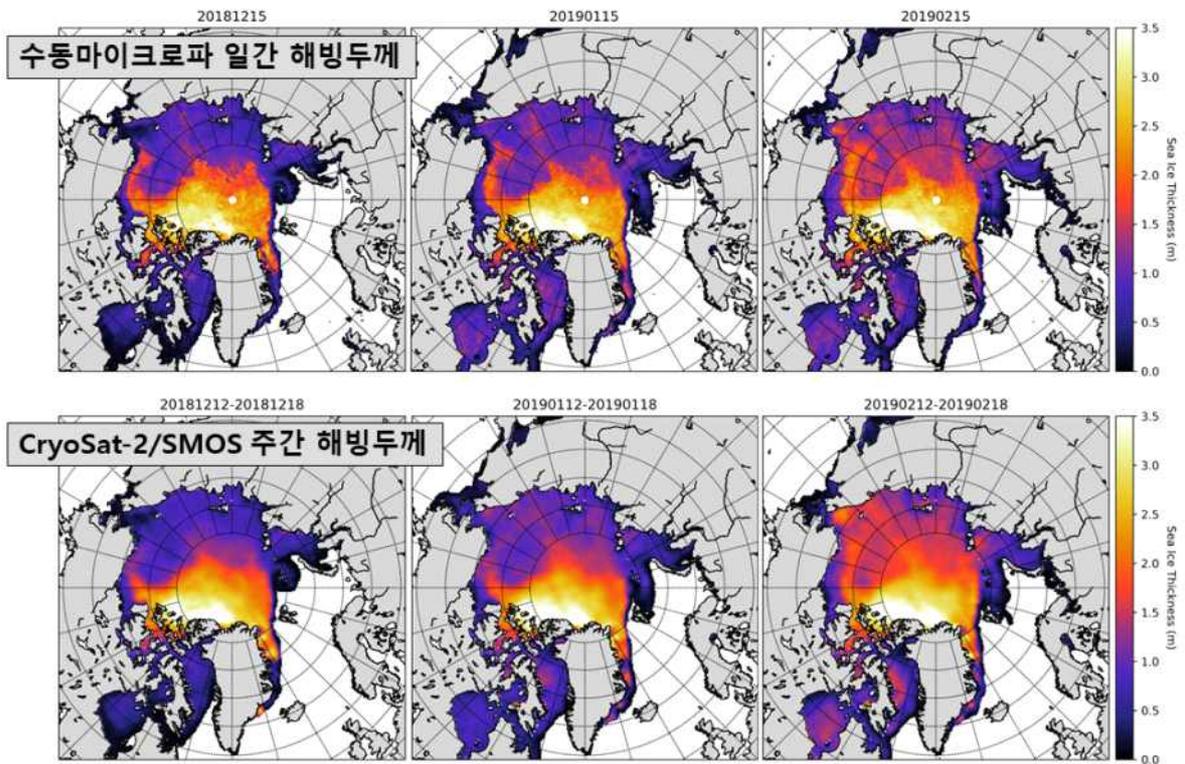


그림 3-1-80. AMSR2 일간 해빙두께 지도 (상)와 CryoSat-2/SMOS 주간 해빙두께 지도 (하)

- 입력 feature들과 해빙두께와 물리적 상관성에 대해서는 설명하기 힘들지만 permutation importance test를 수행하여 통계적으로 중요한 feature들에 대해 분석함

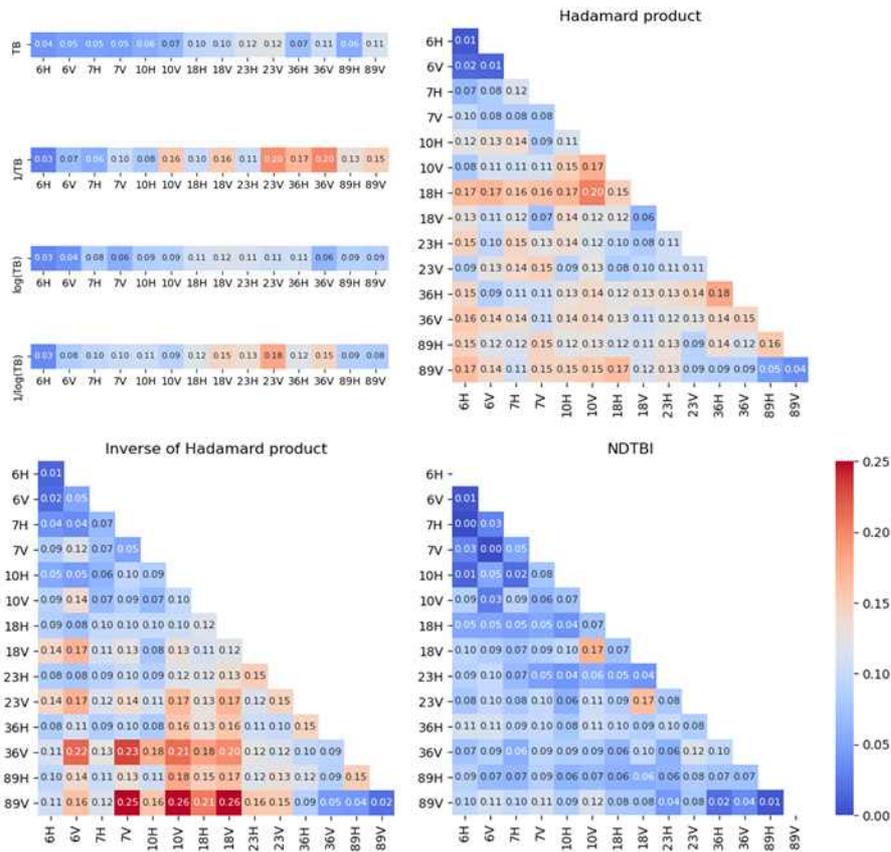


그림 3-1-81. 수동마이크로파 자료로부터 해빙두께를 산출하는데 있어 입력 feature들의 통계적 정확도 비교 (값이 클수록 중요도가 높음)

- 전체적으로 봤을 때 “곱”연산들에 의해 추가된 feature들의 통계적 중요성이 높게 나왔고, 특히 아다마르곱과 관련된 feature들이 전반적으로 더욱 높은 중요도를 보여줌.
- PR과 GR 같이 수동마이크로파 자료로부터 해빙정보를 산출하는데 많이 쓰이는 ratio들과 유사한 공식을 지닌 NDTBI (Normalized Difference TB Index)는 당초 생각했던 것 보다는 통계적 중요도가 낮음
- 결과적으로는 딥러닝 기법을 이용해 수동마이크로파 자료로부터 북극 전체에 대한 해빙두께 산출은 가능할 것으로 판단
- 딥러닝을 이용한 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 고도화
 - 정확하고 효율적인 해빙두께 산출을 위한 입력 피쳐 특성별 학습결과를 융합하는 앙상블 기반의 1차원 합성곱 신경망 모델을 다음 그림과 같이 제안함.

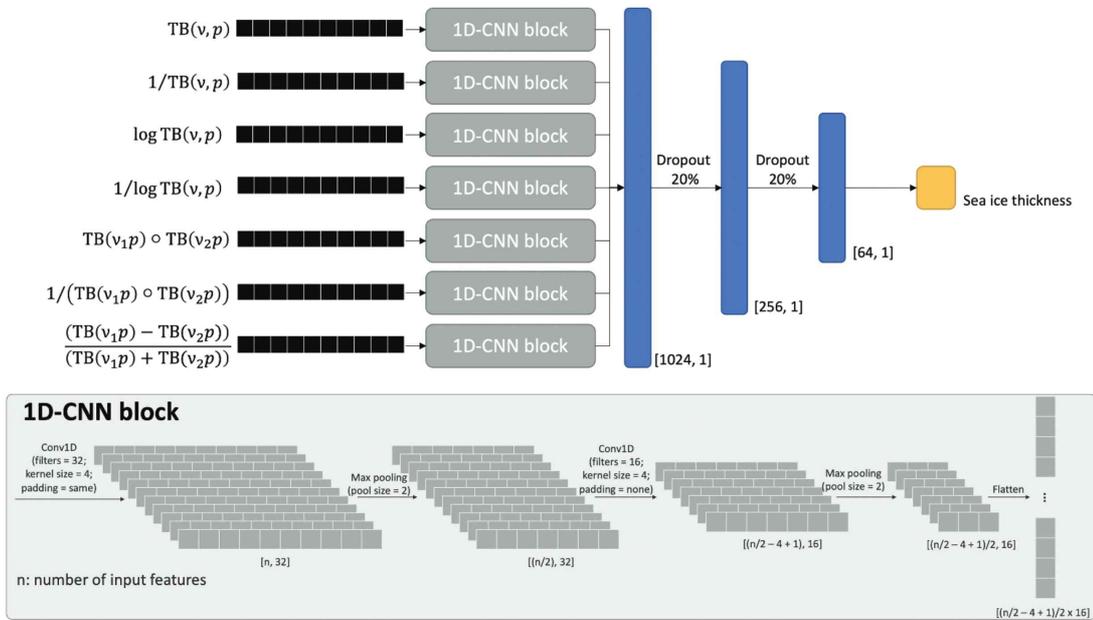


그림 3-1-82. 수동마이크로파 기반 해빙두께 산출을 위한 앙상블 기반 1차원 합성곱 신경망 모델

- 제안된 피쳐 확장법과 앙상블 모델은 기존의 Random forest 나 1차원 합성곱 신경망에 비해 다음 그림에서 보는바와 같이 통계적으로 더욱 높은 정확도를 보여주고 있음. 기준 자료로 사용한 CryoSat-2 산출 해빙두께와 비교 했을 시 평균 약 12 cm 정도의 절대 오차를 보여주고 있음.

극지연구소

표 3-1-16. 해빙두께 산출 모델 종류별 입력 피쳐의 개수별 통계적 정확도 차이 비교

Model	Number of input features	MAE (m)	RMSE (m)	Bias (m)	Correlation	Computation run-time
Random Forest	14	0.3435	0.4601	0.1274	0.8728	~ 0.2 h (CPU)
	357	0.3216	0.4359	0.1007	0.8842	~ 0.2 h (CPU)
1D-CNN	14	0.2500	0.3533	0.0561	0.9267	~ 3 h (GPU)
	357	0.2115	0.3063	0.0767	0.9464	~ 22 h (GPU)
Ensemble 1D-CNN	357	0.1199	0.1838	0.0187	0.9800	~ 20 h (GPU)

- 이 연구에서 제안된 수동마이크로파 기반 해빙두께 산출 결과는 다음 그림에서 보듯이 모델 훈련에 사용되지 않은 연도의 자료에 대해서도 비교적 일관된 통계적 정확도를 보여주

고 있으며, 월별 정확도 비교에서도 크지 않은 오차를 보여주고 있음. 단, 해빙이 얼기 시작하는 10월과 녹기 시작하는 4월에 대해서는 다른 월보다 약간 큰 오차를 보여줌.

표 3-1-17. 해빙두께 산출 결과의 연도별, 월별 통계적 정확도 비교

MAE (unit: m)	Seasonal average	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
2012-2013*	0.1219	0.1387	0.1138	0.1157	0.1124	0.1094	0.1227	0.1407
2013-2014*	0.1334	0.1282	0.1174	0.1176	0.1244	0.1347	0.1403	0.1710
2014-2015*	0.1405	0.1569	0.1247	0.1275	0.1238	0.1296	0.1410	0.1804
2015-2016 ¹	0.0370	0.0474	0.0268	0.0234	0.0363	0.0283	0.0368	0.0599
2016-2017 ¹	0.0335	0.0462	0.0293	0.0250	0.0249	0.0221	0.0286	0.0587
2017-2018 ²	0.0513	0.0604	0.0433	0.0390	0.0425	0.0565	0.0509	0.0668
2018-2019 ^{3*}	0.1343	0.1586	0.1202	0.1221	0.1178	0.1240	0.1313	0.1659
2019-2020*	0.1340	0.1447	0.1265	0.1225	0.1279	0.1289	0.1321	0.1551
Unseen average	0.1328	0.1454	0.1205	0.1211	0.1213	0.1253	0.1335	0.1626
RMSE (unit: m)	Seasonal average	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
2012-2013*	0.1658	0.1834	0.1566	0.1586	0.1553	0.1516	0.1676	0.1876
2013-2014*	0.1810	0.1684	0.1582	0.1635	0.1735	0.1838	0.1909	0.2286
2014-2015*	0.1927	0.2064	0.1716	0.1776	0.1721	0.1819	0.1957	0.2440
2015-2016 ¹	0.0859	0.0915	0.0717	0.0685	0.0848	0.0773	0.0925	0.1148
2016-2017 ¹	0.0828	0.0917	0.0787	0.0747	0.0758	0.0731	0.0788	0.1072
2017-2018 ²	0.1066	0.1143	0.0974	0.0923	0.0935	0.1178	0.1068	0.1240
2018-2019 ^{3*}	0.1823	0.2060	0.1658	0.1709	0.1614	0.1742	0.1802	0.2173
2019-2020*	0.1818	0.1892	0.1726	0.1685	0.1747	0.1794	0.1827	0.2053
Unseen average	0.1807	0.1907	0.1650	0.1678	0.1674	0.1742	0.1834	0.2165
Correlation	Seasonal average	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr
2012-2013*	0.9764	0.9697	0.9783	0.9764	0.9813	0.9811	0.9759	0.9718
2013-2014*	0.9838	0.9836	0.9867	0.9866	0.9824	0.9829	0.9841	0.9807
2014-2015*	0.9798	0.9714	0.9845	0.9841	0.9837	0.9804	0.9785	0.9763
2015-2016 ¹	0.9922	0.9784	0.9949	0.9967	0.9895	0.9969	0.9963	0.9929
2016-2017 ¹	0.9938	0.9899	0.9971	0.9975	0.9948	0.9936	0.9921	0.9914
2017-2018 ²	0.9891	0.9849	0.9942	0.9938	0.9940	0.9866	0.9838	0.9868
2018-2019 ^{3*}	0.9816	0.9729	0.9892	0.9861	0.9845	0.9795	0.9805	0.9786
2019-2020*	0.9784	0.9711	0.9821	0.9827	0.9794	0.9790	0.9774	0.9771
Unseen average	0.9800	0.9737	0.9842	0.9832	0.9823	0.9806	0.9793	0.9769

¹Training data; ²Validation data; ³Test data; *Unseen data

- 다음 그림은 수동마이크로파에서 산출된 해빙두께(좌)와 고도계센서에서 산출된 해빙두께(중) 정보를 IceBridge 현장관측 자료와 비교한 결과로, 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 확인할 수 있음.

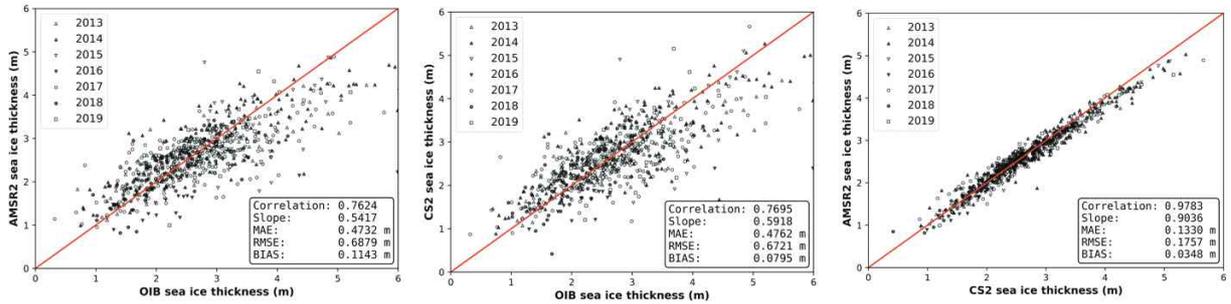


그림 3-1-83. 위성 해빙두께 산출 결과와 IceBridge 현장관측 자료와의 비교. (좌) 수동마이크로 vs IceBridge. (중) 고도계 vs IceBridge. (우) 수동마이크로 vs 고도계

- 다음 그림은 수동마이크로파에서 산출된 매일 15일 전 북극 해빙두께 지도임.

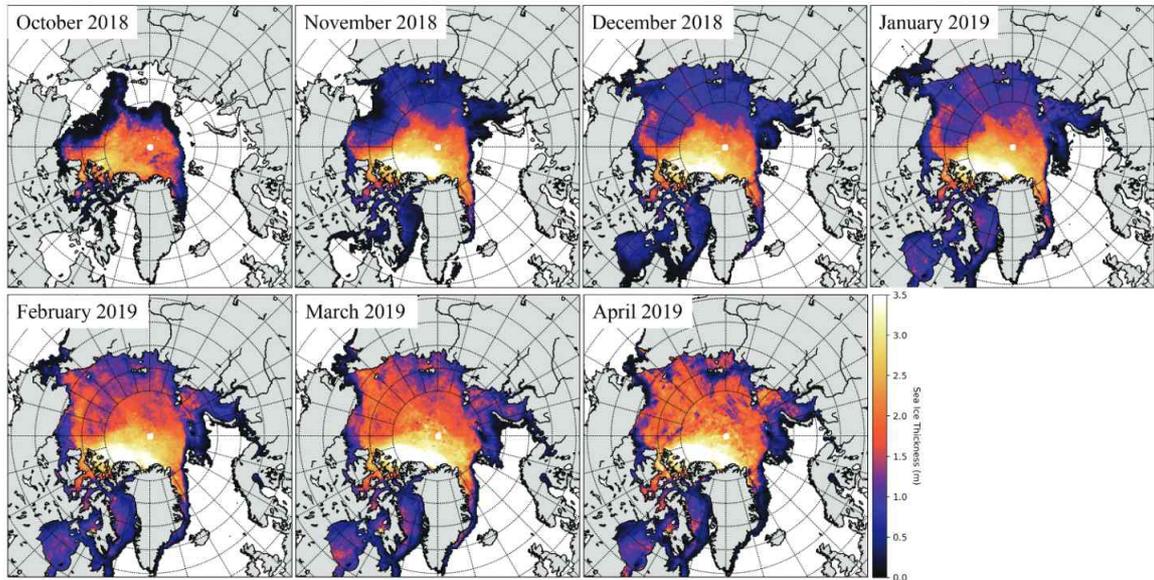


그림 3-1-84. 수동마이크로파 자료로부터 생산된 일간 북극 해빙두께 지도

- 수동마이크로파 자료로부터 딥러닝 모델을 이용하여 고도계 산출 해빙두께 자료와 매우 높은 상관성을 지니는 해빙두께 자료 생산이 가능함을 보여주었음. 하지만 고도계에서 산출되는 얇은 해빙에 대한 두께 산출 정확도 자체가 매우 낮음. 다음 그림은 SMOS로부터 산출된 1미터 이하 얇은 해빙두께와 비교한 자료로 20cm 이상의 평균 절대 오차를 보여 주고 있으며, 상관성도 크게 떨어짐.

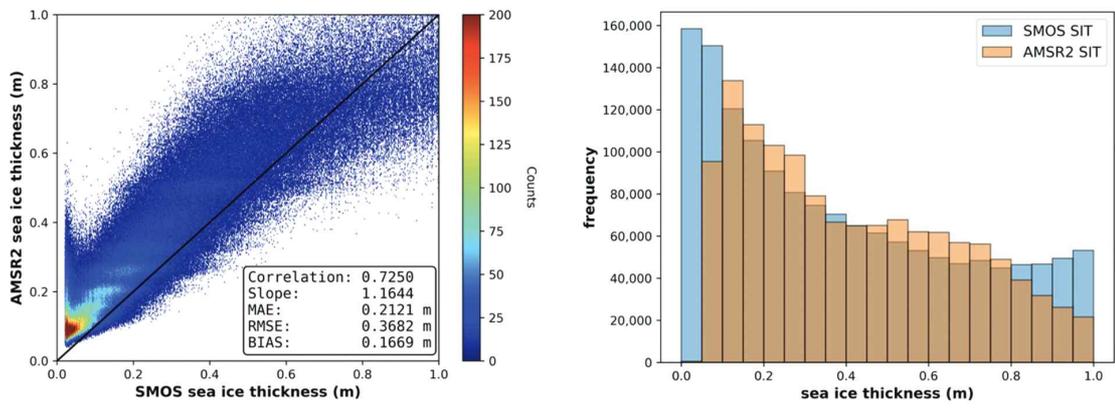


그림 3-1-85. 얇은 해빙두께에 대한 AMSR2 vs SMOS 산점도 비교 (좌). 히스토그램 비교 (우)

- 다음은 오차의 공간적 분포에 대한 그림으로 단년생 해빙 구역에서의 오차가 크게 나타남을 확인할 수 있음.

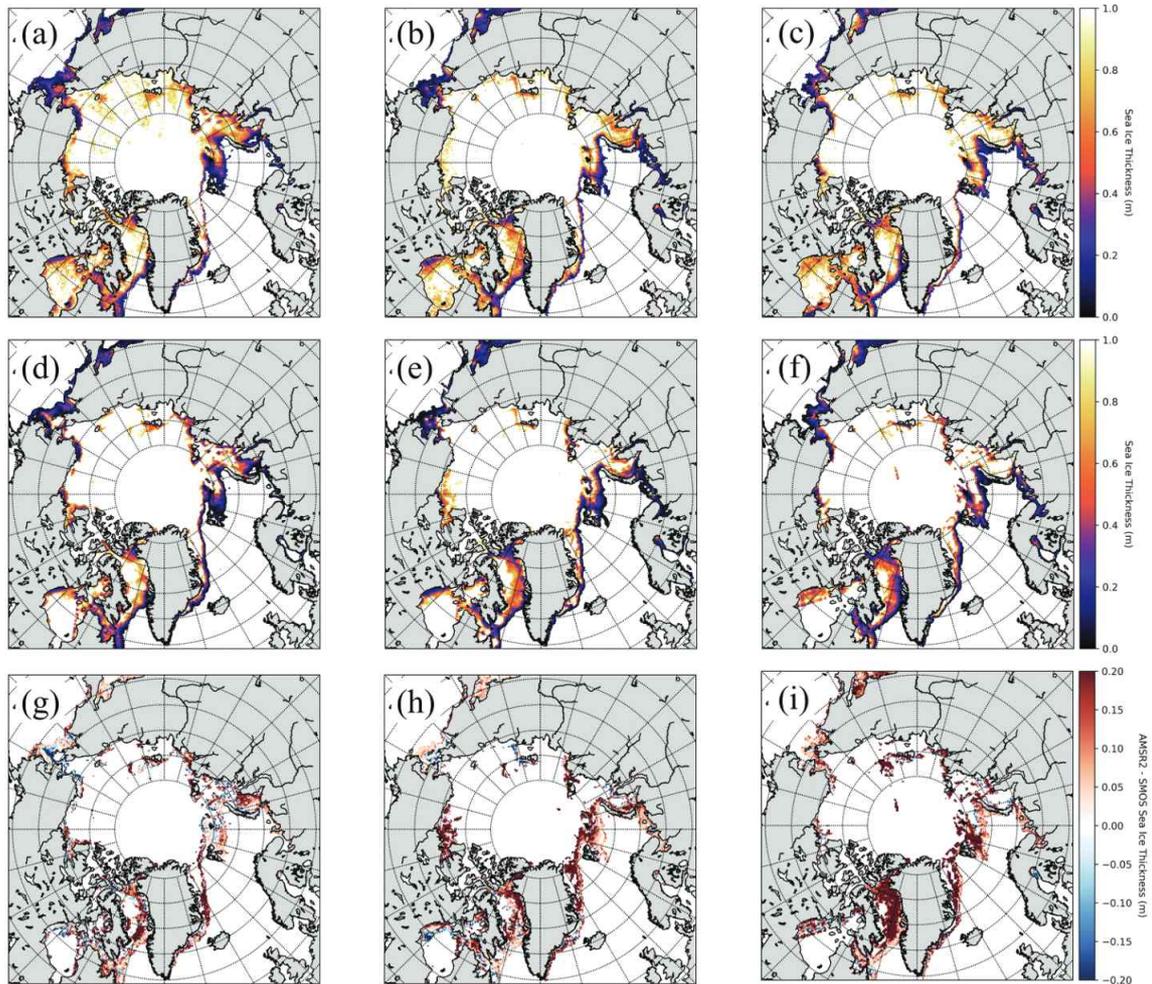


그림 3-1-86. 얇은 해빙에 대한 SMOS와의 비교 결과

6. 해빙 강도

○ 입사각에 따른 해빙 표면 후방산란계수 특성

- 영상레이더 위성자료를 활용하여 해빙 특성의 정확한 시계열 분석을 위해서 표면 특성에 따른 후방산란계수 입사각 보정은 필수로 거쳐야 하는 과정이며 특히 Sentinel-1 Extra Wide Swath (EW) 자료처럼 수백km의 영상에서는 입사각 분포 범위가 18.9~47°이기에 한 영상 내에서도 입사각에 따른 후방산란 신호 차이가 크게 발생함.
- 또한 HH편파와 HV편파의 비율을 사용하는 것이 본 과제의 목표이기 때문에 각 편파자료의 정확성을 높이는 것이 최종 결과의 정확도에 크게 작용함.
- 여러 연구에서 이미 Fram Strait, Canadian Arctic Archipelago, 등 다양한 북극 지역에서 영상레이더 위성자료 입사각특성을 연구하였으나 주로 부류하지 않는 정착빙에 대해서 연구가 되었으며 본 연구의 연구지역인 보포트해 지역에서는 해빙들이 지속적으로 부류하기 때문에 시계열 관측이 어려워 관련 연구 결과가 없는 상황임.
- 이 연구에서는 부포트해 해빙 분포영역의 자장자리에 위치한 다년생 유빙 표면에 GPS를 설치하여 해빙의 위치를 지속적으로 추적하였으며 Sentinel-1 영상 내 해빙의 위치에 해당하는 후방산란계수와 입사각을 추출하여 입사각 특성을 분석하고자 하였음.

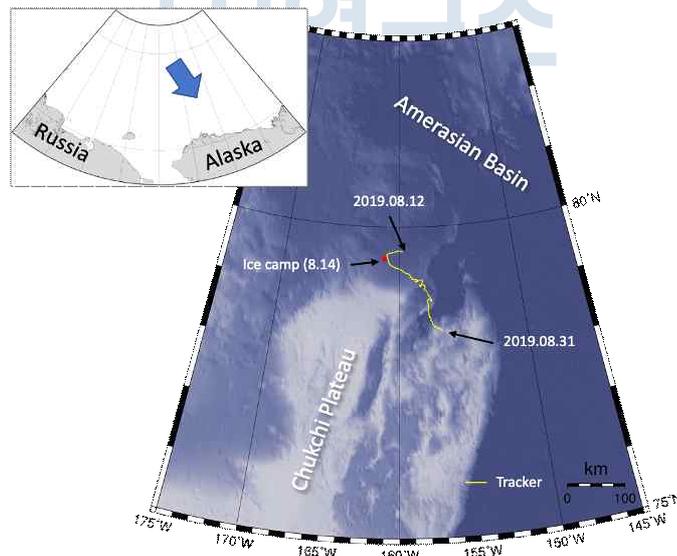


그림 3-1-87. 해빙 표면에 설치된 GPS 위치 변화

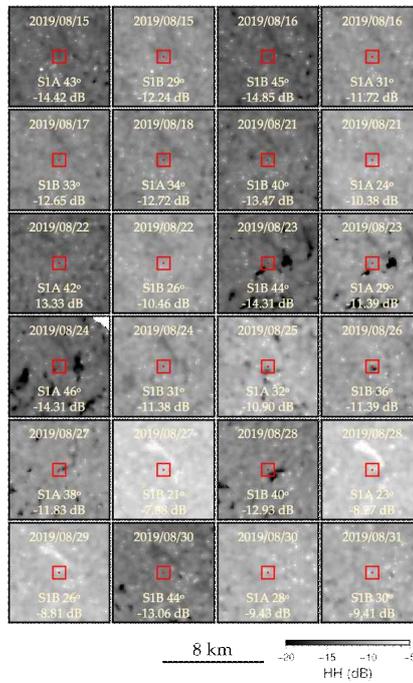


그림 3-1-88. 입사각에 따른 동일 해빙 표면의 후방산란 특성 차이

- 상기 그림에서 볼 수 있듯이 동일 해빙 표면이라도 입사각에 따라서 후방산란계수가 크게 변화하는 것을 볼 수가 있음.
- GPS 정보를 활용하여 추적된 해빙의 1km x 1km 영역에 대한 후방산란계수와 입사각 정보를 추출하여 비교한 결과 입사각이 1°증가함에 따라 HH 편파는 0.24dB 의 기울기로 선형적으로 감소하였으며 HV 편파는 0.10 dB 기울기로 감소하는 것을 확인함.

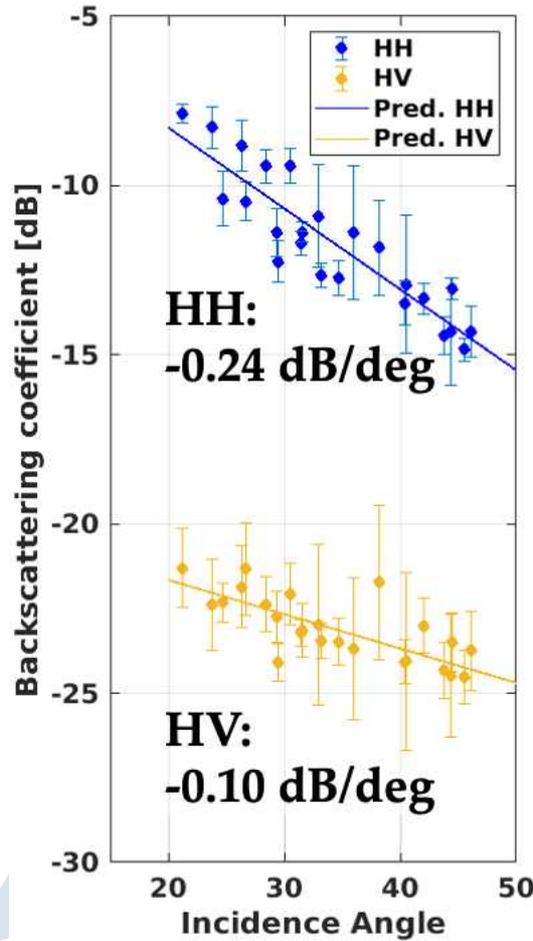


그림 3-1-89. 입사각에 따른 HH, HV 편파 후방산란계수 변화

극지연구소

- 입사각효과가 보정된 후방산란계수와 북극 현장조사에서 확보된 자료 간 상관분석을 통한 급힘강도 산출 알고리즘 개발
 - 앞서 연구된 입사각효과를 보정한 Sentinel-1 후방산란계수와 2017년부터 2018년까지 북극 현장조사에서 확보된 해빙 코어 자료 간 상관 분석을 진행함.
 - 해빙 코어는 10cm 깊이에 따라 염분(salinity)과 온도 자료이며 이를 활용하여 brine volume을 계산할 수 있음.
 - 2017년 4개, 2018년 8개의 해빙 코어 자료는 Sentinel-1 위성 촬영 시간과 현장조사 자료 확보 시간이 다르기 때문에 바로 1대 1 매칭이 불가능함.
 - 북극 현장조사 당시 해빙 floe 에 아라운호가 정박되어 있었기 때문에 DADIS GPS 자료를 확보하여 Sentinel-1 위성 영상 촬영 시간에 아라운 위치를 확인하여 반경 500m 내 후방산란계수 평균을 확보함.

표 3-1-18. 2017년과 2018년에 확보된 해빙 코어 자료 갯수

Date	# of points	Note
2018/08/20~22	2	KOPRI
2018/08/18	3	KRISO
2018/08/17~19	3	KOPRI
2017/08/13	2	KRISO
2017/08/13~15	1	KOPRI
2017/08/16~18	1	KOPRI

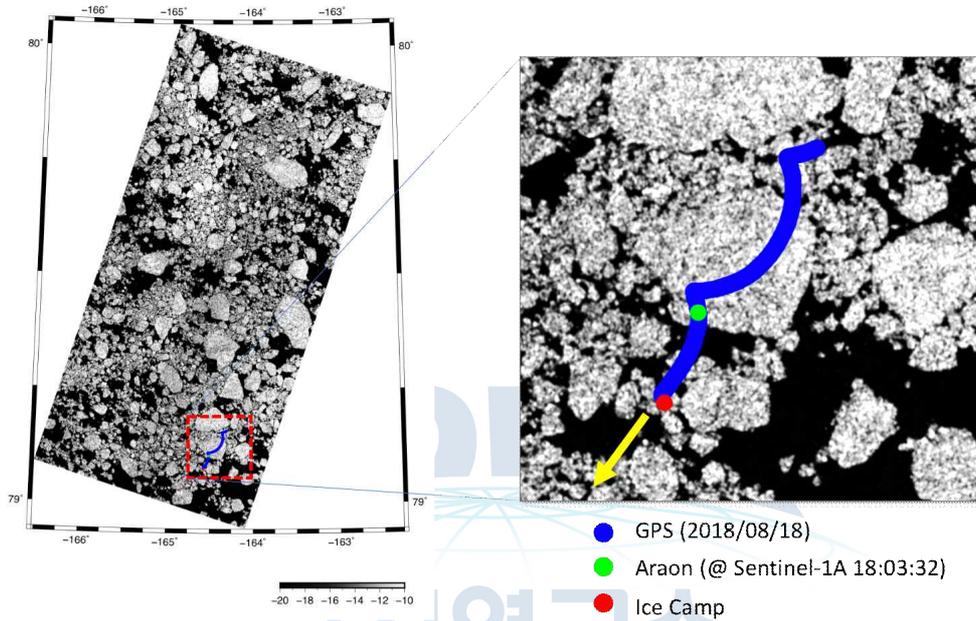


그림 3-1-90. 아라온 GPS 정보를 활용하여 현장조사와 위성영상 간 시간차이에 따른 위치 정보 보정

- Sentinel-1 C-밴드 SAR 신호는 해빙 내 염분(brine)이나 공기방울(air bubble)에서 발생되는 다중산란(volume scattering)에 민감하며 특히 다중편파비(depolarization ratio, HV/HH)는 이런 다중산란의 세기를 분석하는데 유용할 수 있음.
- 현장조사 위치에 해당하는 다중편파비를 위성 영상에서 추출하였으며 앞서 계산한 brine volume 의 root 값과 로그회기모델분석을 수행하였으며 곱힘강도 산출식은 다음과 같음.

$$\sigma_f = 1.76([HV/HH]^{1.08} - e^{2.00})$$

2018. 8. 17. - 8. 23.
(100 m resolution, 7-day, 75 files)

2019. 8. 11. - 8. 16.
(100 m resolution, 6-day, 97 files)

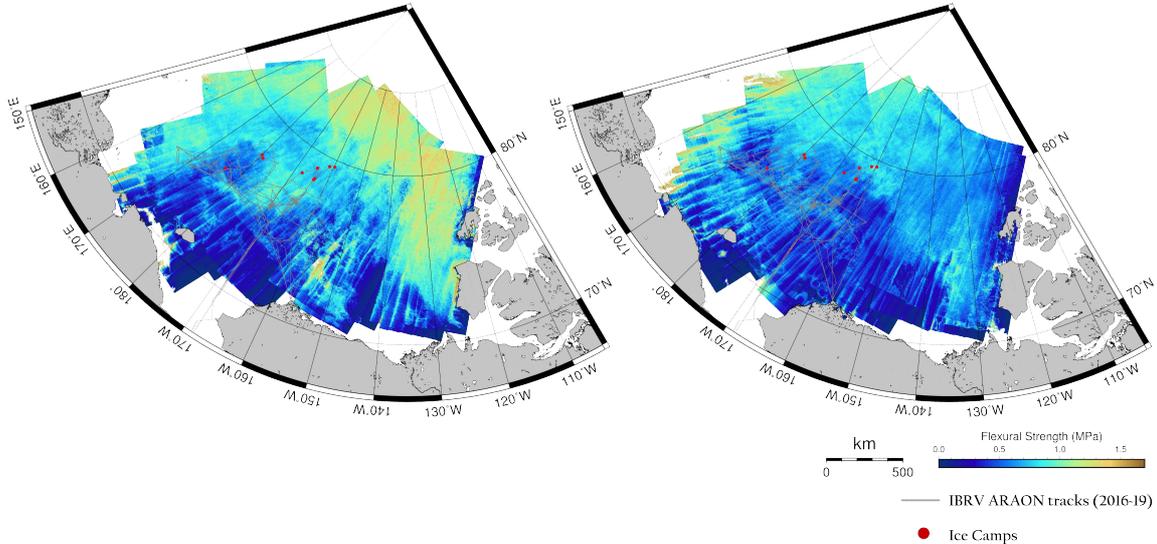


그림 3-1-91. 굽힘강도 산출식을 활용하여 제작한 북극 해빙 강도 지도 (2018년, 2019년)

○ 해빙 굽힘강도 산출 기술 고도화

- 얼음의 굽힘강도는 부러지기 전 까지 가해진 최대 힘과 같으며 극지방을 향해하는 선박이나 구조물의 성능과 안전성을 평가할 때 주로 사용됨.
- 해빙 거칠기 및 염도에 민감하게 반응하는 C-밴드 SAR 다중편파자료와 과거 북극 해빙 캠프에서 획득한 해빙코어 자료간 상관도를 분석하여 염수부피비를 추정하는 알고리즘을 개발함.
- 기존 개발에 활용된 해빙코어 자료는 북극 여름철에 획득되었기 때문에 겨울철 해빙의 특성과 상이할 것으로 예상하여 새로 해빙코어를 확보 및 비교분석을 통해 기존 알고리즘을 개선하고자 하였으나 코로나19 팬데믹으로 인하여 북극 해빙캠프가 취소됨.
- 차선으로 SAR위성이 아닌 타위성 자료를 활용하여 독립적으로 제작된 산출물과 비교하여 알고리즘을 개선하고자 함.
- 대안산출물은 수동마이크로파 위성자료에서 산출된 해빙두께와 ERA5 대기모델에서 추출한 2 m temperature를 활용하여 제작함. 해빙두께는 2 m 기준으로 상이한 경험식에 대입되어 bulk salinity가 계산되었고, 2 m 표면온도는 -2도 기준으로 상이한 경험식에 대입되어 평균 얼음온도로 계산됨.

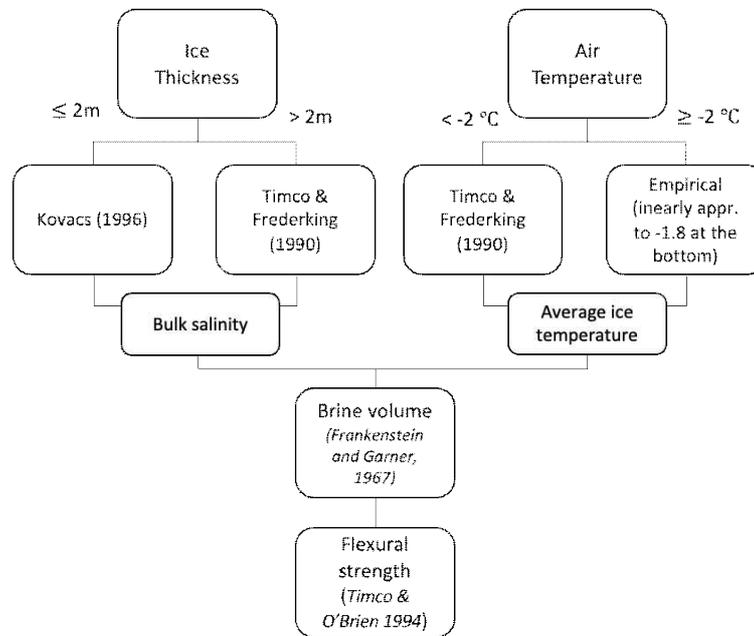


그림 3-1-92. 대안산출물 제작 순서도

- 수동마이크로파 기반 해빙두께 자료는 2010년부터 현재까지 10월부터 4월까지 가을-겨울-봄 시기 자료를 일주일 간격으로 제공함. SMOS 수동마이크로파 자료에서 계산한 얇은 해빙지역과 CryoSat-2 레이더 고도계 자료 기반 계산된 두꺼운 해빙지역이 병합되었으며, 특히 얇은 해빙의 두께 오차가 낮은 장점을 보임. ERA5 2 m temperature 자료는 1979년부터 현재까지 한시간 간격으로 제공함. 해빙두께 자료와 같은 시간 간격을 갖도록 평균 값을 구하여 사용함. 최종 굽힘강도 산출물은 25 km x 25 km 격자로 제작함.
- 2010년 10월부터 2020년 4월까지 1일 간격으로 10년치 7일평균 굽힘강도를 산출함. 연평균 계산 시 최소 하루 이상 해빙이 위치한 픽셀을 사용하였고 북극 전체 평균은 크게 증가하지 않는 것으로 보임.

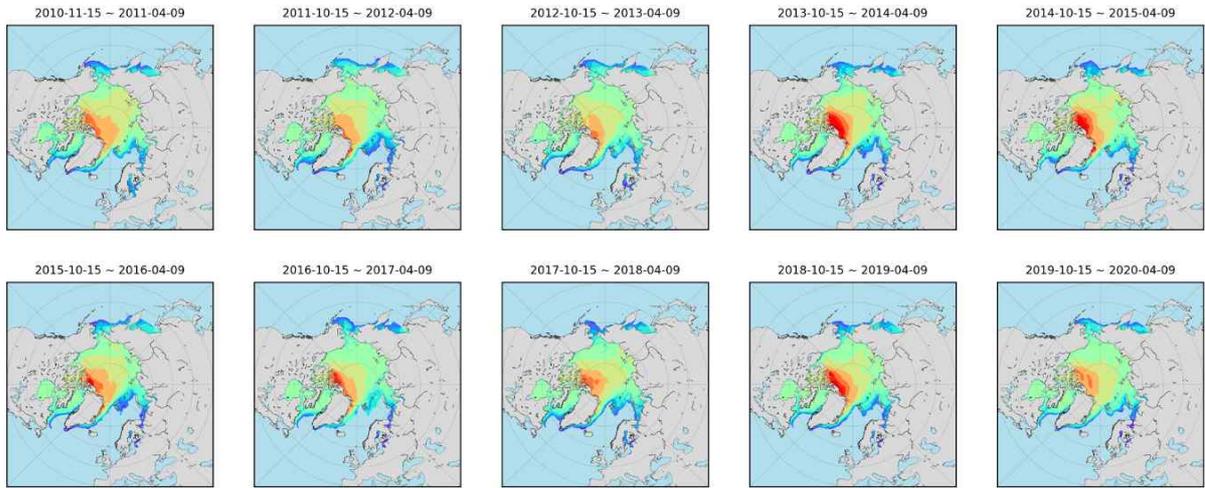


그림 3-1-93. 북극해 굽힘강도 연평균

- 캐나다의 Ellsmere Island와 그린란드 북쪽 바다에 위치한 해빙의 강도가 가장 강했으며, 이는 다년생해빙이 주로 위치하는 장소와 일치함. 2011, 2015, 2019년, 4년 주기로 연평균 강도가 가장 높았으며, 그 사이에 감소와 증가하는 경향성이 보임.
- 대체산출물의 검증을 위해 1996년부터 2006년동안 바렌츠해 주변 단년생 해빙 표면에서 진행된 현장조사 결과를 기록한 논문을 참고하였으며, 주로 5월에 진행된 총 10년동안 확보한 해빙 굽힘강도의 평균과 분산은 각각 0.252 MPa 와 0.084 MPa 로 기록됨.
- 대체산출물에서 바렌츠해 주변 해빙 굽힘강도의 3, 4월 월평균을 계산하여 비교한 결과, 1996~2006년 평균보다 2011~2022년 평균이 높았으나, 이전 현장조사와 시간차가 10년이며 현장조사가 이뤄진 5월부터는 해빙의 용빙이 시작하는 점을 고려하였을 때 대체산출물의 결과가 평균치에서 크게 벗어나지 않는다고 판단됨.

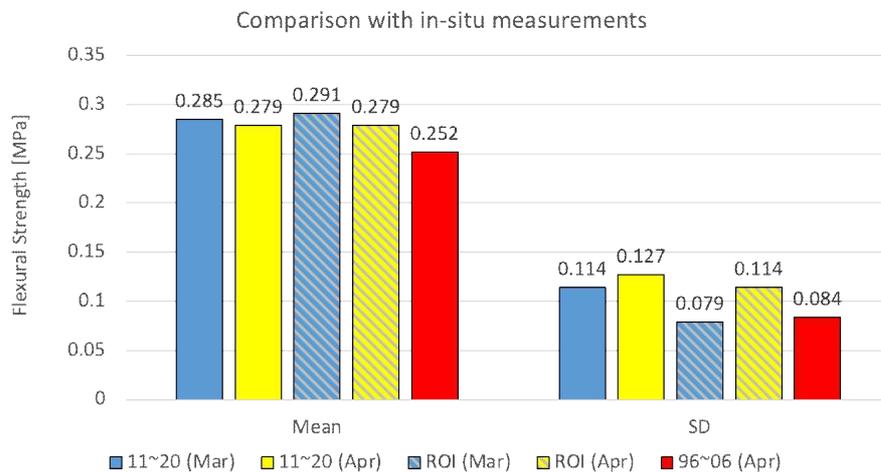


그림 3-1-94. 바렌츠해 월평균 비교

- 독립적인 대안산출물을 이용하여 기존 알고리즘을 개선하고자 하였으며, 2021년 4월 9일에 해당하는 두께자료와 기온자료를 활용하여 제작된 대안산출물을 이용함. 동시기에 북극 전역을 촬영한 Sentinel-1A/B 군집체 자료 확보 후 기존 알고리즘에 대입하여 해빙 굽힘강도 산출함.

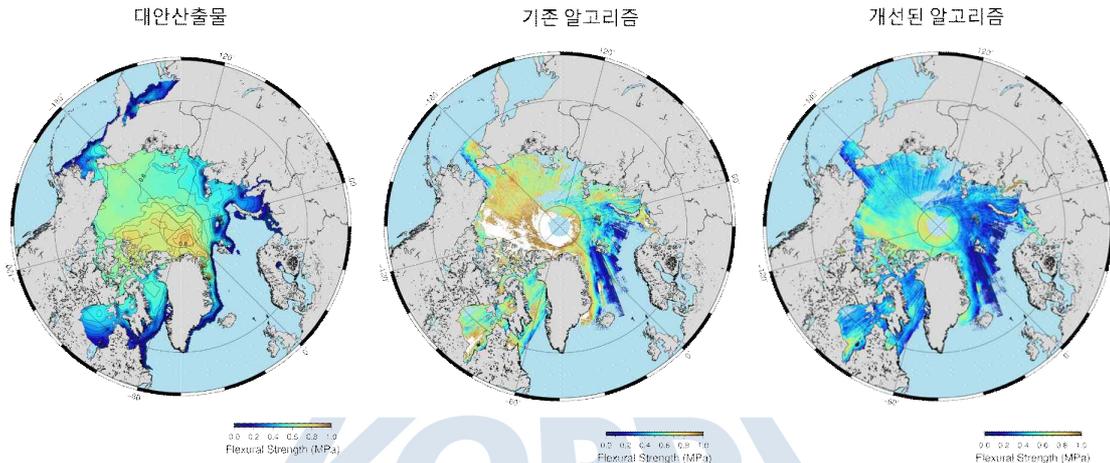


그림 3-1-95. 2021년 4월 9일 해빙 굽힘강도 산출물

- 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 0.5~0.8 MPa 구간에 가장 많은 값이 분포한 반면 기존 알고리즘은 0.5 MPa부터 1.6 MPa까지 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.

7. 해빙 거칠기 (위탁)

○ 북극 해빙 거칠기 변화 연구

가. 이론적, 실험적 접근 방법

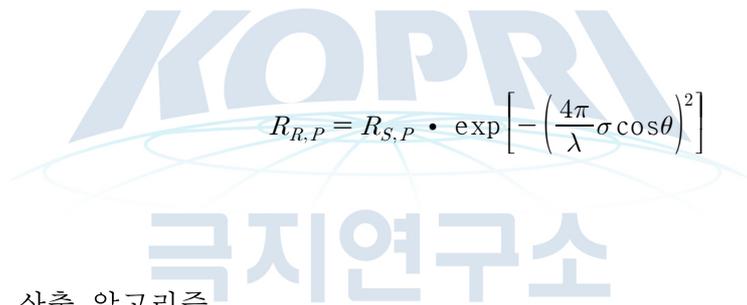
1) 편광 반사도 ($R_{R,P}$)

- 전자기학적 분석을 통한 파장별 편광 반사도와와의 상호 변환 관계식을 적용함. 입사되는 전자기파의 파장 (λ)과 거칠기 (σ)의 상대적 크기와 비율에 따라 반사각 (θ)을 중심으로 가우시안 분포를 갖는 높이 확률 밀도 함수로 표현할 수 있음. (Choudhury et al., 1979; Wu and Fung, 1972)

$$\chi(h) = \exp(-h \cdot \cos^2\theta)$$

$$h = 4\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \sigma^2$$

- 비간섭적 접근을 기반으로 한 semi-empirical model에서 정반사성 표면의 편광 반사도 ($R_{S,P}$)로써 거친 표면의 편광 반사도 ($R_{R,P}$)를 표현할 수 있다. (Ulaby et al., 1982)


$$R_{R,P} = R_{S,P} \cdot \exp\left[-\left(\frac{4\pi}{\lambda}\sigma \cos\theta\right)^2\right]$$

2) 해빙 거칠기 산출 알고리즘

- Small-scale에서의 해빙 거칠기는 해빙 표면 반사도에 영향을 미치기 때문에 표면 편광 반사도 식을 거칠기 식에 대해 정리하여 다음 같이 해빙 표면 거칠기를 산출할 수 있음.

$$\sigma = \frac{\lambda}{4\pi \cos\theta} \sqrt{\ln\left(\frac{R_{S,P}}{R_{R,P}}\right)}$$

- 그러나 위성에서 관측되는 해빙 표면은 정반사성 표면이 아니므로 다음의 과정을 거쳐 거친 표면에서의 해빙 거칠기를 산출한다. Brewster angle 근처에서의 거친 표면의 편광 반사도와 정반사성 표면의 편광 반사도는 다음과 같은 관계를 가진다. (Hong, 2009, 2010, 2013)

$$R_{S,V} > R_{R,V}$$

$$R_{S,H} \approx R_{R,H}$$

해빙 표면 거칠기 식에 위 두 식을 적용하여 다음과 같이 쓸 수 있음.

$$\sigma = \frac{\lambda}{4\pi \cos\theta} \sqrt{\ln\left(\frac{R_{S,V}}{R_{R,V}}\right)}$$

- 위 식에 아래의 Hong approximation을 적용하여,

$$R_{S,V} = (R_{S,H})^{\sec^2\theta}$$

- 정반사성 표면의 수직 편광 반사도 ($R_{S,V}$)를 거친 표면의 편광 수직 편광 반사도 ($R_{R,V}$)로 변환함. (Hong et al., 2014) 해당 식은 녹고 있는 해빙 거칠기 산출에 효과적임.

$$\sigma = \frac{\lambda}{4\pi \cos\theta} \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{R_{R,V}^{\cos^2\theta}}{R_{R,H}}\right)}$$

- 편광 반사도는 다음 식과 같이 수직 및 수평 편광 밝기온도 ($T_{B,V}$, $T_{B,H}$)와 표면 온도 (T_S)로 표현이 가능하므로 (Comiso et al., 2003),

$$R_{R,P} = 1 - \frac{T_{B,P}}{T_S} \quad (P = V \text{ or } H)$$

- 최종적으로 거친 표면에서의 해빙 거칠기는 다음 식과 같이 작성할 수 있음.

$$\sigma = \frac{\lambda}{4\pi \cos\theta} \cdot \sqrt{\ln \left[\frac{\left(1 - \frac{T_{B,H}}{T_S}\right)^{\sec^2\theta}}{\left(1 - \frac{T_{B,V}}{T_S}\right)} \right]}$$

3) 북극 해빙 거칠기-두께 변환관계식

- 0.5 m 이하의 얇은 초년생 해빙의 두께 (D_{ice})와 해빙 거칠기 (σ_{ice})의 겨울철 (10월~4월) 동안의 상관성은 다음의 관계식으로 표현될 수 있음. (Jo et al., 2019)

$$D_{ice} = a \cdot \sigma_{ice}^b \quad (a = 13.27, b = 4)$$

- 변환관계식은 수동형 마이크로파 위성인 Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS)와 Soil Moisture Active Passive (SMAP)의 해빙 두께와 거칠기 자료를 기반으로 생성됨. 위 식은 다음의 두 식과 같이 SMAP 위성 기반 해빙 두께와 SMOS 위성 기반 해빙 거칠기 산출식으로 나타낼 수 있고, 각각 8.034 cm, -0.139 cm만큼의 오차 보정을 포함함.

$$D_{ice,SMAP} = a \cdot \sigma_{SMAP}^b + 8.034 \quad (a = 13.27, b = 4)$$

$$\sigma_{SMOS} = \left(\frac{D_{ice,SMOS}}{a} \right)^{\frac{1}{b}} - 0.139$$

4) Empirical Orthogonal Function (EOF)

- EOF 분석은 시간에 따라 변화하는 연속적인 고차원의 공간자료로부터 여러 개의 독립적인 성분을 분산이 큰 순서로 추출하는 방법으로 시공간 변동성을 동시에 제시할 수 있음. 통계학에서 많이 사용되는 주성분 분석 (Principal Component Analysis, PCA)과 동일한 개념으로 기후 연구에서는 변화하는 공간 패턴과 패턴의 시간에 따른 변화를 연구하는 데 사용됨. 분해되는 EOF의 분산을 모두 더하면 원자료의 총 분산과 동일해지며, 일반적으로는 원자료 분산의 대부분을 설명하는 몇 개의 EOF를 통해

원자료를 재현함. EOF 분석에는 특이값 분해 (Singular Value Decomposition, SVD)와 같은 방법이 주로 사용됨.

$$A = U \times S \times V^T$$

- 위 식의 원자료 A는 세 개의 행렬로 분해 가능하며, 행렬 U의 열이 EOF이고 S의 대각 요소가 각 성분의 분산 설명력을 의미하는 고유값, V의 열이 EOF의 시간적 변화를 나타내는 EOF 시계열에 해당함. (Hannachi et al., 2022; 조은샘 and 유철상, 2020)

나. 연구자료

1) SMAP 위성 자료

- L-band (1.41GHz, $\lambda = 21.41\text{cm}$) 마이크로파 Soil Moisture Active Passive (SMAP) 위성의 Enhanced L3 Radiometer Global Daily 9km EASE-Grid Soil Moisture, Version 4 (SPL3SMP_E) 자료를 사용함.
- SMAP은 수동형 센서와 능동형 센서를 모두 탑재하고 있으며 본 연구에서는 수동형 센서로 관측된 Level-3 자료를 사용함. 해당 자료는 SMAP Level-1C의 밝기온도 기반의 Level-2 지구 표면 일일 추정치를 합성한 토양수분 일자료로 9km×9km의 공간 해상도와 일일 시간 해상도를 가짐. 해당 자료는 2015년 3월 31일 이후부터 현재까지 HDF5 형식으로 제공되고 있고, 연구에는 2015년 4월 1일부터 2019년 12월 31일까지의 수직, 수평 편광 밝기 온도($T_{B,V}$, $T_{B,H}$)와 표면온도(T_s) 자료를 사용함.

2) AMSR2 해빙 농도 위성 자료

- 수동형 마이크로파 위성인 Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2)의 Unified L3 Daily 12.5km Brightness Temperatures, Sea Ice Concentration, Motion & Snow Depth Polar Grids, Version 1 (AU_SI12) 자료에서 제공되는 해빙 농도 자료를 사용함.
- 해당 자료는 12.5km×12.5km의 공간 해상도와 일일 시간 해상도로 2012년 7월 2일 이후부터 현재까지 HDF-EOS5 형식으로 제공되고 있음. 연구에는 2015년 4월 1일부터 2019년 12월 31일 기간의 자료가 사용됨.

3) ECMWF ERA5 자료

- 유럽중기예보센터 (ECMWF)에서 제공하는 ECMWF re-analysis 5th generation (ERA5) 월평균 재분석 자료를 사용함.
- 해당 자료는 관측자료 기반의 자료동화기법을 통해 산출되며, 1959년부터 현재까지 매달 6일경 최신 기간의 자료가 업데이트 되고 있음. 연구에는 2015년 4월부터 2019년 12월의 해수면 온도, 10m 고도에서의 풍속, 대기압 등의 자료가 사용됨.

다. 연구내용

- 본 연구에서는 사전 연구로 진행되었던 해빙 거칠기 산출 알고리즘을 개선하고자 함.
- 겨울철에만 산출 가능하던 기존 알고리즘을 자료 변경을 통하여 여름철에도 산출될 수 있도록 개선하였고, 이후 개선된 알고리즘을 바탕으로 해빙 거칠기의 변동성 분석 및 거칠기와 관련된 기후 변수를 탐색하고 인과관계를 살펴보는 연구를 진행함.
- 해빙 거칠기 산출 알고리즘에는 SMAP 위성 자료를 사용함. SMAP은 40°의 고정된 입사각의 수동형 라디오미터와 능동형 레이더 센서를 모두 탑재하고 있기 때문에 라디오미터와 레이더 자료의 결합을 통해 최대 9km 공간 해상도로 높은 정확도의 수동형 라디오미터 자료를 제공함. 또한 준극궤도(near-polar) 및 태양동기궤도 위성이기 때문에 거의 일정한 시각의 고위도 지상 정보를 제공하고 있어 극지역의 변화 정보를 추적하기에 용이함. 이러한 이유로 해빙 거칠기 산출에 SMAP 위성의 수동형 라디오미터 밝기온도 및 표면온도 자료를 사용함.

1) 해빙 거칠기 알고리즘 개선

- 해빙 거칠기는 해빙 영역뿐만 아니라 바다와 육지 등 표면 전체의 거칠기 산출이 가능한 알고리즘의 산출 영역을 해빙으로 제한하여 산출함. 따라서 해빙 영역을 설정하는 과정이 중요하며, 이때 사용되는 자료의 제공 시기가 해빙 거칠기 산출물의 시간 커버리지에 영향을 미치게 됨.
- 본 연구의 사전 연구에서는 SMAP 위성의 수직 및 수평 편광 밝기온도와 표면 온도를 알고리즘에 적용하여 해빙 거칠기를 산출하였고, 이때 개빙 구역과 해안 연안을 제외하여 해빙 영역을 설정하기 위해 다음 그림과 같은 SMAP surface_flag의 model frozen ground flag 자료와 Cryosat-2의 해빙 두께 자료를 사용함.

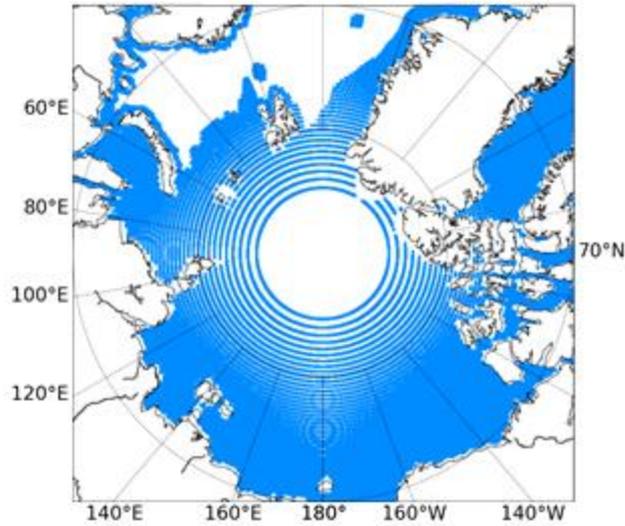


그림 3-1-96. SMAP 9km model frozen ground flag 자료

- 그러나 model frozen ground flag 자료는 영구동토층의 freeze/thaw 영역 탐지 알고리즘을 기반으로 하기 때문에 정확한 해빙 영역을 제공하고 있다고 보기에는 어려움이 있고, 특히 여름철인 5~9월의 경우, 다음 그림과 같이 해빙 영역을 거의 잡아내지 못함.
- Cryosat-2의 해빙 두께 자료 역시 5~9월에는 제공되지 않으며, 시간 해상도 또한 28일인 월자료이기 때문에 일일 해빙 거칠기 자료를 산출하기엔 해빙 영역의 시간적 변화를 반영하지 못한다는 한계가 있음.
- 따라서 계절에 영향을 받지 않고 일일 해빙 영역을 설정하기 위하여 기존에 사용하던 두 자료 대신 AMSR2의 해빙 농도 자료로 변경함. AMSR2의 해빙 농도는 마이크로파 주파수의 밝기 온도가 100% 해빙과 100% 해수에서의 값을 중심으로 군집하는 경향에 기반하여 아래의 선형 혼합 방정식을 통해 산출됨. (Zwally et al., 1983)

$$T_B = T_i C_i + T_o (1 - C_i)$$

- T_i 는 100% 해빙의 밝기온도, T_o 는 100% 개빙 구역에서의 밝기온도, C_i 는 해빙 농도를 의미함.
- 일반적으로 해빙 면적 계산 시, 해빙 농도 15%를 임계값으로 설정하여 그 이상의 값이면 바다가 해빙으로 덮여 있다고 간주함. (Meier et al., 2019) 따라서 AMSR2 해빙 농도 자료가 15% 이상인 영역을 해빙으로 판단, 해당 영역의 SMAP 자료를 거칠기

알고리즘에 적용하여 해빙 거칠기를 산출함.

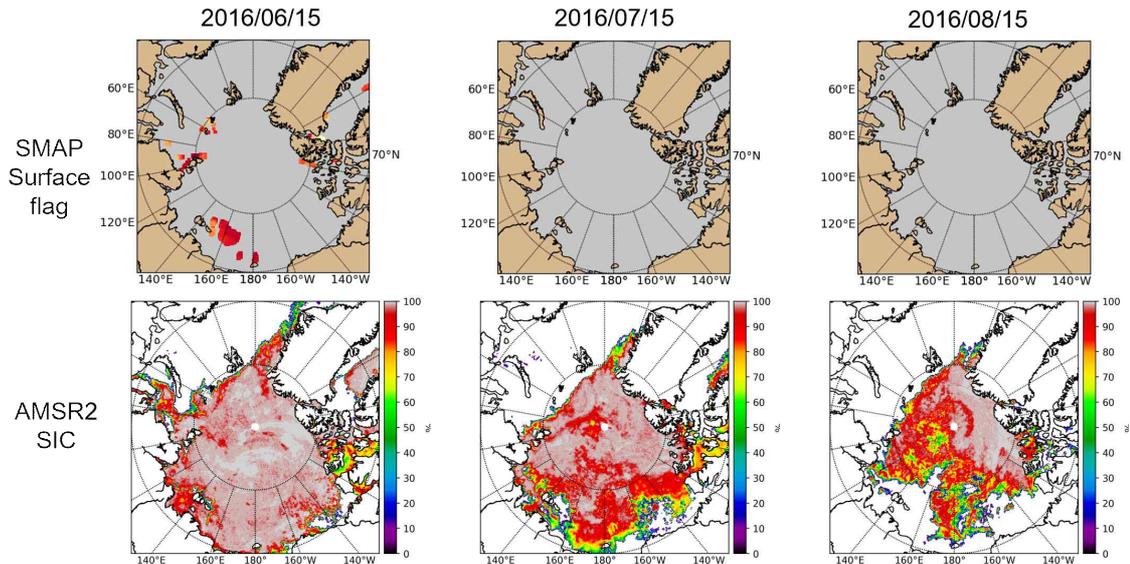


그림 3-1-97. 개선 전후 해빙 거칠기 알고리즘에 적용된 여름철 해빙 영역 판단 일자료 (위)
SMAP surface flag (아래) AMSR2 해빙 농도

- 자료 개선을 통하여 여름철을 포함한 전 계절에서의 해빙 거칠기를 산출할 수 있게 되었으며, 해빙 변동성 분석 및 기후 변수 탐색 연구에 개선된 알고리즘으로 산출된 해빙 거칠기를 사용함.

2) 해빙 거칠기 변동성 분석

(가) 시계열 변화 분석

- 개선된 알고리즘으로 산출된 SMAP 해빙 거칠기를 사용하여, 여름철을 포함한 전 계절 해빙 거칠기의 시계열적 변화 추세를 확인하고 월별, 연도별 패턴을 분석해 보고자 함.
- 분석은 전체 해빙 영역과 0.5m 이하의 얇은 해빙 영역으로 나누어 진행함. 이때 0.5 m 이하의 얇은 해빙 영역 설정에는 거칠기 기반 해빙 두께 변환관계식을 통해 얻어진 SMAP 해빙 두께 자료를 사용함. 해당 변환식은 SMOS 해빙 두께 자료를 기반으로 생성되었기 때문에 일반적으로 0.5 m 이하의 해빙 영역이 SMOS에서의 0.5 m 이하 해빙 영역과 거의 일치하나, 해빙이 두꺼워지기 시작하는 10월 경에는 SMAP 해빙 두께가 SMOS 해빙 두께 보다 과대 추정하는 경향이 있어 다음 그림과 같이 0.5 m 이

하 해빙 영역이 상대적으로 넓게 추정될 수 있음.

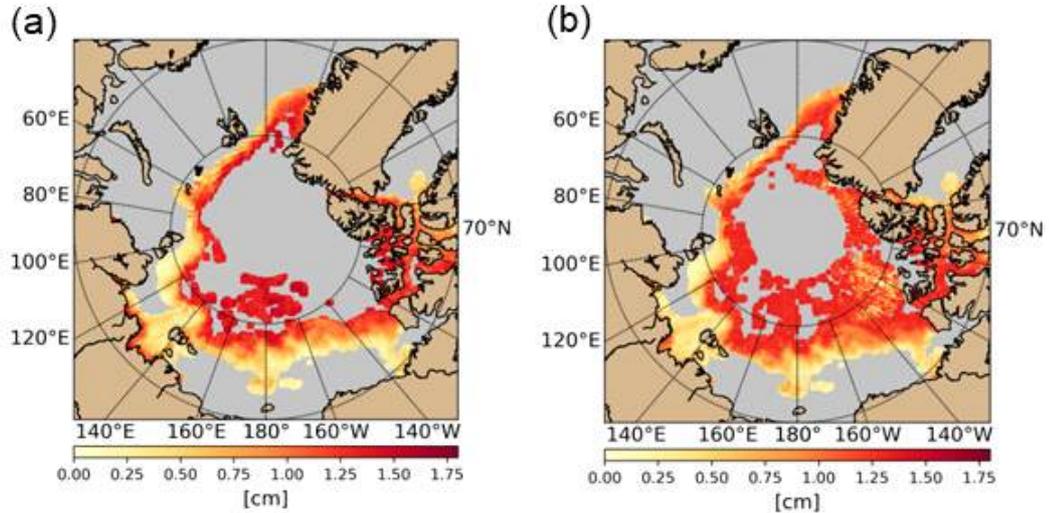


그림 3-1-98. 0.5m 이하의 얇은 해빙 영역에서의 거칠기 (a) SMOS 영역 (b) SMAP 영역

- 그러나 SMOS 자료의 경우, 10월 중순부터 4월 중순 기간의 자료만을 제공하기 때문에 여름철 해빙 두께 자료를 획득할 수 없다는 한계가 있지만, SMAP 해빙 두께는 해빙 거칠기를 기반으로 산출되기 때문에 여름철에도 획득이 가능하다는 이점이 있음. 시계열 및 월별, 연도별 변화 패턴 분석에는 일일 SMAP 해빙 거칠기 자료를 평균한 월자료를 사용함.

(나) EOF 분석

- 해빙 거칠기의 시공간적 패턴의 변동성을 확인하고자 EOF 분석을 실시함. 0.5 m 이하의 얇은 해빙 분포는 위 그림의 (b)와 같이 띠 형태의 좁은 영역에 해당되므로 EOF 분석은 전체 해빙 영역에 대해서만 진행함.
- EOF의 각 모드는 분산의 크기에 비례하여 원자료의 시공간적 변동성의 설명력을 가짐. 따라서 해빙 거칠기의 80% 이상을 설명할 수 있는 상위 3개 모드에 대해서 분석함. EOF 분석 시, 프로그램은 python 라이브러리인 eofs를 활용하였으며, (<https://ajdawson.github.io/eofs/latest/api/eofs.standard.html>) 시계열의 변동성에 초점을 맞추어 해석하기 위해 해빙 거칠기 자료에서 장기 경향성인 선형 추세를 제거함. 이를 통해 해빙 거칠기의 주기적 패턴 및 다른 기후 변수들과의 시계열 패턴 분석을 실시할 수 있음.

3) 해빙 거칠기 관련 기후 변수 탐색

- EOF 분석을 통해 얻어진 상위 3개의 해빙 거칠기 주성분 (Principal Component: PC)을 다양한 기후 변수들과의 시간에 따른 패턴 분석을 통해 해빙 거칠기와 관련성을 갖는 기후 변수들을 찾고자 함.
- 분석에는 ERA5의 해수면 온도와 10 m 고도에서의 풍속, 대기압 자료 및 Arctic Oscillation (AO), Pacific-North American (PNA), Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) Index 자료를 비교 변수로 사용함.
- 전해빙 거칠기 주성분들과 기후 변수들 사이의 선후행 관계는 Time Lagged Cross Correlation (TLCC)을 통하여 추정하였으며, TLCC는 Pearson CC를 기반으로 계산함.
- 일반적으로 변수 간의 상관성 분석에 사용하는 Pearson CC는 두 변수간의 선형 상관관계를 나타내는 정보이기 때문에 변수들 간의 인과관계는 설명이 불가능함. 또한 두 변수가 시계열 자료일 경우, 자료 간의 상관성 비교를 위해서는 시차가 정보가 고려되어야 하기 때문에 해빙 거칠기와 관련된 기후 변수 탐색에는 pearson CC의 사용이 적합하지 않음.
- 따라서 하나의 자료를 시간에 따라 이동시키면서 시차마다 전체 자료의 pearson CC를 계산하는 방식인 TCLL을 사용하여 두 자료가 어느 정도의 시차를 가질 때 상관성이 최대가 되는지 알아보려고 함. 시차가 양의 값이면 움직이는 자료가 상관관계를 주도, 즉, 선행되는 것을 의미하며, 음의 값이면 후행된다고 해석할 수 있음.

라. 연구결과

1) 해빙 거칠기 변동성 분석

(가) 시계열 변화 분석

- 다음 그림은 각각 전체 해빙 영역과 0.5 m 이하의 얇은 해빙 영역에서의 해빙 거칠기 변화 추세에 대한 결과 그래프임. 해빙 거칠기는 해빙 표면의 거친 정도를 나타내는 것으로, 해빙이 녹는 정도에 영향을 받기 때문에 감소 시기와 관련 있기 있고, 그림의 (c)와 (d)에서 전체 해빙과 얇은 해빙에서의 거칠기가 공통적으로 겨울에 증가하고 여름에 감소하는 패턴은 이러한 측면에서 해석이 가능함.

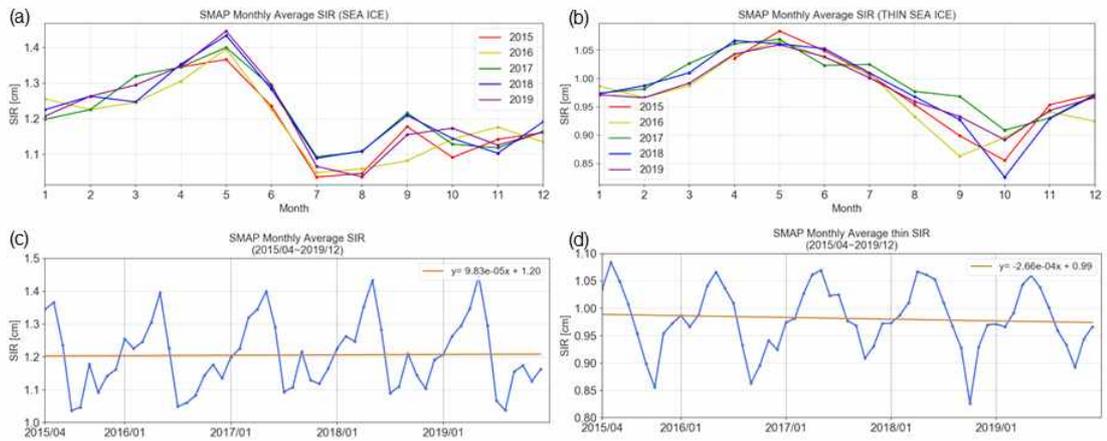


그림 3-1-99. 해빙 거칠기 변화 추세 및 연도별 변동 패턴 (a), (c)는 전체 해빙, (b), (d)는 얇은 해빙

- 겨울철은 기온의 감소로 해빙이 동결되는 기간이기 때문에 단년생과 다년생 해빙의 면적이 증가하고 두께가 두꺼워지면서 해빙 표면이 점차 더 거칠어지게 되고, 여름철은 해수면 온도 상승하면서 단년생 해빙은 거의 사라지고 다년생 해빙은 녹으면서 해빙 표면이 매끄러워져 거칠기가 감소하게 됨.
- 그러나 전체 해빙과 얇은 해빙 영역에서의 유사한 거칠기 패턴은 최소가 되는 시기에 차이를 보임. 전체 해빙 영역의 거칠기는 7, 8월에 최소가 되는데, 이때는 태양에너지와 해수면 온도가 최대가 되는 시기이기 때문에 급격히 해빙이 녹게 되어 표면의 거칠기 역시 짧은 기간 안에 급격히 감소하는 것으로 이해할 수 있음.
- 반면 얇은 해빙은 9, 10월에 거칠기가 최소가 되는데, 이 시기는 해빙의 면적이 최소가 되는 시기로 얇은 해빙은 대부분 녹아 사라지고, 남아있는 해빙의 표면마저 녹아 매끄럽게 되어 거칠기가 감소한 것으로 보임. 이러한 해빙 면적과의 연관성은 서서히 감소하고 증가하는 패턴에서도 확인이 가능함.
- 특이한 점은 전체 해빙 영역에서의 거칠기가 가장 더운 9월에 증가하고 있다는 점인데, 이는 태양에너지에 의해 해빙 표면이 녹아내리면서 매끄러워지긴 하나 이 시기에는 대부분의 얇은 해빙은 녹아 사라지고 두꺼운 해빙만 남게 되기 때문에 오히려 해빙 거칠기가 증가한 것으로 생각됨. 전체 해빙과 얇은 해빙에서의 연도별 거칠기 변화는 다른 해와 다르게 2016년에 다른 양상을 보이는데, 이는 2016년에 발생한 강한 엘니뇨 현상에 의해 해빙이 이른 시기에 더 많이 녹았기 때문으로 추정됨.
- 이러한 해석은 위 그림 (a)와 (b)의 시계열 변화 추세와도 관련지어 생각해 볼 수 있음. 얇은 해빙 거칠기의 감소 추세는 얇은 해빙 면적 지속적으로 더 많이 사라지고 있는 것으로 이해할 수 있으며, 전체 해빙 거칠기의 증가 추세는 해빙이 동결되면서 거칠어진다고 보던 얇은 해빙이 빠르게 녹아 사라지면서 상대적으로 두꺼운 해빙만 남게

되어 오히려 해빙 거칠기가 증가하는 것으로 이해할 수 있음.

(나) EOF 분석

- 해빙 거칠기는 다음 그림들과 같이 3개의 모드로 83.2%를 설명할 수 있음.

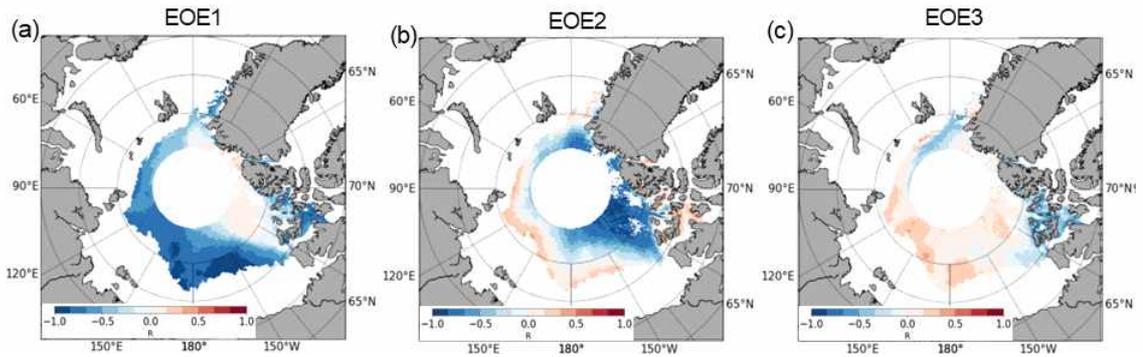


그림 3-1-100. 해빙 거칠기 EOF 모드 (상위 3개)

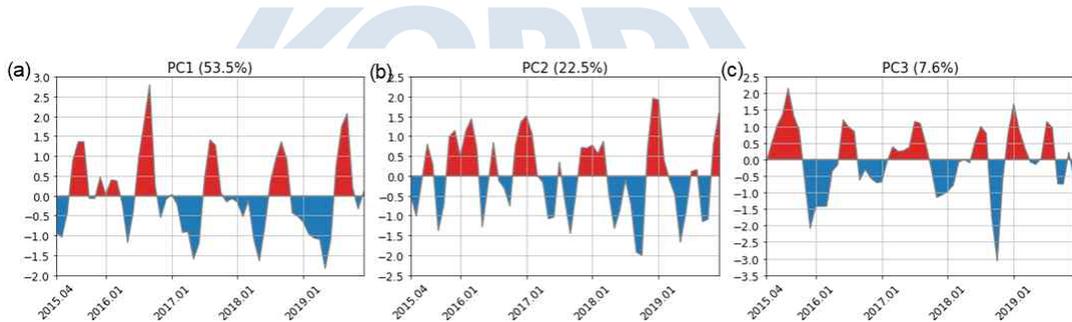


그림 3-1-101. 해빙 거칠기 주성분 (상위 3개)

- 첫 번째 모드는 가장 지배적인 추세로 해빙 거칠기의 53.5%를 설명하며 보퍼트 해와 러시아 근방의 해역에서 음의 상관성을 보임. (a)는 첫 번째 주성분으로 계절적 변동성이 뚜렷하게 반복되며 전 기간에 걸쳐 거의 일정한 강도로 패턴이 나타나는 것을 확인할 수 있음. 여름철에 증가하고 겨울철에 감소하는 이러한 형태의 패턴은 해수면 온도의 변화 주기와 유사하며, 이후 진행된 기후 변수 탐색 연구를 통해 해수면과 연관이 있음을 확인하였음.
- (b)의 두 번째 모드는 해빙 거칠기의 22.5%를 설명하며 해빙의 내부와 경계면에서 음의 상관성을 보였고, 비교적 내부에서 강한 변동성이 나타남. 두 번째 주성분에서는 첫 번째 주성분과 마찬가지로 일정한 계절적 주기를 갖는 패턴을 확인할 수 있었으며, 시간이 지날수록 점차 강하게 진동하는 형태를 보임.

- (c)는 세 번째 모드로 해빙 거칠기의 7.6%를 설명하며, 전체적으로 약한 변동성을 보임. 흥미로운 점은 북극권 해양에서 나타나는 해류 순환 패턴이 분명하게 관찰된다는 것인데, 해빙 영역에서의 EOF 분석이므로 고위도 일부 영역의 공간 변동성만 확인이 가능하여 광범위한 해류 순환 패턴까지는 확인이 어렵다는 한계가 있음.
- 북극권에서는 다음 그림 (a)의 파란색 화살표 흐름에 해당하는 해빙수와 같은 차가운 담수 해류의 유출과 빨간색 화살표 흐름에 해당하는 따뜻한 북대서양 해류의 유입이 발생하며, 특히 그린란드와 스피츠베르겐 간 깊은 해협인 프람 해협 (Fram strait)을 통해 따뜻한 해수가 북극해 중앙으로 유입되면서 빙하를 녹이게 됨 (그림 (b)). 해빙 거칠기의 세 번째 모드에서 이와 같은 흐름이 나타나며, 프람 해협 근방에서는 담수와 북대서양 해류의 반대되는 변동성을, 북극 제도 (Arctic Archipelago)에서는 차가운 담수의 흐름을 확인할 수 있음.

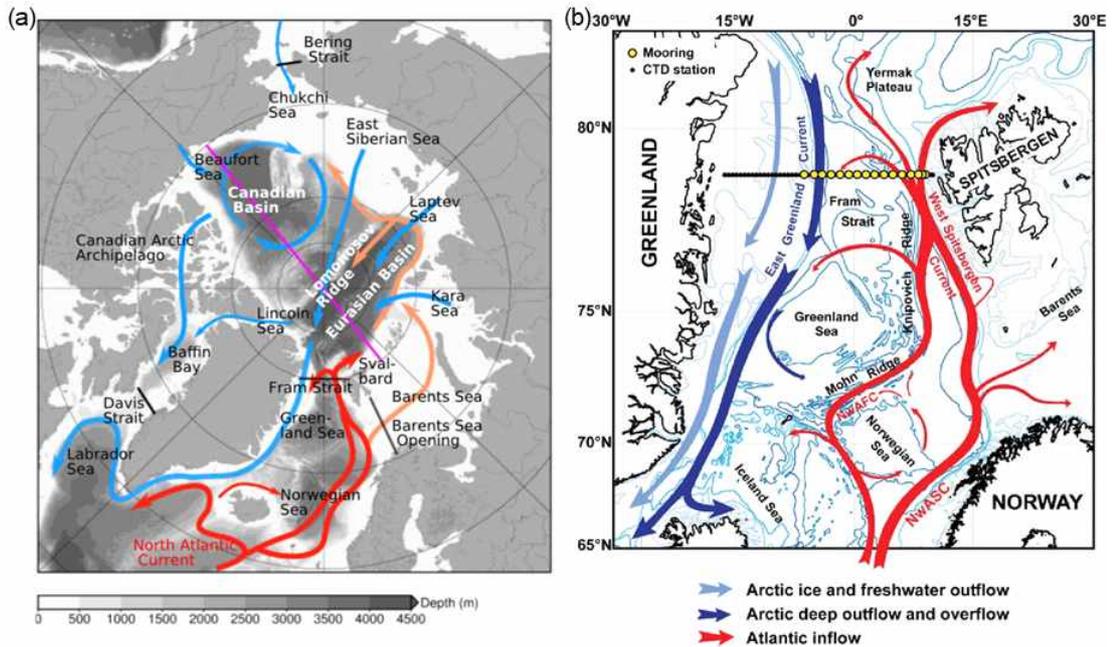


그림 3-1-102. (a) 북극권에서의 해양 순환 (Wang, Q et al., 2018), (b) 프람 해협에서의 해류 순환 (Beszczynska-Moller et al., 2012)

2) 해빙 거칠기 관련 기후 변수 탐색

- 다음 그림은 EOF 분석을 통해 얻은 3개의 해빙 거칠기 주성분(PC)과 기후 변수들과의 TCLL을 통해 얻어진 결과임. 첫 번째 열은 해빙 거칠기와 변수들 사이의 선후행에 따른 TCLL을 나타낸 그래프이고, 두 번째 열은 TCLL의 절댓값이 가장 클 때의 시차만큼 이동시켜 해빙 거칠기 PC와 변수를 중첩한 시계열 결과 그래프임. 시차는 1달을 기준으로 이동시켜 분석함.

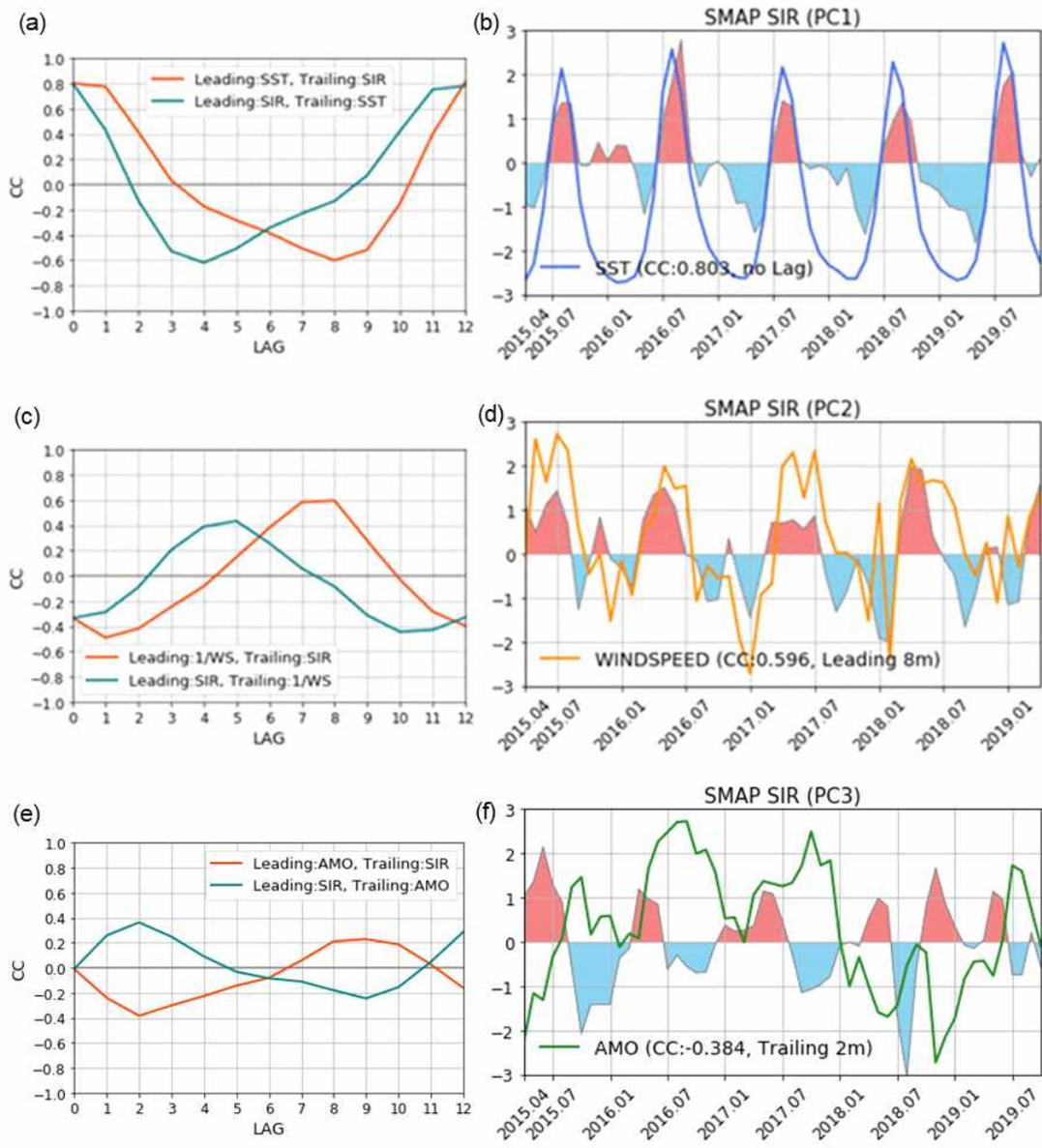


그림 3-1-103. 해빙 거칠기 PC와 기후 변수 사이의 TLCC (좌) 및 시계열 중첩 (우) ((a), (b)는 PC1&SST, (c), (d)는 PC2&1/풍속, (e), (f)는 PC3&AMO)

- PC1은 앞서 EOF 분석 시, 일관된 계절 변동을 보이는 것을 확인하였고 해수면 온도의 변동 주기와 유사하다고 판단하여 해수면 온도와 비교를 실시함. 그 결과 그림 8-(a)에서 확인되듯이 시차가 없거나 12달일 때 Pearson CC가 최대가 되었으며, 이는 PC1과 해수면 온도 사이의 시계열적 시차는 없고 두 자료 모두 일 년 주기의 반복되는 변동성을 갖는다는 것으로 해석할 수 있음. PC1과 해수면 온도를 중첩한 결과 (그림 8-(b)), CC는 0.803으로 매우 높은 양의 상관성을 보임. 겨울보다 여름철에서 패턴이 매우 유사했는데, 이는 여름철 해수면 온도의 상승과 해빙 거칠기가 상당한 영향을 갖는 것으로 볼 수 있음.

- PC2는 풍속의 역수를 취한 값과 높은 상관성을 보임. (c)를 통해 알 수 있듯이 풍속의 역수가 해빙 거칠기보다 8달 선행될 때 Pearson CC가 0.596으로 최대가 되었고, 시차가 없거나 12달일 때 CC가 동일해지는 패턴이 PC1에서와 동일하게 나타남. 이를 통해 PC2 역시 일 년 주기의 변동성을 갖는 것으로 이해할 수 있음. 8달 시차를 주어 두 시계열을 중첩해 본 결과, 전반적인 증감 패턴이 거의 유사하게 나타남. PC2는 여러 기후 변수들과의 비교 분석 시, 풍속의 역수와 상관성이 가장 높긴 하였으나, 앞의 EOF 두 번째 모드를 통해 확인된 공간 변동성이 해빙의 내부와 경계에서 발생한다는 점에 착안하여 유사한 패턴의 index인 AO와도 연관 지어 분석함.

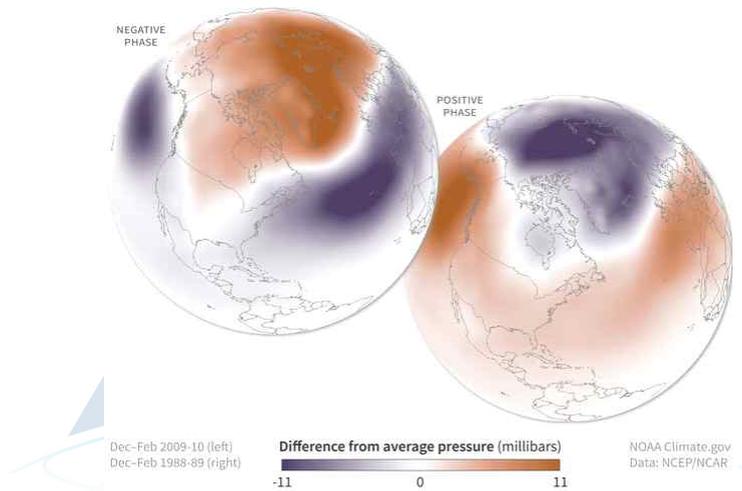


그림 3-1-104. AO index (a) negative phase, (b) positive phase (NOAAClimate.gov)

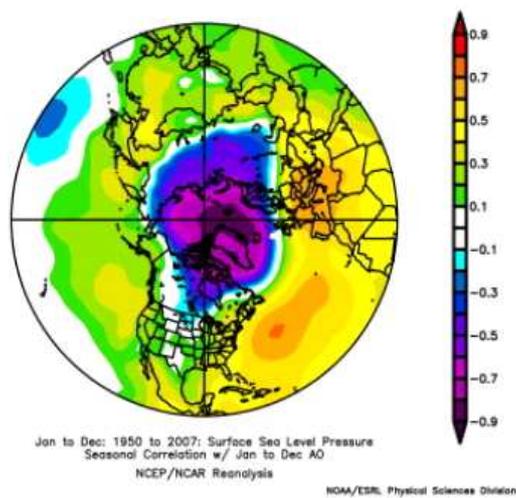


그림 3-1-105. AO index와 대기압 (20 - 90°N) 의 상관성 (1958~2002, Talley, L. D., 2011)

- PC2와 AO의 직접 분석에서는 TCLL에서의 CC가 평균 0.1로 유효한 상관성이 나타

나지는 않았음. AO는 북극 대기 순환을 나타내는 기후 지수로 1000 hPa의 지위고도 (geopotential height)를 기반으로 계산되며, 본 연구의 관심 영역에서 대기압과 -0.7 이상의 강한 음의 상관성을 가짐. 따라서, PC2를 AO와 상관성이 높은 대기압과 비교 분석해 보았고, 그 결과, 그림 11과 같은 결과를 확인할 수 있었음.

- 다음 그림 (a)를 통해 대기압이 PC2보다 7달 후행될 때 상관성이 -0.342로 가장 높은 것을 알 수 있으며, 이러한 음의 상관성 결과는 위 그림의 사전 연구 결과와도 일치함. 7달의 시차를 주어 두 변수를 중첩한 그림 (b)에서는 두 시계열이 반전되어 일치하는, 즉, 음의 상관 패턴을 보였으며, 따라서 해빙 변동의 영향으로 거칠기가 변화하게 됨에 따라 대기압이 영향을 받는 것으로 해석할 수 있음.

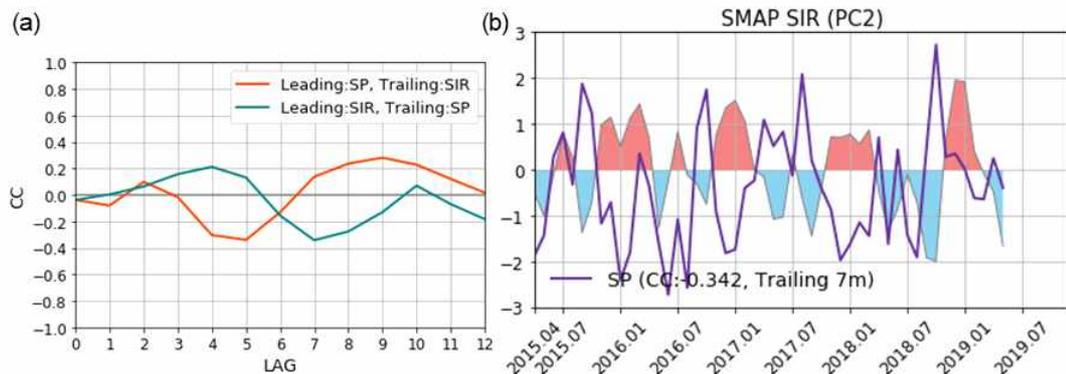


그림 3-1-106. 해빙 거칠기 PC2와 대기압 사이의 TLCC (좌) 및 시계열 중첩 (우)

- PC3은 AMO index와의 비교에서 유사한 패턴을 확인할 수 있었고, TCLL을 진행하여 AMO가 PC2보다 2달 선행할 때 CC가 -0.384로 가장 상관성이 높게 나타나는 것을 확인함. AMO가 PC2보다 2달 후행일 때의 CC는 0.363으로, 2달 선행일 때와 거의 동일한 정도의 상관성을 보이긴 하나, 분석 결과 AMO가 해빙 거칠기에 선행될 것으로 판단함. 그 이유는 AMO가 북대서양의 해수면 온도를 기반으로 계산되기 때문에, 북대서양 해류의 유입에 따른 해수면 온도가 해빙에 영향을 주어 그에 대한 결과로써 해빙 거칠기 변화가 발생된다고 이해하는 것이 자연스럽기 때문임. 앞서 EOF 세 번째 모드의 분석에서 북대서양의 해류 흐름이 관찰되었는데, 이에 따라 PC3 역시 AMO와 상관성을 보이게 된 것으로 해석됨. PC3은 시차가 없거나, 11달일 때 CC가 0으로 동일해지는 패턴이 나타나는 것으로 보아 11개월 주기를 갖는 것으로 생각되고, AMO가 2달 선행되도록 시차를 주어 두 시계열을 중첩 시, 음의 상관성으로 패턴이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있음.

○ 가상의 L-band 위성 편광 밝기온도 자료 개발

가. 이론적, 실험적 접근 방법

1) Data2Data

- Data2Data (D2D) 모델은 Conditional Generative Adversarial Nets (CGAN) 기반의 Pix2Pix 모델의 전후에 처리 과정을 추가함으로써 자료 값 자체를 보존한 채 변환이 가능하도록 만들어진 모델임. (Han et al., 2022)
- D2D의 기본 구조에 해당되는 CGAN은 생성자 (Generator)와 판별자 (Discriminator)를 경쟁 관계로 학습하여, 입력된 이미지를 새로운 도메인의 이미지로 변환시키는 신경망임. 기존 GAN에 이러한 적대적 기계학습 (Adversarial Training)을 도입하였기 때문에, 입출력 자료가 쌍을 이루어 학습이 진행되며, 손실 함수 값을 줄여나가는 방향으로 학습이 이루어짐. 이때 라벨 혹은 데이터를 통해 조건을 주어서 사용자가 원하는 방향으로 학습을 시킬 수 있게 됨.
- Pix2Pix는 x에 해당되는 학습 자료를 입력받아 생성자를 통해 G(x)라는 가상의 x를 생성한 후, Patch-GAN 기반의 판별자를 사용하여 G(x)와 y (실제 값)의 비교를 통해 최종적으로 Fake/Real을 구분해 내는 알고리즘임. 아래 식의 목적 함수에 대한 최대-최소 문제를 해결하는 방향으로 최적화가 진행됨. (Isola et al., 2017)

$$\mathcal{L}_{L1}(G) = \mathbb{E}_{x,y,z} [\|y - G(x,z)\|_1]$$

$$\mathcal{L}_{cGAN}(G,D) = \mathbb{E}_{x,y} [\log D(x,y)] + \mathbb{E}_{x,y} [\log(1 - D(x, G(x,z)))]$$

$$G^* = \arg \min_G \max_G \mathcal{L}_{cGAN}(G,D) + \lambda \mathcal{L}_{L1}(G)$$

- 기존의 Pix2Pix는 도메인 변환에 이미지가 사용되지만, D2D의 경우, 원자료의 값 자체를 사용하여 변환 가능하다는 차이를 가짐. D2D의 전처리 과정에서는 Min-Max 정규화를 통해 입력 자료를 0에서 1사이의 값으로 변환하며, 이때 입력 자료는 이미지의 픽셀 값에 해당하는 0~255 사이의 값이 아닌, 원자료 값 자체를 사용함.
- 원자료를 사용하게 되면 결측값 등의 불필요한 값들이 필연적으로 포함되게 되는데 이때 이러한 값들에 -1이라는 고정된 값을 줌으로써 해당 픽셀의 값들이 최대한 학습에 영향을 주지 않도록 설정함. 따라서 최종적인 입력 자료값들의 범위는 -1~1이 되며, 학습이 완료된 후, -1~1 사이의 값을 원자료 값의 범위로 변환하는 후처리 과정이 역정규화 (Demormalization)를 통해 진행됨.

나. 연구자료

1) SMAP 위성 자료

- 위 거칠기 연구에서의 SMAP 위성 자료와 동일한 자료를 사용하였으며, 해당 연구에는 2015년 4월 1일부터 2021년 12월 31일까지의 수직, 수평 편광 밝기온도 자료를 사용함.

2) AMSR2 위성 자료

- AMSR2의 Unified L3 Daily 25km Brightness Temperatures & Sea Ice Concentration Polar Grids, Version 1 (AU_SI25) 자료에서 제공하는 C-band인 6.9 GHz의 수직, 수평 편광 밝기온도 자료를 사용함. 해당 자료는 25 km × 25 km의 공간 해상도와 일일 시간 해상도를 가지며, 2012년 7월 2일 이후부터 HDF-EOS5 형식으로 제공된다. 연구에는 2015년 4월 1일부터 2021년 12월 31일 기간의 자료를 사용함.

다. 연구내용

- 본 연구에서는 해빙 거칠기 변동성 연구를 장기간에 대한 기후변화 연구로 확장해 보고자 그에 대한 사전 연구로써 장기 위성 자료 생성을 목적으로 수행함.
- 해빙 거칠기 산출에 사용하는 SMAP 위성 자료는 2015년 3월 31일부터 현재까지 제공되고 있기 때문에 변동성 연구 또한 자료 제공 기간에 맞추어 10년 이하의 비교적 짧은 기간에 대해 수행될 수밖에 없음. 따라서 해빙 거칠기 알고리즘에 적용되는 SMAP 수직과 수평 밝기온도 자료를 위성이 운용되기 이전의 과거 기간에 대해 생성하는 딥러닝 모델을 개발함.

1) 학습 모델

- 과거 위성 자료를 생성하기 위하여 Pix2Pix를 변형한 딥러닝 모델인 D2D를 사용함. CGAN 기반의 D2D는 생성자와 판별자를 통해 학습되는 적대적 신경망으로 입출력 자료가 쌍을 이루어 진행되어 사용자가 원하는 도메인의 자료로 변형이 가능함. 다시 말해, 새로운 도메인의 자료를 생성할 수 있다는 특징을 가지기 때문에 과거 위성 자료 생성을 목적으로 하는 본 연구에 적합한 딥러닝 모델이라 할 수 있음.
- 연구에는 Resnet-9 기반의 생성자와 Patch-GAN 기반의 판별자를 사용하였으며, AMSR2 6.9 GHz 수직, 수평 편광 밝기온도 중첩 자료를 SMAP 수직, 수평 편광 밝기온도 중첩 자료와 쌍으로 사용함으로써 AMSR2 밝기온도를 SMAP 밝기온도로 변환하는 모델을 생성함. AMSR2 자료는 SMAP 운용 기간보다 빠른 2012년 7월부터

제공되기 때문에 해당 모델을 적용하면 SMAP 운용 이전의 과거 기간에 대한 SMAP 자료를 산출할 수 있음.

- D2D는 Min-Max 정규화와 역정규화 과정이 모델 학습의 전후처리 과정으로 포함되어 있기 때문에 입출력 자료인 SMAP과 AMSR2 편광 밝기온도 모두 동일한 전후처리 과정을 거쳤으며, 이때 사용되는 최댓값과 최솟값은 모델의 학습과 검증, 테스트에 사용된 모든 자료에서 도출된 단일한 값임. 해당 값을 사용하여 모델의 입력 자료로 -1~1로 정규화된 SMAP과 AMSR2 편광 밝기온도 쌍이 들어감. 모델의 출력 결과로는 가상의 정규화된 SMAP 밝기온도가 생성되고, 역정규화 과정을 통해 최종적으로 실제 SMAP 밝기온도 범위를 갖는 가상의 SMAP 밝기온도 자료로 변환됨. 다음 그림은 본 연구에서 진행된 D2D 모델의 전반적인 학습 진행 과정을 시각적으로 보임.

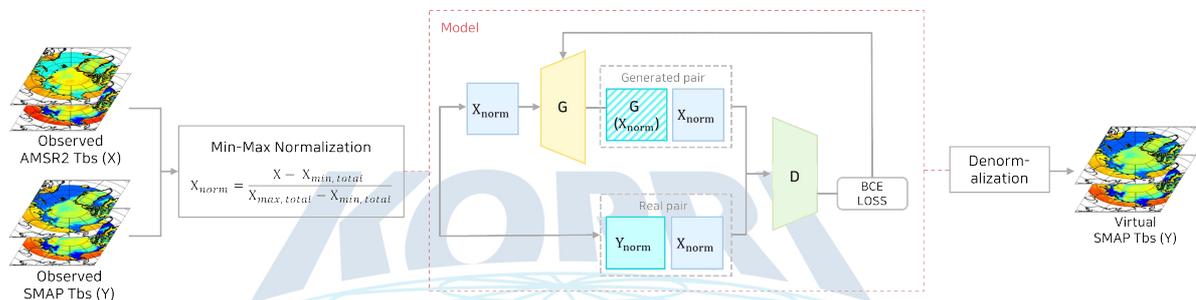


그림 3-1-107. D2D 모델 학습 과정

극지연구소

2) 학습 자료 선정

- L-band와 C-band의 높은 상관성을 기반으로 SMAP 편광 밝기온도와의 학습 쌍으로 AMSR2 6.9 GHz 편광 밝기온도 자료를 선정함. 주파수가 높아질수록 수증기나 구름의 수분 흡수와 같은 대기 효과에 강한 영향을 받기 때문에 4~8 GHz의 비교적 낮은 주파수대인 C-band와 L-band는 선형적 상관성이 0.96 이상으로 매우 강하고 (Meissner and Manaster, 2021), 특히, AMSR2 6.9 GHz 밝기온도는 해빙 경계, 다양한 토양 환경 등에서 SMAP 1.4 GHz 밝기온도와 유사하다고 알려져 있음. (AlJassar et al., 2019)
- 북위 65도 이상 영역에서 2018년도 일자료로 SMAP과 AMSR2의 주파수 별 상관성을 직접 비교해 본 결과, 다음 표와 같이 6.9 GHz의 수직(V), 수평(H) 편광 모두에서 가장 높은 상관성을 보이는 것이 확인됨.

표 3-1-19. SMAP 밝기온도와 AMSR2 주파수 별 밝기온도 상관계수 (2018년, 북위 65도 이상)

AMSR2 Center Frequency (GHz)	6.925		10.65		18.7		23.8		36.5		89	
	Pol.	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	
Pearson CC	0.96	0.99	0.95	0.99	0.88	0.98	0.73	0.96	0.41	0.86	-0.34	0.84

- SMAP과 AMSR2 6.9 GHz 밝기온도 산포도는 다음 그림과 같음. 모든 편광에서 사전 연구 결과와 동일한 0.96 이상의 상관성이 나왔고, 수직 편광보다 수평 편광에서 비교적 더 강한 선형성을 확인할 수 있음.

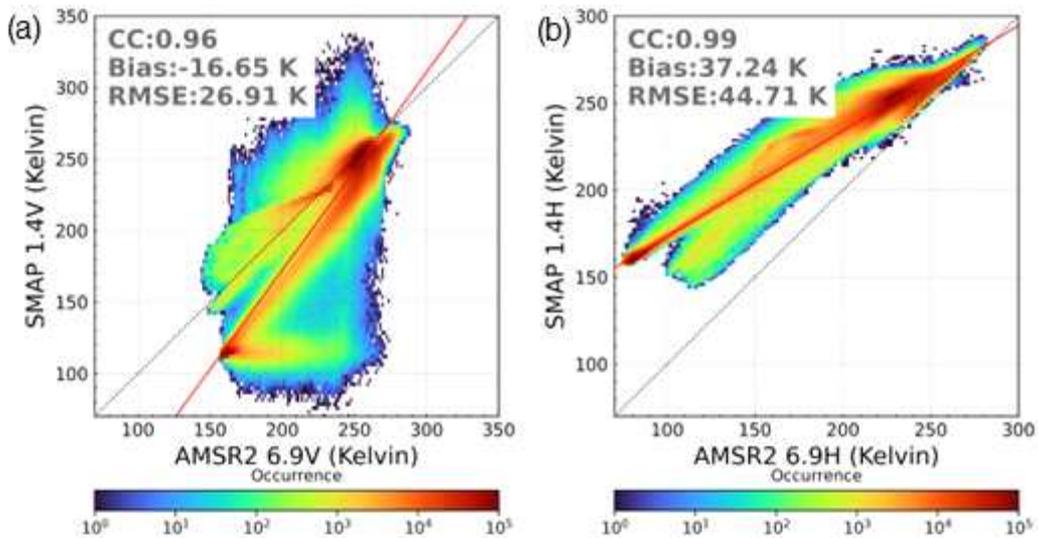


그림 3-1-108. SMAP과 AMSR2 6.9GHz 편광 밝기온도의 산포도 (a)수직, (b)수평

- 추가로 다음 그림과 같이 바다와 육지, 해빙으로 나누어 영역 별 SMAP과 AMSR2 2018년 연평균 밝기온도 차이의 절대값을 확인해 보았고 전반적으로 6.9 GHz 일 때 가장 차이가 적게 나타나는 것을 확인함. 따라서 이러한 결과들을 바탕으로 SMAP 자료와 짝을 이루어 학습을 진행할 자료로 AMSR2 6.9GHz 수직과 수평 편광 자료를 선택함.

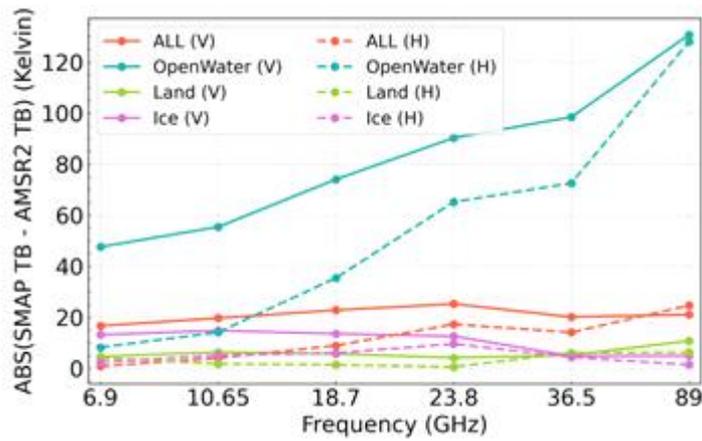


그림 3-1-109. SMAP 편광 밝기온도와 AMSR2 주파수 별 연평균 차이 (2018년)

3) 모델 학습 및 검증 자료 구축

- 모델 학습과 검증, 테스트에는 북위 65도 영역의 SMAP과 AMSR2 편광 밝기온도 일 자료를 사용함.
- SMAP과 AMSR2 자료는 공간 해상도가 각각 9 km x 9 km와 25 km x 25 km로 다르기 때문에 SMAP을 더 낮은 해상도인 25 km x 25 km로 보간하여 자료의 해상도를 일치시킴. 보간 시, SMAP과 AMSR2의 위경도 사이의 최단거리를 구하는 방법을 사용하였고, 최종적인 두 자료의 크기는 448 x 304임.
- 사용된 전체 자료 기간은 2015년 4월 1일부터 2021년 12월 31일로, 모델 학습과 검증, 테스트에 각각 2015년부터 2018년 (1367쌍), 2019년 (332쌍), 2020년 (366쌍)의 자료를 사용함. 2021년 자료는 unseen 자료로써 학습된 D2D 모델 성능의 우수성을 보이기 위해 진행된 선형회귀 변환 결과와의 비교에서 사용함.

4) SMAP과 AMSR2 6.9GHz 밝기온도 간 선형 관계

- SMAP 1.4 GHz와 AMSR2 6.9 GHz 밝기온도는 높은 상관성을 갖기 때문에 일반적으로 두 주파수대의 밝기온도 자료는 단순 선형 회귀식을 통해 변환하여 사용함.
- 그러나 두 센서의 밝기온도 산포도에서 확인할 수 있듯이 자료 분포는 2-3개로 나누어진 그룹 형태를 가지고 있기 때문에 하나의 선형 회귀식을 사용하여 두 자료를 변환하기에는 정확도 측면에서 문제가 발생할 수 있음. 다음 그림은 자료를 바다와 육지, 해빙 영역으로 분류하여 나타냄. 앞서 확인된 2-3개의 그룹이 영역에 따라 분류되는 것을 확인할 수 있으며, 특히 수평 편광에서 그룹화가 더 뚜렷하게 나타남. 이는 SMAP과 AMSR2 자료의 상관성 자체가 높다 하더라도 영역별로 구분 지어 선형 회귀식이 사용되어야 할 필요성이 있고, 수직 편광에서는 영역 구분을 통한 선형 회귀식

마저도 한계가 있음을 의미함.

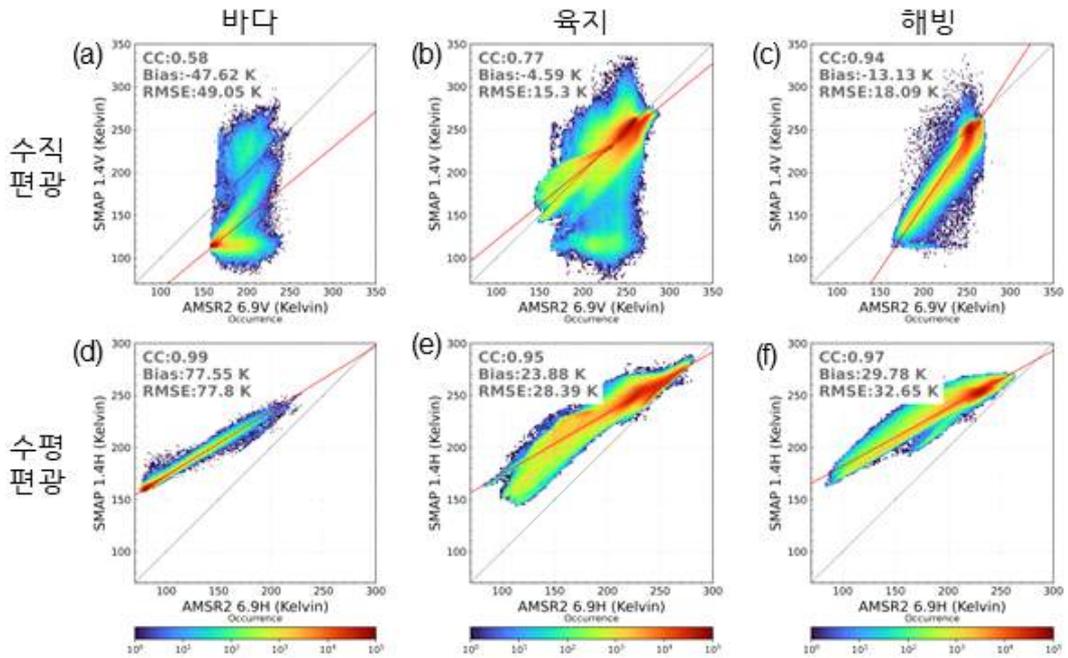


그림 3-1-110. 영역별, 편광별 SMAP과 AMSR2 6.9GHz 편광 밝기온도의 산포도

- 따라서 보다 복잡한 계산이 이루어지는 딥러닝 기법을 적용하여 하나의 모델을 통해 자료 변환을 하는 것이 효과적임. D2D 모델의 사용이 선형 회귀식보다 효과적임을 보이기 위하여, AMSR2에서 SMAP으로의 자료 변환을 각 방법으로 진행한 후 비교함. 각 영역별 선형 회귀식은 D2D 모델 학습에 사용된 동일한 기간의 자료를 통해 도출되었으며, 영역별 선형 회귀 계수는 다음의 표와 같음.

표 3-1-20. 영역별 회귀계수 (2015~2018년, 북위 65도 이상)

Linear reg. coef.		m	b
전체	V	1.4	-103.8
	H	0.6	113.1
바다	V	0.8	-17.8
	H	0.6	110.9
육지	V	0.8	42.8
	H	0.6	112.9
해빙	V	1.5	-140.5
	H	0.6	126.1

라. 연구결과

- D2D 모델로 생성된 가상의 수직 및 수평 편광 밝기온도 결과임. 정량적 평가 지표로는 Pearson correlation coefficient (CC)와 Root Mean Square Deviation (RMSE), Bias를 사용하였고 모델의 성능 평가 지표로는 다음의 두 식과 같이 relative Mean Bias Error (rMBE), relative RMSE (rRMSE)을 사용함.

$$rMBE = 100 * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)}{O_i}$$

$$rRMSE = \frac{100}{O_i} * \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

- rMBE와 rRMSE는 다음의 표와 같이 절댓값이 작을수록 모델 성능이 우수함을 의미하며, 각각 3%와 5% 이하일 때 매우 우수한 모델이라고 해석됨.

표 3-1-21. rMBE와 rRMSE의 모델 성능 평가 척도

Model Skill	rMBE	rRMSE
Poor	rMBE > ±5 %	rRMSE >15%
Good	±3 % <rMBE ≤ ±5 %	5% <rRMSE ≤ 15%
Excellent	rMBE ≤ ±3 %	rRMSE ≤ 5%

1) 가상의 SMAP 수직 편광 밝기온도

(가) 정량적 평가

- 가상의 SMAP 편광 밝기온도는 최종적으로 해빙 거칠기 장기 변동성 산출에서의 사용을 목표로 하기 때문에 바다와 육지, 해빙이 포함된 전체 학습 영역과 해빙 영역으로 구분 지어 평가함.
- 정량적 평가에는 테스트 자료인 2020년의 일 년 치 일자료를 사용함. 다음 그림은 D2D로 생성된 가상의 SMAP과 원자료 SMAP 수직 편광 밝기온도 결과 산포도임.

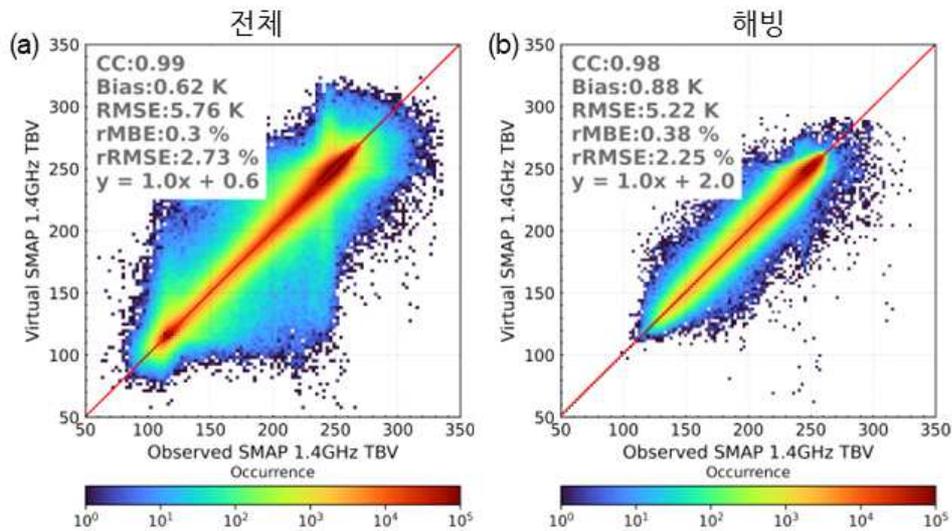


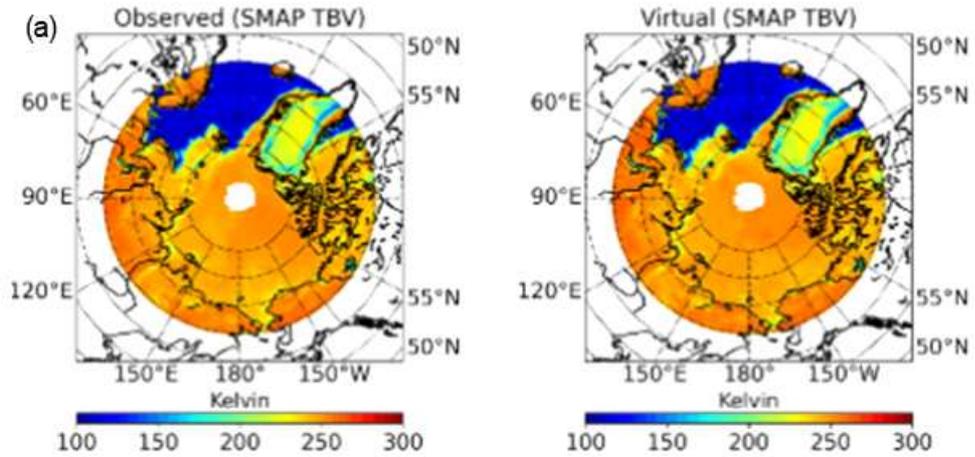
그림 3-1-111. SMAP 원자료와 가상의 D2D 생성물 결과 산포도 (수직 편광 밝기온도)

- 전체 영역에서의 통계수치는 CC가 0.99, Bias는 0.62 kelvin, RMSE는 5.76 kelvin으로 가상의 자료와 원자료가 거의 일대일 대응에 가깝게 일치하는 결과를 보임. 해빙 영역에서의 통계수치 역시 일대일 대응에 가까운 결과를 만들어냈으며, CC가 0.98, Bias는 0.88 kelvin (K), RMSE는 5.22 K으로 좋은 결과를 보임. 수직 편광 밝기온도 자료에서의 rMBE와 rRMSE는 각각 약 0.3%, 약 2%로 모델 성능이 매우 우수하게 학습된 것을 알 수 있음.

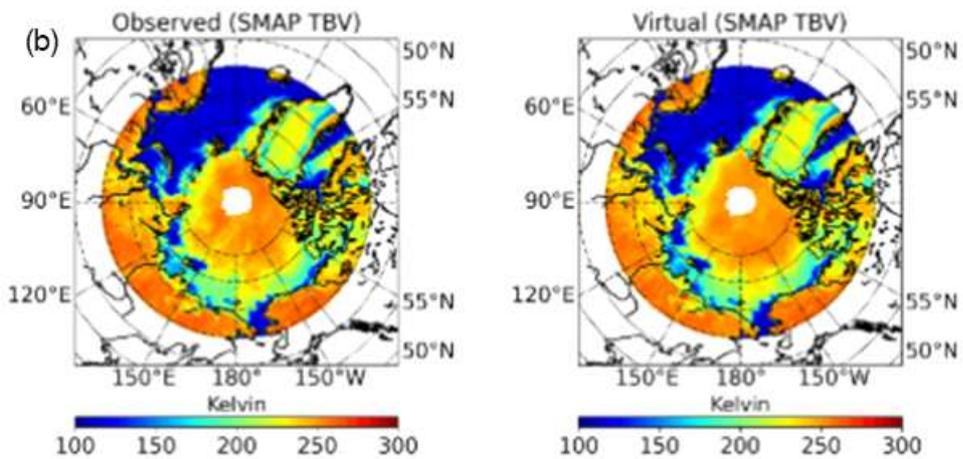
(나) 정성적 평가

- 다음 그림은 테스트 기간인 2020년의 1월과 6월, 10월의 15일 일자료를 사용하여 원자료 SMAP과 D2D로 생성된 가상의 SMAP 수직 편광 밝기온도 결과를 비교한 것임.

Date: 2020/01/15



Date: 2020/06/15



Date: 2020/10/15

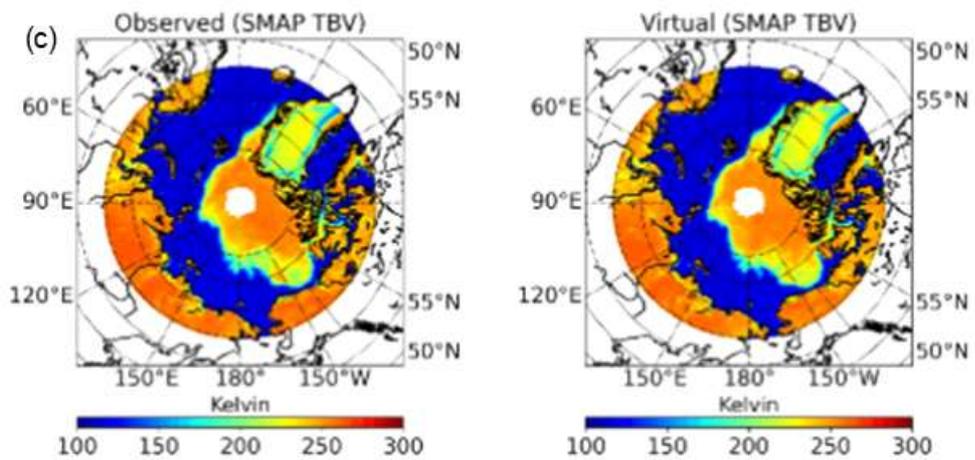


그림 3-1-112. 수직 편광 밝기온도 결과의 정성적 비교 ((좌) SMAP 원자료, (우) 가상의 D2D 생성물)

- 가상의 SMAP 생성물은 바다와 육지, 해빙을 포함한 모든 영역에서 원자료와 구분이 거의 되지 않을 정도로 일치하는 결과를 보여줌. 일부 날짜에서 가상의 SMAP 생성물

이 블러링되는 경우가 있으나, 실제 값 자체의 차이가 거의 없는 정도의 미세한 차이를 보임.

(다) D2D와 선형 회귀 변환 결과 비교

- 선형 회귀 변환과의 결과 분석에는 unseen 자료 기간에 해당되는 2021년의 일 년 치 일자료를 사용하였고, 선형 회귀식 변환 결과는 바다와 육지, 해빙의 각 영역별로 다른 회귀식을 적용하여 계산함.
- 다음 그림들은 각각 2021년 2월과 8월의 15일 일자료를 예시로, (a)가 원자료, (b)와 (c)가 D2D로 생성된 가상의 자료, (d)와 (e)가 선형 회귀식으로 변환된 자료에 대한 결과임.

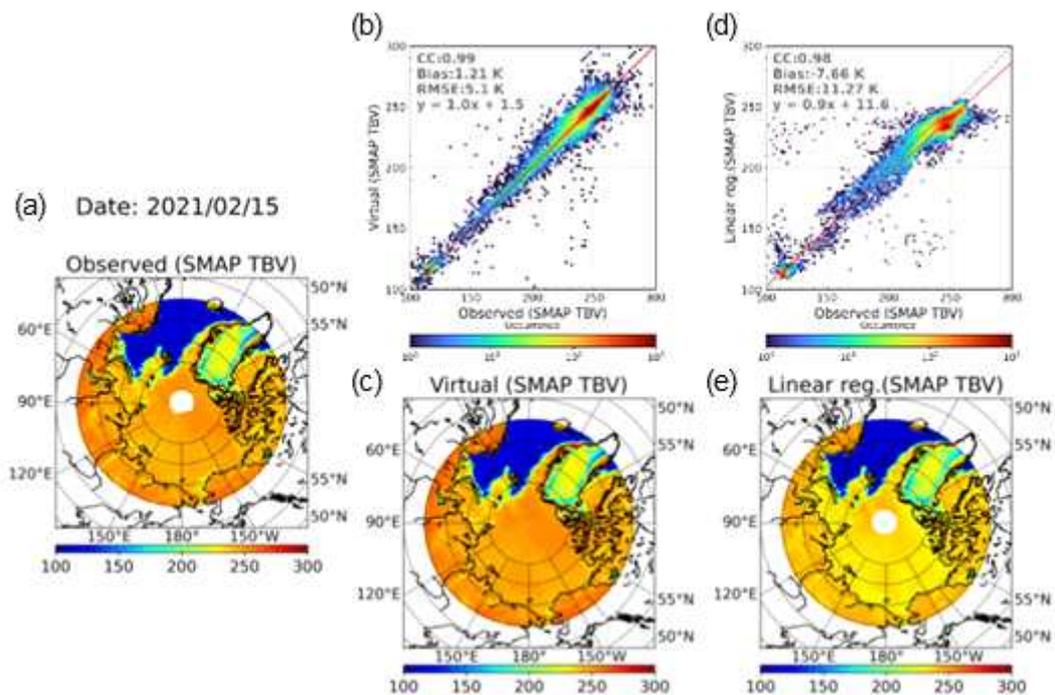


그림 3-1-113. 가상의 D2D 생성물 (b, c)과 선형 회귀변환 결과 (d, e) 비교 (수직 편광, 2021/2/15)

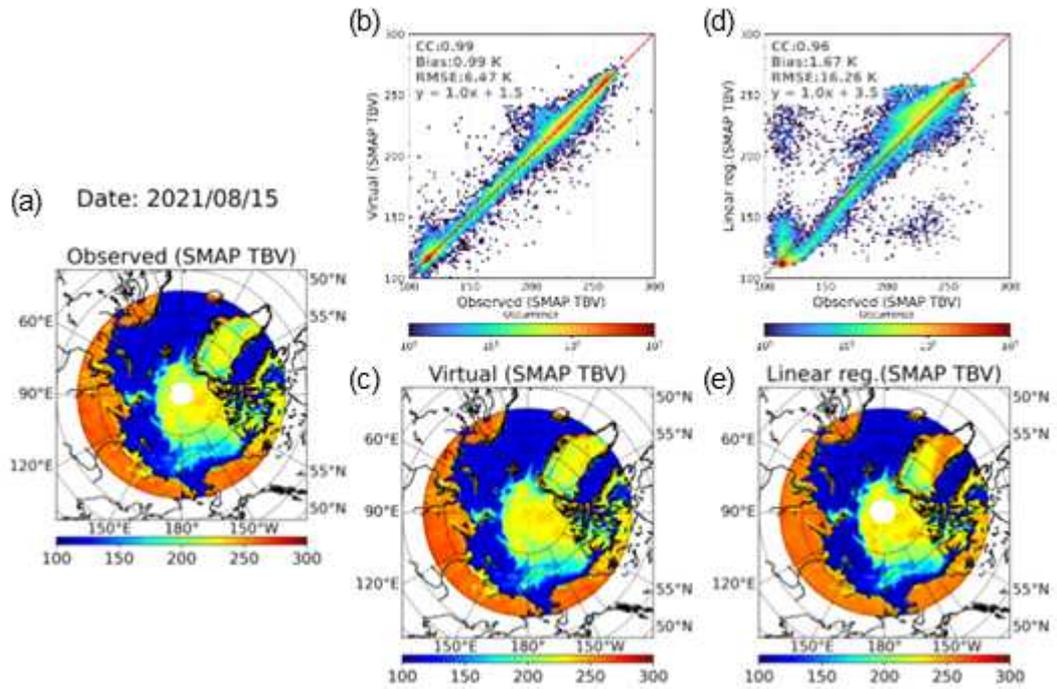


그림 3-1-114. 가상의 D2D 생성물 (b, c)과 선형 회귀변환 결과 (d, e) 비교 (수직 편광, 2021/8/15)

- 원자료와 비교했을 때, D2D와 선형 회귀 변환 결과 모두에서 높은 상관성이 확인됨. 그러나 D2D 생성물의 Bias가 평균 1 K인데 반해, 선형 회귀 변환에서는 최대 7 K까지 원자료와 차이를 보였으며, RMSE 역시 두 배 이상의 차이가 발생함. 따라서 2월 그림 (e)에서의 육지 오차와 8월 그림 (e)에서 전반적으로 낮은 값이 산출과 같이 원자료와 차이를 보이는 결과가 발생됨. 추가로, 산포도를 보면 낮은 온도와 높은 온도가 분리되는 현상이 두 방법에서 공통적으로 발생하는데 그 정도가 선형 회귀 변환에서 더 두드러지게 나타남.
- D2D 생성물의 경우 north pole에 해당되는 북위 85도 이상의 영역도 산출이 가능하며, 이는 D2D SMAP 생성물이 AMSR2 자료를 기반으로 생성되기 때문에 해당 영역이 제공되는 AMSR2의 특징이 반영된 것으로 볼 수 있음. 따라서 D2D를 사용하여 SMAP 밝기온도 자료를 생성하게 되면 과거 자료 생성뿐만 아니라 SMAP에서의 결측 픽셀에서의 자료까지 얻을 수 있다는 장점이 있음.

2) 가상의 SMAP 수평 편광 밝기온도

(가) 정량적 평가

- 앞서 진행된 수직 편광 밝기온도 평가와 동일한 방식으로 진행함.
- 다음 그림은 D2D로 생성된 가상의 SMAP과 원자료 SMAP 수평 편광 밝기온도 결과

의 산포도임. 전체 영역에서의 통계수치는 CC가 0.99, Bias는 0.54 K, RMSE는 7.38 K
 으로, 육지 영역에 픽셀에서 퍼짐이 발생하긴 하나 가상의 자료와 원자료가 거의 일대
 일 대응에 가까운 결과를 보임. 해빙 영역에서의 통계수치는 CC가 0.98, Bias는 1.03
 K, RMSE는 7.58 K으로 역시 좋은 결과를 보였으며, rMBE와 rRMSE는 각각 1% 미
 만, 4% 미만으로 모델 성능 또한 매우 우수함을 확인함.

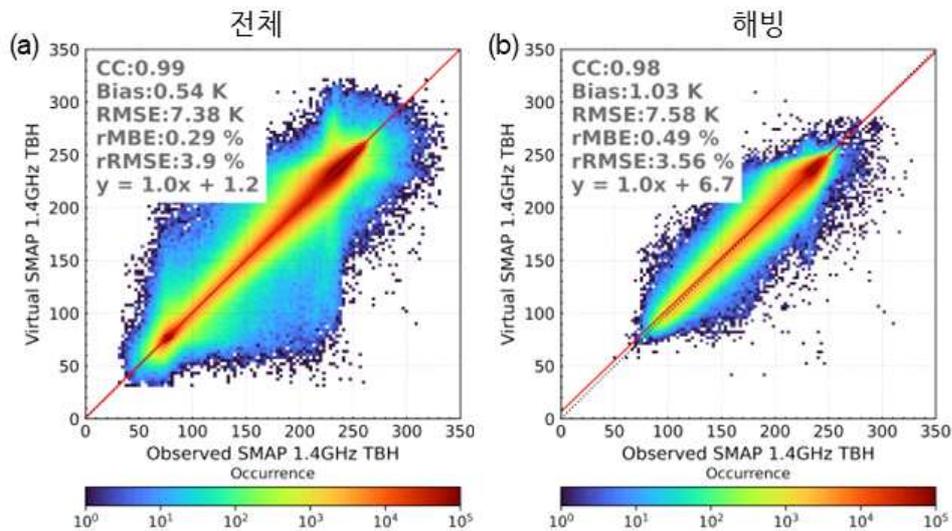


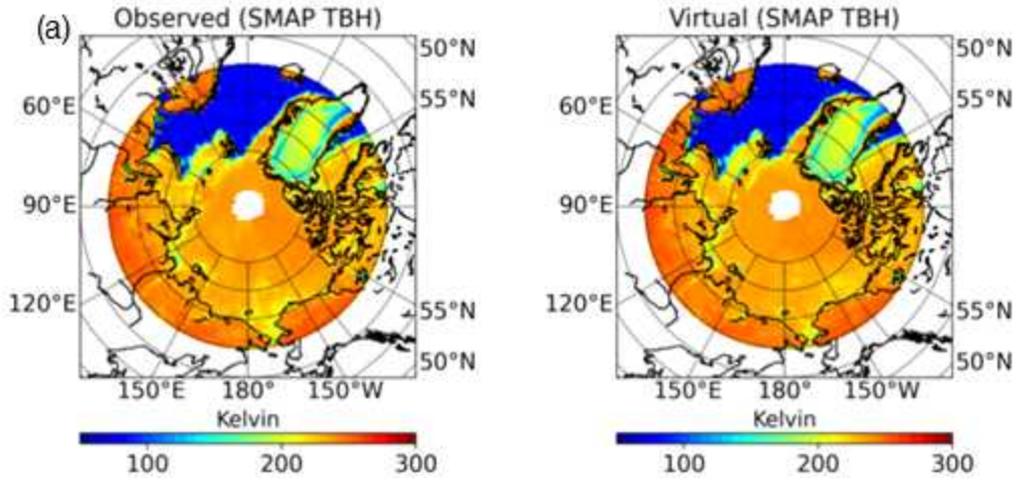
그림 3-1-115. SMAP 원자료와 가상의 D2D 생성물 결과 산포도 (수평 편광 밝기온도)

극지연구소

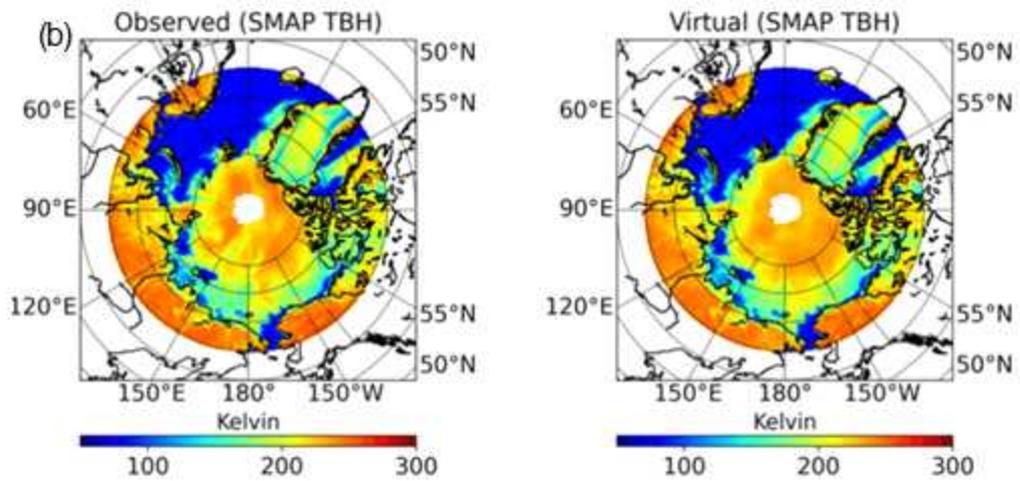
(나) 정성적 평가

- 다음 그림은 테스트 기간인 2020년의 1월, 6월, 10월의 15일 일자료를 사용하여 원자료 SMAP과 D2D로 생성된 가상의 SMAP 수평 편광 밝기온도 결과를 비교한 이미지임. 가상의 SMAP 생성물은 수직 편광 결과와 마찬가지로 모든 영역에서 원자료와 매우 유사한 결과를 보였으며, 여름철 일부 날짜에서 블러링되는 현상이 동일하게 발생함. 이때도 절대적인 오차 값은 매우 작으며, 전반적인 패턴은 원자료와 거의 동일함.

Date: 2020/01/15



Date: 2020/06/15



Date: 2020/10/15

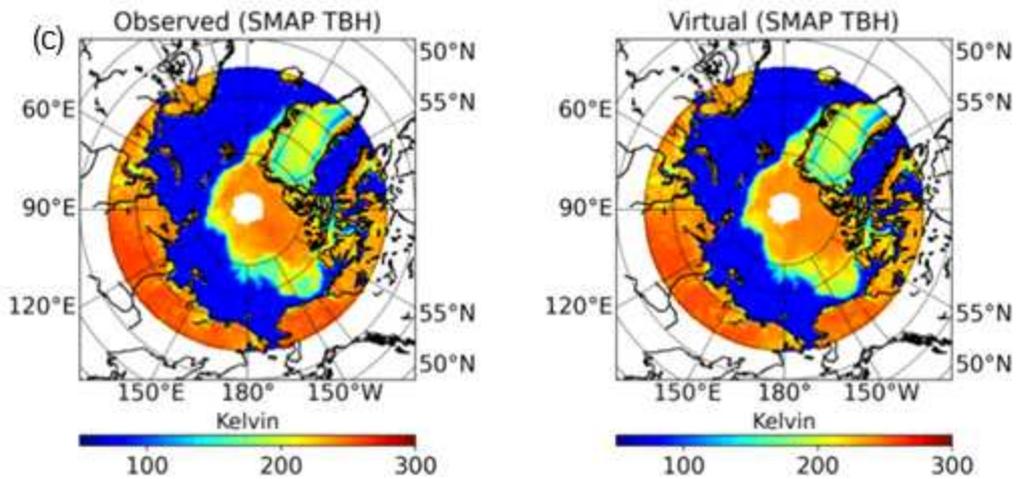


그림 3-1-116. 수평 편광 밝기온도 결과의 정성적 비교 ((좌) SMAP 원자료, (우) 가상의 D2D 생성물)

(다) D2D와 선형 회귀 변환 결과 비교

- 선형 회귀 변환과의 결과 분석은 앞서 진행한 수직 편광 밝기온도 분석과 동일한 방식으로 이루어짐.
- 다음 그림들은 각각 2021년 2월과 8월의 15일 일자료 예시로 (a)가 원자료, (b)와 (c)가 D2D로 생성된 가상의 자료, (d)와 (e)가 선형 회귀식으로 변환된 자료에 대한 결과임.

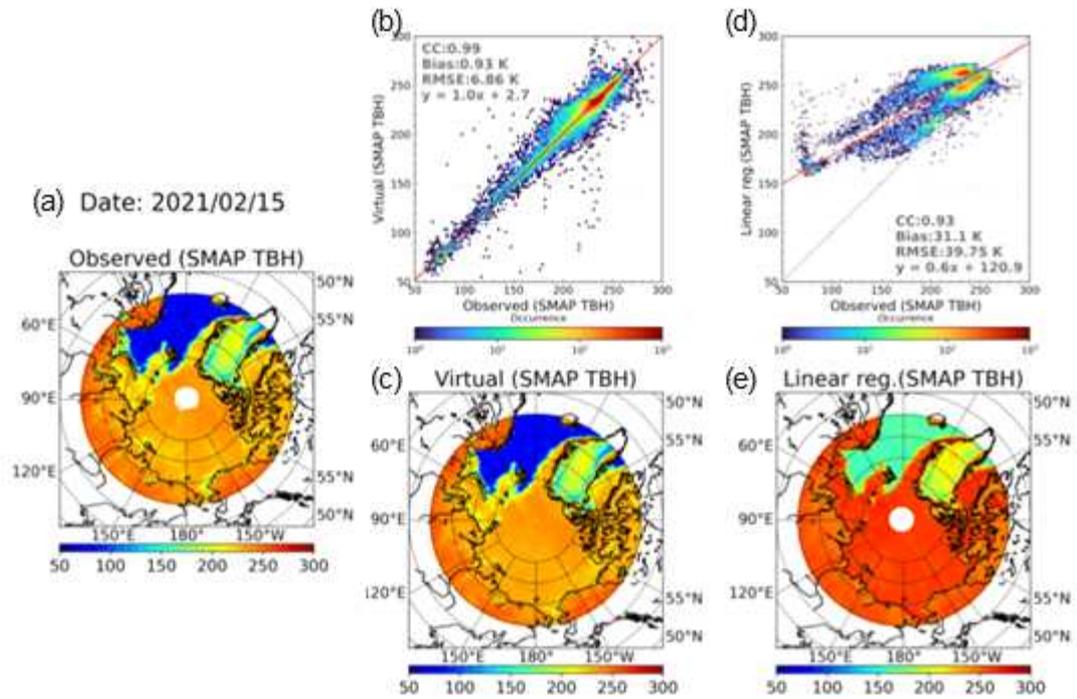


그림 3-1-117. 가상의 D2D 생성물 (b, c)과 선형 회귀변환 결과 (d, e) 비교 (수평 편광, 2021/2/15)

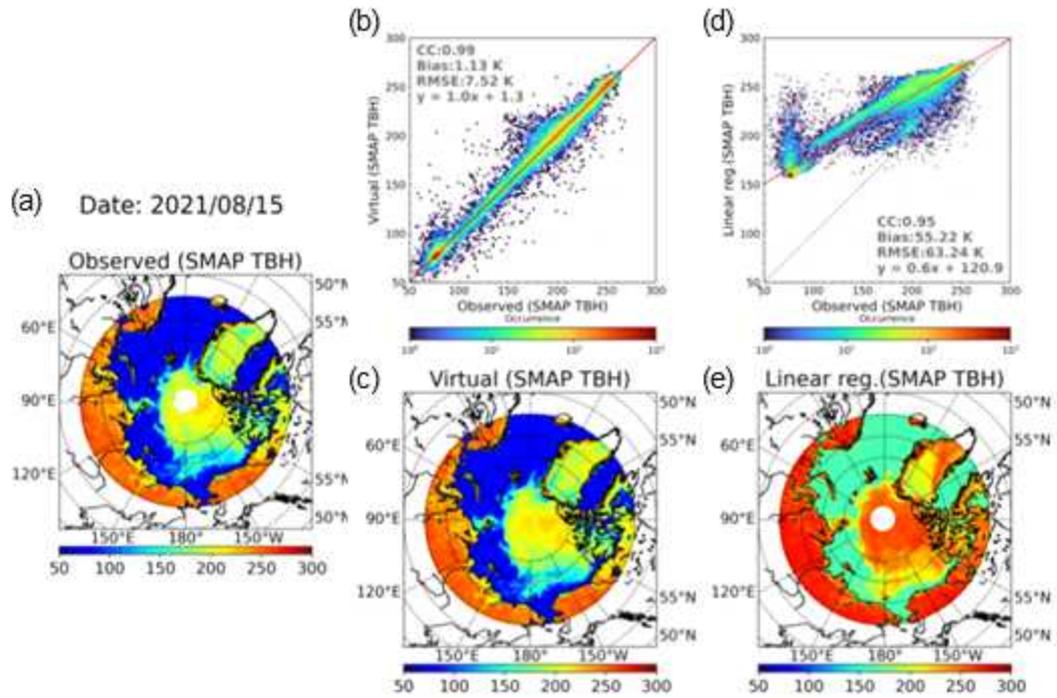


그림 3-1-118. 가상의 D2D 생성물 (b, c)과 선형 회귀변환 결과 (d, e) 비교 (수평 편광, 2021/8/15)

- 원자료와 비교했을 때, D2D와 선형 회귀 변환 결과 모두 높은 상관성을 보이긴 하였으나 D2D 생성물의 CC는 0.99~1로 원자료와 거의 동일한 수준의 결과를 생성함. Bias의 경우, D2D 생성물에서 1 K 미만인 것에 반해, 선형 회귀 변환에서는 30~50 K으로 차이가 매우 크게 나타났으며, 그 결과 패턴은 유사하나 값의 범위가 전혀 맞지 않는 결과를 보임. 산포도에서는 수직 편광의 결과와 마찬가지로 낮은 온도와 높은 온도가 분리되는 현상이 두 방법에서 공통적으로 나타났고, 선형 회귀 변환의 경우엔 모든 자료에서 2개의 그룹으로 분리되는 현상이 발생됨을 확인함. 가상의 D2D 수평 편광 밝기온도 생성물 또한 north pole 영역까지 산출이 가능함.

8. 해빙 용빙호

○ 고해상도 북극해 해빙영상 현장 획득 및 모자이크 영상 제작

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

- 일반적으로 인공위성에서 획득된 광역 자료를 이용하여 용빙호 탐지와 분류가 수행되어 왔으나 이를 검증하기 위한 기준 자료로 사용될 수 있는 고해상도 현장 관측 자료는 매우 제한적임.
- 정밀한 용빙호 탐지와 분류를 위해 2019년 쇄빙연구선 아라온의 북극해 탐사 중 척치해 (Chukchi Sea) 해빙에 정박한 뒤 아라온에 탑재된 헬리콥터 및 광학카메라를 이용하여 8월 16일 해발 약 600 m 고도에서 고해상도 해빙 현장 영상 획득 수행함.

표 3-1-22. 북극해 해빙영상 현장 획득 센서 개요

Imaging setup	Specifications
Digital camera	Canon EOS M6
Imaging interval	1 sec
Imaging mode	Aperture priority mode
Sensor	24 mega-pixel APS-C
Focal length	22 mm
Aperture	F11
Shutter speed	Varies between 1/640 and 1/3200
ISO	400

- 총 2,496장의 영상이 약 52분의 비행 동안 획득되었고, 영상 사이의 중복도를 고려하여 약 절반인 1,194장을 영상 모자이크 제작에 활용함.
- 영상 획득 시기에 연구 대상 해빙의 측면에 단단히 고정된 쇄빙연구선 아라온호에서 매초 기록된 GNSS 기반 이동 기록으로부터 해빙의 흐름(drift) 정보가 확보됨.

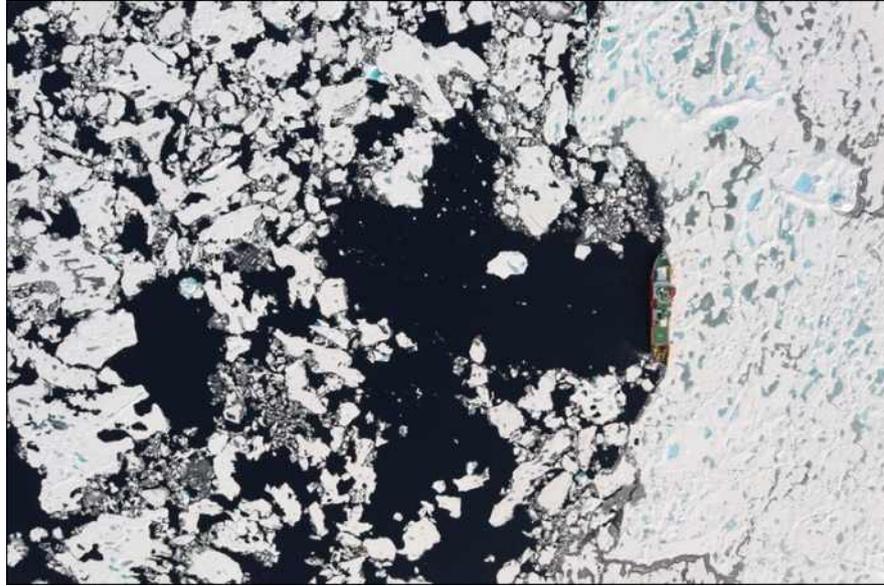


그림 3-1-119. 아라온이 정박 중인 북극해 해빙에 대한 고해상도 영상 획득 결과 예

- 영상 획득 시점에 대한 해빙 위치를 정밀하게 동조시키기 위해 해빙 흐름 기록에 시간 인터플레이션을 적용 후 Hyun et al. (2019)에서 제안된 방법에 따라 모자이크 제작에 사용된 첫 영상의 획득 시점을 기준으로 각각의 영상에서 해빙 흐름에 의한 위치 이동 정도를 보정함.
- 해빙 흐름이 보정된 영상 위치 정보 및 영상과 Structure-from-Motion (SfM) 기법을 이용하여 UTM 좌표계의 영상 모자이크가 제작됨.

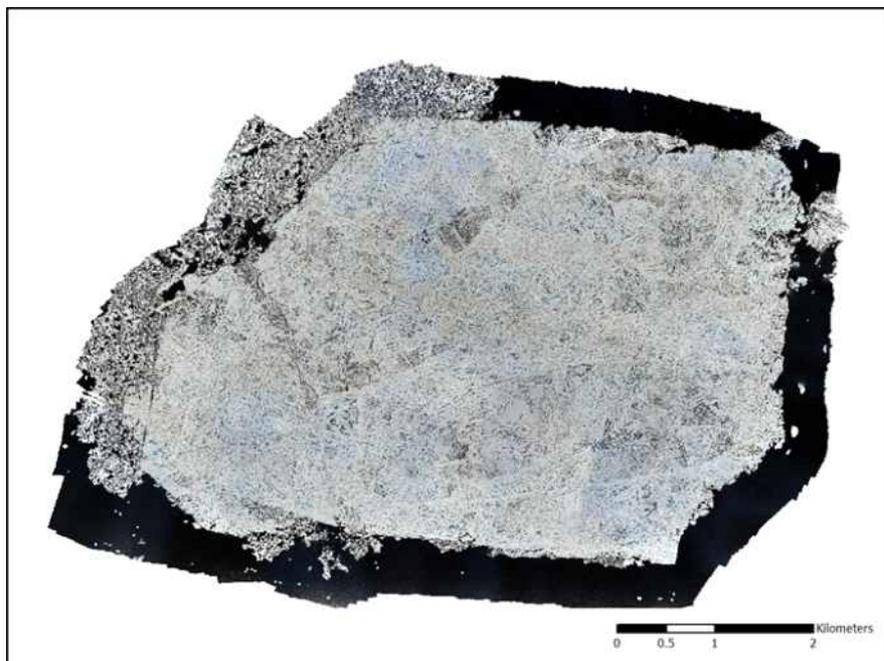


그림 3-1-120. 해빙 흐름이 보정된 고해상도 북극해 해빙영상 모자이크 제작 결과

- 해빙 흐름 영향 제거의 효과는 모자이크 제작 과정에서 추정되는 영상 획득 위치와 원래 영상 획득 위치를 아래의 식을 이용하여 X, Y, Z, XY 및 XYZ (total) 방향에 대해 비교하여 평가가 가능함.

$$X \text{ error} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{i,est} - X_{i,in})^2}, \quad Y \text{ error} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{i,est} - Y_{i,in})^2}, \quad Z \text{ error} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_{i,est} - Z_{i,in})^2}$$

$$XY \text{ error} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{i,est} - X_{i,in})^2 + (Y_{i,est} - Y_{i,in})^2}$$

$$Total \text{ error} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{i,est} - X_{i,in})^2 + (Y_{i,est} - Y_{i,in})^2 + (Z_{i,est} - Z_{i,in})^2}$$

- 해빙의 흐름을 보정하여 영상 모자이크를 제작한 결과 영상 획득 지점에 대한 위치 오차가 총오차(total error)의 경우 약 4% 감소함.

표 3-1-23. 해빙 흐름 보정 전후의 영상 모자이크 제작을 위한 영상 획득 지점의 위치 오차 평가

Camera location	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
Before sea ice drift compensation	25.0	28.2	6.1	37.7	38.2
After sea ice drift compensation	25.8	25.3	6.1	36.2	36.7

○ 고해상도 북극해 해빙영상 모자이크 기반 용빙호 분류

- 영상 객체(object) 생성은 edge 기반 영상 분할 기법과 Full Lamda Schedule 병합 기법을 연속 적용함.
- 생성된 영상 객체의 분류를 위하여 각 객체에 대해 형태 특성과 관련된 면적(area)과 compactness를 포함하여 아래 표와 같은 특성을 산출하고(Miao et al., 2015), 기계학습 방법의 하나인 랜덤 포레스트(Random Forest) 기법을 적용하여 해양(open sea), 눈/얼음으로 구성된 해빙(snow/ice), 해빙 음영지역(shadow), 물에 잠긴 해빙(submerged ice)의 4개 클래스로 분류를 수행함.

표 3-1-24. 용빙호 분류를 위한 영상 객체 속성 정의

Feature	Name	Number	Description
Spectral	Average brightness value (Ba)	3	$Ba = \sum \text{Brightness value} / n$, where n is the number of pixels within an object
	Band standard deviation (Bstd)	3	Bstd = standard deviation (brightness value)
	Band ratio 1 (BR1)	1	$BR1 = (B - R) / (B + R)$
	Band ratio 2 (BR2)	1	$BR2 = (B - G) / (B + G)$
	Band ratio 3 (BR3)	1	$BR3 = [(B - R) - (B - G)] / [(B - R) + (B - G)] = (G - R) / (2B - R - G)$
Texture	Variance (Tv)	1	Tv = variance (brightness value) within a 3×3 kernel
	Entropy (Te)	1	$Te = - \sum p \cdot \log_2(p)$, where p is the frequency of histogram counts
Shape	Compactness (C)	1	$C = 4\pi \cdot A / P^2$, where P is the perimeter
	Area (A)	1	$A = nc^2$, where c is the pixel size

- 객체 기반 고해상도 모자이크 영상 분류를 위해 총 4개 클래스(해양, 눈/얼음으로 구성된 해빙, 해빙 음영지역, 물에 잠긴 해빙)에 대해 학습 및 검증자료 생성을 수행함

표 3-1-25. 용빙호 분류를 위한 해빙 영상 객체 클래스 정의 및 학습/검증자료 생성

Class	Number of objects	
	Train	Test
Snow/ice	110	67
Shadow	102	67
Submerged ice	134	94
Open sea	95	59
Total	441	287

- 해빙 모자이크 영상에 대해 4개의 클래스로 분류 후 눈/얼음으로 구성된 해빙(snow/ice) 클래스와 음영지역(shadow) 클래스를 병합하여 도시함

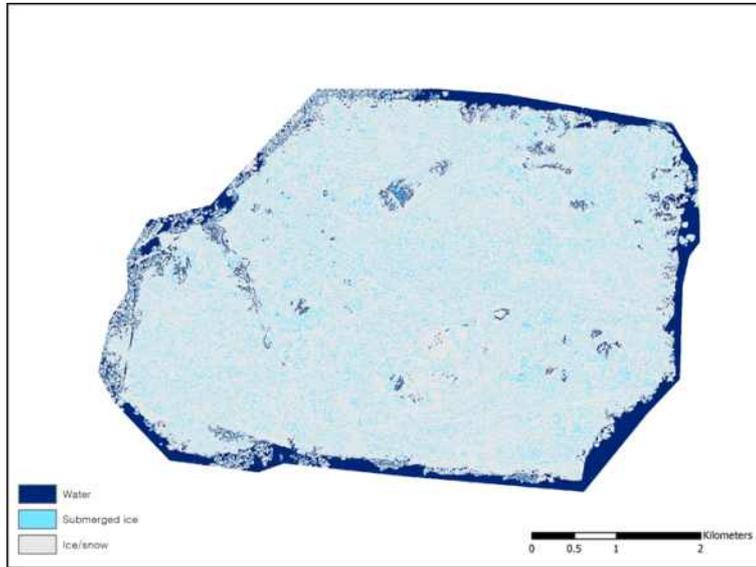


그림 3-1-121. 모자이크 영상 기반 용빙호 분류 결과

- 분류 결과에 대해 인접분석(neighbor analysis)을 통하여 물에 잠긴 해빙(submerged ice) 클래스가 해양(open sea)에 인접한 경우 해양으로 재분류를 수행함으로써 해빙 가장자리에서 해양에 잠긴 해빙을 용빙호가 아닌 해양 클래스로 재할당함

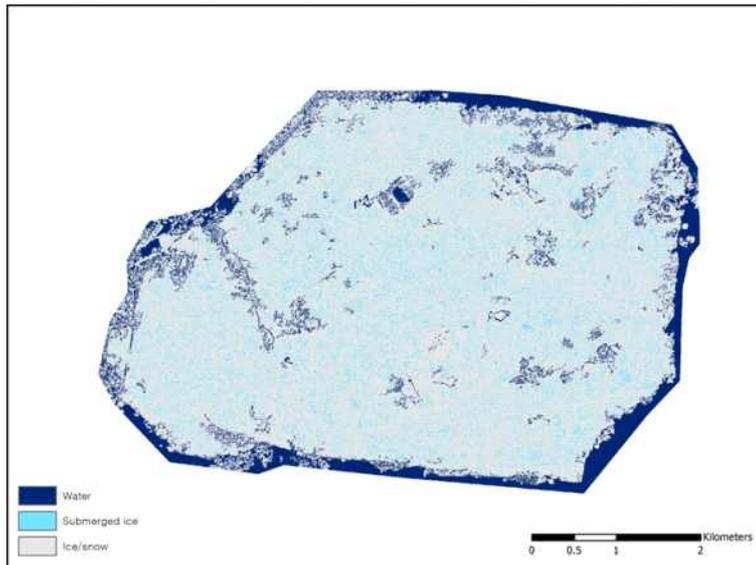


그림 3-1-122. 모자이크 영상 기반 용빙호 분류 후 해양에 잠긴 해빙을 용빙호가 아닌 해양 클래스로 재할당하기 위한 인접분석 적용 결과

- 보다 자세한 비교를 위해 동일 지점에 대해 확대 영상을 도시하면 인접분석 후 해양에 맞닿은 용빙호가 해양 클래스로 재할당이 이루어짐을 확인 가능함

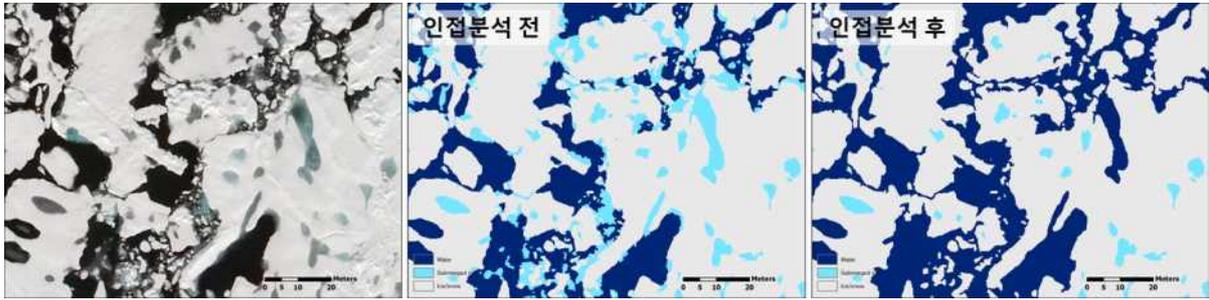


그림 3-1-123. 동일 지점에 대한 모자이크 영상과 인접분석 전후의 해빙 분류 결과 비교

- 클래스별로 생산된 검증자료를 이용하여 4개 클래스에 대해 분류 정확도를 평가한 결과 전체 분류 정확도(overall accuracy)는 약 93%로 평가됨

표 3-1-26. 객체 기반 고해상도 해빙 모자이크 영상 분류 정확도 평가 결과

		Ground reference classes				Total	User's accuracy (%)
		Open sea	Submerged ice	Shadow	Snow/ice		
Classification results	Open sea	59	1	0	0	60	98.3
	Submerged ice	0	87	8	1	96	90.6
	Shadow	0	6	59	4	69	85.5
	Snow/ice	0	0	0	62	62	100.0
Total		59	94	67	67	287	
Producer's accuracy (%)		100.0	92.6	88.1	92.5		
Overall accuracy (%)		93.0					

- 산출된 북극해 해빙의 용빙호 분류 결과는 향후 다양한 인공위성 센서로부터 획득 및 분석된 용빙호 정보의 검증뿐만 아니라 용빙호 분포 패턴에 대한 정밀 분석에도 활용이 가능할 것으로 기대됨.

○ 용빙호 정밀 관측을 위한 광학 원격탐사 자료 구축

- 개별 용빙호에 대해 정밀관측을 위해 저고도에서 무인기 관측을 수행하고 다중지점 영상을 활용하기 위한 전처리를 수행함.
- 무인기 획득 영상을 기반으로 Structure-from-Motion (SfM) 기법을 적용하여 공간해상도

1 cm 미만의 고해상도 모자이크 영상을 제작 후 매핑을 통한 지도화를 수행하였고, 용빙호 형태 및 바닥 구조에 대한 정보 확보가 가능함을 확인.

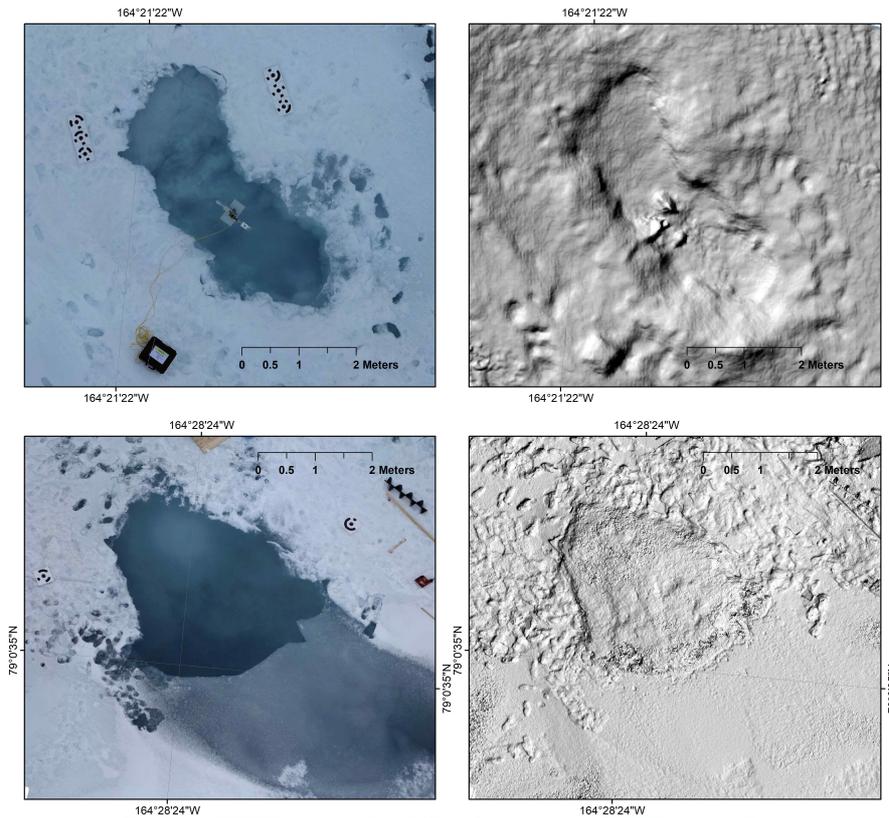


그림 3-1-124. 고해상도 무인기 영상 기반 개별 용빙호 정밀 관측

○ 북극해 전역 용빙호 시공간 분포 자료 수집 및 분석

- 북극해 해빙 표면의 기복을 따라 발생하는 용빙호(melt pond)는 해빙을 구성하는 눈이나 얼음보다 상대적으로 높은 태양에너지 흡수 특성으로 인해 용빙을 가속하기 때문에 해빙 변화에 대한 정확한 현황 파악과 예측을 위해서는 용빙호 탐지 및 분포를 위한 자료 확보와 분석이 필요함.
- 고해상도 용빙호 매핑과는 별개로, 2단계 연구에서의 북극해 전역 시공간 변화 특성 연구 진행을 위해서는 북극해 전역에 대한 정보가 필요하며, 이에 산출물을 만든 대표적 사례들에 대해 자료를 수집하고 그 특성을 비교분석함.
- 북극해 전역에 대한 용빙호 산출물의 시초는 Rosel 등의 2012년에 발표한 EOS-MODIS 영상과 용빙호 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 용빙호의 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.

표 3-1-27. 대표적 전북극 용빙호 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 양상블 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.

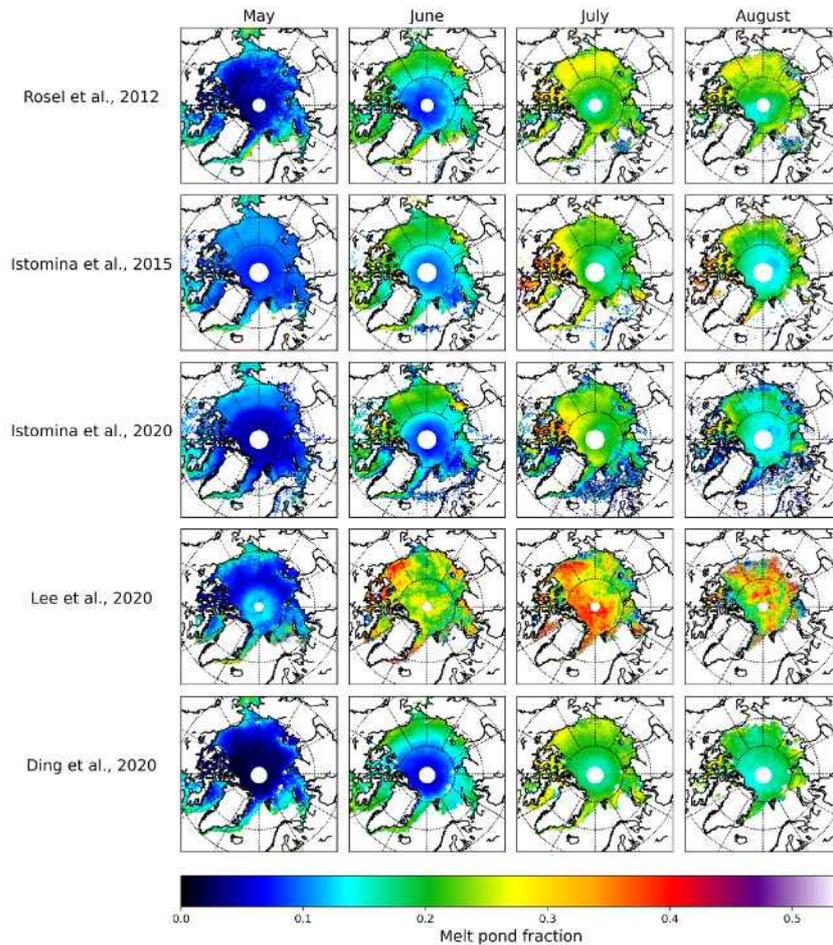


그림 3-1-125. 대표적 전북극 용빙호 분포 산출물의 2002~2011년 5~8월 월평균

극지연구소

- Madhavan 등의 2012년 연구에 의하면, MODIS 센서의 가시광 밴드 영역 일부에서 포화 현상이 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 용빙호 비율이 상승했으며, 5월, 8월은 감소함. 즉, 기존보다 여름철 용빙은 커졌으며, 이를 전후로 한 기간에서의 알려진 양의 편차가 잘 제거됨.
- MERIS MPF에서 용빙기 말기에 용빙호 비율이 현장 관측치에 비해 과소 추정되는 것으로 보이나, 이는 재결빙된 용빙호를 용빙호로 분류할 것인가 얼음으로 분류할 것인가 또는 아예 제외할 것인가의 결정에 따라 다르게 판단할 수 있음.
- MODIS20의 경우, 재결빙된 용빙호는 계절평균(Climatology) 자료를 통해 제외되었기 때

문에 8월 용빙호 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 용빙호로 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, 용빙기와 그 전후에서 각각 과소추정, 과대추정했을 가능성이 존재함.
- 결론적으로, 산출물 품질 관점에서 MERIS MPF가 가장 좋으나, 끊임 없는 장기 데이터셋 분석을 위해서는 MODIS에 기반한 산출물을 활용해야 할 것이며, 이 경우 MODIS DNN이 최적이라 판단됨.

○ 북극 해빙 용빙호 탐지 및 면적 추정 (위탁)

가. 북극 해빙 용빙호 reference 구축

- 기존 공개되어 있는 북극지역 용빙호 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 계획하였으나, 이때 위성 관측시간을 고려한 실제 여름철 북극의 용빙호의 샘플링을 수행 할 계획이었으나, COVID-19 팬데믹으로 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 용빙호 reference를 구축함.

1) 고해상도 촬영 자료 활용 북극 해빙 용빙호 샘플링

- NASA IceBridge 팀의 Continuous Airborne Mapping By Optical Translator (CAMBOT) 고해상도 현장사진자료를 활용하여 북극 해빙 용빙호 육안탐지 및 샘플링을 수행함. 해당 자료는 지난 2019년 4월 및 9월 총 7회에 걸쳐 북극 Greenland 및

남극 지역의 해빙, 고차빙 등을 관측하였으며, 총 76,397장의 현장사진자료를 기하보정하여 제공함.

- 본 연구에서는 ICESat-2 관측시간과 지역이 매칭되는 2019년 9월 9일 수행한 Greenland 지역의 현장관측자료 10,901장을 활용하여 북극 해빙 용빙호를 자동으로 분류하는 모델을 개발하여 reference 샘플로 활용하고자 계획 하였으며, 자동 분류모델의 개요는 다음과 같음.
- 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.
- 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 용빙호가 가질 수 있는 특징 중 하나인 어두운 픽셀영역을 추출한 결과, 다음 그림처럼 다양한 형태의 용빙호로 의심되는 어두운 영역이 도출됨. 하지만, 육안판별로는 용빙호가 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 다른 상황으로 ISODATA의 판단 기준 (parameter, threshold 등)을 일관성 있게 설정하는데에 한계가 있는 것으로 판단됨.

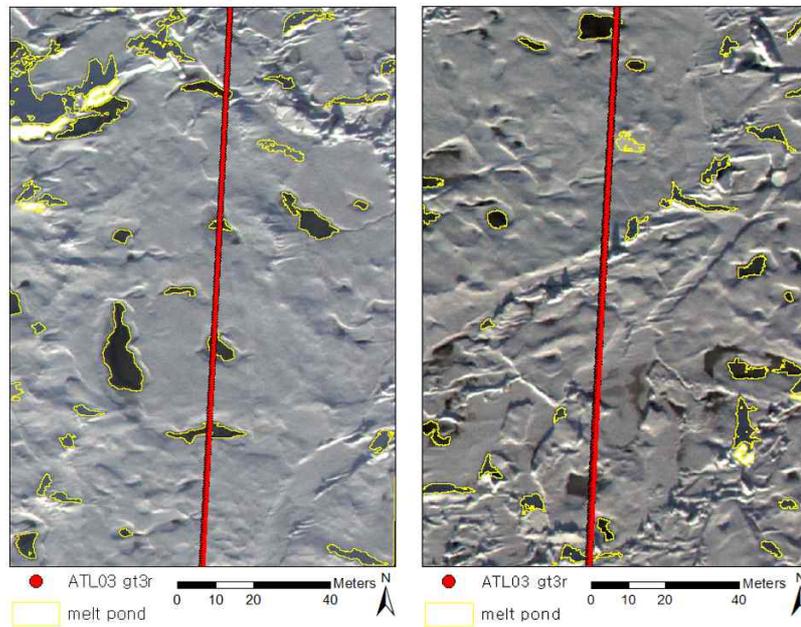


그림 3-1-126. ISODATA 분류기 활용 CAMBOT 영상 melt pond 의심 영역 탐지 결과 및 ICESat-2 track 예시 (2019. 09. 09. 14:58)

2) 선행연구 참고 고해상도 위성 기반 용빙호 reference 수집

- CAMBOT 자료 활용 용빙호 reference 구축 결과의 한계를 극복하기 위하여 본 연구에서는 선행연구에서 ICESat-2 자료의 활용 및 분석에 활용한 고해상도 위성 관측기반 용빙호 reference를 활용함. Tilling et al. (2020)의 ICESat-2를 활용한 여름철 북극의 용빙호 탐지에 관한 선행연구를 참고하였으며, 여기서 제시한 Sentinel-2 고해상도 광학 위성 (10 m 공간 해상도)을 기준으로 한 reference를 참고하여 분석에 활용함.

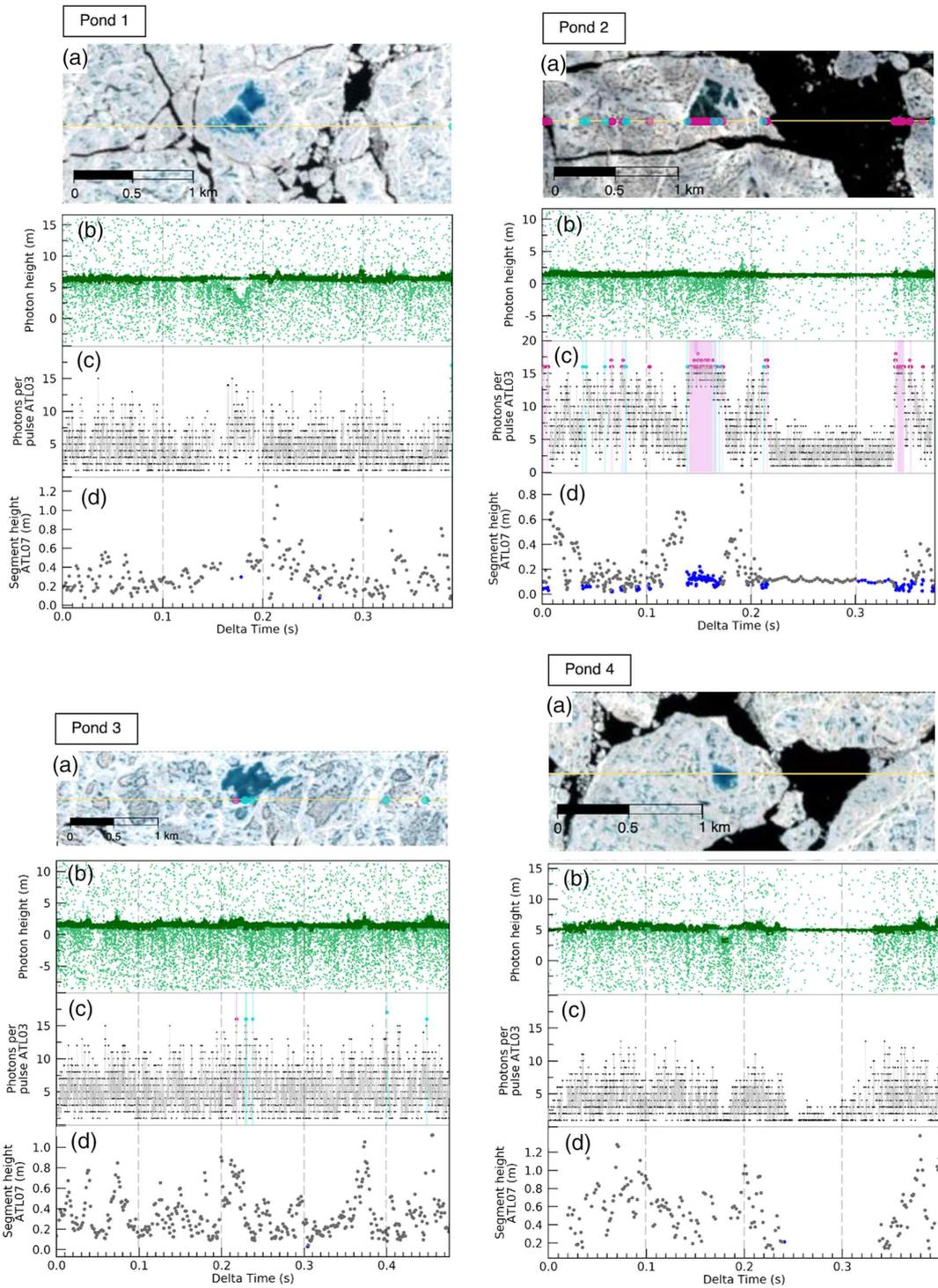


그림 3-1-127. Tilling et al. (2020)에서 분석한 Sentinel-2 영상 기반 melt pond 및 ICESat-2 ATL07 match-up data 예시

표 3-1-28. Tilling et al. (2020)에서 분석한 ICESat-2 활용 melt pond reference 참고 영상

Date of acquisition	Tile ID	Δ time (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 다음 그림과 같이 해당 날짜에 대한 Sentinel-2 영상을 reference로써 활용함.

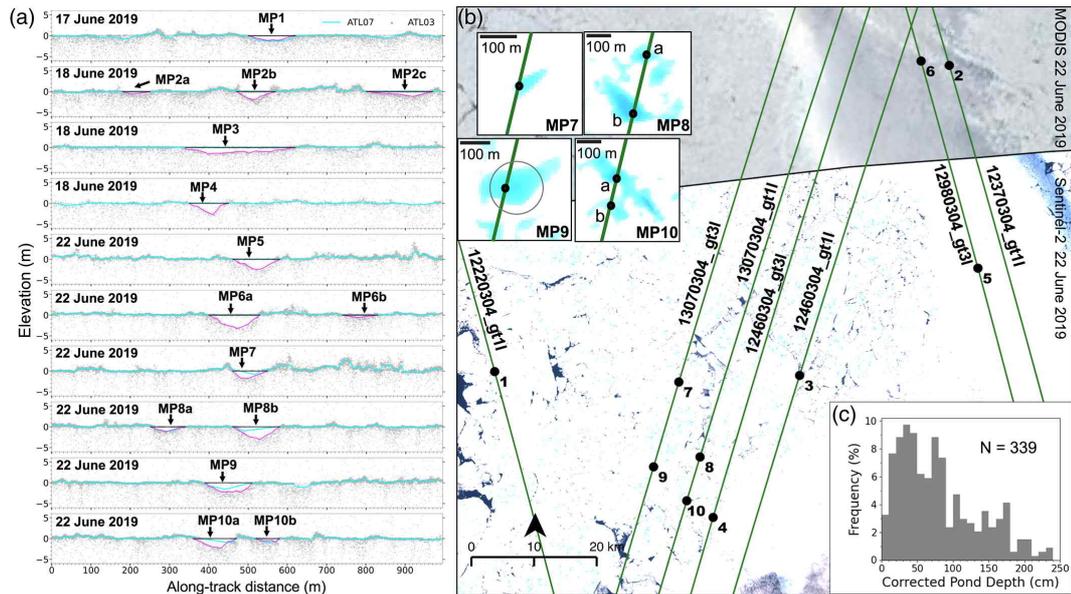


그림 3-1-128. Farrell et al. (2020)에서 제시한 MODIS 및 Sentinel-2 활용 영상 예시

극지연구소

나. 북극 해빙 용빙호 탐지 알고리즘 개발

1) Sentinel-2 MSI 영상 활용 용빙호 signal 분석

- 구축한 고해상도 위성 활용 용빙호 reference와 ICESat-2 photon height data의 높이 분포 및 반사되는 광자 개수에 대해 분석함. 용빙호 발생 지역 및 시기에 Sentinel-2와 ICESat-2의 관측 시간 차가 적은 (약 1 시간 이내) 사례가 매우 드물기 때문에, 선행 연구를 참고하여 자료를 수집함.

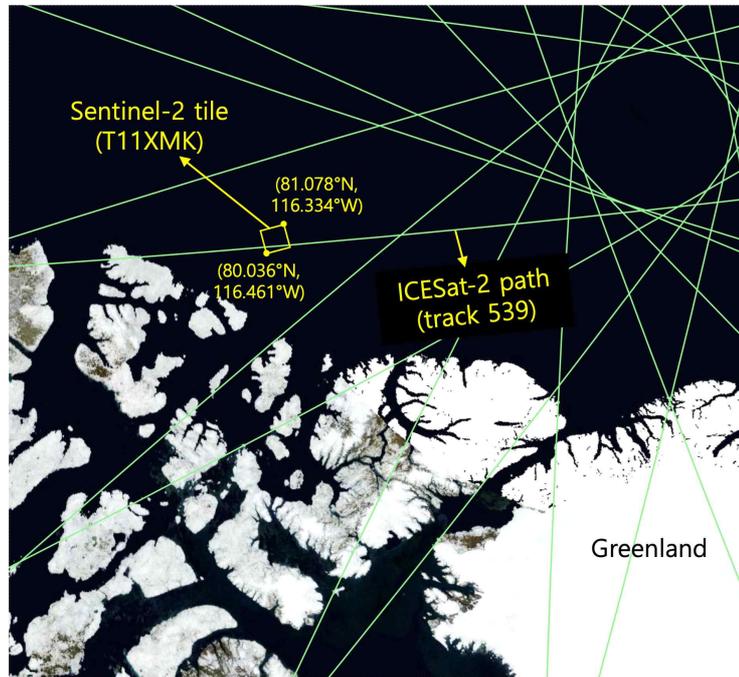


그림 3-1-129. 본 연구에서 활용한 2019년 8월 5일의 ICESat-2와 Sentinel-2의 공간적인 분포. 노란색 박스는 Sentinel-2의 영역을 나타내고, 초록색 선은 2019년 8월 5일에 관측된 ICESat-2의 궤도임.

- 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 활용함.

2) 높이 표준편차 및 반사된 광자 수를 활용한 용빙호 탐지 모델 개발

- Segment별 높이의 표준편차는 표면이 거친 해빙과 표면이 매끄러운 용빙호에서 서로 다른 특징을 보임. 물로 이루어진 용빙호와 얼음으로 덮인 용빙호 모두 해빙에 비해 매끄러운 표면을 가지기 때문에 상대적으로 높이의 표준편차가 매우 작기 때문으로, 해빙과 용빙호를 구분하기 위한 높이의 표준편차는 0.1 m를 임계값을 활용하였으며, 임계값보다 작은 값은 매끄러운 표면이므로 용빙호로 분류함. 이를 활용하여 일차적으로 해빙과 용빙호를 구별함.
- 물로 이루어진 용빙호와 얼음으로 덮인 용빙호를 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 판단

하였고, 200개 이상의 광자의 경우 표면이 매끄러운 얼음으로 판단함. 이를 활용하여 표면에 따른 용빙호 종류를 구분함. 최종적으로 제시된 용빙호 탐지 모델에서는 해빙, 물을 표면으로 하는 용빙호, 얼음을 표면으로 하는 용빙호를 탐지할 수 있음.

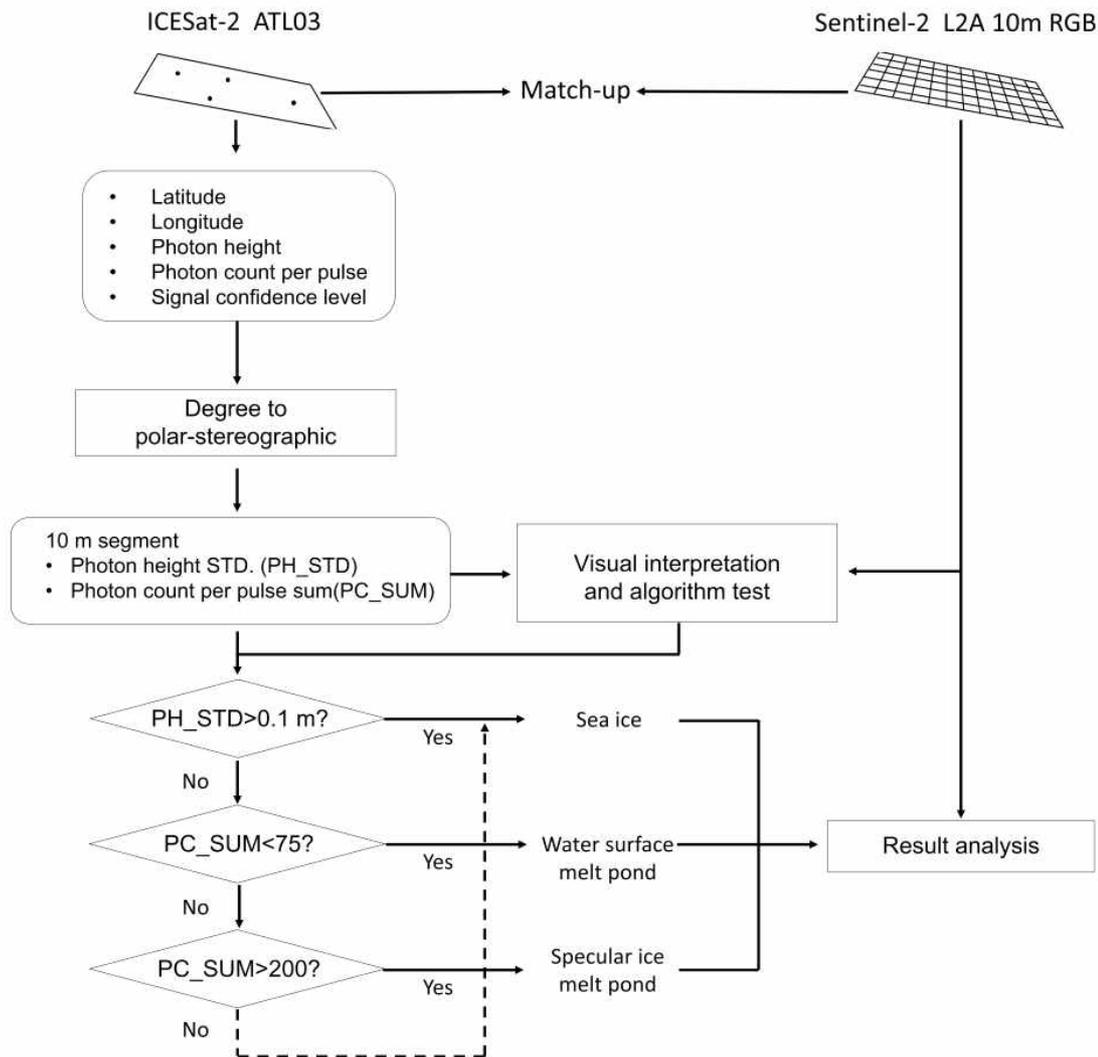


그림 3-1-130. 본 연구에서 제시한 melt pond 탐지 알고리즘의 흐름도

- 다음 그림에서는 북극의 다양한 형태의 리드 및 용빙호를 확인할 수 있음. 높이 표준 편차의 분포는 모든 리드 및 용빙호에서 비교적 일관적인 분포를 보임. 해당 그림은 2019년 08월 05일의 Sentinel-2 영상의 일부를 확대한 것임. (a)는 제시한 용빙호 탐지 결과를 Sentinel-2와 비교한 것이며, 파란 색은 물을 표면으로 가지는 용빙호, 분홍 색은 반사도가 높은 얼음 표면을 가진 용빙호 (specular pond) 및 작은 리드를 나타냄. (b)는 각 segment의 높이 표준편차를 나타내며 단위는 m임. (c)는 각 segment당 획득한 광자의 총 합을 의미함. (d)는 (a)에서 물이 표면인 용빙호와 얼음이 표면인 용빙호의 분류 결과가 섞여있을 때 분류 결과를 판독하기 쉽게 하기 위해 수면(파랑)과

얼음 표면 용빙호(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 용빙호의 광자 총 합의 임계값인 75와 200을 나타냄. 마지막으로 (g)는 segment로 묶지 않은 photon height의 분포를 나타냄.

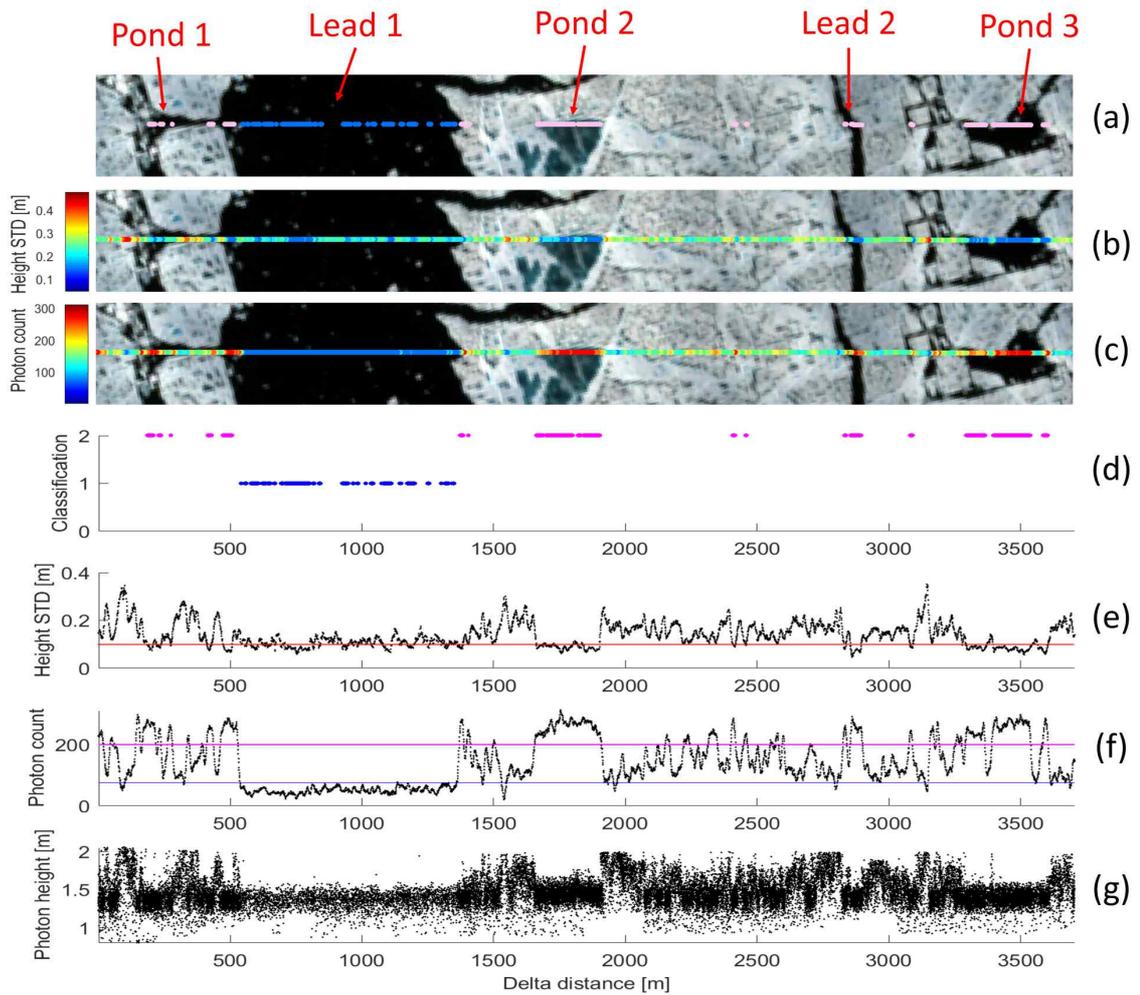


그림 3-1-131. 2019년 08월 05일의 Sentinel-2 영상 및 ICESat-2 활용 용빙호 탐지 결과

- 약 1 km 규모의 Lead1과 나머지 리드 및 용빙호에서 segment 중 일부가 높이 표준편차가 임계값보다 낮은 결과를 보임. 이를 통해 해빙과 리드 및 용빙호를 일차적으로 구분하는 데에는 높이의 표준편차가 효과적으로 사용될 수 있다는 가능성을 제시할 수 있음.
- 하지만 높이의 표준편차만으로는 표면이 물인 용빙호와 얼음인 용빙호를 구별하기 어려움. 이는 광자의 총 합을 활용하면 보다 뚜렷하게 구분할 수 있는데, 규모가 큰 리드인 Lead1과 나머지 리드 및 용빙호의 신호를 비교하면, 광자의 반사율이 극명하게

차이 나는 것을 확인할 수 있음.

- 이를 통해 표면이 물인 Lead 1에서는 광자의 총 합 매우 낮은 반면, 다른 리드 및 용빙호에서는 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 차이 나는 것은 고해상도 고도계의 핵심적인 특성으로 판단됨.
- 지표 특성에 따른 광자 양의 차이는 다음 그림에서도 확인할 수 있는데, 수면인 Lead1에 비해 Pond1-3, Lead2에서는 단위 길이당 비교적 많은 양의 ICESat-2 높이 정보가 분포하고 있음.
- 다음 그림은 위와 같은 Sentinel-2 광학 영상의 다른 용빙호 사례임. 2019년 08월 05일의 Sentinel-2 영상의 일부를 확대한 것으로, (a)는 제시한 용빙호 탐지 결과를 Sentinel-2와 비교한 것이며, 파란 색은 물을 표면으로 가지는 용빙호, 분홍 색은 반사도가 높은 얼음 표면을 가진 용빙호 (specular pond) 및 작은 리드를 나타냄. (b)는 각 segment의 높이 표준편차를 나타내며 단위는 m임. (c)는 각 segment당 획득한 광자의 총 합을 의미함. (d)는 (a)에서 물이 표면인 용빙호와 얼음이 표면인 용빙호의 분류 결과가 섞여있을 때 분류 결과를 판독하기 쉽게 하기 위해 수면(파랑)과 얼음 표면 용빙호(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 용빙호의 광자 총합의 임계값인 75와 200을 나타냄. 마지막으로 (g)는 segment로 묶지 않은 photon height의 분포를 나타냄.

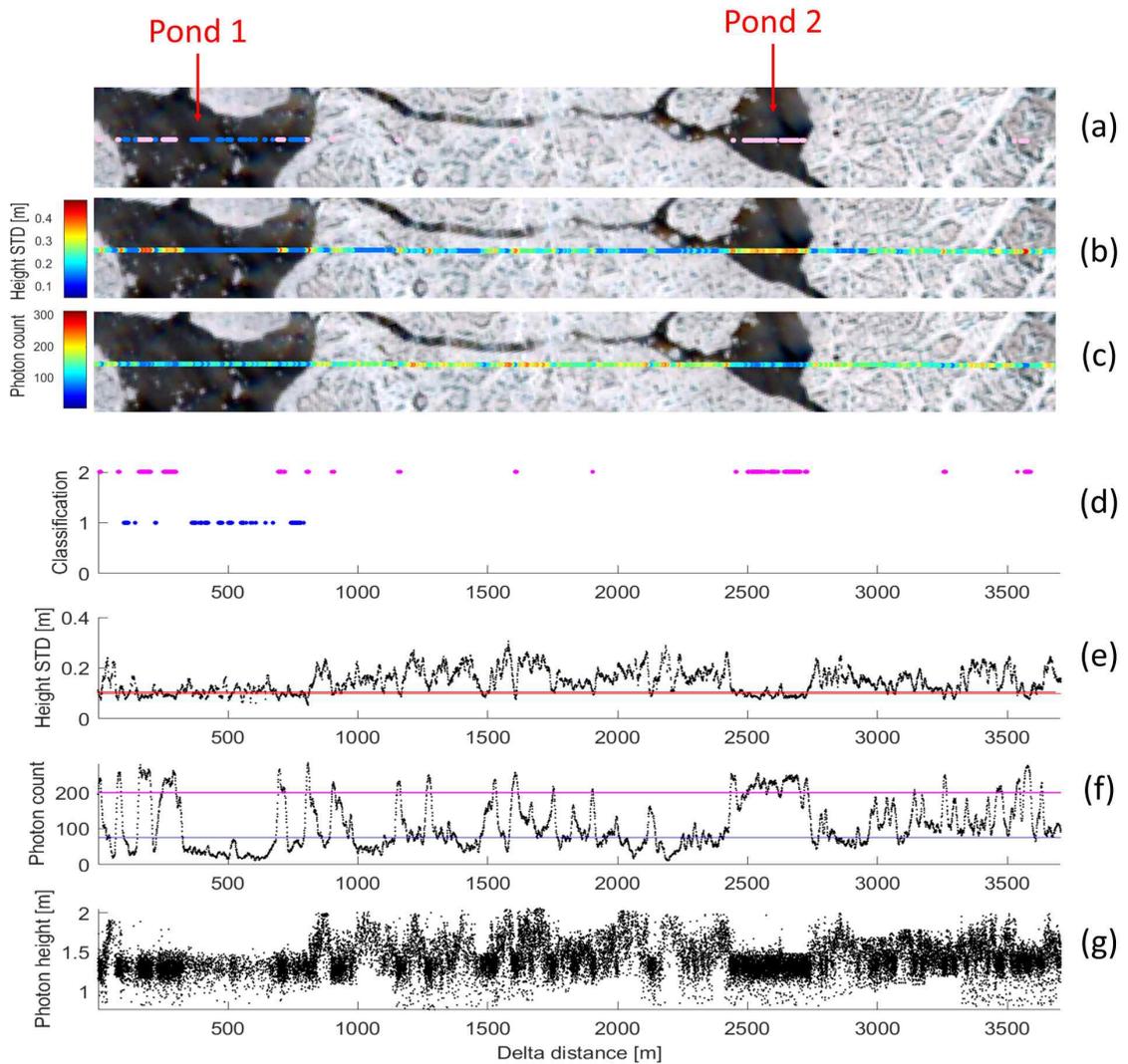


그림 3-1-132. 2019년 08월 05일 타지역의 Sentinel-2 영상 및 ICESat-2 활용 용빙호 탐지 결과

- Pond2에서는 높이의 표준편차 및 광자의 총 합의 분포가 비교적 균일하게 나타났지만, 반면 Pond1에서는 이웃한 지점에서 다른 광자의 총 합 분포를 보여주며, 결과적으로 하나의 용빙호 내에서 물과 매끄러운 얼음이 동시에 존재하는 것으로 분류됨.
- 또한 해빙 내에서도 일부 오분류가 발생하였으며, 반대로 탐지하지 못한 용빙호 정보도 다수 존재함. 이를 통해 제시한 분류 알고리즘이 모든 상황에서 활용될 수 없다는 한계점을 확인하였고, 본 연구에서 설정한 임계값은 본 연구에서 관찰한 용빙호에 대해 최적화 되었기 때문에, 추가적인 분석을 통해 더욱 일반화된 임계값 설정이 필요할 것으로 판단됨.

3) 2019년 melting season Arctic melt pond fraction 추정 결과

- ICESat-2 photon height 및 photon count를 활용한 threshold 기반의 북극 용빙호 탐지 알고리즘을 활용하여 2019년 5~9월의 melt pond fraction을 도출함. 기타 해빙 및 환경변수와의 비교를 위하여 NSIDC에서 활용하고 있는 polar stereographic projection grid (25 x 25 km)를 활용하여 ICESat-2 Signal을 월별 합산함.
- 2019년 5-9월 월평균 용빙호 분석 결과는 다음 그림에 나타냄. melt pond fraction에 대한 시·공간적인 reference data가 존재하지 않는 실정으로, 본 연구에서는 NSIDC에서 제공하는 해빙농도 (Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSPP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1) 자료를 함께 비교함. melt pond detection 결과의 경우, 각 픽셀 별 최빈 관측 결과를 나타낸 것으로, sea ice (blue), open sea (green), 용빙호 (yellow)로 표기함. melt pond fraction의 경우, 각 픽셀 별 melt pond class의 관측 빈도를 정리한 것으로, 0 - 100%의 값을 가짐. 내삽 기법 활용 melt pond fraction의 경우, 월별 melt pond fraction 자료를 활용하여 ICESat-2 관측이 이루어지지 못한 지역에 대한 내삽을 수행하여 공간적 gap-filling한 결과임. 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.



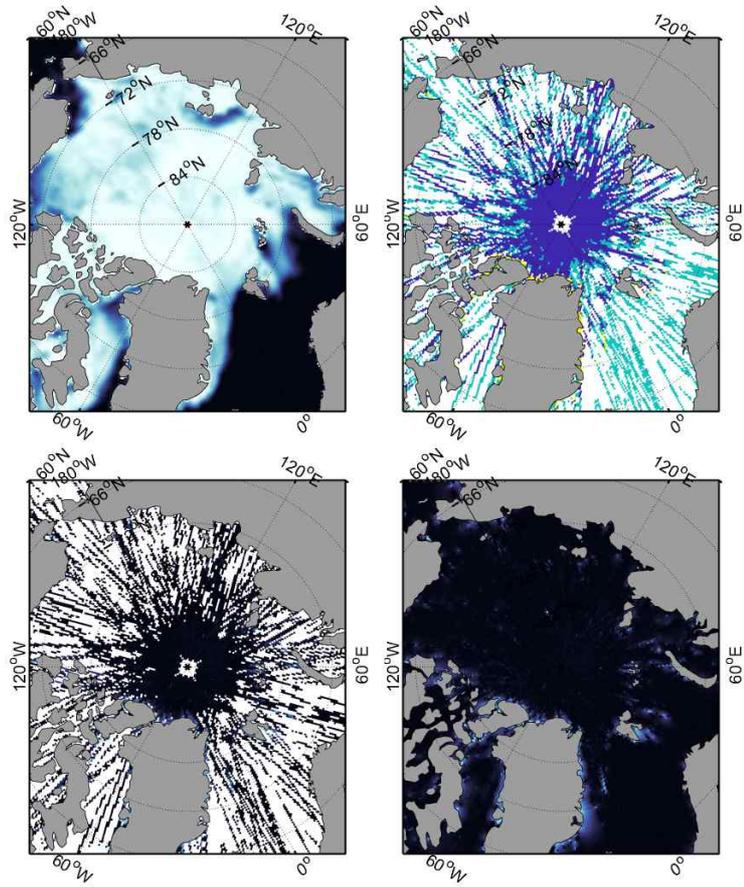


그림 3-1-133. ICESat-2 활용 2019년 5월 평균 melt pond 탐지 결과. 왼쪽 위: 월평균 해빙 농도 (0 - 100%), 왼쪽 아래: 월평균 용빙호 비율 (0 - 100%), 오른쪽 위: 월평균 용빙호 탐지 (노란색: 용빙호, 초록색: 개빙수역, 파란색: 해빙), 오른쪽 아래: 내삽 기법 활용 월평균 용빙호 비율 (0 - 100%)

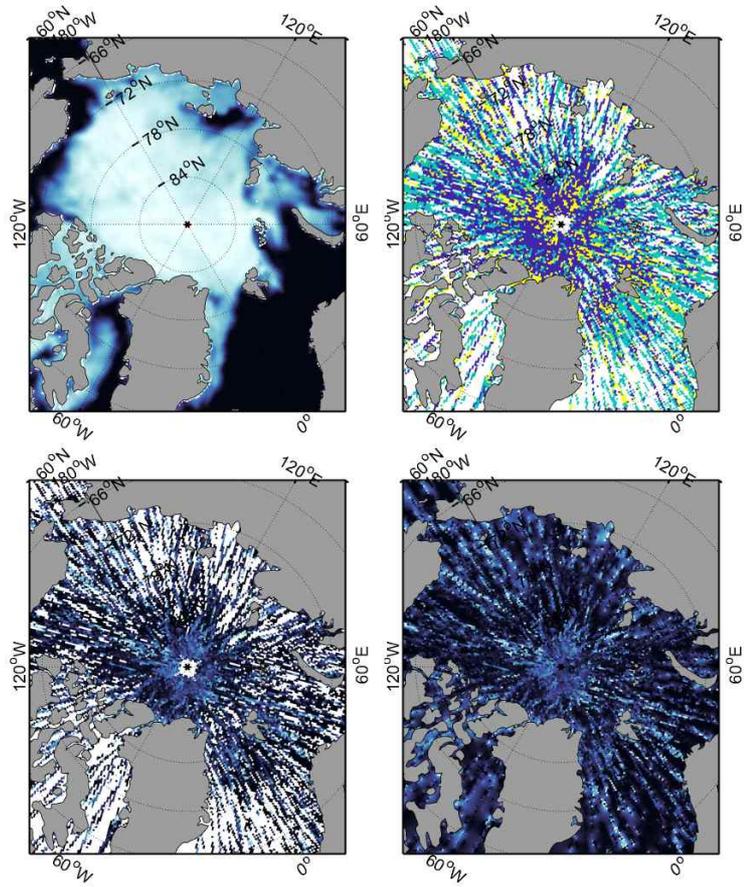


그림 3-1-134. ICESat-2 활용 2019년 6월 평균 melt pond 탐지 결과. 왼쪽 위: 월평균 해빙 농도 (0 - 100%), 왼쪽 아래: 월평균 용빙호 비율 (0 - 100%), 오른쪽 위: 월평균 용빙호 탐지 (노란색: 용빙호, 초록색: 개방수역, 파란색: 해빙), 오른쪽 아래: 내삽 기법 활용 월평균 용빙호 비율 (0 - 100%)

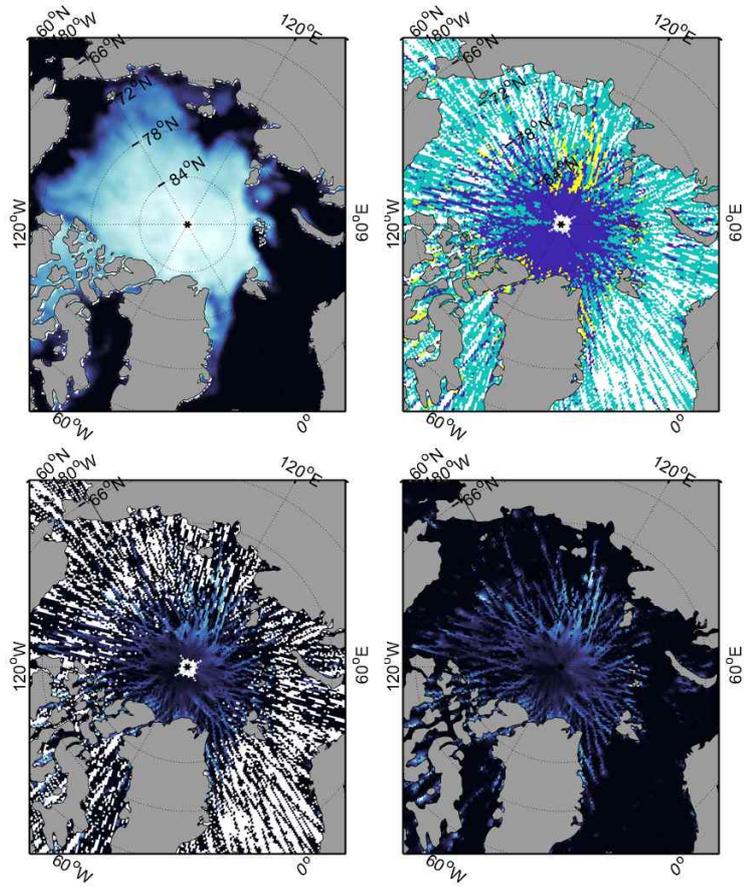


그림 3-1-135. ICESat-2 활용 2019년 7월 평균 melt pond 탐지 결과. 왼쪽 위: 월평균 해빙 농도 (0 - 100%), 왼쪽 아래: 월평균 용빙호 비율 (0 - 100%), 오른쪽 위: 월평균 용빙호 탐지 (노란색: 용빙호, 초록색: 개빙수역, 파란색: 해빙), 오른쪽 아래: 내삽 기법 활용 월평균 용빙호 비율 (0 - 100%)

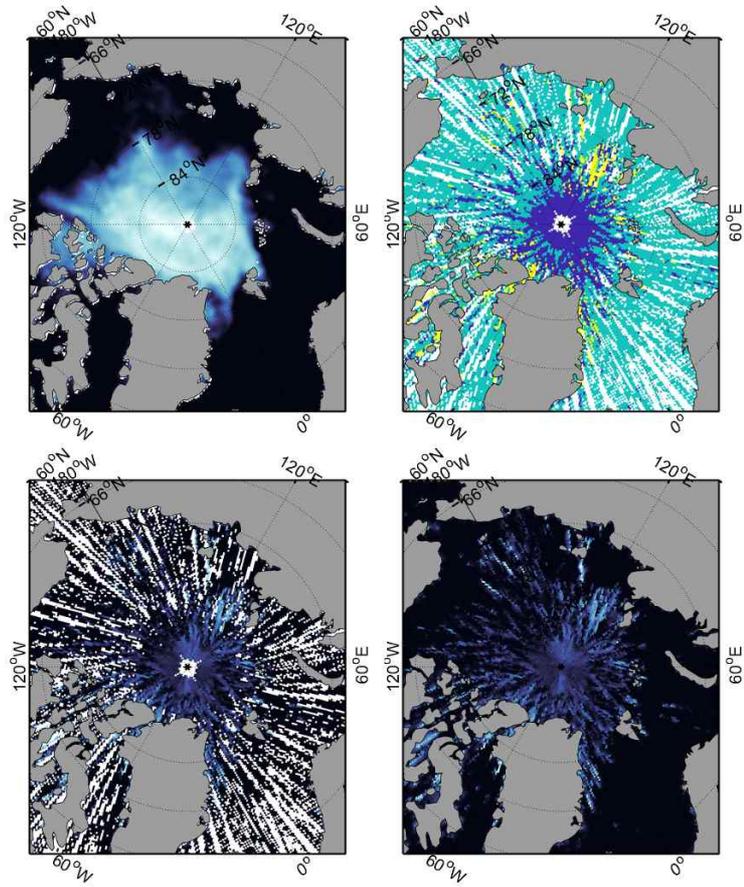


그림 3-1-136. ICESat-2 활용 2019년 8월 평균 melt pond 탐지 결과. 왼쪽 위: 월평균 해빙 농도 (0 - 100%), 왼쪽 아래: 월평균 용빙호 비율 (0 - 100%), 오른쪽 위: 월평균 용빙호 탐지 (노란색: 용빙호, 초록색: 개방수역, 파란색: 해빙), 오른쪽 아래: 내삽 기법 활용 월평균 용빙호 비율 (0 - 100%)

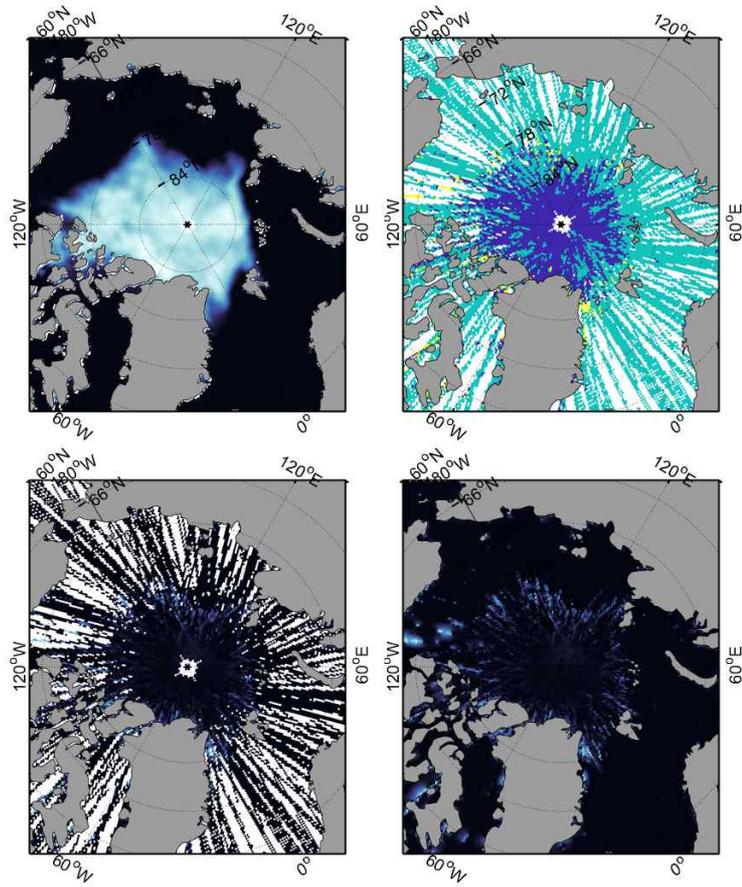


그림 3-1-137. ICESat-2 활용 2019년 9월 평균 melt pond 탐지 결과. 왼쪽 위: 월평균 해빙 농도 (0 - 100%), 왼쪽 아래: 월평균 용빙호 비율 (0 - 100%), 오른쪽 위: 월평균 용빙호 탐지 (노란색: 용빙호, 초록색: 개방수역, 파란색: 해빙), 오른쪽 아래: 내삽 기법 활용 월평균 용빙호 비율 (0 - 100%)

- 월별 분포 추정 결과, NSIDC 해빙 농도 자료 기준 해빙이 관측되지 않은 open sea 지역에 대해서도 (특히 2019년 6월) 용빙호가 관측됨. 이는 25 km grid로 치환하는 과정에서 ICESat-2 track에서 관측된 작은 유빙들에 의해서 발생한 관측 오차일 가능성이 있으며, 실제 작은 유빙들에 의한 관측 오차인지 추후 연구에서 확인 필요. 특히, 관측 빈도수에 따르면, 저위도로 갈수록 ICESat-2에 의한 관측빈도가 낮은 것으로 나타나며, 상대적으로 고위도(Arctic-Center)지역에 비하여 저위도 지역의 월평균 관측 결과에 대한 불확실성이 높게 나타날 수 있을 것으로 판단됨.

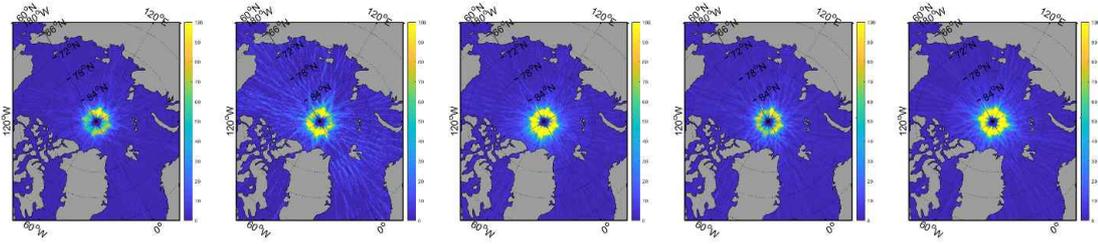


그림 3-1-138. 2019년 월별 ICESat-2 관측 누적 빙도수. 좌측부터 2019년 5월~9월

4) 한계점 및 논의사항

- ICESat-2를 활용하여 북극 해빙의 melt pond 탐지를 수행하였지만, 상대적으로 적은 사례로 인하여 기계학습 기법과 같은 보다 고도화된 탐지모델을 개발하는데 한계가 있음.
- 하지만, 단순한 판별식을 통해서도 충분히 melt pond를 탐지할 수 있는 것으로 나타났으며, 추후 (1) 샘플의 보완을 통한 기계학습 기법의 적용, 혹은 (2) 경험적으로 제시한 단순 판별식의 고도화를 통한 모델의 강화를 수행할 수 있을 것으로 기대됨.
- 기존 고해상도 기반의 melt pond 탐지/분석 연구가 많지 않을뿐더러, 분석자료의 양이 크지 않아, 정량적인 분석보다는 정성적인 분석을 주로 수행함. 실제 검증할 수 있는 현장자료가 없는 상황이며, KOPRI에서 확보하고 있는 melt pond의 현장자료를 활용하고자 하여도 ICESat-2의 track과 겹치는 자료가 없어 활용도가 매우 낮은 실정임.
- 추후에 샘플의 추가 확보를 통하여 보다 넓은 시·공간에 대한 정량적인 검증이 추가적으로 수행된다면 본 연구가 제시하는 melt pond 탐지 알고리즘의 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 기대됨. 또한, 본 연구에서 제시한 melt pond 탐지 알고리즘은 ICESat-2 높이 자료의 상대적인 분포를 활용함으로써 지역별 높이 차이에 대한 민감도가 낮을 것으로 기대됨.

○ 북극 해빙 리드 및 융빙호와 북극 해빙 변화 영향 (위탁)

가. 2019년 melting season Arctic melt pond fraction과 기후인자 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.

- 선정된 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.
- 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. 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.

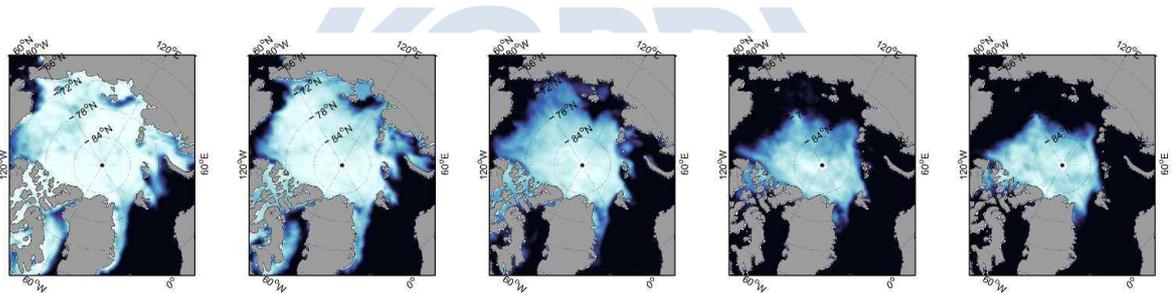


그림 3-1-139. 2019년 월별 NSIDC 해빙농도 관측자료. 좌측부터 5~9월

- 이 외에 기후관련 인자에 대한 시·공간 분포특성은 다음 그림들과 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 해빙 농도 변수와 마찬가지로 인과관계(causality)를 고려하지 않고 직접적인 상관계수를 분석함.

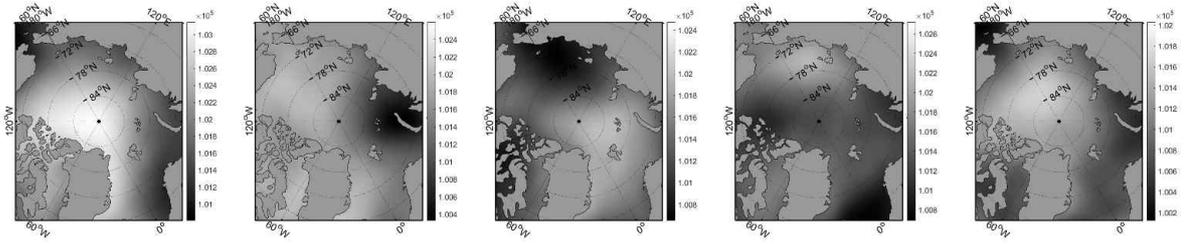


그림 3-1-140. 2019년 월별 ERA-5 mean sea level pressure 재분석자료. 좌측부터 5~9월

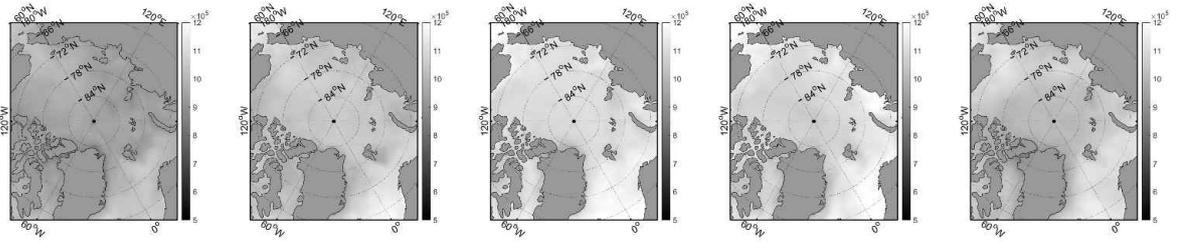


그림 3-1-141. 2019년 월별 ERA-5 surface thermal radiation downwards 재분석자료. 좌측부터 5~9월

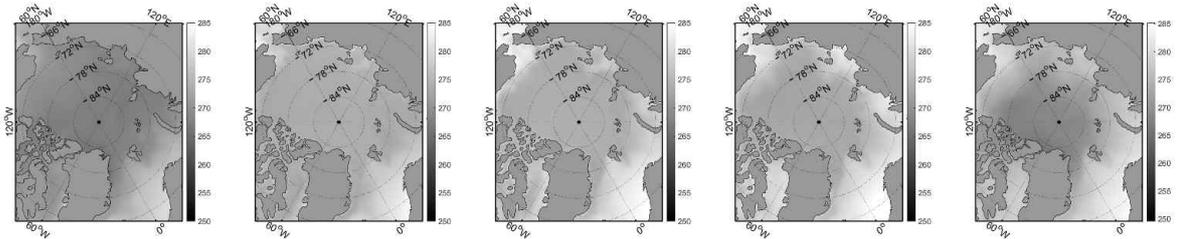


그림 3-1-142. 2019년 월별 ERA-5 2-meter temperature 재분석자료. 좌측부터 5~9월

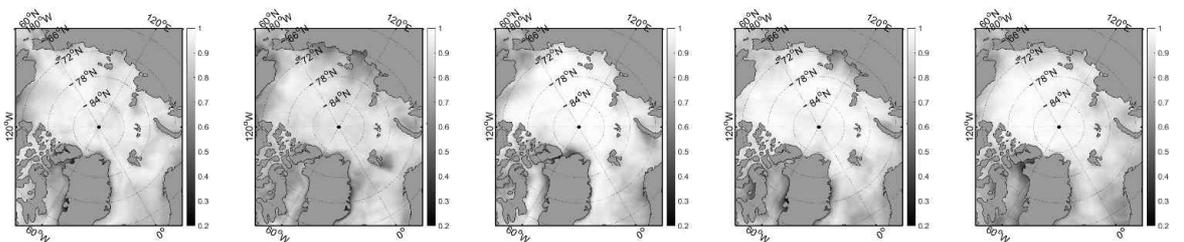


그림 3-1-143. 2019년 월별 ERA-5 total cloud cover 재분석자료. 좌측부터 5~9월

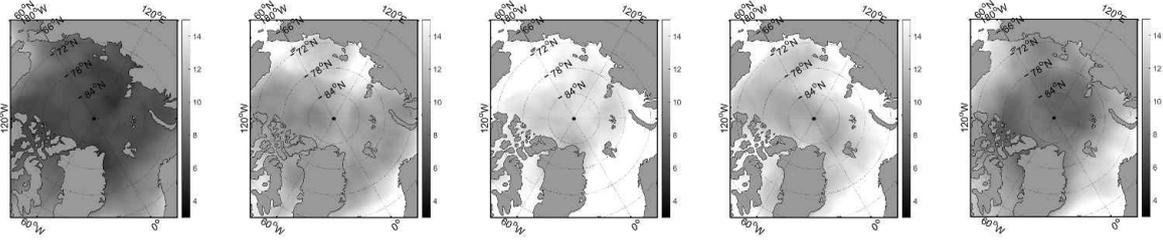


그림 3-1-144. 2019년 월별 ERA-5 total column vertically-integrated water vapour 재분석자료. 좌측부터 5~9월

- 2019년 월별 melt pond fraction과 관련 인자의 상관관계 분석 결과, 변수별로, 월별로 편차가 큰 것으로 나타남. SIC의 경우, 용빙이 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 용빙이 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 용빙이 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 용빙이 진행되면서 양의 상관관계에서 음의 상관관계로 변하는 모습을 보임.
- melting season 전체 기간에 대한 상관관계 분석 결과 SIC, STRD, T2M, TCWVS가 높을수록, 반면 MSL, TCC가 낮을수록 melt pond fraction이 높은 것으로 나타남.



그림 3-1-145. 2019년 (좌) 월별 (우) 5~9월 전체 melt pond fraction과 관련 변수 간 상관관계수

나. 2019년 melting season Arctic melt pond fraction과 과거 기후인자 상관관계 분석

- 본 연구는 추가적으로 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).
- 분석 결과, 1개월 전 SIC가 높을수록 melt pond fraction이 높은 것으로 나타났으며, 이는 지난 달의 낮은 해빙농도를 가지는 픽셀이 용빙기가 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.

극지연구소

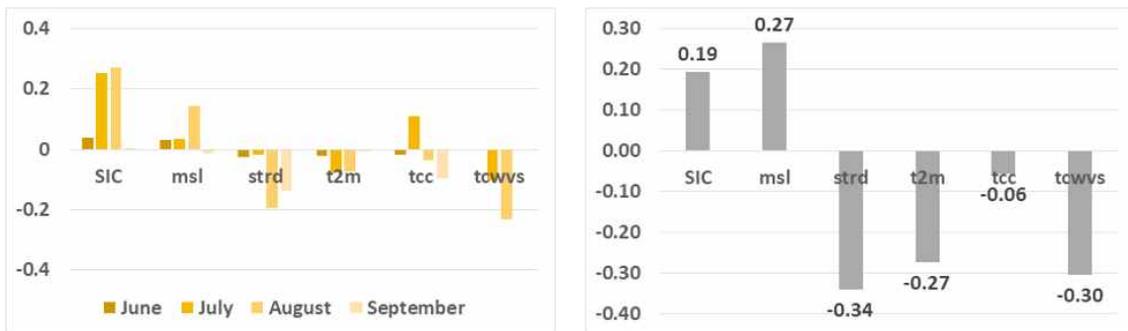


그림 3-1-146. 2019년 (좌) 월별 (우) 5~9월 전체 melt pond fraction과 1개월 이전 관련 변수 간 상관관계수

다. 기후·해빙 인자별 melt pond fraction과의 상관관계에 대한 선행연구 활용 비교·검증

- 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.
- 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.

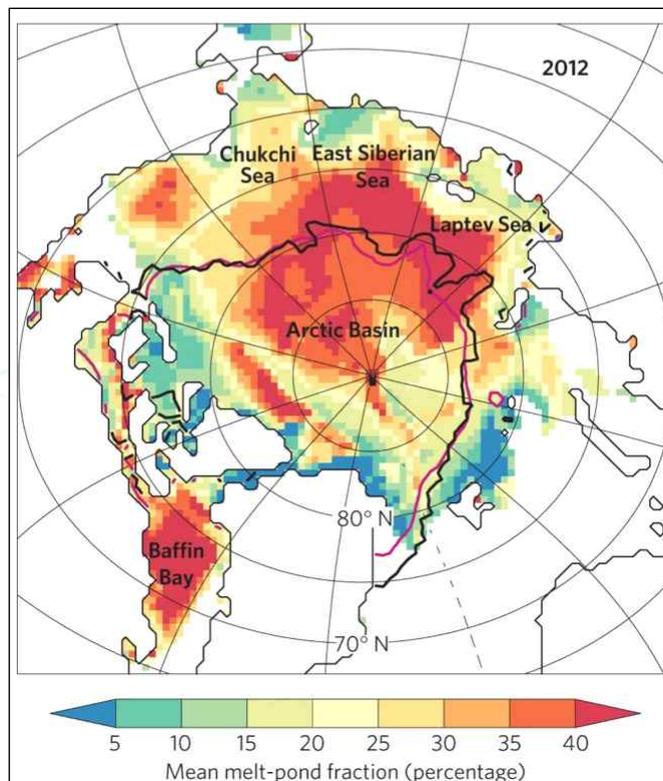


그림 3-1-147. 2012년 북극 melt pond fraction 분포도 (Schröder et al. (2014)의 Figure 2b)

- 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 용빙기에 한하여 음의 상관관계를 보이는 것으로 나타남. 또한, MSL 변수의 경우, sea ice thinning를 야기하는 지표로 널리 알려져 있으며 (Kwok and Untersteiner, 2011) 용빙기에 점점 넓어지는 melt pond가 albedo의 감소를 가져오고 surface runoff 및 water vapor (TCWVS)의 형성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있음 (Kwok and Untersteiner, 2011).

본 연구에서도 MSL과 용빙호의 비율이 양의 상관관계를 가지며, 용빙기가 진행됨에 따라 그 상관계수가 감소하는 것으로 나타나, 영향이 점점 감소하는 현상을 확인함.

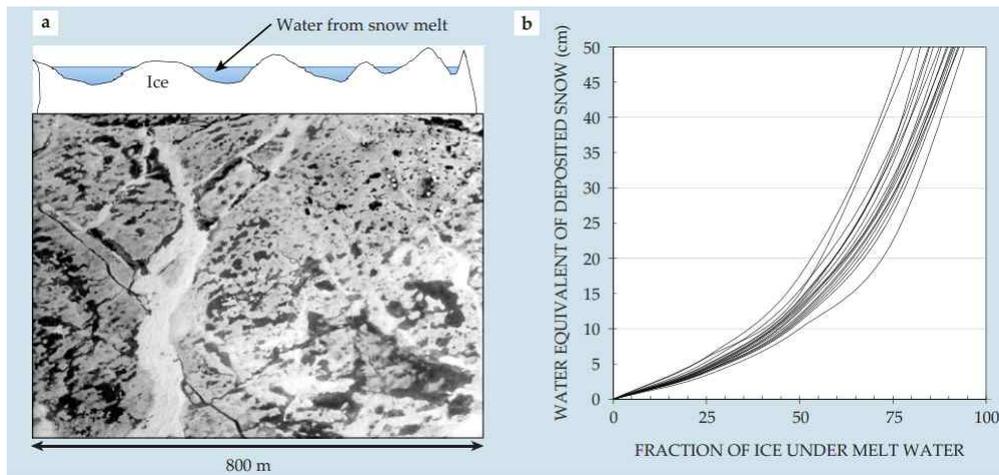


그림 3-1-148. 여름철 북극 melt pond로 인한 (a) 해빙 albedo 차이 및 (b) 표층 수분 함량의 상관관계 (Kwok and Untersteiner, 2011)



9. 해빙 복사강제력 (위탁)

- 본 연구는 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출 및 분석을 목표로 함.
- 이를 위해 우선 북극 지역에서의 복사강제력을 산출함. 선진기관 및 선행연구를 바탕으로 북극지역의 복사강제력 산출의 기준을 제시하고, 복사강제력 산출을 위한 장기간의 위성 기반 자료를 수집함. 그리고 수집한 자료를 바탕으로 동일한시·공간 해상도로 일치시켜주고 이를 종합하여 북극지역에서의 복사강제력 산출을 수행함.
- 복사강제력 특성 분석 및 해빙 유무에 따른 복사강제력 특성을 분석함. 북극권 지역을 중심으로 우선 분석을 수행하여 북극 전역의 복사강제력 특성 분석을 수행함. 이후 위성 기반 해빙농도 자료를 수집하여 북극 해빙-개빙지역을 구분하고 해빙 유무에 따라 복사강제력의 변화 및 특성 분석함.
- 복사강제력 기반으로 해빙변화에 따른 피드백을 정량적으로 평가함. 재분석자료 및 기존 위성기반의 해빙표면온도 자료의 한계를 극복하고자 DNN 기반의 해빙표면온도를 생산함. 이를 바탕으로 복사강제력 결과와 비교 및 평가를 진행함. 마지막으로 이를 바탕으로 북극지역의 복사강제력 특성을 종합하여 북극 기온의 정량적인 변화와 연계성 분석을 수행함.

○ 연구자료

가. Surface Albedo

- CM SAF에서 제공하는 CLARA-A2-SAL (CLARA Dataset, AVHRR 2nd release, Surface albedo) 자료를 활용함. 본 자료는 CLARA-A1-SAL Dataset (Riihelä et al. 2013)을 개선한 자료로, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and Meteorological Operational (METOP) 위성의 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)의 Red 및 NIR 채널 자료를 바탕으로 생성함.
- 대기 보정은 Simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum(SMAC) algorithm (Rahman and Dedieu, 1994), Bidirectional Reflectance Distribution Function(BRDF) algorithm은 Roujean et al. (1992)과 Wu et al. (1995)를 바탕으로 수행함.
- 공간해상도는 0.25°이며, 1982년부터 2015년까지 해빙이 존재하는 지역을 대상으로 월평균 된 자료를 적용함. 본 자료는 surface albedo, insolation(SIS), incoming(SDL)/ outgoing long wave(SOL)와 같은 다양한 에너지 수치 변수를 제공함. 해당 자료는 각 변수별로 다양한 시간 해상도로 제공되고 있으며, 기본적으로 모든 변수는 월평균 자료로 제공됨.
- 해당 자료의 정확도는 Greenland Summit 지역의 실측 자료와 비교한 결과, RMSE 0.044, Mean relative retrieval difference [%] -3.88로 나타났으며(Karlsson et al., 2017), 북극의 surface albedo 연구에서도 활용하고 있음(Cao et al., 2015; Xiao et al., 2017).
- 해당 산출물의 특징 및 예시는 아래 표 및 그림과 같음.

표 3-1-29. CM SAF CLARA-A2-SAL

Sensor/Platform	AVHRR
Spatial resolution	0.25 degree
Spatial coverage	N: 90, S: -90, E: 180, W: -180
Temporal resolution	Monthly
Temporal coverage	1982~2015

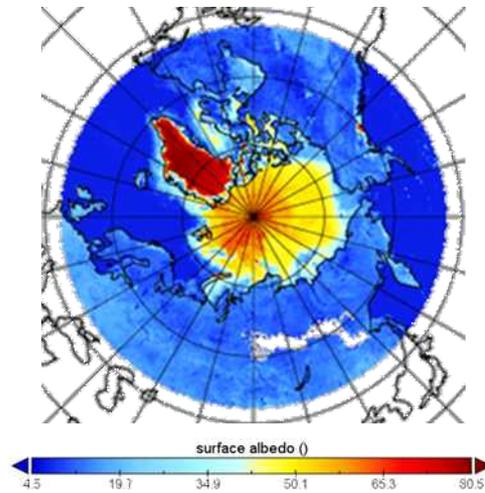


그림 3-1-149. CM SAF surface albedo 자료의 예

나. Skin Temperature

- 피부온도(Skin Temperature)는 표면 flux의 변화에 즉각적으로 반응할 수 있는 최상부 표면층의 온도를 나타냄. 본 연구에서는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECWMF)에서 제공한 ERA5의 자료를 사용함.
- ERA5(ECMWF ReAnalysis 5)는 ECMWF의 5세대 국제 기후대기 재분석 자료로, 2017년 ECMWF는 ERA-Interim을 대체하기 위해 역학 과정을 개선하는 동시에 시·공간 해상도를 대폭 늘린 5세대 재분석자료인 ERA5를 공식적으로 배포하기 시작했음. ERA5는 기존 ERA-Interim에 비해 다양한 분야가 개선되었음. 먼저 더 많은 위성 자료를 바탕으로 산출되었으며, 불확실성을 일관되게 제시하며, 입력자료에 대해 투명하게 공개함. 뿐만 아니라 시간 해상도인 6시간 해상도(예보 자료의 경우 3시간)보다 매우 높아진 1시간 간격의 해상도를 가지며, 공간해상도 (위도×경도) $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 로 4배 이상 높은 해상도를 가짐.
- 본 연구에서 사용한 Skin temperature는 ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present의 산출물 중 하나로써 시간해상도 월 평균, 공간해상도 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 를 사용하였으며 해당 자료는 북극의 기후 변화를 이해하는데 중요한 역할을 함. 해당 자료는 the International Arctic Buoy Programme (IABP), Multidisciplinary Drifting Observatory for the study of Arctic Climate (MOSAIC), Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) 등 국제 buoy 프로그램에서 운영되고 있는 자료들과 검증을 수행하였다. 상관계수 0.98로 높은 정확도를 나타냄 (Yu et al., 2021).

표 3-1-30. ERA5 skin temperature

Sensor/Platform	AVHRR
Spatial resolution	0.25 degree
Spatial coverage	N: 90, S: -90, E: 180, W: -180
Temporal resolution	Monthly
Temporal coverage	1982~2015

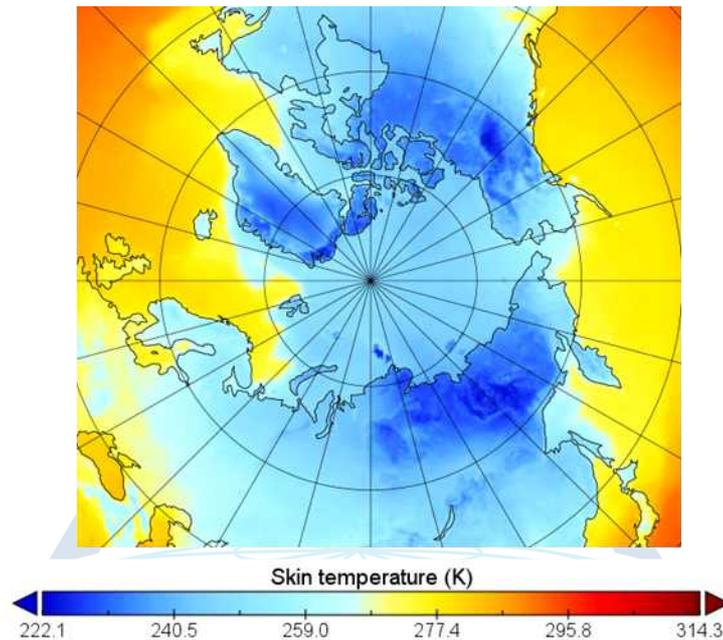


그림 3-1-150. ERA5 Skin temperature 예시

다. Sea Ice Concentration

- 해빙 농도(Sea Ice Concentration)는 단위가 없는 항이며, 얼음이 덮여있는 영역을 상대적 인 양으로 설명함. 보편적으로 위성기반 해빙농도는 해당 격자 안에 얼마나 해빙이 덮여 있는지를 표출하며 농도는 전형적으로 퍼센트(%) 단위로 표현함 (0~100%: 15% 이하의 해빙 농도의 경우 해양으로 구분).
- 본 연구에서는 Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 2 (NSIDC-0051) 자료를 활용함. 해당 자료는 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) onboard Nimbus-7, Special Sensor Microwave/Imagers (SSM/I) onboard the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)-F8, -F11, and -F13, and Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) on DMSP-F17 등 다양한 passive microwave 센서들을 활용하여 생성됨. 이 자료는 겨울철 5%, 여름철 melt pond 등에서 15% 정도의 불확실성을 가짐

(Cavalieri, et al., 1996). 해당 자료는 현재 많은 북극 연구에서 활용되고 있음 (Ivanova et al., 2014; Meier 2005).

표 3-1-31. 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

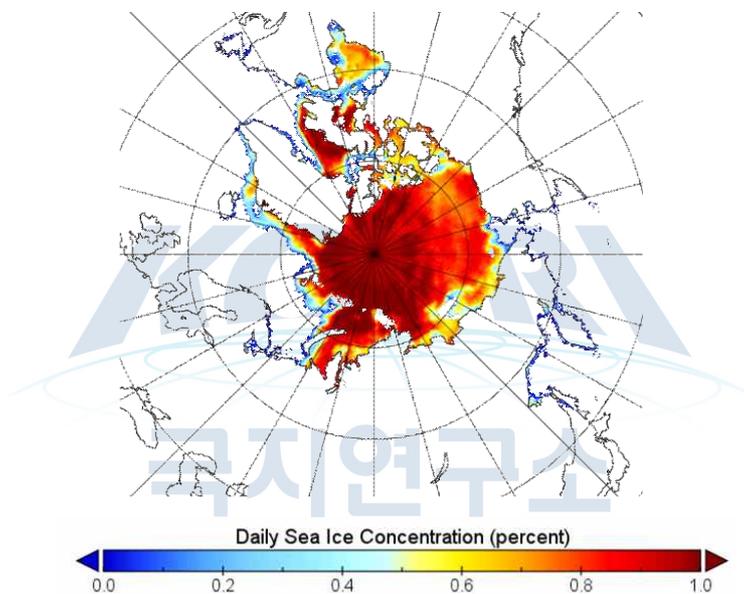


그림 3-1-151. NSIDC Sea Ice Concentration 예시

라. Radiative Kernel

- 복사 커널(Radiative Kernel)은 복사 관련 상태 변수의 작은 섭동이 지구의 에너지 균형에 어떻게 영향을 미치는지 설명함.
- 복사 커널은 general circulation models (GCMs)을 기반으로 생성함. 그러나 GCM들에 따라 복사 커널을 계산하는 데 사용되는 대기 상태 기후 데이터의 기간과 종류는 매우 다양함. 따라서 본 연구에서는 사용되는 GCM에 따른 불확실성을 제거하고자 총 5가지의 GCM 기반의 복사 커널을 수집함: 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 사용함.
- surface albedo 복사 커널은 표면의 albedo가 1% 변화할 때, radiative flux에 미치는 에너지양 (W/m^2)을 의미함. 다음 그림은 GCM에 따른 surface albedo 복사 커널들의 월평균 시계열 분포를 나타냄.

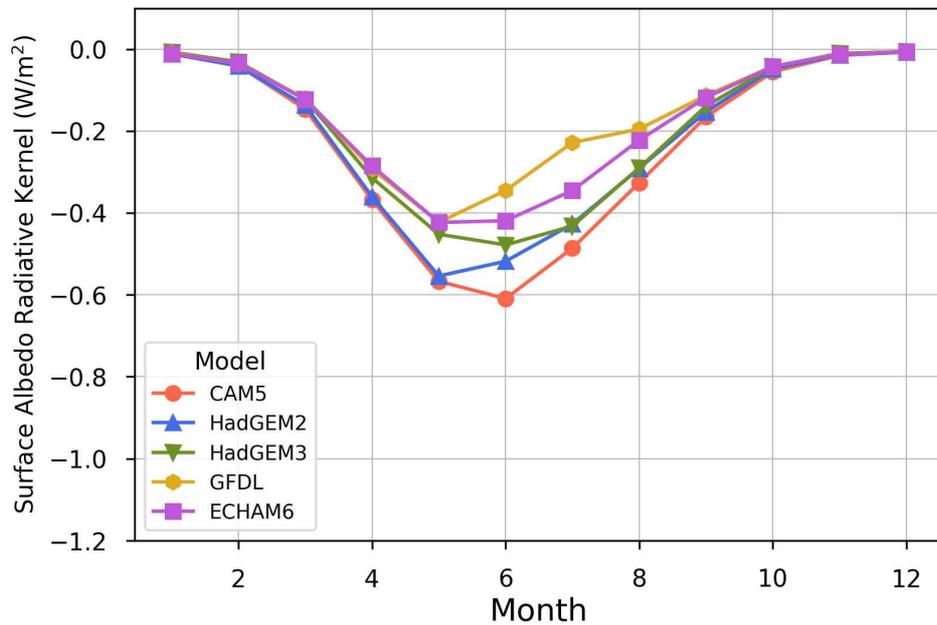


그림 3-1-152. GCM에 따른 surface albedo 복사 커널들의 월평균 시계열 분포

- 전체적으로 유사한 분포특성이 나타나지만, 5~6월에는 GCM에 따라 다른 특성이 나타남. CAM5 model은 여름철에 알베도의 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타나며, 반대로 GFDL는 상대적으로 albedo 영향이 다른 모델에 비해 낮게 나타남.
- 다음 그림은 surface albedo 복사커널의 차이가 가장 크게 발생하는 6월 기준 CAM5와 GFDL의 차이의 공간적 분포를 나타냄. 대부분의 지역에서 CAM5 surface albedo 복사커널이 낮은 값이 산출되며, Chukchi, Laptev, East Siberian seas 해역에서 약 $2 W/m^2$ 의 차이가 발생함.

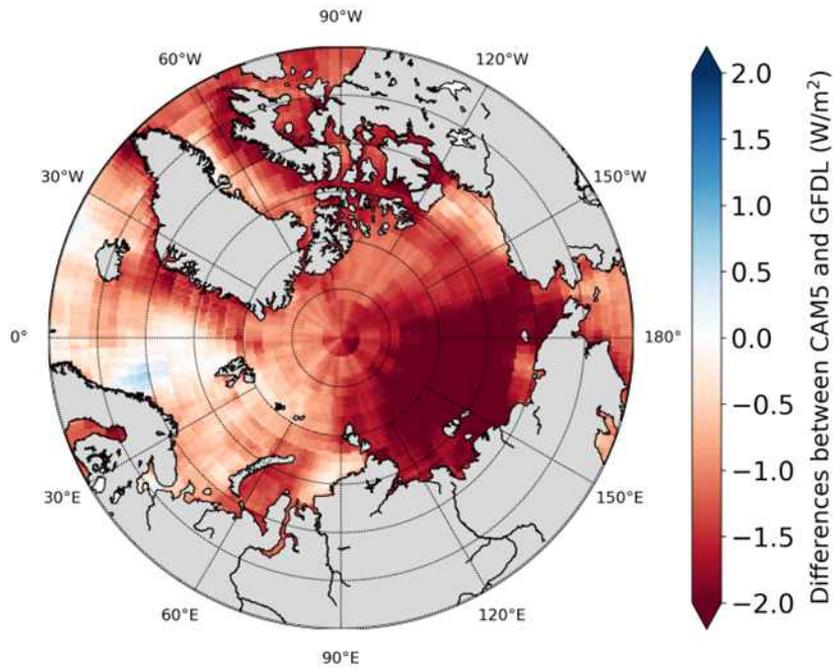


그림 3-1-153. 6월 기준 GCM(CAM5, GFDL)에 따른 surface albedo 복사커널 차이의 공간적 분포.

- surface temperature 복사 커널은 표면 온도가 1K 변화할 때, radiative flux에 미치는 에너지양 (W/m^2)을 의미함. surface temperature 커널은 surface albedo 커널에 비해 전체적으로 더 큰 영향력을 가지지만, 다음 그림과 같이 계절별 변동성은 작게 나타남. 그 중에서도 CAM5와 GFDL의 경우 계절에 따른 변동성이 더욱 작게 나타남. HadGEM2, HadGEM3, ECHAM6는 비슷한 양상을 띤.

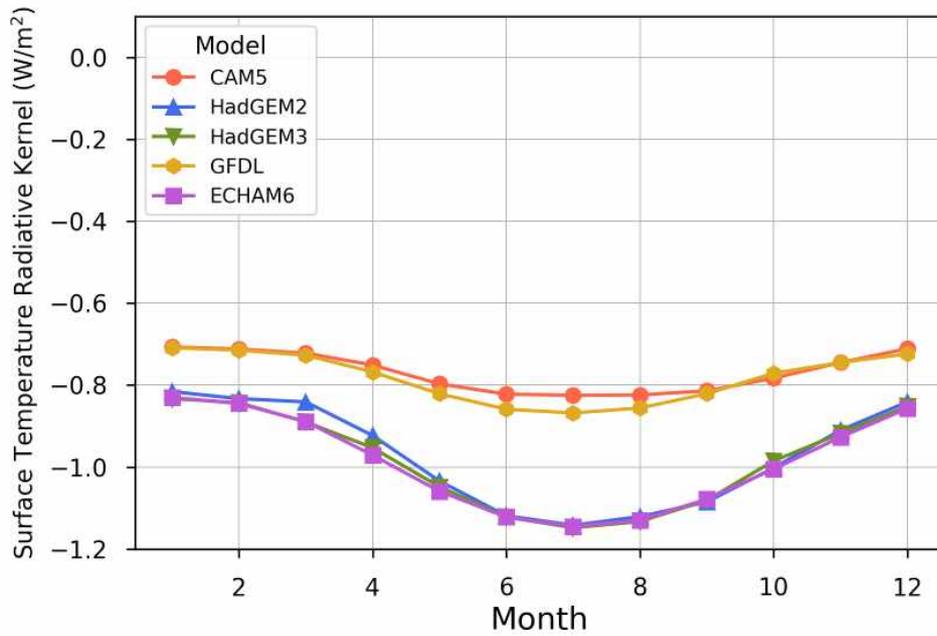


그림 3-1-154. GCM에 따른 surface temperature 복사 커널들의 월평균 시계열 분포

- 다음 그림은 차이가 가장 크게 발생하는 8월 기준 HadGEM3와 CAM5 surface temperature 복사 커널의 차이를 공간적 분포로 표현함. 북극 전역에 대하여 HadGEM3 surface temperature 복사 커널이 0.55 W/m^2 낮게 나타나며 지역적인 특색은 나타나지 않음.

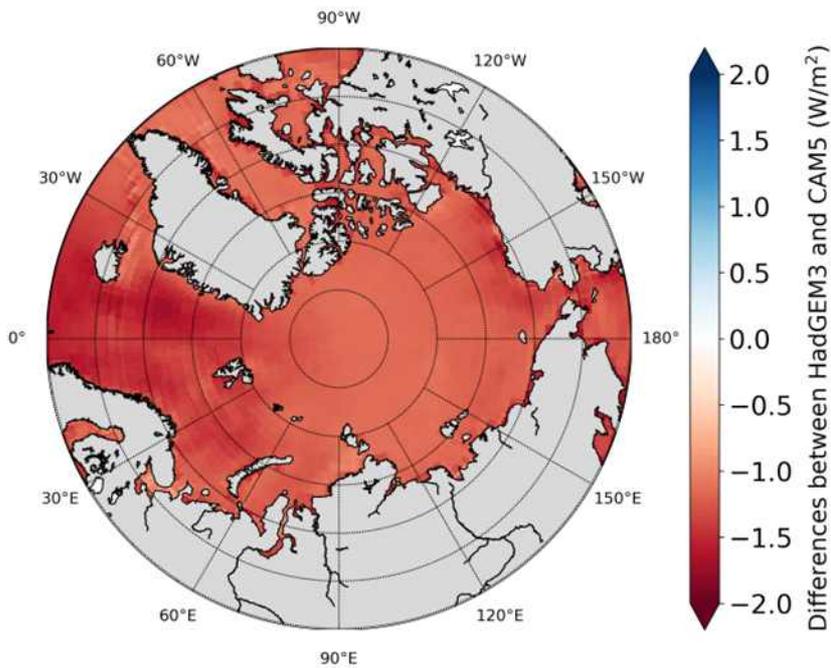
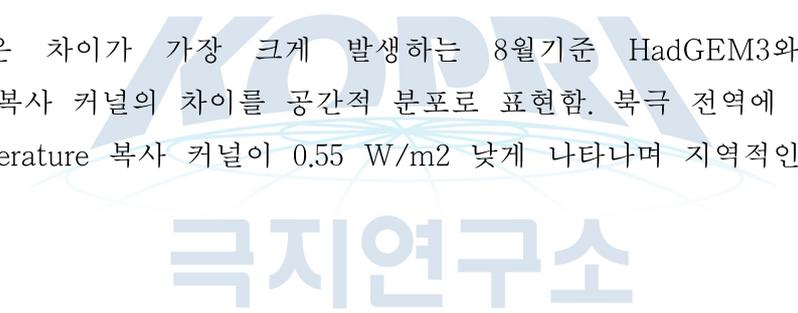


그림 3-1-155. 8월 기준 GCM(HadGEM3, CAM5)에 따른 surface albedo 복사커널 차이의 공간적 분포.

- 본 연구에 사용된 자료들의 요약은 다음의 표와 같음.

표 3-1-32. 본 연구에 활용된 데이터 특성

Variables	Datasets	Horizontal resolution	Temporal resolution	Time span
Surface Albedo	CLARA-A2	25 km	Monthly	1982-2015
Skin Temperature	ERA5	0.25°	Monthly	1982-2015
Sea Ice Concentration	NECI	0.25°	Daily	1982-2015
Radiative Kernels	CAM5 HadGEM2 HadGEM3 GFDL ECHAM6	1.25° 1.88° 1.88° 2.5° 1.88°	Monthly	-

○ 연구방법

가. 복사강제력 산출

- 위성 및 재분석자료를 활용하여 북극의 복사강제력을 산출하기 위하여 우선 북극 지역의 복사강제력 산출 기준을 제시함.
- 현재 진행되고 있는 선행 연구 및 선진기관에서 지표와 관련된 복사강제력 산출 조건을 조사하고 본 연구에 적합한 북극 지역의 복사강제력 산출 기준을 제시함. 이 때 3개 이상의 다음으로 복사강제력 산출을 위한 자료 수집 및 전처리 과정이 필요함.
- 북극의 기후변화를 관측 및 연구 하기 위해서는 장기간의 자료 확보가 필수적임. 해당 자료들은 대부분 1980년대 중반부터 존재함. 각각의 자료는 제공하는 기관, 사용되는 sensor에 따라 그 시·공간적 해상도가 상이하므로 동일한 좌표계와 해상도로 변환할 필요가 있음. 이를 위하여 전처리 과정을 수행하는데, 기하 보정을 통하여 극지방에 적합한 좌표계로 re-mapping 해주는 동시에 평균과 up/down scaling과 같은 방법을 이용하여 동일한 시·공간적 해상도로 일치시킴.
- 이렇게 확보된 자료를 바탕으로 shortwave, longwave 영역의 복사강제력을 산출함. 우선적으로 북극 에너지 순환에 중요 지점인 북극권 지역을 산출 수행하며, 전체적인 경향을 파악함.

나. 복사강제력 시공간 특성 분석

- 관측자료를 바탕으로 Radiative kernel 평가를 수행하고, 북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력의 시공간 특성을 분석함.
- 먼저 Radiative kernel을 이해, 추가적으로 확보하고 그 특성을 비교함. 기후모델은 모델마다 에러값을 포함하고 있기 때문에 각 모델이 내포하고 있는 불확실성에 대해 분석이 필요함. 이때 각 기후모델에 따른 시공간 차이를 비교하며 3가지 이상의 기후모델 자료를 수집이 필요함.
- 다음으로 관측자료와 Radiative kernel 기반 자료의 비교 및 평가를 수행함. 지표변화(Albedo, temperature)에 따른 커널 기반의 TOA Flux 변화를 산출하고, 관측 기반의 TOA Radiation과 패턴을 비교함. 이러한 비교를 통해 각 기후모델의 radiative kernel의 특성을 파악함.
- 시공간적으로 Albedo, Temperature 기반의 복사강제력은 다른 경향을 나타냄. 따라서 본 연구에서는 복사강제력을 산출하는데 두 가지 요인(Albedo, Temperature)을 통합하여 Net 복사강제력을 산출하고 평가를 진행함. 이 결과를 기존 연구(Albedo만 사용한 선행연구)와 비교하여 시공간 특성에 대해 제시함.
- 다음으로 계절에 따른 주도적 요인이 무엇인지 파악함. 북극의 경우 여름철에는 백야, 겨울에는 극야가 진행되어 계절에 따른 특징이 다른 지역에 비하여 매우 뚜렷함. 이 때 월별 해빙 변화량에 따른 복사강제력 특성을 분석하고 계절에 따른 주도적 요소를 파악함.
- 다음으로 지역에 따른 복사강제력 특성 파악도 필요함. 선행 연구에 의하면 현재 북극은 지역에 따라 온도 변화의 경향이 다르게 나타나고 있음. 특히 북극의 Warming에 대해 많은 영향을 끼치는 해역에 대한 분석이 필요함.

다. 인공지능 기반 해빙 표면온도 복사강제력 산출 및 평가

- DNN 기반 해빙표면온도(Ice Surface Temperature) 산출하고 이를 바탕으로 표면온도 복사강제력 재산출 및 기존 자료와 비교 평가함.
- 위성 및 재분석기반의 해빙표면온도는 다른 경향을 나타냄. 위성기반의 IST는 MODIS에서 제공하고 있으나, 결측치가 다수 존재하며, 재분석자료의 경우 결측치 없이 전 영역에서 산출되고 있으나 위성기반의 IST와는 다른 경향이 나타남. 따라서 계절에 관계없이 결측치가 없는 위성기반의 해빙표면온도 산출이 필수적임.
- 현재 위성기반의 해빙표면온도는 대부분 Brightness Temperature 기반으로 산출하게 되는데 이는 위성의 궤도 및 구름의 영향으로 결측치를 발생시킴. 따라서 본 연구에서는 먼저 IST와 밀접한 관계가 있는 기후자료를 바탕으로 IST를 산출함.
- 입력자료 선정을 위하여 선행연구를 바탕으로 입력변수를 수집하고, 변수마다 상관관계

분석을 통하여 최적의 변수를 선정함. 본 연구에서는 최근 위성 관련 연구에 많이 활용되고 있는 Deep Neural Network (DNN)기반의 IST 산출 모델을 구축함. 산출된 IST는 타 위성 (MODIS IST) 자료 및 CREEL-Mass Balance Buoy 자료의 표면온도 자료와 검증을 수행함.

- 최종 산출된 IST를 바탕으로 Temperature-SIRF를 산출하고 ERA5 skin temperature를 이용한 Temperature-SIRF와 비교 분석하여 최종적으로 Albedo-SIRF와 결합하여 북극 해빙 변화에 따른 복사강제력을 산출함.

○ 북극지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석

- 복사 커널을 이용한 연구는 기후 요소 변화에 의한 복사강제력을 산출하는 연구에 널리 이용되고 있음. 본 연구에서는 북극의 해빙 변화에 따른 복사강제력을 산출하기 위하여 복사 커널을 이용하는 방법을 적용함.
- 본 연구에서 사용하는 해빙 복사강제력(Sea Ice Radiative Forcing, SIRF)는 해빙 변화가 대기 상단의 복사 수지에 즉각적으로 미치는 영향(W/m^2)을 의미함. 본 연구에서는 두가지 타입의 복사강제력(albedo-SIRF, temperature-SIRF)을 계산함. grid cell r 로 구성된 영역 A 내 전체 연구영역 R 에 대해 시간(t)에 종속되는 SIRF는 다음과 같이 표현됨.

$$SIRF(t,R) = \frac{1}{A(R)} \int_R S_x(t,r) \frac{\partial \alpha}{\partial S_x} \frac{\partial F}{\partial \alpha} dA(r)$$

- 여기서 $S(t,r)$ 은 북반구에서의 해빙 농도를 의미하며, $\frac{\partial \alpha}{\partial S_x}(t,r)$ 는 해빙변화에 따른 α (surface albedo 또는 skin temperature)의 변화율을 나타냄. $\frac{\partial F}{\partial \alpha}(t,r)$ 는 surface albedo 변화에 따른 TOA 단파 복사량 또는 skin temperature 변화에 따른 longwave 복사량임.
- Flannet et al.(2011)에 의하면, $\frac{\partial \alpha}{\partial S_x}$ 와 $\frac{\partial F}{\partial \alpha}$ 의 시공간적 변화가 각각 해빙 농도 S 와 α 에 일치한다고 가정함. $\frac{\partial \alpha}{\partial S_x}$ 는 해빙 변화에 따른 surface albedo(또는 skin temperature) 변화이며, 이는 간단하게 해빙 유무에 따른 surface albedo(또는 skin temperature)의 차이로 설명됨. 해빙이 존재하지 않는 개빙환경에 대해서, surface albedo의 경우 이전 연구(Cao et al., 2015)를 참조하였으며, skin temperature는 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) 자료를 활용함. OISST 자료는 해빙이 존재하는 지역에 대해서도 해빙 농도와 sea surface temperature의 선형 관계식을 통하여 sea surface temperature를

제공함(Reynolds et al., 2007). $\frac{\partial F}{\partial \alpha}$ 는 surface albedo(또는 skin temperature) 복사 커널의 값을 적용함.

- surface albedo 복사 커널의 값이 +일 경우 에너지 flux의 방향은 위를 향하며, skin temperature 복사 커널은 그와 반대를 의미함(Soden et al., 2008). 따라서 본 연구에서는 albedo와 temperature를 결합하여 그 영향력을 평가하고자 temperature kernel에 -을 곱하여 SIRF를 계산함. 변화량을 표현하기 위하여 본 연구에서는 기율기에 시간 간격을 곱하여 계산함. 모든 상황에서 p-value는 0.05 이하로 산출됨.
- 추가로 지역에 따른 SIRF의 특징을 분석하기 위하여 본 연구에서는 다음 그림과 같이 National Centers for Environmental Information (NCEI)에서 제공하는 북극 지도를 바탕으로 지역에 따른 SIRF를 각각 계산함.

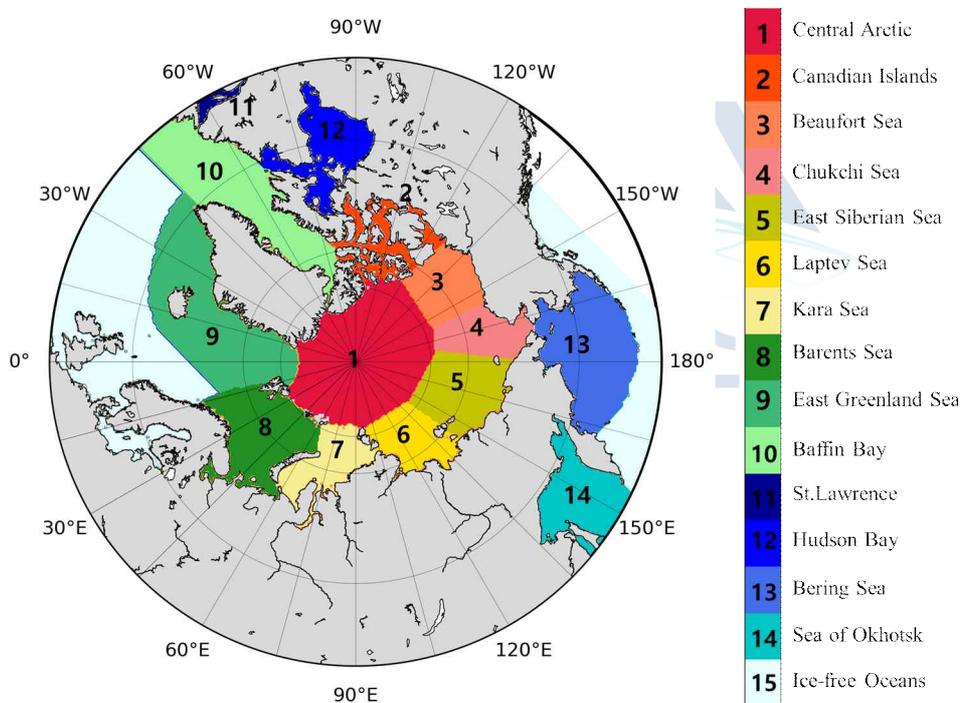


그림 3-1-156. 북극 영역의 지역명 지도

가. SIRFs의 연간 특성

- 본 연구에서는 복사 커널을 이용하여 albedo-SIRF, temperature-SIRF를 산출하였으며, 이 두 SIRF의 합을 net-SIRF로 표현함. 다음 그림은 1982년부터 2015년까지 기후 모델에 따른 연평균 SIRF를 나타냄.

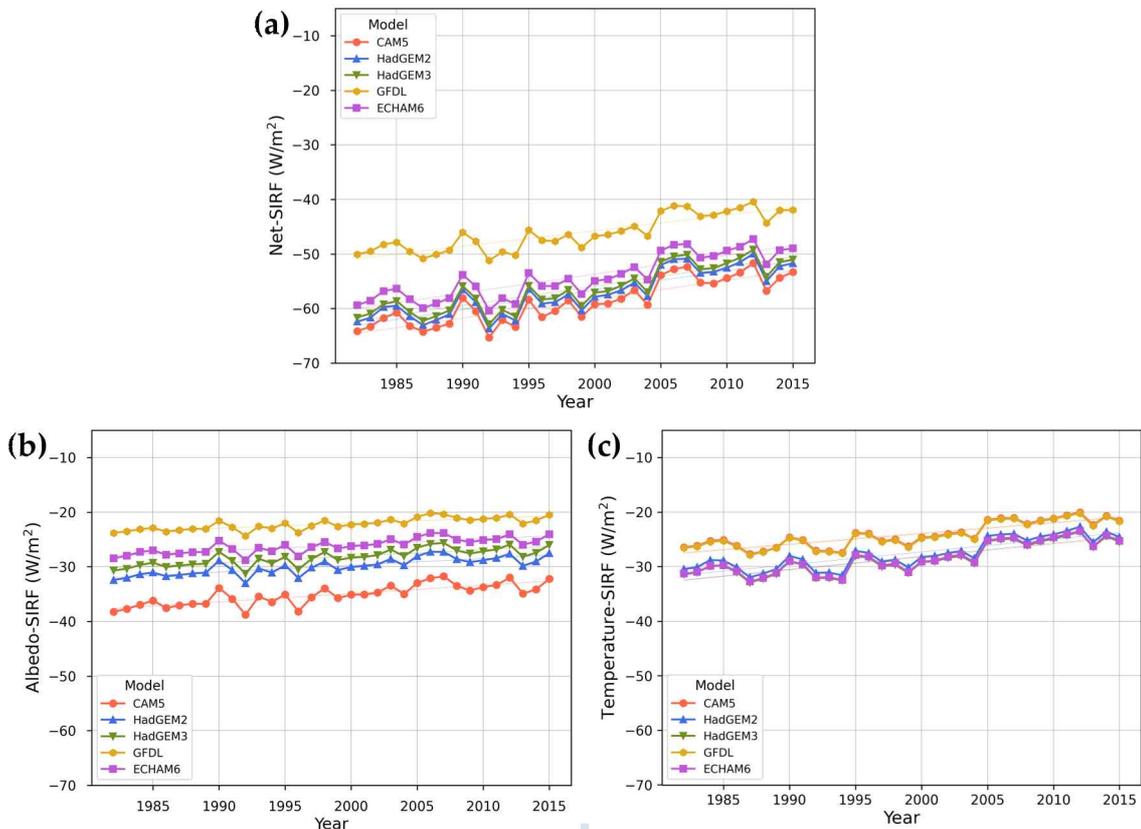


그림 3-1-157. 북극에서의 1982년부터 2015년까지 기후 모델에 따른 연평균 SIRF 들의 시계열 분포, (a) net-SIRF, (b) albedo-SIRF, (c) temperature-SIRF.

- 기후모델에 관계없이 net-SIRF는 증가하는 경향이 나타남. 사용하는 GCM에 따라 값의 차이는 발생하나 전체적인 경향을 모두 동일하게 산출됨.
- net-SIRF는 GFDL, ECHAM6, HadGEM3, HadGEM2, CAM5 순으로 높은 값이 나타남. 모든 기후모델의 복사커널의 평균값을 사용하였을 때, 평균 net-SIRF는 $-54.57 \pm 3.84 \text{ W/m}^2$ 로 계산됨. 평균 net-SIRF는 기후 모델에 따라 최대 12.64 W/m^2 차이가 발생함.
- 다른 기후 모델 기반의 SIRF들과 달리 GFDL의 net-SIRF는 상대적으로 큰 차이가 나타남. albedo-SIRF와 temperature-SIRF 역시 사용하는 기후모델에 관계없이 모두 증가 경향이 나타남. 두 SIRF들은 약 $-30 \sim -20 \text{ W/m}^2$ 로 산출됨.
- 평균 albedo-SIRF는 기후모델에 따라 최대 12.94 W/m^2 의 차이가 나타났으며, CAM5 기반의 albedo-SIRF가 $-35.14 \pm 1.88 \text{ W/m}^2$ 로 가장 낮은 값이 산출되었고, GFDL 기반의 albedo-SIRF는 $-22.17 \pm 1.09 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높은 값이 산출됨.
- 평균 temperature-SIRF는 기후모델에 따라 최대 4.41 W/m^2 차이 발생했으며 HadGEM3 기반의 temperature-SIRF가 $-28.60 \pm 2.75 \text{ W/m}^2$ 으로 가장 낮은 값, CAM5 기반의 temperature-SIRF가 $-24.19 \pm 2.29 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높은 값이 계산됨. temperature-SIRF

는 연간 $0.22 \pm 0.14 \text{ W/m}^2$ 씩 변화하고 있는데 이는 albedo-SIRF의 연간 변화량($0.12 \pm 0.12 \text{ W/m}^2$)에 거의 2배에 해당되는 수치임.

- 사용하는 GCM에 관계없이 SIRF들은 전반적으로 변화 경향이 모두 유사하게 나타났기 때문에 본 연구에서는 지역에 따른 SIRF들의 변화를 분석하기 위하여 각 요소별로 GCM 기반의 복사커널을 평균하여 SIRF를 산출 및 평가함.
- 다음 그림은 각 요소에 따른 SIRF의 연간 변화량의 공간적 분포를 나타냄. 해역에 따른 변화 경향은 모든 SIRF에서 유사하게 나타남. 이전 그림에서 나타난 것과 마찬가지로 temperature-SIRF가 albedo-SIRF에 비해 상대적으로 급격한 변화 경향이 나타남.

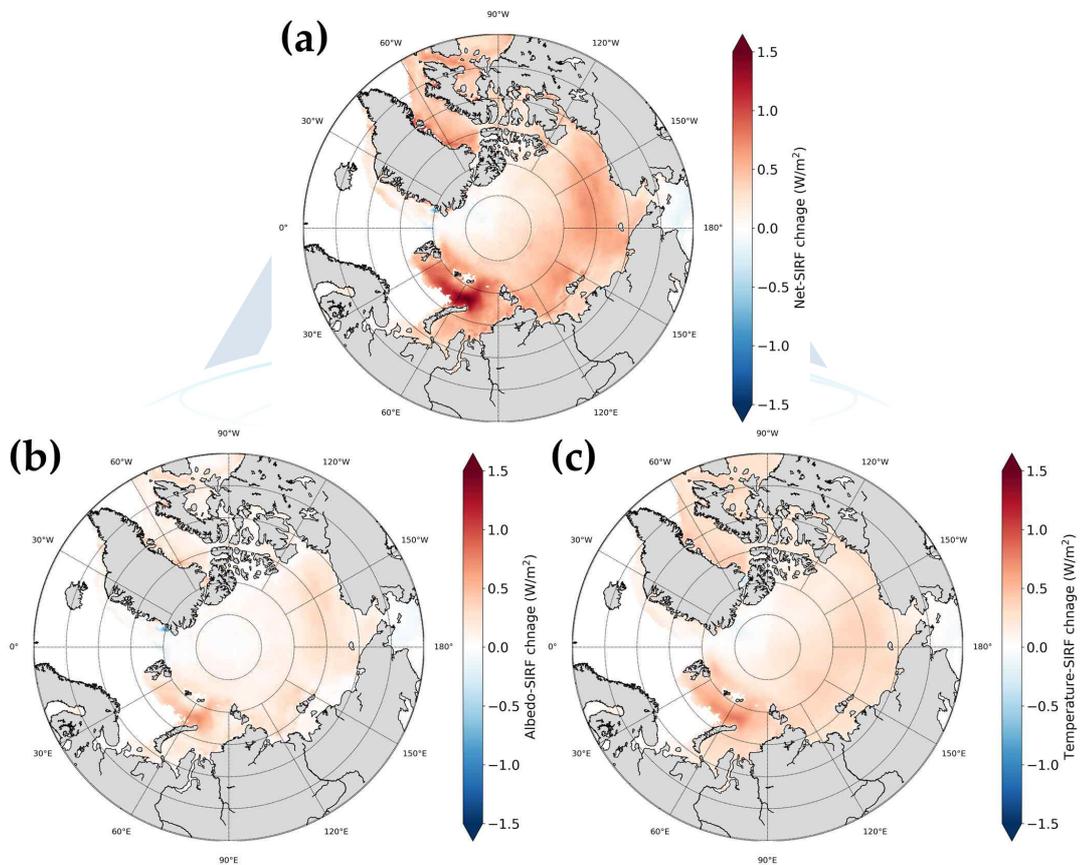


그림 3-1-158. 기후 모델들의 평균값을 이용한 연간 SIRF 변화량의 공간적 분포, (a) net-SIRF, (b) albedo-SIRF, (c) temperature-SIRF.

- 다음 표는 해역별 SIRFs의 연간 변화량을 나타냄.

표 3-1-33. 지역에 따른 SIRF 들의 연간 변화량 (W/m²)

	Net	Albedo	Temperature
Arctic Ocean(All)	0.34 ± 0.24	0.12 ± 0.12	0.22 ± 0.14
Baffin	0.41 ± 0.17	0.14 ± 0.10	0.27 ± 0.12
Barents	0.58 ± 0.36	0.24 ± 0.17	0.35 ± 0.21
Kara	0.62 ± 0.25	0.24 ± 0.14	0.38 ± 0.11
Laptev	0.50 ± 0.10	0.18 ± 0.08	0.31 ± 0.04
Beaufort	0.42 ± 0.12	0.19 ± 0.09	0.24 ± 0.05
Chukchi	0.49 ± 0.14	0.21 ± 0.07	0.28 ± 0.07

- Kara 해역에서 net-SIRF $0.62 \pm 0.25 \text{ W/m}^2$, albedo-SIRF $0.24 \pm 0.14 \text{ W/m}^2$, temperature-SIRF $0.38 \pm 0.11 \text{ W/m}^2$ 로 계산됨. 이 지역은 모든 해역 중에서 가장 급격한 증가 경향의 net-SIRF 변화가 발생하는 곳임. Temperature-SIRF 또한 이 해역에서 가장 높은 영향력을 끼치고 있음. 선행 연구(Kumar et al., 2020; Parkinson et al., 2008; Smedsrud et al., 2013; Boisvert et al., 2016)에서도 북극의 다른 지역에 비해 Barents와 Kara 해역에서 급격한 변화가 발생한다고 보고함. Kumar et al.(2020)의 연구에서는 이 지역에서 급격한 변화가 발생하는 것에 대해 해양에서 대기로 향상된 열 전달로 인해 발생하는 outgoing longwave radiation (OLR)의 증가 때문이라고 설명함.
- Baffin, Chukchi, Beaufort, Laptev 해역에서도 북극 평균 net-SIRF의 변화량 보다 급격하게 변화가 발생함. 이러한 결과는 albedo-SIRF 기반의 선행 연구에서도 동일하게 나타남.
- 북극 지역의 대부분에서 SIRF 값들은 모두 증가 경향이 나타나는 반면에, Baring 해역과 East Greenland 해역의 일부 지역에서는 감소 경향이 나타남. 이것은 해빙이 존재하는 Baring 및 East Greenladn 지역의 surface albedo 및 skin temperature의 값이 해빙이 존재하지 않는 개빙 환경의 값과 크게 차이가 나지 않기 때문임.
- 본 연구에서는 해빙 농도의 값이 존재하는 모든 지역에 대하여 SIRF를 계산함. 하지만 NSIDC에서는 해빙 농도가 15% 이상인 지역에 대해서만 해빙 지역 지역이라 표현함. 이 지역은 다른지역에 비해 1년 내내 해빙이 존재하는 다년빙이 아닌, 계절에 따라 생성과 소멸이 반복되는 계절성 해빙이 주로 구성되어 있는 지역임. 계절성 해빙은 다년빙에 비해 surface albedo의 값이 일관적으로 낮음. 또한 계절성 해빙과 다년빙은 skin temperature와 아주 밀접한 관계가 있는 방출율, microwave backscattering에서도 큰 차이가 나타남. 이러한 특징 때문에 북극의 다른 지역과 달리 Baring 해역과 East Greenland 해역에서는 다른 변화 경향이 산출됨.

나. SIRFs의 계절에 따른 특성

- 북극의 경우 극야 현상으로 인하여 선행 연구들에서는 3월부터 9월까지만 surface albedo 기반의 복사강제력을 산출하였으며, 다른 월의 경우 surface albedo radiative kernel은 모두 0이 계산됨. 하지만 일부 연구들에서는 북극 증폭이 알베도가 관측되지 않는 겨울철에 더욱 증폭된다는 결과를 제시함. 따라서 본 연구에서는 계절에 따른 SIRF 경향을 분석하고, 이를 위하여 계절별 SIRF 산출에 사용되는 모든 변수는 계절 평균값을 적용함.
- 연구기간 동안 각 기후 모델에 따른 계절별 평균 SIRF는 다음 그림과 같음.

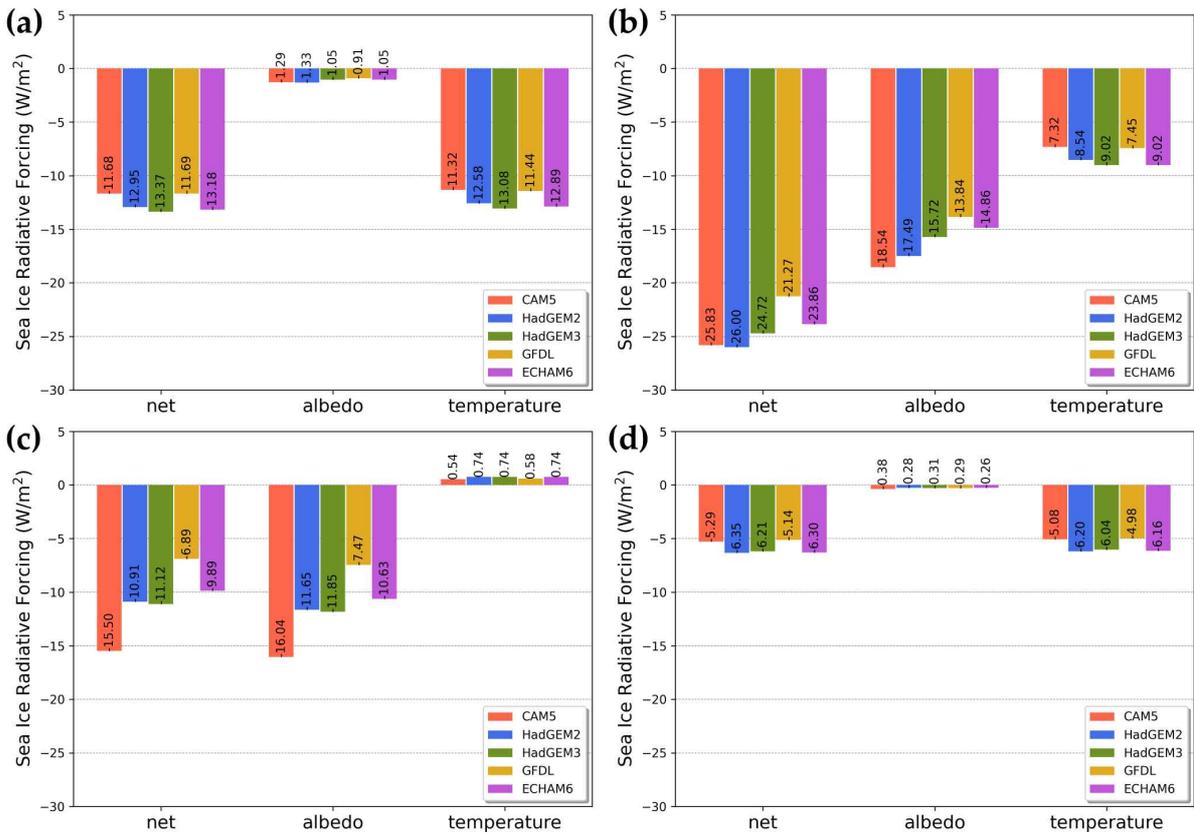


그림 3-1-159. 기후모델에 따른 평균 계절별 SIRF. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON

- December-January-February (DJF) 기간에는 평균 net-SIRF가 $-12.57 W/m^2$ 이 계산되었으며 각 기후모델에 따라 $0.83 W/m^2$ 정도 차이가 발생함. 이러한 차이가 발생하는 것은 모두 temperature-SIRF의 영향 때문임. 이 시기에는 대부분의 북극 영역에서 surface albedo가 관측되지 않기 때문에 albedo-SIRF의 영향력은 거의 존재하지 않음. HadGEM3 기반의 net-SIRF가 가장 큰 영향력을 가지고 있으며 그 값은 평균 $-13.37 \pm 10.65 W/m^2$ 이며, CAM5 기반의 net-SIRF가 가장 작은 영향을 끼쳤으며 그 값은 평균 $-11.68 \pm 9.26 W/m^2$ 으로 산출됨.
- March-April-May (MAM) 기간에는 평균 net-SIRF가 $-24.34 W/m^2$ 로 계산되었으며, 기

후모델에 따라 평균 1.92 W/m^2 차이가 발생함. 전체 계절중에 MAM 기간은 가장 낮은 평균 net-SIRF가 산출됨. 이 시기는 albedo가 관측되기 시작하는 시기임. 전체 기후모델에 대해, 평균 albedo-SIRF ($-16.09 \pm 1.92 \text{ W/m}^2$)가 temperature-SIRF ($-8.27 \pm 0.83 \text{ W/m}^2$)보다 낮게 계산됨. CAM5 기반의 net-SIRF ($-25.83 \pm 19.64 \text{ W/m}^2$)와 HadGEM2 기반의 net-SIRF ($-26.00 \pm 19.64 \text{ W/m}^2$)가 유사하게 산출되었으며, GFDL 기반의 net-SIRF ($-21.27 \pm 16.48 \text{ W/m}^2$)가 가장 높은 값이 나타남. CAM5의 경우, albedo-SIRF는 $-18.54 \pm 14.28 \text{ W/m}^2$ 로 전체 기후모델 중 가장 낮은 값이 계산되었으나, temperature-SIRF는 $-7.32 \pm 5.80 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높은 값이 나타남.

- June-July-August (JJA) 기간에는 평균 net-SIRF가 -10.86 W/m^2 로 계산되었으며, 기후 모델에 따라 평균 3.09 W/m^2 차이가 발생함. 이 시기에는 기후 모델에 따라 net-SIRF의 차이가 가장 크게 발생하는 계절임. 이는 albedo-SIRF (평균 $-11.53 \pm 3.07 \text{ W/m}^2$)에 의한 영향임. CAM5 기반의 albedo-SIRF가 $-16.04 \pm 15.62 \text{ W/m}^2$ 로 가장 낮은 값이 나타났으며, GFDL 기반 albedo-SIRF가 $-7.47 \pm 7.41 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높은 값이 산출됨. 두 SIRF들의 차이는 8.57 W/m^2 로써 본 연구에서 계산된 기후모델의 차이 중 가장 큰 값임. temperature-SIRF는 평균 $0.67 \pm 0.10 \text{ W/m}^2$ 로 albedo-SIRF에 비해 매우 작은 영향력이 나타남. 모든 temperature-SIRF는 본 연구에서 사용한 자료의 특성으로 인하여 이 시기에 양의 값이 산출됨. 이 시기에 해빙은 급격하게 녹음. 본 연구에서 활용한 ERA5 skin temperature는 얼음이 녹는 시기에 해빙위에 존재하는 물을 표현하기 위하여 그 값을 0도에 가깝게 계산함. 이것은 해빙이 존재함에도 불구하고, 해빙이 존재하지 않는 개빙 환경에서의 skin temperature가 더 낮게 산출되는 현상을 야기함. 따라서 이 시기에 모든 temperature-SIRF는 양의 값이 나타남.
- September-October-November (SON) 기간에는 평균 net-SIRF가 -5.86 W/m^2 로 계산되었으며, 기후모델에 따라 평균 0.59 W/m^2 차이가 발생함. 이 시기는 net-SIRF가 가장 높게 산출되는 계절임. SON 기간에는 surface albedo가 관측되지 않기 때문에 평균 albedo-SIRF가 평균 $-0.30 \pm 0.05 \text{ W/m}^2$ 으로 그 영향력이 매우 낮음. GFDL 기반의 net-SIRF가 $-5.14 \pm 4.72 \text{ W/m}^2$ 으로 가장 높은 값, HadGEM2 기반 net-SIRF가 $-6.35 \pm 5.79 \text{ W/m}^2$ 으로 가장 낮은 값이 산출됨. 다른 계절과 비교하여 SON 기간은 기후모델에 따른 SIRF들의 차이가 가장 작게 발생한 기간임.
- SIRF는 계절에 따른 차이에 비해 기후모델에 따른 차이는 상대적으로 작게 발생함. 각 SIRF들의 계절에 따른 패턴은 모든 기후모델에서 동일하게 나타남. 따라서 본 연구에서는 각 요인별 SIRF를 산출할 때 기후모델의 커널을 평균하여 계절별 SIRF를 계산하였으며 공간적 분포는 다음 그림과 같음.

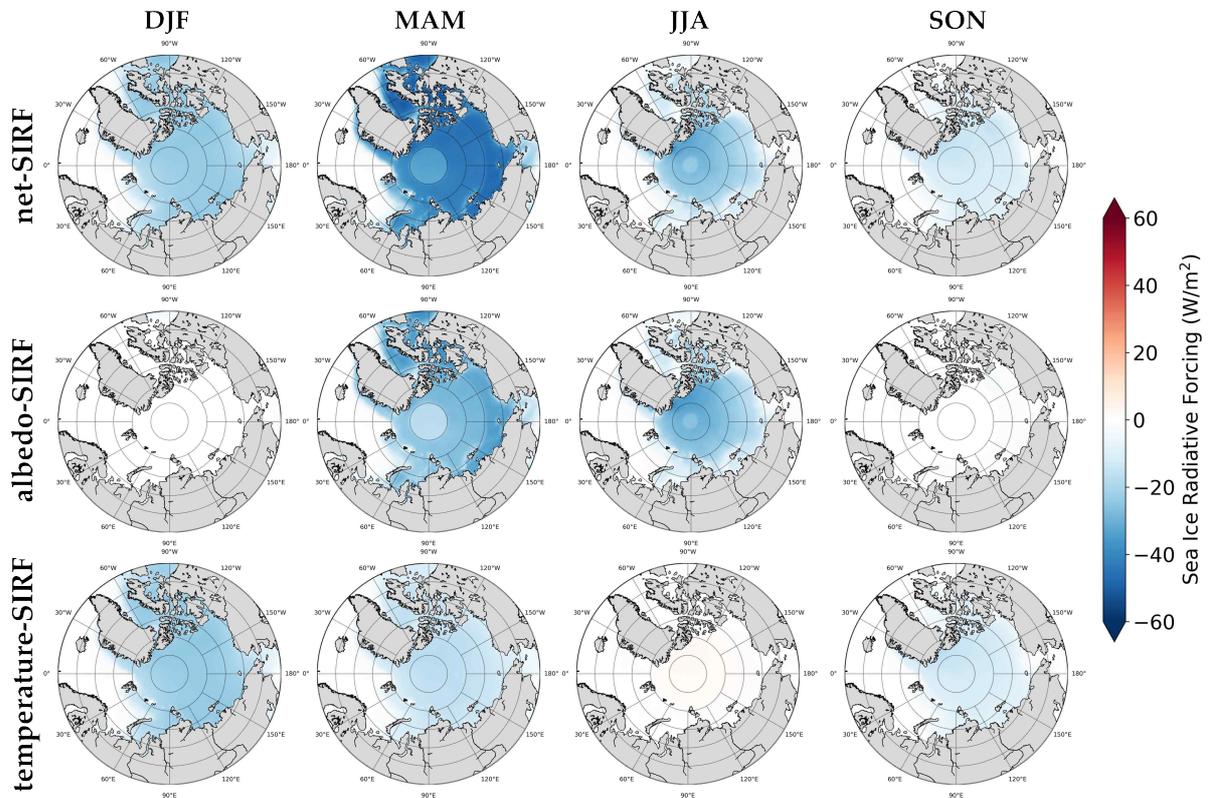


그림 3-1-160. 각 기후모델의 평균 커널값을 활용한 계절별 평균 SIRFs 공간적 분포, 가로축 : 계절, 세로축 : 각 요소별 SIRF

- MAM 및 JJA 기간에는 net-SIRF와 albedo-SIRF에서 북극 중양 해역에 원형 패턴으로 다른 지역과 구분되는 현상이 발생함. 이는 이 시기에 일부 기간동안 albedo-SIRF가 관측되지 않기 때문임. 그리고 albedo-SIRF는 DJF와 SON 기간 동안 surface-albedo가 전혀 관측되지 않기 때문에 albedo-SIRF를 0으로 계산함. 그림의 (c)와 같이 temperature-SIRF는 JJA 기간동안 모든 지역에서 양의 값이 산출됨. 이는 앞서 설명한 것과 마찬가지로 ERA5 skin temperature의 특성 때문임. 이러한 현상을 제외하고 전체 연구 기간동안 계절에 따른 SIRF는 지역적 특징이 나타나지 않음.
- 다음 표는 앞서 분석한 해역과 동일한 지역을 대상으로 해역별 계절에 따른 SIRF 변화량을 나타낸 것임.

표 3-1-34. 지역별 계절 SIRF의 변화량

Period		Arctic Ocean (All)	Baffin	Barents	Kara	Laptev	Beaufort	Chukchi
DJF *	Net	0.34 ± 0.28	0.62 ± 0.28	0.78 ± 0.42	0.60 ± 0.29	0.28 ± 0.06	0.24 ± 0.07	0.27 ± 0.06
	Albedo	-	-	-	-	-	-	-
	Temperature	0.34 ± 0.28	0.62 ± 0.28	0.78 ± 0.42	0.60 ± 0.29	0.28 ± 0.06	0.24 ± 0.07	0.27 ± 0.06
MAM *	Net	0.41 ± 0.39	0.61 ± 0.37	0.96 ± 0.66	0.78 ± 0.36	0.61 ± 0.15	0.33 ± 0.13	0.48 ± 0.12
	Albedo	0.16 ± 0.26	0.32 ± 0.29	0.59 ± 0.41	0.34 ± 0.26	0.20 ± 0.17	0.11 ± 0.12	0.17 ± 0.13
	Temperature	0.25 ± 0.19	0.30 ± 0.14	0.38 ± 0.27	0.45 ± 0.06	0.41 ± 0.04	0.23 ± 0.06	0.30 ± 0.06
JJA *	Net	0.35 ± 0.28	0.41 ± 0.27	0.48 ± 0.36	0.63 ± 0.34	0.51 ± 0.23	0.51 ± 0.22	0.56 ± 0.20
	Albedo	0.35 ± 0.31	0.41 ± 0.28	0.49 ± 0.39	0.63 ± 0.40	0.51 ± 0.26	0.55 ± 0.24	0.60 ± 0.23
	Temperature	0.00 ± 0.05	0.00 ± 0.02	0.00 ± 0.04	-0.01 ± 0.07	0.00 ± 0.04	-0.04 ± 0.03	-0.04 ± 0.03
SON *	Net	0.41 ± 0.22	0.32 ± 0.11	0.38 ± 0.24	0.51 ± 0.21	0.56 ± 0.1	0.51 ± 0.16	0.73 ± 0.22
	Albedo	-	-	-	-	-	-	-
	Temperature	0.41 ± 0.22	0.32 ± 0.11	0.38 ± 0.24	0.51 ± 0.21	0.56 ± 0.1	0.51 ± 0.16	0.73 ± 0.22

* DJF: December–January–February; MAM: March–April–May; JJA: June–July–August; SON: September–October–November.

- 선정된 해역들의 연간 SIRF 변화량은 북극 전체 평균보다 높게 나타남. 계절 평균 SIRF에서는 지역적 특징이 거의 나타나지 않았으나, SIRF의 계절에 따른 변화량은 지역에 따라 다른 양상을 띠. 먼저 본 연구에서는 DJF 기간과 SON 기간에 albedo-SIRF에 대하여 계절에 따른 변화량을 산출하지 않았음. 이는 이 시기에 대부분의 해역에서 albedo-SIRF가 산출되지 않기 때문임. 그러므로 해당 시기에 net-SIRF와 albedo-SIRF는 동일한 값을 가짐. DJF 기간동안 net-SIRF는 $0.34 \pm 0.28 \text{ W/m}^2$ 의 변화량이 산출됨. Barents 해역에서 temperature-SIRF가 $0.78 \pm 0.42 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높은 값이 나타났으며 Beaufort 지역이 $0.24 \pm 0.07 \text{ W/m}^2$ 으로 북극 전역에서 가장 낮은 변화량이 계산됨.
- MAM 기간에는 net-SIRF가 $0.41 \pm 0.39 \text{ W/m}^2$, albedo-SIRF $0.16 \pm 0.26 \text{ W/m}^2$, temperature-SIRF가 $0.25 \pm 0.19 \text{ W/m}^2$ 으로 계산됨. 전체 net-SIRF 변화량 계산에 있어서 temperature-SIRF는 albedo-SIRF보다 높은 기여를 함. 하지만 이러한 경향은 지역에 따라 다르게 나타남. albedo-SIRF는 Baffin 지역(net-SIRF $0.61 \pm 0.37 \text{ W/m}^2$, albedo-SIRF $0.32 \pm 0.29 \text{ W/m}^2$, temperature-SIRF $0.30 \pm 0.14 \text{ W/m}^2$)과 Barents 지역(net-SIRF $0.96 \pm 0.66 \text{ W/m}^2$, albedo-SIRF $0.59 \pm 0.41 \text{ W/m}^2$, temperature-SIRF $0.38 \pm 0.27 \text{ W/m}^2$)에서 다른해역에 비해 급격하게 변화하고 있음. Barents 지역의 net-SIRF 변화량은 모든 연구기간 및 지역을 통틀어 가장 급격하게 변화하는 지역임. 반대로 Beaufort 지역은 net-SIRF $0.33 \pm 0.13 \text{ W/m}^2$ 으로 가장 낮은 값이 산출되었으며, 이 시기에 albedo-SIRF 변화량도($0.11 \pm 0.12 \text{ W/m}^2$) 가장 작았음. 전체적으로 지역에 따른 평균 albedo-SIRF (0.16 W/m^2)의 차이는 temperature-SIRF (0.08 W/m^2)의 차이보다 크게 나타남.
- JJA 기간에는 net-SIRF $0.35 \pm 0.28 \text{ W/m}^2$, albedo-SIRF $0.35 \pm 0.31 \text{ W/m}^2$, temperature-SIRF $0.00 \pm 0.05 \text{ W/m}^2$ 로 변화량이 산출됨. ERA5 skin temperature의 특징 때문에 temperature-SIRF는 변화량이 거의 나타나지 않음. 다른 계절과는 달리 이 시기에

는 선정된 개별 지역들이 북극 전체 평균에 비해 net-SIRF의 변화량이 크게 나타남. Kara 지역에서 net-SIRF의 변화량이 $0.63 \pm 0.34 \text{ W/m}^2$ 로 가장 크게 나타났으며, Baffin 지역에는 상대적으로 $0.41 \pm 0.27 \text{ W/m}^2$ 로 적은 변화량이 관찰됨.

- SON 기간에는 net-SIRF가 북극 평균 $0.41 \pm 0.22 \text{ W/m}^2$ 로 계산됨. 연간 net-SIRF의 가장 큰 변화는 Barents 지역에서 나타났으며, 다른 계절에는 이 지역이 북극의 다른 지역보다 항상 더 큰 net-SIRF 변화를 보임. 그러나 SON 기간에는 net-SIRF의 변화량이 $0.38 \pm 0.24 \text{ W/m}^2$ 로 북극 평균에 비해 낮은 변화량이 나타남. 이는 전체 연구 기간 중 2번째로 낮은 변화량임. 가장 높은 변화량은 Chukchi 해역으로 net-SIRF의 변화량이 $0.73 \pm 0.22 \text{ W/m}^2$ 으로 계산됨.

다. SIRFs의 월별 특성

- 본 연구에서는 다음 그림과 같이 전체 연구기간에 대해 5개의 복사 커널의 평균값을 이용하여 월별 net-SIRF를 산출함.

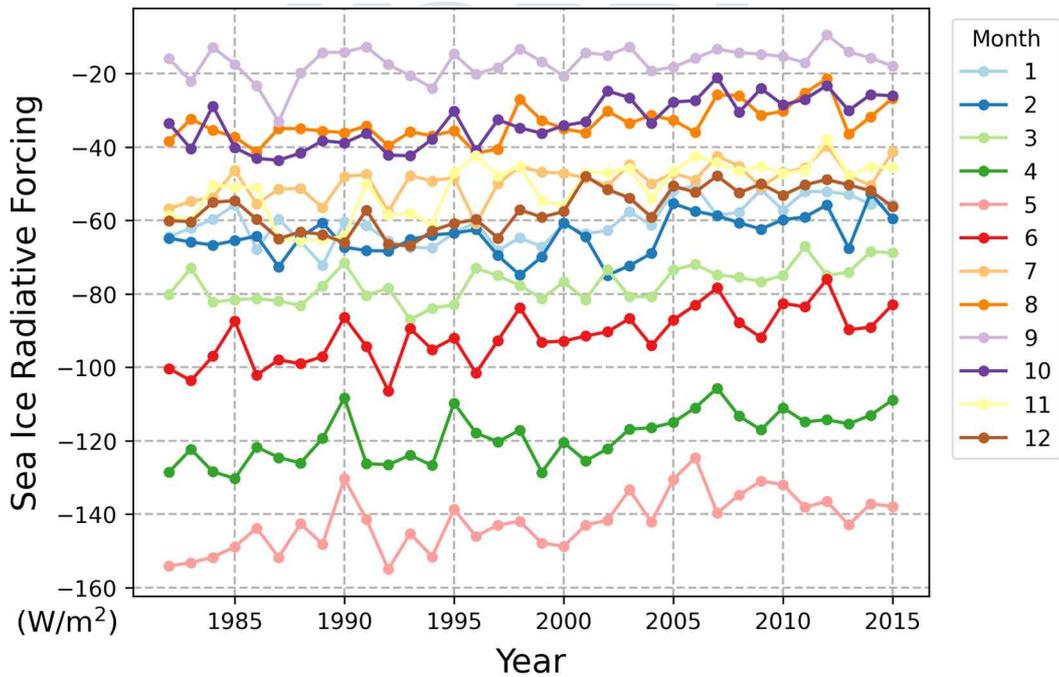


그림 3-1-161. 5개 커널 평균값을 이용한 월별 net-SIRF 시계열 분포

- 월에 따라 변화하는 경향을 다르게 나타냈으나 전반적으로 모두 증가 추세를 보임. 4~6월은 해빙이 급속도로 녹기 시작하는 시기로 이 시기에는 albedo-SIRF가 net-SIRF에 큰 영향을 미침. 대조적으로 가장 높은 net-SIRF는 9월로 계산됨. 본 연구에서는 해빙이 존재하는 지역에 한하여 SIRF를 산출하였는데 이 시기는 북극에서 해빙의 범위가 가장 작

은 시기임. ERA5 skin temperature의 특성 때문에 이 기간에는 temperature-SIRF는 거의 산출되지 않았음.

- 다음 그림은 34년 동안의 북극 전역을 대상으로 산출된 net-SIRF의 월별 변화량을 나타냄.

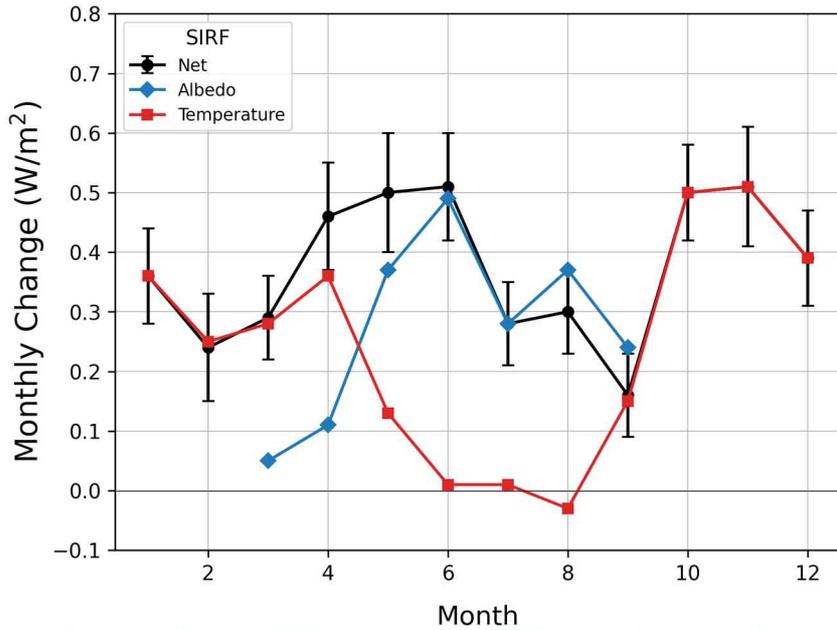


그림 3-1-162. 1982년부터 2015년 동안 각 요소별 SIRF 월별 변화량

- 이 때 복사커널은 5개 기후모델의 평균값을 사용하여 선형 변화량을 산출함. 모든 결과는 0.05 이하의 유의성을 만족함. 본 연구의 albedo-SIRF의 월별 변화량은 선행 연구와 비슷하게 산출됨. 그러나 net-SIRF와 albedo-SIRF를 함께 비교할 때, 본 연구의 결과는 선행 연구와 차이가 발생함. 선행 연구에는 SIRF의 가장 큰 변화가 5~6월에 발생한 반면, 본 연구에는 5~6월 뿐만 아니라 10~11월에도 큰 변화가 발생함. 5월의 net-SIRF는 albedo-SIRF($0.37 \pm 0.07 \text{ W/m}^2$)과 temperature-SIRF($0.13 \pm 0.05 \text{ W/m}^2$) 두 SIRF의 영향을 모두 받았음. 6월은 대부분 albedo-SIRF의 변화량에 기인함. 10월과 11월은 temperature-SIRF(각각 $0.50 \pm 0.08 \text{ W/m}^2$, $0.51 \pm 0.10 \text{ W/m}^2$)의 영향으로 5~6월의 net-SIRF 변화량과 유사한 분포를 나타냄. 가장 변화가 적은 기간은 9월이며, 6월부터 8월까지 temperature-SIRF의 변화는 거의 나타나지 않음 ($0.37 \pm 0.07 \text{ W/m}^2$, p-value ≥ 0.3). 이러한 특성으로 인하여 temperature-SIRF의 값의 분포($0.03 \sim 0.51 \text{ W/m}^2$)는 albedo-SIRF 값의 분포($0.05 \sim 0.49 \text{ W/m}^2$)보다 넓게 나타남.

- 다음 그림은 5개 기후모델의 평균 복사커널 값을 바탕으로 산출된 net-SIRF의 월별 변화량에 대한 공간적 분포를 나타냄.

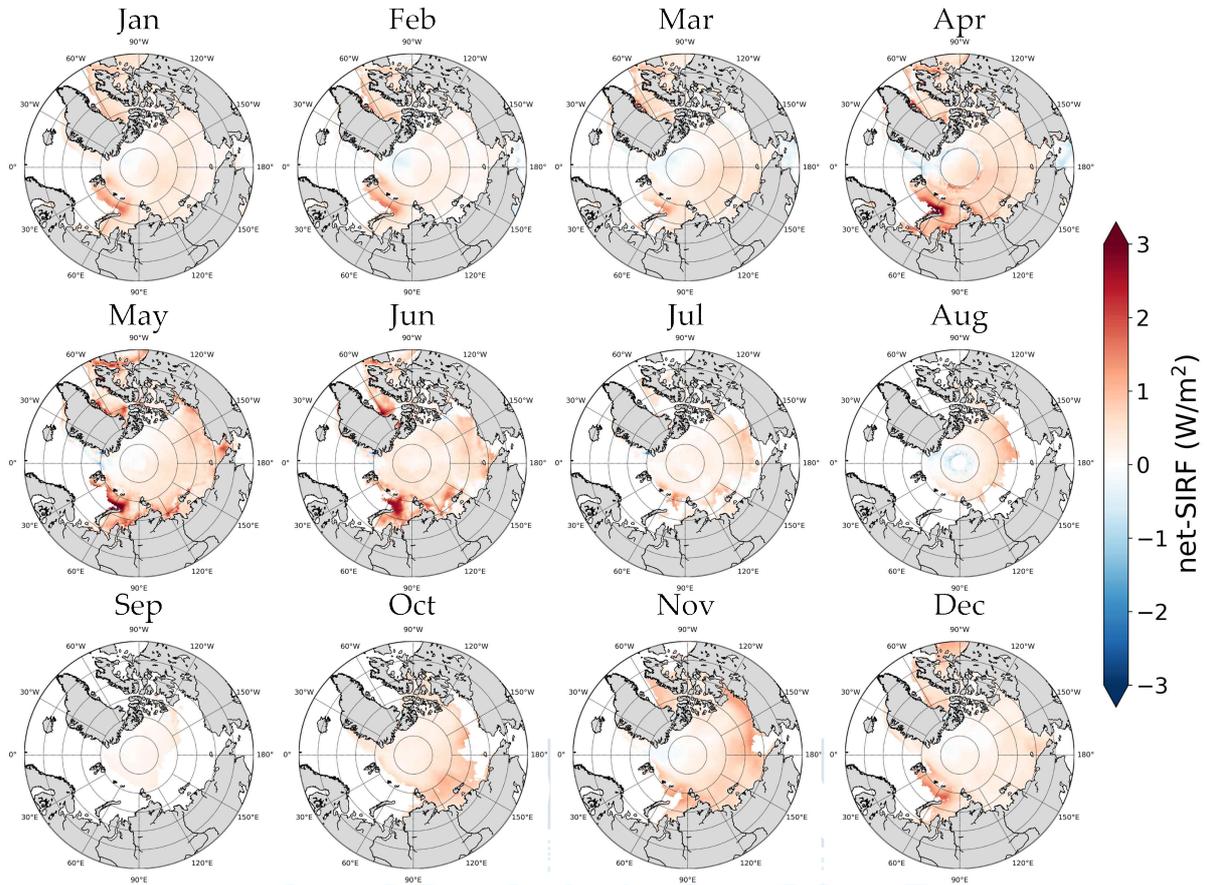


그림 3-1-163. net-SIRF 월별 변화량의 공간적 분포

극지연구소

- albedo-SIRF의 변화가 크게 나타나는 6~8월의 경우 다른 월에 비해 지역에 따른 차이가 크게 발생함. 이 기간동안 net-SIRF의 변화량은 Barents, Laptev, Kara 지역 뿐만 아니라 Baffin Bay의 일부 지역에서 1.5 W/m^2 이상으로 계산됨. 반대로 4월의 East Greenland와 Arctic Central 해역의 일부 지역에서는 net-SIRF가 감소하는 경향이 나타남. 8월 Arctic Central 해역에서도 감소 경향이 관찰됨.
- 10월과 11월은 temperature-SIRF의 영향으로 인해 net-SIRF의 변화량이 크게 나타남. 이때 net-SIRF의 변화량은 4~6월과 유사하나 4~6의 비해 지역적인 차이가 작게 발생함. 이러한 결과는 Bintanja and Krikken (2016) 연구에서도 나타나는 지역적 특징임. 하지만 본 연구와 동일한 방법을 적용하여 복사강제력을 산출하지는 않음.

○ DNN기반 해빙표면온도 산출 및 복사강제력 비교

- 앞서 SIRF 산출 및 분석 결과에 따르면 temperature-SIRF는 해빙이 녹는 시기에 그 지역의 표면온도를 0도에 가깝게 산출하는 ERA5 skin temperature의 특징으로 인하여 여름

철 temperature-SIRF의 값이 0에 가깝게 산출되는 경향이 있었음.

- 다음 그림은 2000년부터 2015년까지 6월 평균 ERA5와 MODIS의 표면온도의 분포를 나타냄.

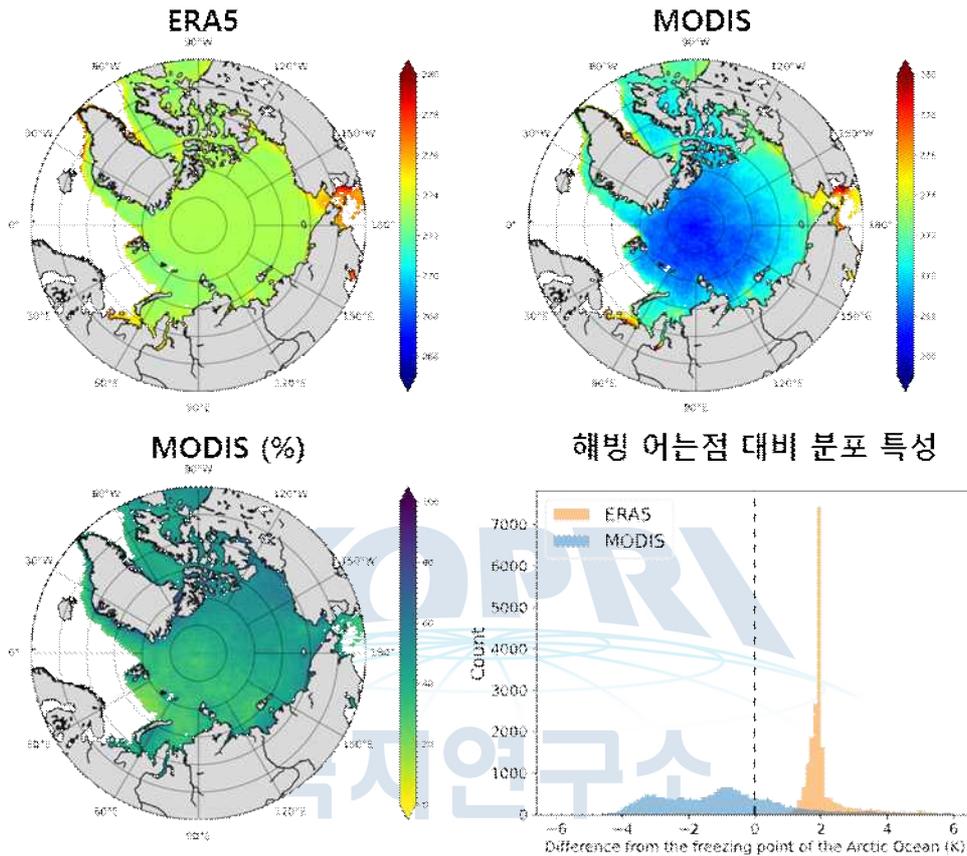


그림 3-1-164. 2000-2015년 기준 6월 평균 ERA5 및 MODIS의 표면온도 분포 특성

- 왼쪽 위는 ERA5 skin temperature의 6월 평균값이며, 오른쪽 위 그림은 MODIS IST의 평균값을 나타냄. 왼쪽 아래는 MODIS IST에 대해 6월 기준 평균적으로 확보되는 pixel의 퍼센트를 나타냄. 총 16년 동안 모두 존재하였으면 100%, 존재하지 않았을 경우에는 0%로 표기함. 오른쪽 아래 그림은 해빙의 어는점(영하 1.8도) 기준으로 ERA5와 MODIS의 분포를 히스토그램으로 표현함. ERA5의 경우 해빙이 존재함에도 불구하고 위에서 언급한 것과 마찬가지로 약 0도 정도의 높은 표면온도 값이 산출되고 있으나, MODIS의 경우에는 ERA5에 비해 평균 4도 낮은 값의 분포를 나타냄. 하지만 ERA5와는 달리 모든 영역에 대하여 자료가 존재하지 않고 약 50%정도만 확보 가능함.
- 겨울철의 경우 그림 24와 같이 나타난다. 여름철과 다르게 전체적인 분포특성의 차이는 있지만 여름철보다는 유사한 분포를 띤. 하지만 MODIS의 경우 Brightness Temperature

기반으로 IST를 산출하는데 이 때, 위성의 궤도 및 구름의 영향으로 결측이 발생하게 됨.

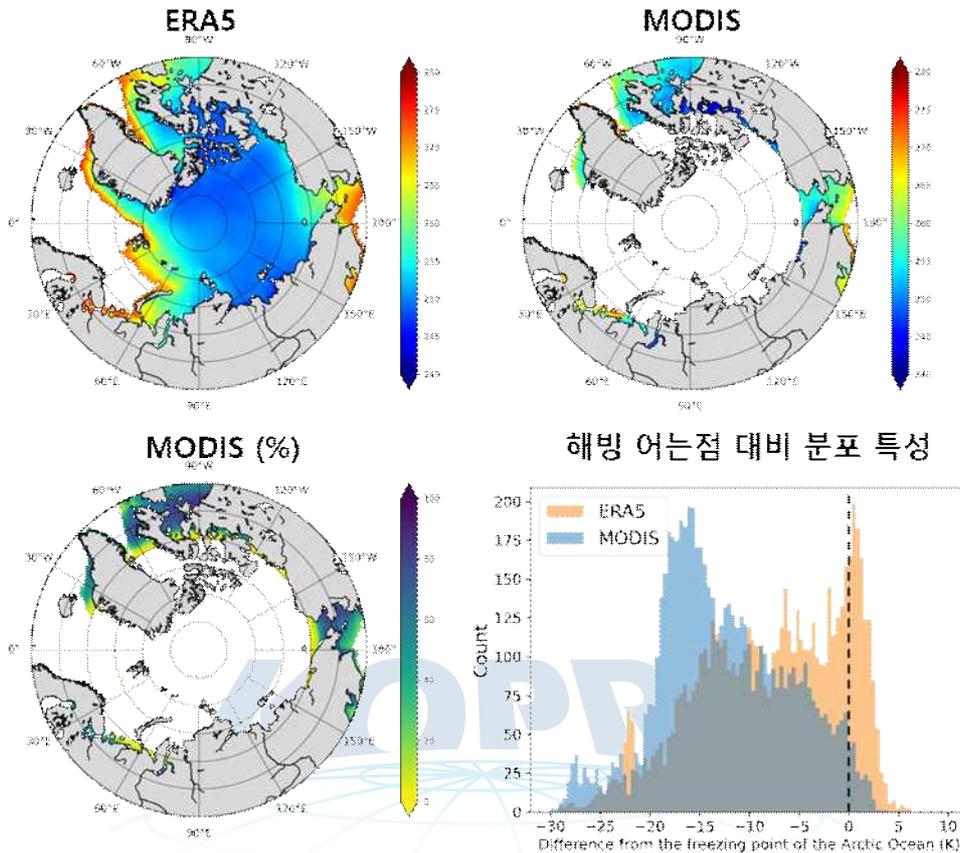


그림 3-1-165. 2000-2015년 기준 12월 평균 ERA5 및 MODIS의 표면온도 분포 특성

- 따라서 본 연구에서는 계절에 관계없이 결측지가 없는 위성기반의 해빙표면온도를 산출하고 그 특성을 분석함. 최근 각광 받고있는 기계학습 모델 중에서 비선형 관계들에 대한 모델링 및 예측 정확도가 높고 위성기반 산출 연구에 많이 활용되고 있는 DNN 모델을 구축하여 해빙표면온도를 산출함.

가. DNN기반 해빙표면온도 산출

(1) DNN기반 해빙표면온도에 활용할 변수 선정

- DNN 기반의 IST 산출 알고리즘을 구축하기 위하여 먼저 입력변수의 후보를 선행연구를 통하여 선정함.
- Key et al., (1997) 연구에서는 해빙표면온도 알고리즘의 정확도 향상을 위하여 전체 범위가 아닌 온도에 따라 구간을 나누어 알고리즘의 계수를 산출하는 것이 효과적이

라 언급함. 이러한 이유는 대기 중 수증기량에 큰 영향을 받기 때문이라 설명함.

- A. Tetzlaff et al., (2013) 연구에서는 기온-IST-해빙농도의 상관성 분석을 수행, 해빙 농도에 따라 다른 변화양상을 나타내는 것을 확인함.
- Christopher A. et al., (2014) 연구에서는 기온이 높을수록 IST와 기온의 차이가 크게 발생하며, 태양천정각에 따라 기온-IST 차이의 패턴 변화가 발생한다 보고함.
- Mäkynen, M., and Karvonen, J. (2017)의 연구에서는 MODIS IST를 기반으로 해빙 두께를 산출함.
- 이러한 선행 연구를 바탕으로 아래와 같이 최종 DNN 기반 IST 산출 알고리즘의 입력 변수를 선정함. 모든 자료는 3절에서 생상한 복사강제력과 동일한 시공간해상도로 계산하여 사용함.

(가) Ice Surface Temperature (IST)

- Terra 위성의 MODIS 센서에서 취득되는 MOD29E1D 자료로써 공간해상도 4 km, 시간해상도 daily 자료임. 이 자료는 IST와 SST를 함께 제공하고 있으며, 해빙농도 자료를 이용하여 해빙농도가 15% 이상인 지역만 해빙지역으로 선정하여 본 연구에 활용함.

(나) Sea Ice Concentration (SIC)

- NOAA에서 제공하는 OI (Optimal Interpolation) 자료를 활용함. 이 자료는 AMSR-E, AVHRR, Ships, Buoy 등 다양한 플랫폼을 함께 사용하여 생산함. 공간 해상도 0.25°, 시간해상도는 daily임.

(다) Sea Ice Age (SIA)

- NSIDC에서 제공하는 자료로, AMSR-E, AVHRR, Buoy 등 다양한 자료를 결합하여 생성되며 공간해상도 12.5 km, 7일 주기로 생성됨.

(라) 2 m air Temperature (Ta), Total column Water Vapor (TCWV)

- 위성기반의 자료들은 북극 지역의 특성으로 인하여 많은 영역에서 결측치를 가짐. 따라서 본 연구에는 이러한 문제를 해결하고자 ERA-Interim 재분석 자료를 활용함. 해빙 관련 많은 연구(Preuber, A., et al., 2016; Paul et al., 2020)에서 위성자료와 재분석자료를 함께 사용하고 있음. 본 연구에서는 공간해상도 0.25°, 시간해상도 daily 자료를 사용함.

(마) Solar Zenith Angle (SZA)

- SZA는 태양-타겟-천정이 이루는 각도를 의미함. 이는 태양에너지의 변화에 큰 영향을 주는 요소 중 하나임 (Florent et al., 2016). Christopher et al.(2014)에 의하면 SZA에 따라 Ta와 IST 차의 패턴이 변화하는데, SZA가 클수록 Ta와 IST의 차이가 크게 발생함.

(바) Local Solar Noon Angle (LSN)

- LSN은 지구 중심-타겟-태양이 이루는 각도를 의미함. 로컬타임으로 정오일 때의 태양천정각은 시간 및 위도에 따라 변화함. 이 변수는 계절성을 대변할 수 있는 변수라 판단하여 입력자료로 선정함.

(사) Ta climatology

- Hall et al.(2013)에 의하면 2001부터 2012년 까지 그린란드 지역에서 Ta가 $\sim 2^{\circ}\text{C}/10$ 년 증가함에 따라 IST는 $\sim 2.51^{\circ}\text{C}/10$ 년 증가함. 대기 온도 변화 경향을 포함하고자 입력변수로 선정함. 본 연구에서는 1982년부터 2015년 까지 34년 동안의 ERA-Interim Ta daily 자료를 평균하여 daily 기준 기후값을 산출함.

(아) Latitude

- 지표에 도달하는 태양에너지는 위도에 따라 상이하게 나타남. Seo et al. (2020) 연구에 의하면 위도에 따라 그로 인한 온도 차이는 뚜렷하게 관측되고 있음. 특히 고위도로 갈수록 입사하는 에너지 양보다 방출하는 에너지양이 많아져 온도의 감소가 극명하게 나타남.

(2) 효과적인 IST 산출을 위한 Case 분류

- 현재 MODIS IST ATBD(Algorithm Theoretical Basis Document)에서는 11 um의 밝기온도(T11)를 기준으로 IST cold ($T11 < 240 \text{ K}$), IST moderate ($240 \text{ K} < T11 < 260 \text{ K}$), IST warm ($T11 > 260 \text{ K}$) 총 3가지 경우로 나누어 산출하고 있음. 이는 앞서 설명한 것과 마찬가지로 Key et al. (1997)에서 계절에 따른 구분보다 온도에 따른 IST를 산출하는 것이 더 효과적임. 이를 바탕으로 본 연구에서는 동일한 범위 기준을 바탕으로 Ta를 활용하여 온도범위에 따라 IST 모델을 개별적으로 구성함.
- 추가로 SIA를 활용하여 일년빙과 다년빙에 대해 개별 모델을 생성함. SIA는 해빙의 상태를 나타내는 주요 설명자로, 역학 및 열역학적 변화를 설명할수 있는 주용한 지표로 작용하고 있음 (Korosov et al., 2018). 이 자료는 Sea Ice Thickness와도 밀접한 상관성이 있으며, 다년빙(Mult Year Ice, MYI)과 일년빙(First Year Ice, FYI)로 분류가 가능함. 특히 다년빙은 일년빙에 비해 대기-해양의 변화에 더 탄력적으로 반응하고 있

으며 해빙과 관련된 많은 연구에서 다년빙과 일년빙을 구분하여 연구를 수행하고 있음. 따라서 최종 분류된 Case는 총 6개로 다음과 같음.

- FYI & IST cold
- FYI & IST moderate
- FYI & IST warm
- MYI & IST cold
- MYI & IST moderate
- MYI & IST warm

(3) DNN 모델 생성 및 정확도 평가

- DNN은 입력층(input layer)과 출력층(output layer) 사이에 여러 개의 은닉층(hidden layer)들로 이뤄진 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)임. 심층 신경망은 일반적인 인공신경망과 마찬가지로 복잡한 비선형 관계(non-linear relationship)들을 모델링할 수 있음.
- 본 연구에서는 Google Colab 환경 Keras 2.9.0 버전에서 DNN 기반 IST 알고리즘을 구축함. 활성화 함수는 Relu, 옵티마이저는 Adam을 적용함.
- 최종적으로 선정된 입력변수는 Ta, SZA, LSN, Ta climatology, Latitude, TCWV이며, 모든 입력변수는 MinMaxScaler를 활용하여 0~1로 정규화하여 적용함.
- 최종 선정된 하이퍼파라미터는 GridSearchCV를 활용하여 다음 표와 같이 선택함. GridSearchCV는 하이퍼파라미터를 순차적으로 학습시킨 후 최적의 값을 도출하는 방식이며, 과적합방지를 위하여 EarlyStopping 콜백함수를 적용함.

표 3-1-35. 본 연구에 적용한 DNN 하이퍼파라미터

Hyper-parameter	Layer, Node	Batch size	Epoch	Loss Function
Setting value	(128,128,128)	32	100	Mse (Mean Squared Error)

- 훈련 및 검증데이터, 테스트 데이터는 StratifiedShuffleSplit를 사용하여 동일한 월을 기준으로 각각 60%, 20%, 20%로 분류하여 사용함.

- 다음 그림은 본 연구의 DNN 구조를 도식화 한 것임.

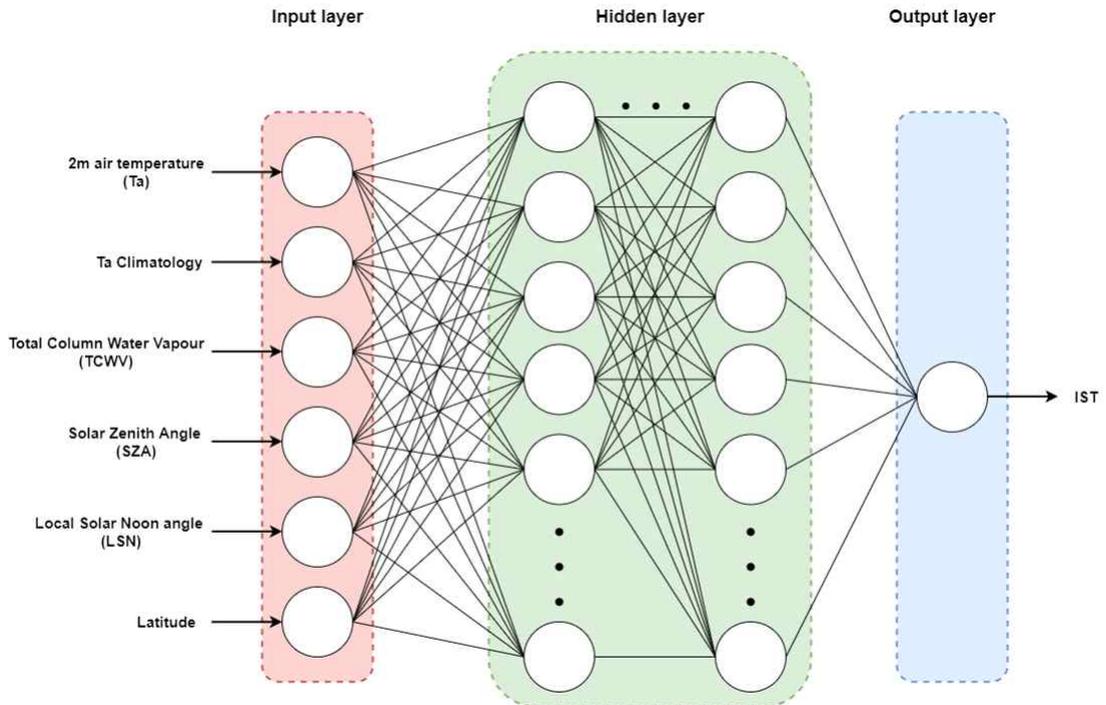


그림 3-1-166. 본 연구에 적용한 DNN 구조

- 본 연구에서는 결과를 평가하기 위하여 다음과 같은 평가지수를 활용함

(가) 상관계수 (R, correlation coefficient)

- 두 변수 사이의 통계적 관계를 표현하기 위해 특정한 상관 관계의 정도를 수치적으로 나타낸 계수임. 본 연구에 사용한 상관계수는 피어슨 상관 계수이며, 두 변수 X 와 Y 간의 선형 상관 관계를 계량화한 수치임. 피어슨 상관 계수는 코시-슈바르츠 부등식에 의해 +1과 -1 사이의 값을 가지며, +1은 완벽한 양의 선형 상관 관계, 0은 선형 상관 관계 없음, -1은 완벽한 음의 선형 상관 관계를 의미함.

(나) Root Mean Square Error (RMSE)

- 추정 값 또는 모델이 예측한 값과 실제 환경에서 관찰되는 값의 차이를 다룰 때 흔히 사용하는 척도임. 정밀도(precision)를 표현하는데 적합함. 각각의 차이값은 잔차(residual)라고도 하며, 평균 제곱근 편차는 잔차들을 하나의 척도로 종합할 때 사용함.

(다) Relative Root Mean Square Error (RRMSE)

- RRMSE는 각 잔차가 실제 값에 대해 조정되는 평균 제곱근 값으로 정규화된 평균 제곱근 오차를 의미함. RMSE는 원래 측정 규모에 의해 제한되지만 RRMSE는 다양한 측정 기술을 비교하는 데 사용할 수 있음. 예측이 정확하지 않으면 RRMSE가 증가한다. RRMSE는 오류를 상대적으로 또는 백분율 형식으로 표현함.

(라) bias

- bias, 즉 Mean Bias Error(MBE)는 예측값과 실제 값의 차이의 평균을 의미함. bias는 양수 또는 음수 중 하나의 값을 가짐. 양의 bias는 자료가 과대 평가되었음을 의미하며 음수는 과소 평가되었다는 것을 의미함. 하지만 양의 error와 음의 error가 상쇄될 수 있을 가능성이 존재함.
- 다음 그림은 본 연구에서 생성한 DNN 기반 IST와 MODIS IST를 비교한 결과임. 모든 Case의 총합으로 총 384,628개의 테스트 자료를 대상으로 R은 0.94, RMSE는 3.46 K, RRMSE는 1.35 %, Bias 0.29 K의 결과를 계산함. 전체적으로 MODIS IST와 전체적으로 유사한 분포를 나타냄. 추가적으로 Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL)에서 제공하는 Ice Mass Balance (IMB) buoy 자료와 검증을 수행함. 검증 결과 MODIS IST는 검증 자료 수는 65개로 R 0.92, RMSE 4.51 K, RRMSE 1.7%, Bias -2.81 K로 산출됨. 본 연구에서 산출한 DNN 기반의 IST는 검증 자료 수 173개에 대해 R 0.98, RMSE 3.85 K, RRMSE 1.47 %, Bias -2.89 K가 나타남. Bouy 자료와 비교 결과, MODIS IST 비해 높은 정확도가 산출되는 것을 확인함.

극지연구소

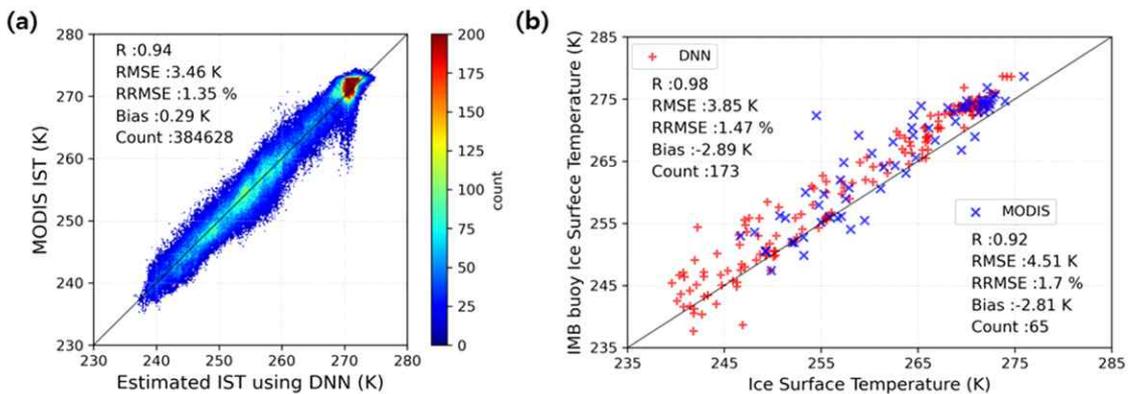


그림 3-1-167. MODIS IST 및 IMB buoy 데이터를 통해 DNN 기반 IST 검증 결과. (a) DNN기반 IST와 MODIS IST의 분포. (b) DNN 기반 IST 및 MODIS IST와 IMB buoy IST와 비교.

- 다음 그림은 각 계절별로 같은 날짜에 대한 MODIS IST와 DNN 기반 IST의 공간적 분포를 나타냄. 전체적으로 MODIS IST와 전반적으로 유사한 공간적 분포가 나타나고 있음. MODIS IST에서는 pole hole을 포함한 넓은 지역에서 결측치가 발생하고 있으나, DNN 기반 IST에서는 결측치 없이 모든 지역에서 산출되는 것을 확인함.

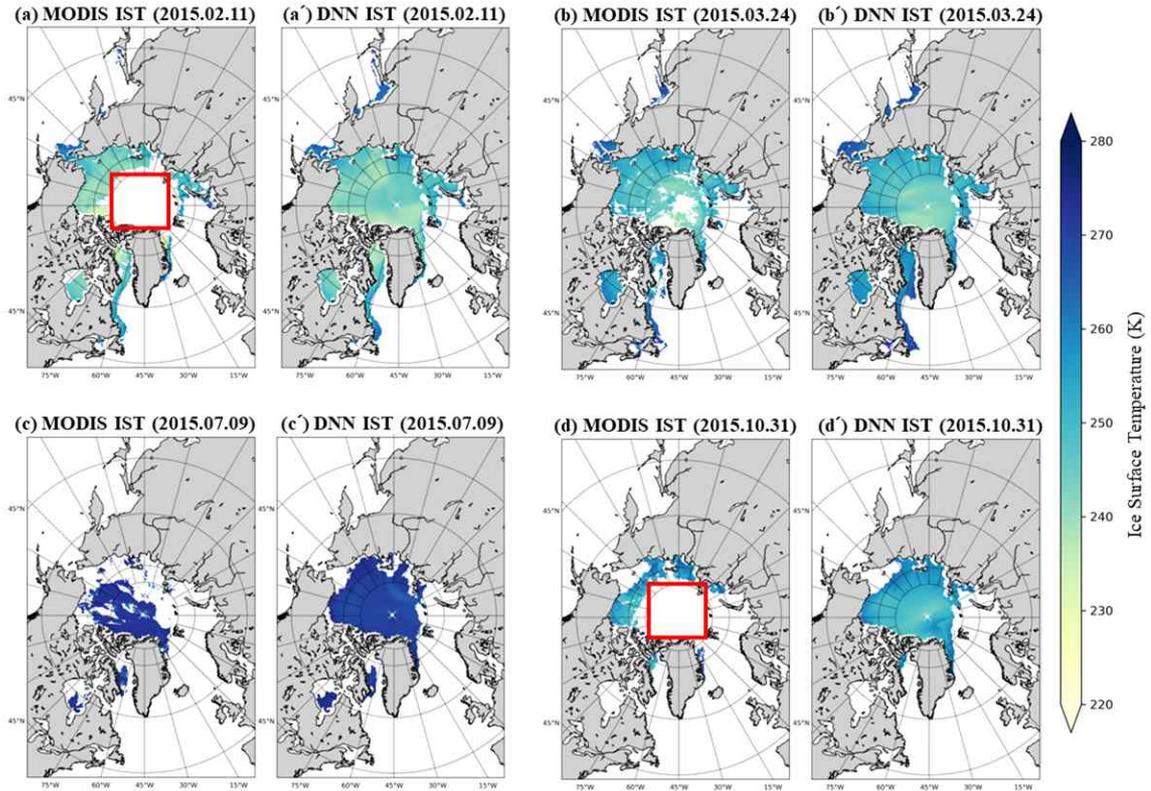


그림 3-1-168. MODIS IST(a, b, c, d)와 DNN 기반 IST와(a', b', c', d')의 공간적 분포.

- 다음으로 Case에 따른 분석을 수행함. 다음 그림의 (a)는 DNN IST의 정량적 평가 결과 중 FYI case에 대한 결과로, R은 0.79 ~ 0.89, RMSE 2.77 ~ 3.87 K, Bias 0.606 ~ 1.35로 산출되었으며 IST warm case에서 일부 비선형적인 분포 양상이 나타남. (b)는 MYI case에 대한 결과로, FYI case와 매우 비슷한 분포 양상이 나타남. R 0.81 ~ 0.88, RMSE 2.69 ~ 3.77K, Bias -0.53 ~ -0.20으로 나타남. Bias가 FYI case와는 달리 음수로 나온 것이 특징이며, IST warm case에서 FYI와 마찬가지로 일부 비선형적 분포 특징이 나타남.

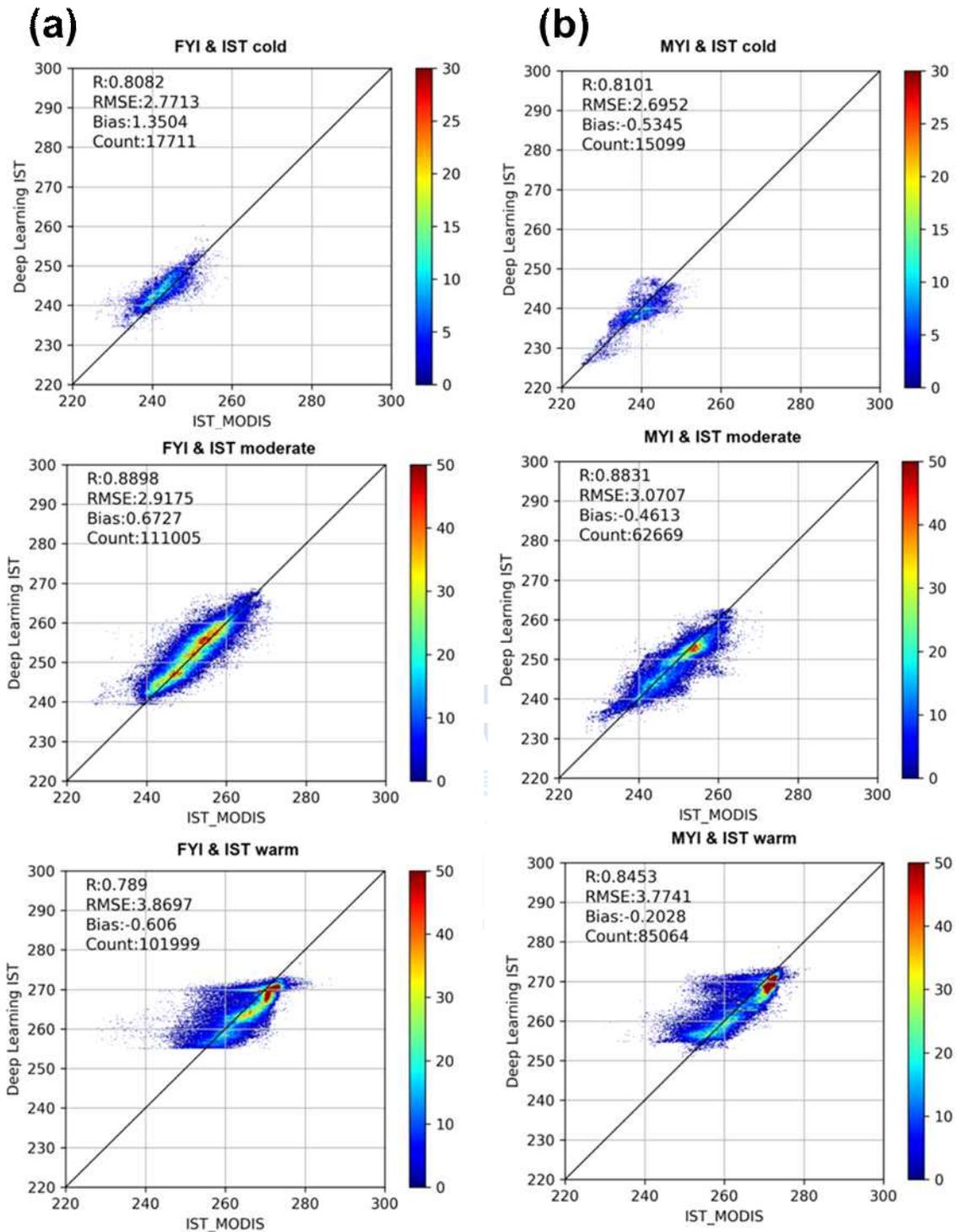


그림 3-1-169. Case 별 MODIS IST와의 검증 결과

- 다음 그림은 DNN 모델에서 각 변수 별로 기여하는 영향력을 평가한 결과임. 본 연구에서는 SHAP (Shapley Additive exPlanations) 값을 활용함. SHAP는 게임이론에서 사용하는 Shapley Value를 기반으로 예측 결과에 대한 각 변수의 기여도를 계산하는 것임. SHAP 절댓값이 높을수록 모델에 큰 기여도를 갖는다고 해석이 가능함. 각 case 에 따라 변수의 기여도가 상이한 것을 알 수 있음. 이러한 이유에 대해서는 추가 분석

이 필요한 실정임. 그럼에도 불구하고 case에 따라 변수의 중요도가 매우 상이하기 때문에 변수에 따른 구분은 필수적이라는 것이 설명 가능함.

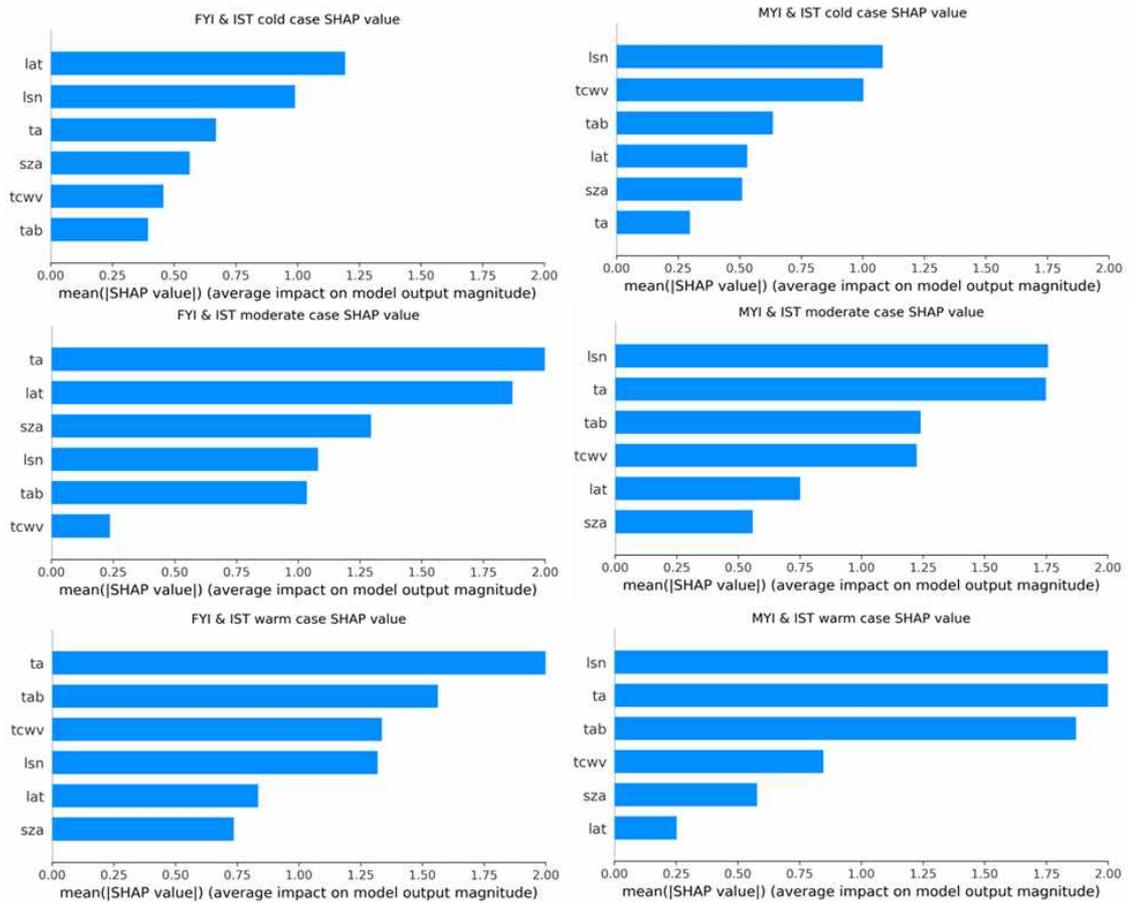


그림 3-1-170. SHAP를 활용한 Case에 따른 변수 중요도 평가 결과

나. DNN 기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가

- 위 과정에서 생성된 DNN 기반의 IST 자료를 바탕으로 temperature-SIRF를 산출하고 그 특징을 기존 자료와 비교함.
- 다음 그림은 3절에서 사용한 ERA5 skin temperature를 바탕으로 산출된 temperature-SIRF (이하 ERA5-SIRF)와 본 4절 1장에서 생성한 DNN 기반의 IST를 바탕으로 산출된 temperature-SIRF (이하 DNN-SIRF)의 연평균 시계열 분포를 나타냄.

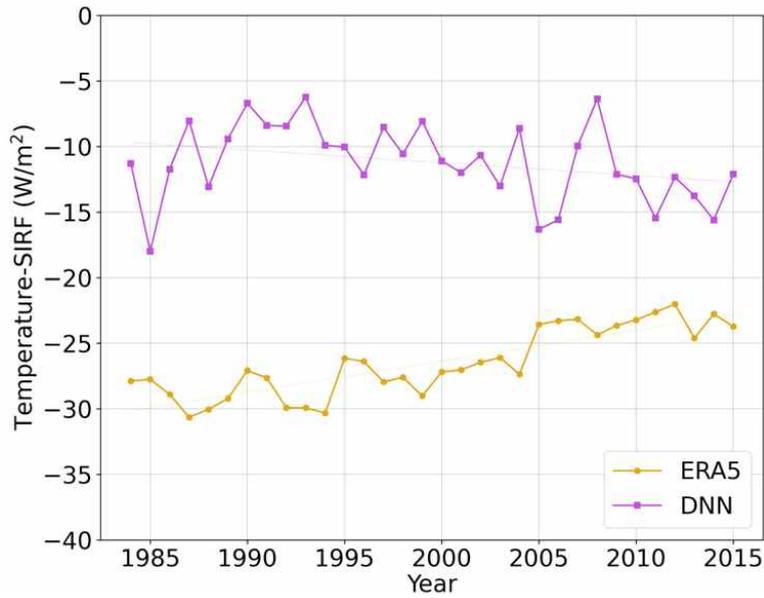


그림 3-1-171. ERA5-SIRF와 DNN-SIRF의 연평균 시계열 분포.

- 전체적으로 두 자료는 반대경향을 나타냄. DNN-SIRF가 ERA5-SIRF에 비해 약 10 W/m² 만큼 높게 산출됨. 그리고 ERA5-SIRF는 증가 경향인 반면에, DNN-SIRF는 증가 경향이 나타나고 있다.
- 다음 그림은 두 SIRF의 계절별 공간적 분포를 나타냄.

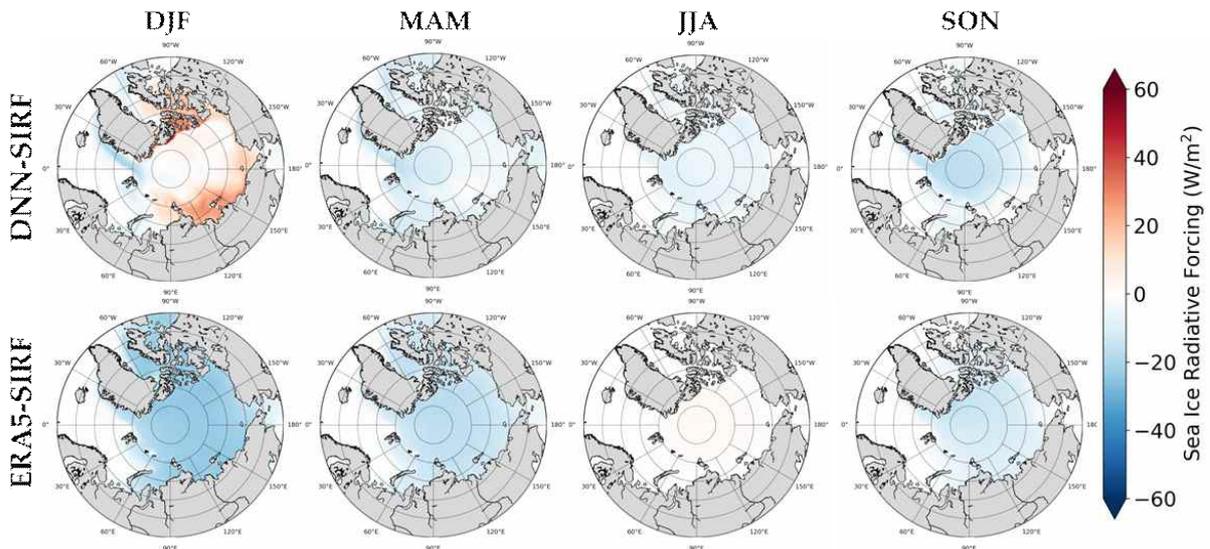


그림 3-1-172. ERA5-SIRF와 DNN-SIRF의 계절별 평균 공간적 분포.

- 시계열 분포특성과 마찬가지로 공간적 분포에서도 두 자료의 차이를 확인할 수 있음. 먼

저 DJF 기간은 다른 계절에 비해 차이가 확연히 드러남. DNN-SIRF의 경우 Chukchi 및 Barents 해역 등 전반적으로 양의 SIRF가 산출된 지역이 넓게 분포함. 이러한 특징 때문에 연평균 DNN-SIRF에서도 ERA5-SIRF에 비해 높게 산출됨. 반면 해당기간 ERA5-SIRF는 지역에 따른 차이는 상대적으로 매우 작게 나타나며 전반적으로 약 -30 W/m^2 의 분포 특성이 나타남. MAM 기간은 다른 계절에 비해서는 차이가 적게 나지만, 북극 중앙해 부근에서 DNN-SIRF가 높은 값이 산출됨. JJA 기간은 앞의 다른 계절과 다른 양상이 나타남.

- DNN-SIRF와 ERA-SIRF 모두 지역에 따른 차이는 크게 나타나지 않는다. 하지만 해당 계절에서 DNN-SIRF는 대부분 지역에서 음의 SIRF가 산출되는 반면 ERA5-SIRF는 양의 SIRF가 산출됨. SON 기간은 MAM기간과 비슷한 양상을 나타냄. 두 SIRF 모두 0에 가까운 값이 산출되었으며, DNN-SIRF의 경우 Baring 및 Laptev 해역 일부에서 양의 SIRF가 나타남.



제 2 절 동토 모니터링을 위한 위성 및 무인기 자료 분석 기반기술 개발

1. 초분광/라이다 통합센서자료의 정밀 정사기하보정

○ 기술 개발

- 무인기 탑재 초분광센서는 높은 공간 및 분광 해상도의 과학적 분석자료 제공 가능. 이러한 초분광자료를 활용하기 위해서는 관측센서와 GNSS/INS 센서 간의 이격 및 자세 차이를 보정하는 boresight calibration과 영상지도로 가공하는 ortho-rectification이 선행되어야 함
- Boresight calibration의 경우는 무인기 플랫폼을 고려한 효과적인 방법들이 잘 문헌화된 상태인 반면, ortho-rectification의 경우는 대부분 인공위성 및 고고도 항공기 플랫폼에 맞춰 연구가 진행되어 왔음. 즉, 무인기 플랫폼에 대해서는 아직 충분한 논의가 이루어지지 못한 상태라 할 수 있음
- Ortho-rectification의 핵심기술은 원시영상의 한 지점과 이에 대응하는 3차원 지상좌표를 정의하는 ray tracing이라 할 수 있음. Ray tracing은 대응 3차원 지상좌표를 결정하기 위해 2.5차원의 수치표고모델 (digital surface model, DSM)을 이용함
- 그러나 DSM은 래스터 자료인 관계로 공간적으로 불연속적이기 때문에 이 과정은 지상의 한 좌표로 수렴하지 못하는 무한루프 케이스를 유발할 수 있음. 이러한 지점들은 촬영고도가 낮아질수록 더욱 빈번히 발생할 가능성이 농후함

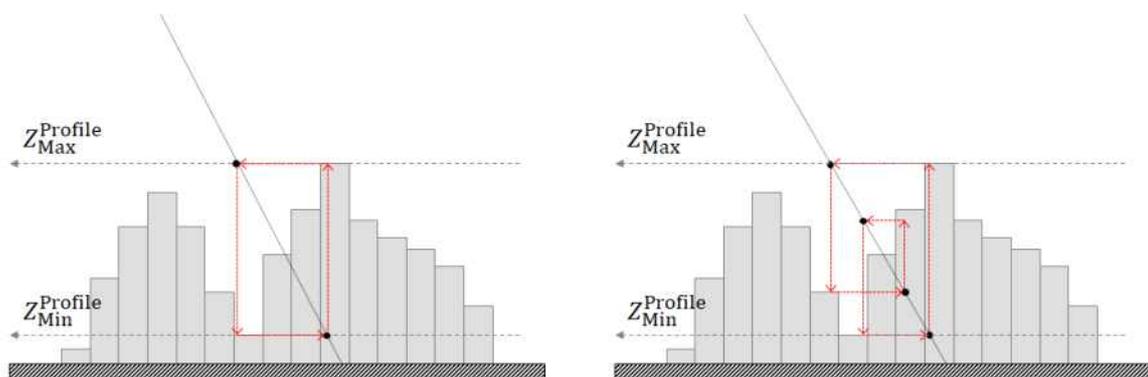


그림 3-2-1. 공간 불연속적 수치표고모델과 낮은 촬영고도로 인한 무한루프 케이스

- 이에 이 연구는 이러한 문제를 해결할 수 있는 정밀 ortho-rectification 방법 개발을 목적

으로 하였음. 제안방법은 무한루프 케이스들을 효과적으로 다루기 위해 아래 절차에서와 같이 탐색높이범위 결정단계와 3단계의 ray tracing으로 구성됨

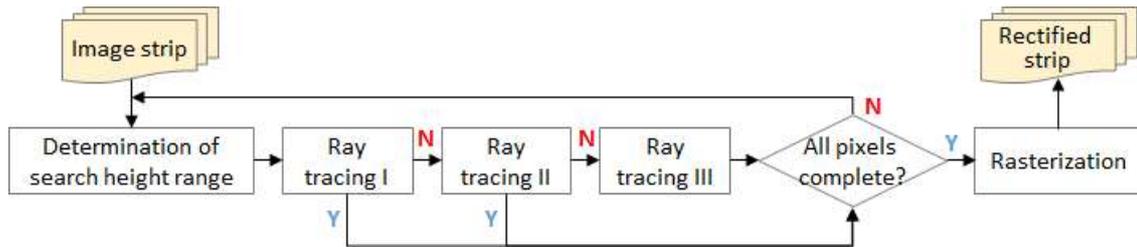


그림 3-2-2. 제안방법의 작업절차

- 첫 번째 단계에서는 ray tracing의 효율성 향상을 위해 탐색높이범위를 사전에 정의함. 입력 DSM의 최대 및 최소 높이값으로부터 시선벡터를 정의하며, 이로부터 직교투영에 해당하는 프로파일을 산출함. 즉, 탐색구간은 프로파일 내 최대 및 최소 높이값으로 결정

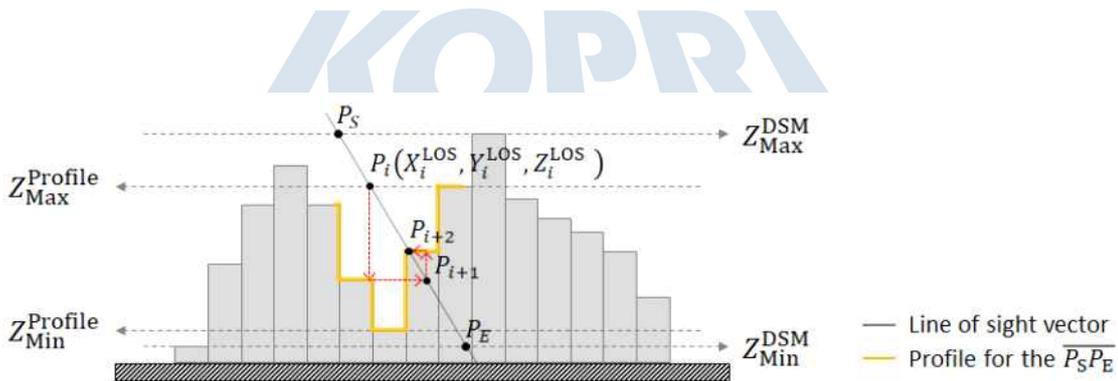


그림 3-2-3. 시선벡터 프로파일 추출을 통한 탐색범위 결정

- Ray tracing 1단계는 주어진 초기 탐색 높이값을 시작으로 반복적인 ray tracing 수행. 위 그림에서와 같이 시선벡터상의 높이와 DSM상의 높이가 일치될 때 종료. 그렇지 않고, 탐색점의 위치가 반복되며 무한루프를 취하면 다음 단계로 이동
- Ray tracing 2단계는 단일 ray tracing을 통해 투영점을 탐색. 아래 그림(좌측)에서와 같이 주어진 탐색범위에서 특정 탐색간격으로 투영점의 존재 유무를 판단하며, 탐색과정에서 투영점을 찾으면 종료, 그렇지 않으면 다음 단계로 이동. Ray tracing 1&2단계로도 투영점을 찾지 못할 경우, 좀 더 조밀한 간격으로 ray tracing 3단계 실시

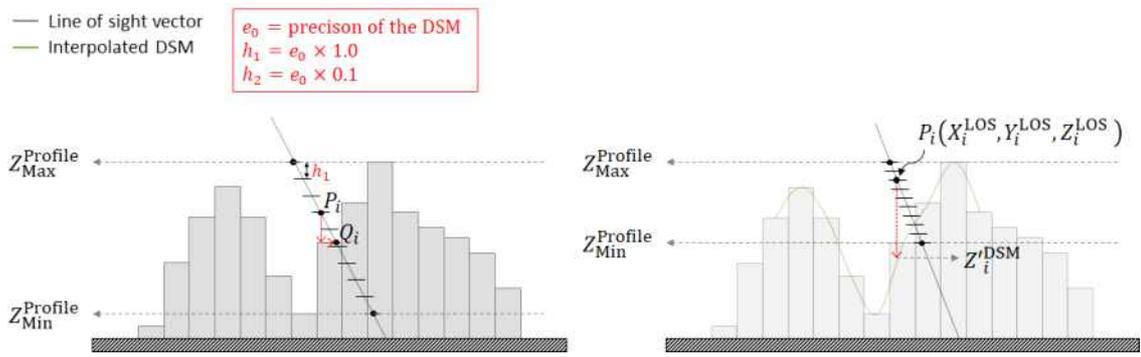


그림 3-2-4. Ray tracing 2단계(좌측)와 3단계(우측) 개념

- Ray tracing 3단계에서는 시선벡터상의 높이에 해당하는 DSM상의 높이를 측정할 때, bilinear interpolation을 통해 근사적으로 수치표고모델의 연속형 복원. 제안방법의 성능검증에는 아래 그림과 표에서와 같이 촬영고도를 달리하여 취득한 8개의 초분광 스트립 자료들과 LiDAR 포인트 클라우드로 제작한 DSM 사용



그림 3-2-5. 실험자료 취득 개요: (a) 연구지역, (b) 초분광 스트립 취득을 위한 비행경로, (c) 처리된 LiDAR DSM.

표 3-2-1. 영상 스트립별 촬영고도, 공간해상도, 영상 크기

FID	Flight height (m)	GSD (cm)	Strip size (pixels)
A-1	113	6.6	640 × 1632
A-2	114	6.6	640 × 1616
B-1	50	2.9	640 × 2816
B-2	50	2.9	640 × 2864
B-3	49	2.9	640 × 2912
C-1	27	1.5	640 × 5616
C-2	26	1.5	640 × 5648
C-3	26	1.5	640 × 5696

- 제안방법으로 처리한 기하보정 결과는 아래 그림과 같이 나타났음. 촬영 도중 센서의 위치 및 자세 변화로 인해 진동하는 듯한 모습을 나타냈던 원시자료가 보정을 통해 기하학적으로 잘 정렬된 것을 확인할 수 있음. 현장에서 정밀 GPS 측정을 통해 취득한 지상기준점 10점에 대해 기하보정의 위치 정확도를 측정해본 결과 X, Y축 방향으로 각각 3.4cm, 9.4cm의 RMSE 오차를 나타냈음.

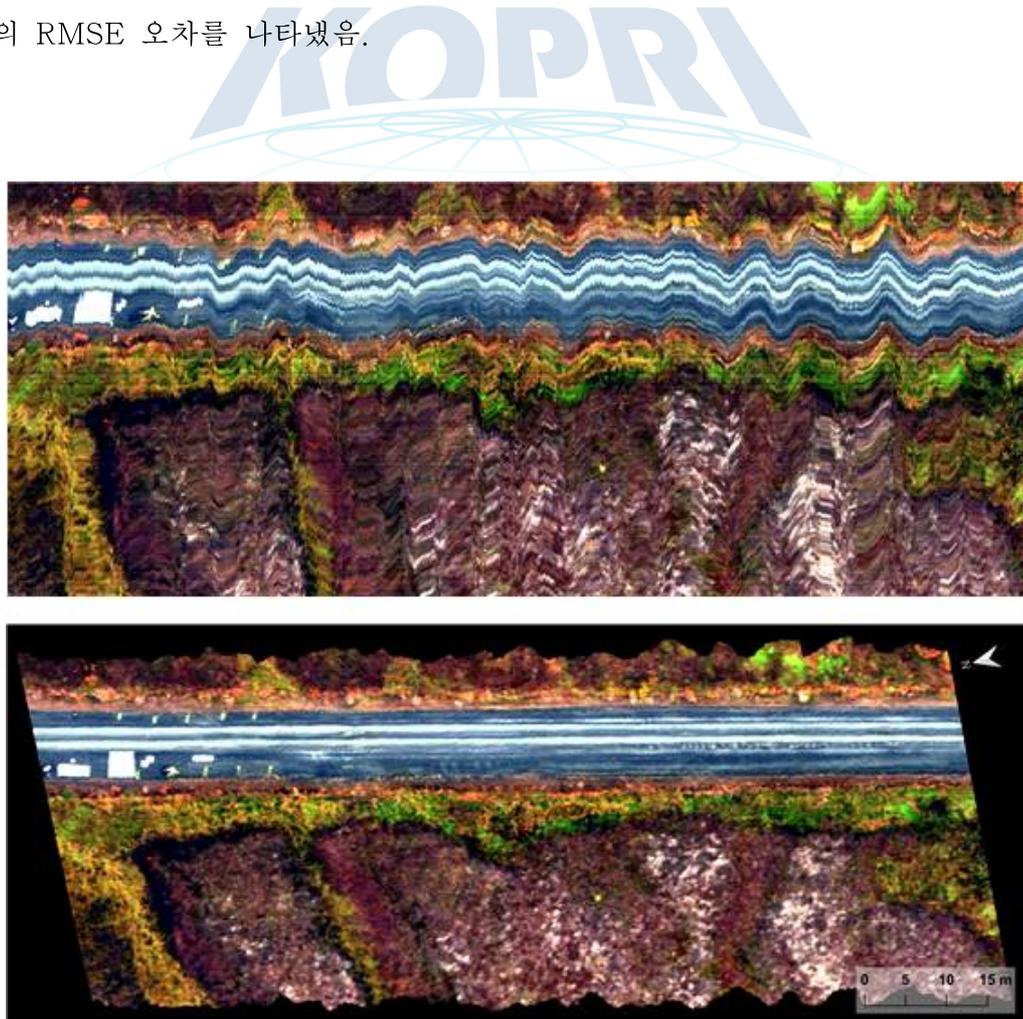


그림 3-2-6. 제안방법 처리 결과: (a) 원시자료, (b) 기하보정된 결과.

- 다음의 표는 제약조건 및 ray tracing 방법별 처리 결과를 정량적으로 보여줌. 우리는 이 실험을 통해 세 가지의 의미 있는 결과를 확인할 수 있었음

표 3-2-2. 제약조건 및 ray tracing 방법별 정사기하보정 결과

Method	e0	h1	h2	Number of pixels					Average number of loops			Maximum number of loops			Time (sec)
	(cm)			Total	R1	R2	R3	Failed	R1	R2	R3	R1	R2	R3	
R 1&2&3	1	1	0.1	1,044,480	1,012,538	502	30,484	292	2.00	41.28	163.84	5	198	999	15.52
R 1&2&3	2	2	0.2	1,044,480	1,012,538	487	31,419	35	2.00	21.30	91.66	5	92	959	11.94
R 1&2&3	3	3	0.3	1,044,480	1,012,538	470	31,470	2	2.00	14.94	58.98	5	62	670	10.69
R 1&2&3	4	4	0.4	1,044,480	1,012,538	452	31,490	0	2.00	11.58	42.54	5	47	501	10.34
R 1&2&3	5	5	0.5	1,044,480	1,012,538	440	31,502	0	2.00	9.77	32.72	5	38	399	9.97
R1 only	3	3	0.3	1,044,480	1,012,538	-	-	31,942	2.00	-	-	5	-	-	8.74
R2 only	3	3	0.3	1,044,480	-	1,012,239	-	32,241	-	1.59	-	-	71	-	10.13
R3 only	3	3	0.3	1,044,480	-	-	1,044,283	197	-	-	33.98	-	-	692	35.94

- 1) 탐색간격과 허용오차가 작아질수록 처리실패 건수 및 처리시간이 증가했음. 이는 처리 성능 제고를 위해서는 기하보정 요구 정확도와 DSM 높이 정밀도를 반영하여 탐색간격과 허용오차를 결정해야 함을 시사. 이 연구에서 사용한 DSM의 높이 정밀도는 3cm로, 실험 결과에서도 이보다 크게 허용오차 및 탐색간격을 설정했을 때 합리적인 결과들을 나타냈음
- 2) 전통적 방법(R1)으로 해결할 수 없는 화소 수는 전체 영상 대비 약 3%로 나타났음. 이들은 무한루프 케이스들을 의미하며, 불연속적인 래스터 DSM을 사용함에 따라 무한루프 케이스들이 발생할 수 있다는 본 연구의 주장을 증명
- 3) 기하보정 성능은 모든 ray tracing 단계를 모두 적용했을 때 가장 우수했음. 이는 통합된 방법의 결과와 개별 방법들의 결과들을 비교하여 확인 가능. DSM 상에 정확한 투영점을 얻을 수 있는 R1 & R2는 적은 반복횟수로 화소들의 포지셔닝을 수행했지만 많은 수의 무한루프 케이스들을 처리하진 못했음. 심지어 R2는 R1으로 다룰 수 있었던 약 300점의 화소들을 처리하지 못했음. 반면, R3은 상대적으로 적은 실패 건수를 나타냈지만, 많은

반복횟수로 처리시간이 크게 증가됐음. 게다가 R3 역시도 약간의 처리되지 못한 화소들을 남겼음. 이 결과들은 개별 ray tracing 단계들이 상호보완할 수 있음을 보여주며, 제안방법의 타당성을 지지해줌. 따라서 제안방법은 정확도와 더불어 처리속도 측면 모두에서 높은 성능 확보가 가능하다 볼 수 있음.

- 다음의 표는 촬영고도별 정사기하보정 결과를 보여줌. 실험결과는 촬영고도가 낮아질수록 무한루프 케이스가 증가함을 나타냈음. 무한루프 케이스들은 주로 elevation discontinuity 지역에 집중됐음. 이는 공간해상도 향상이 무한루프 케이스들의 증가로 이어질 것이라는 우리의 주장을 증명하는 결과임.

표 3-2-3. 촬영고도 변화에 따른 정사기하보정 결과

Strip	GSD (cm)	Number of pixels (pixels)					Average number of loops			Maximum number of loops			Infinite loop ratio
		Total	R1	R2	R3	Failed	R1	R2	R3	R1	R2	R3	
Strip A	6.60	1,039,360	1,011,685	340	27,333	3	1.95	16.58	54.73	5	65	661	2.66 %
Strip B	2.88	1,832,960	1,754,689	2,019	76,241	11	2.04	14.23	73.73	6	69	690	4.27 %
Strip C	1.53	3,618,133	3,450,807	7,040	160,249	37	2.03	17.67	102.34	6	68	651	4.63 %

- 따라서 제안방법은 수목지대, 빙하지대, 암반지대와 같이 표고 변화가 큰 지역에서 고해상도 초분광자료를 얻고자 할 때 매우 효과적일 것으로 판단됨

○ 기술 고도화

- 동토지역의 지형 및 식생 변화 분석은 지구온난화에 따른 영향을 파악함에 있어 매우 중요함. 관측 센서별로 제공 가능한 정보의 종류가 상이함에 따라, 지형 및 식생 변화를 효과적으로 분석하기 위해서는 동종 및 이종 센서자료 간 기하학적 정렬을 통한 융합이 필수적임. 그러나, 이들 관측 센서 자료 간 기하학적 정렬에는 여러가지 이유로 많은 어려움이 뒤따름.
- 첫째로, 센서들은 서로 다른 촬영 기하를 가지며, 취득되는 자료의 형태도 상이함 (다중분광 센서: 프레임 방식의 촬영 기하, 래스터 자료 / 초분광 센서: 푸쉬부름 방식의 촬영 기하, 래스터 자료 / 라이다 센서: 회전 스캐닝 방식, 벡터 자료).
- 둘째로, 센서들 사이에는 촬영기하 특성에 따라 georeferencing 방식에 차이가 있음. 일례

로, 프레임 촬영 기하를 갖는 다중분광 센서는 지상기준점을 이용한 간접적인 방식과 GNSS/INS를 이용한 직접적인 방식 모두가 적용 가능한 반면, 스캐닝 촬영 기하를 갖는 초분광 센서와 라이다 센서는 직접적인 방식만이 가능함.

- 셋째로, 상기의 이유로 센서 자료들의 georeferencing을 직접적인 방식으로 통일한다 해도, GNSS/INS 정확도, boresight parameters, 시야각 등의 차이로 인해 센서자료들은 공간적으로 정확히 일치되기 어려움.
- 이에 이 연구에서는 센서자료들의 고유 특성을 고려하여 두 단계의 전처리를 통해 정밀한 기하학적 정렬을 수행하고자 하였음. 그 첫 단계로, 센서별 boresight calibration을 수행하였음.
- 이를 위해 다음 그림에서와 같이 checkerboard 타겟과 hut 타겟을 지상에 설치한 뒤, 촬영고도를 달리하여 자료를 취득하였으며, 타겟들에 대한 지상좌표와 영상좌표 정보를 이용하여 boresight parameters을 추정하였음.

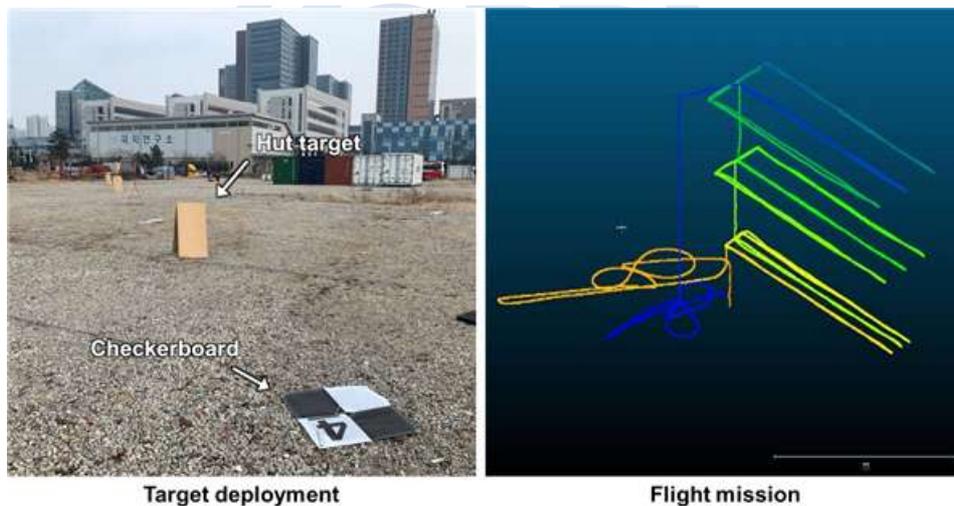


그림 3-2-7. Boresight calibration을 위한 타겟 설치 및 비행 계획 수립

- 그 결과로 라이다 DSM (digital surface model)과 RGB 영상 모자이크 사이에는 그 이상의 추가적인 처리 없이도 기하학적으로 잘 정렬된 것을 확인할 수 있었음. 아래 그림은 라이다 DSM을 이용하여 생성된 RGB 영상의 정사 모자이크 결과를 보여줌.

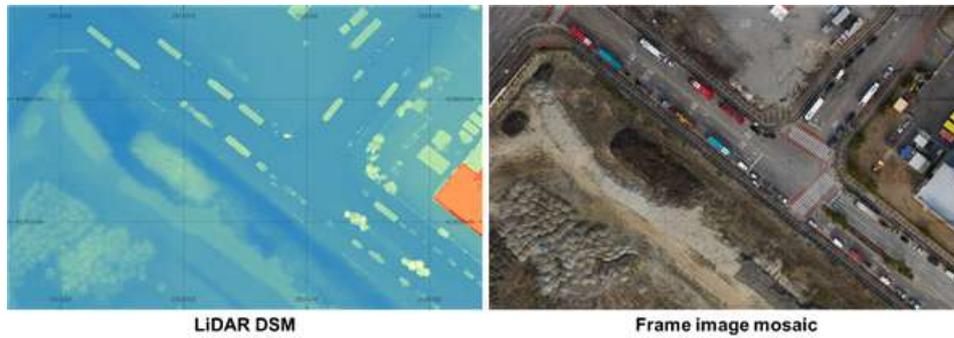


그림 3-2-8. Boresight calibration을 통한 라이다 자료와 광학영상 자료 간 기하학적 정렬

- 반면, RGB 영상 모자이크와 초분광 영상 모자이크 사이에서는 boresight calibration을 통해 정렬도가 보다 향상된 것을 확인할 수는 있었으나, 여전히 일치되지 않는 부분들이 확인되었음.



그림 3-2-9. Boresight calibration에 따른 초분광 센서자료의 기하보정 결과 비교

- 잔존하는 불일치를 보정하기 위해, 두번째 단계로 data-to-data registration을 수행하였음. 이를 위해 다음 그림과 같이 기준자료로 설정한 RGB 모자이크와의 대응점 추출을 수행하였으며, 호모그래피 변환모델을 추정하여 초분광 영상의 registration을 실시하였음.



그림 3-2-10. Registration을 통한 정밀 기하보정 결과

- 그 결과, 초분광 영상과 RGB 영상 모자이크 사이에 남아있던 불일치가 정밀하게 보정된 것을 확인할 수 있었음. 이러한 결과는 향후 다중센서자료 통합분석에 있어 높은 신뢰성 확보로 이어질 수 있을 것으로 기대됨.



2. 알래스카 카운실 동토지형 변화 시계열 변화 분석

- 코로나19 팬데믹으로 인한 2020년, 2021년 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 살펴보기위해 수년전 부터 스노우펜스를 설치하여 동토지형 변화를 모니터링 하고자 함. 그물로 만들어진 스노우펜스 주변에 다른 지역보다 눈이 더 쌓이는 형태를 가짐.

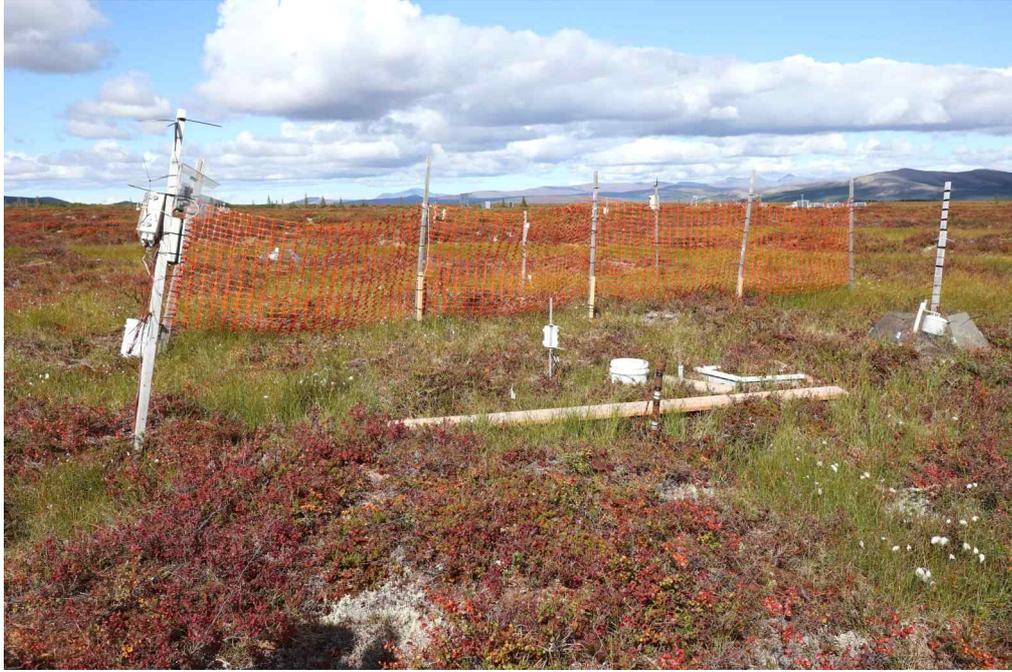


그림 3-2-11. 연구지역에 설치된 스노우펜스

- 이 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 확인함.

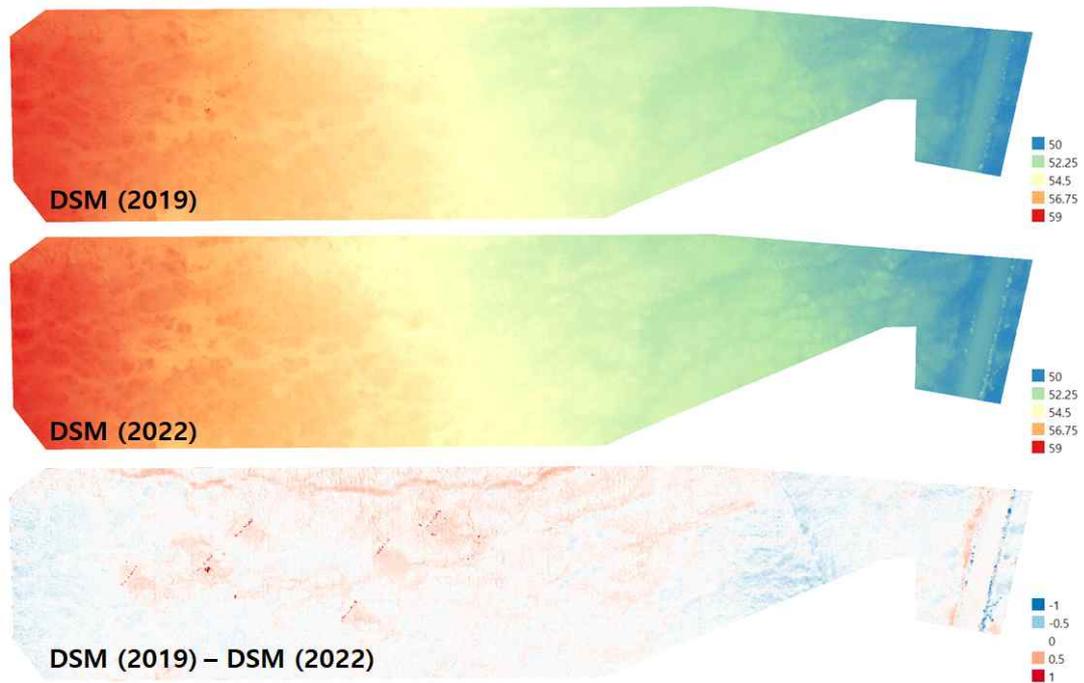


그림 3-2-12. 라이다 포인트 클라우드로부터 구축된 2019년과 2022년에 구축된 DSM (각각 상, 중). 3년간 지형의 높이 차이 (하). 붉은색일수록 2019년에 비해 지형의 높이가 낮아진 경우를 뜻함

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

제 3 절 북극 빙권요소 위성 관측 검보정을 위한 현장조사, 자료 수집 및 분석

1. 현장조사: 해수 광 특성

○ 북극 해수 채수 및 광 특성 조사 (2020)

- 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))

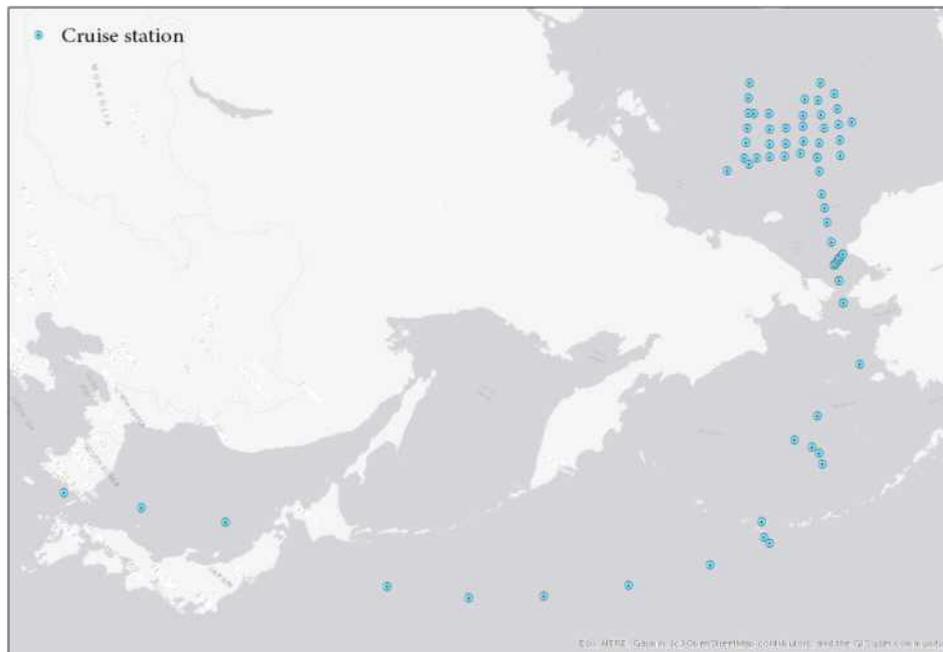


그림 3-3-1. 2020년도 아라온호 하계 북극해 항해 중 해수 시료 샘플링 위치

○ 북극 해수 채수 및 광 특성 조사 (2021)

- 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.

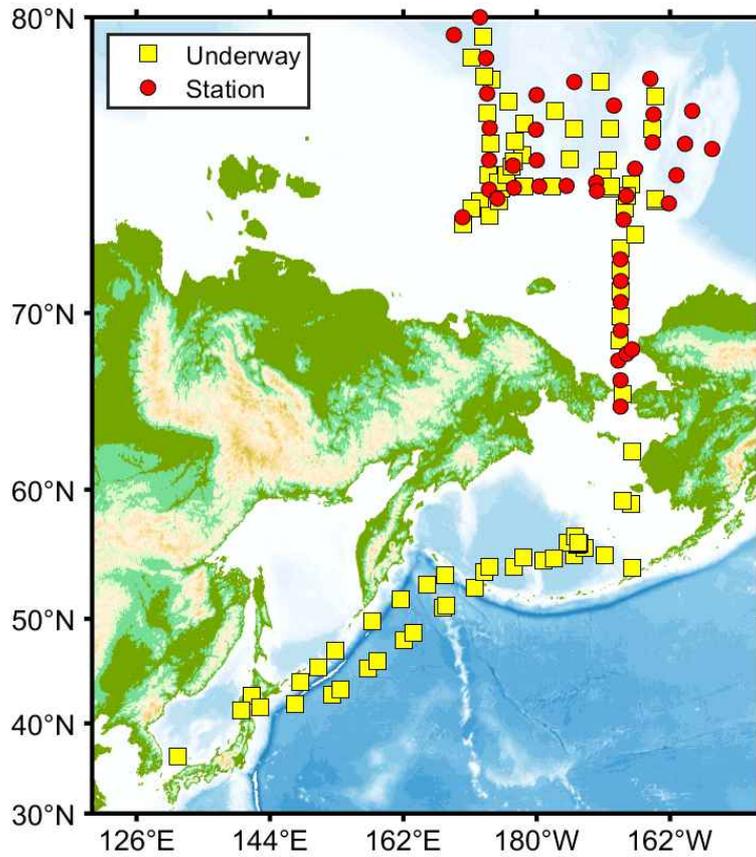


그림 3-3-2. 아라온호 하계 북극해 항로 상 해수 시료 샘플링 위치

○ 북극 해수 채수 및 광 특성 조사 (2022)

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

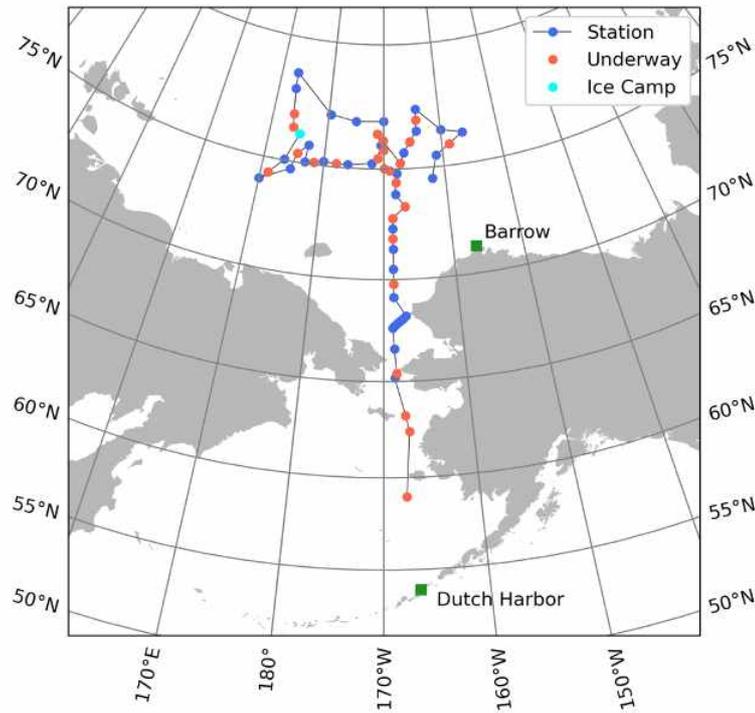


그림 3-3-3. 아라운 북극 2항차 경로와 해수 샘플 취득 위치

- 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 1,000 ml씩 세 개로 나누어 각각 클로로필-a, 부유 퇴적물 (SS), 유색용존유기물 (CDOM)에 의한 흡광량을 측정하기 위해 필터링과 화학처리를 거침.
- 흡광 특성은 250~800 nm의 분광범위에서 측정되었으며, 다음은 연구정점 10번에서 취득한 샘플의 흡광 특성 분석 결과를 나타냄.

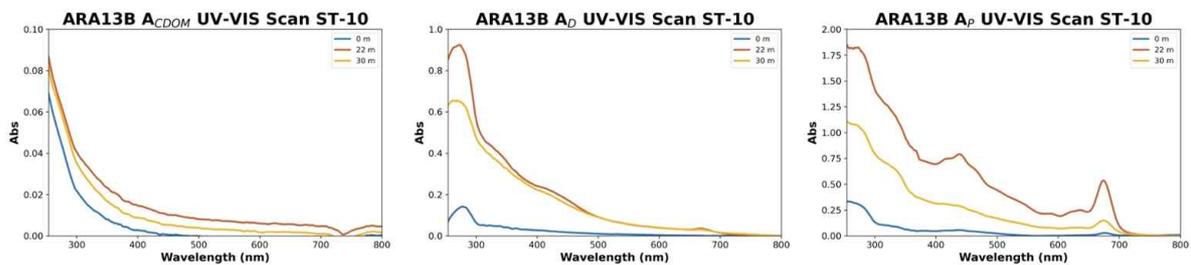


그림 3-3-4. 연구정점 10번에서 취득한 해수 샘플의 흡광 특성. (좌) 입자 (중) 쇄설물 (우) 유색용존유기물

- 또한 연구정점에서 일사량이 5 W/m^2 이상인 경우에 분광복사계 TriOS를 이용하여

320~950 nm 분광범위에서의 수중 복사 조도와 상하방 복사 휘도를 측정함. 해수 표층부터 유광층 경계 깊이까지 분당 30 m의 속도로 내려가며 수직적 변화를 연속적으로 측정함.

- 다음은 연구정점 23번에서 취득한 TriOS의 깊이별 계측치를 나타냄.

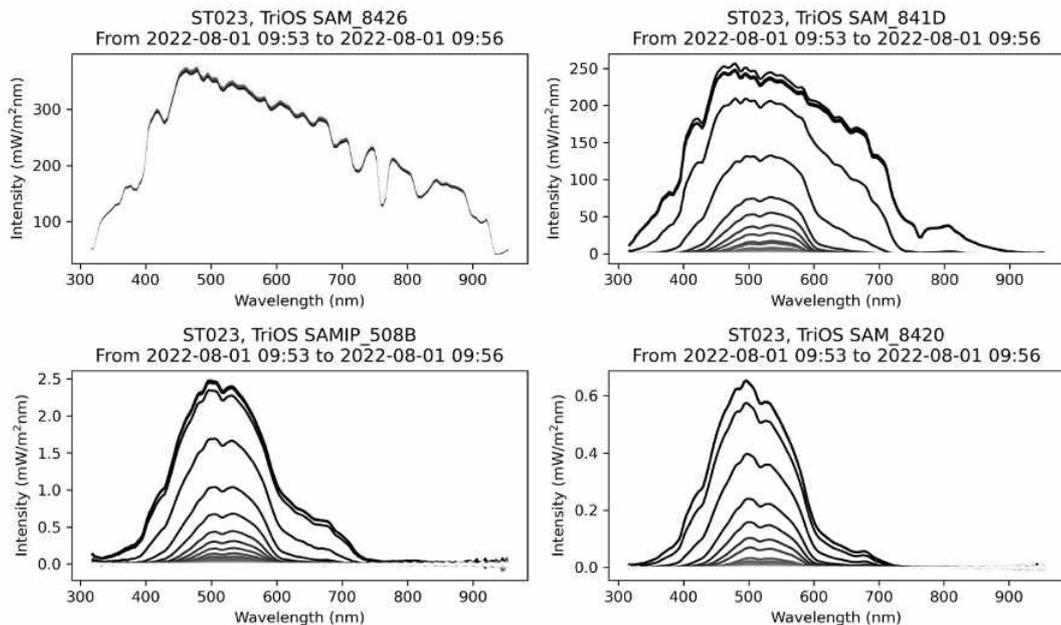


그림 3-3-5. 연구정점 23번에서의 TriOS 관측 결과

2. 현장조사: 해빙 이동

○ 해빙 트래커 자료 (2020)

- 해빙이 이동에 대한 정보는 동일지역에서 지리적으로 중첩 획득된 시계열 원격탐사 자료의 분석을 통해 산출됨.
- 원격탐사 자료를 기반으로 산출된 북극해 해빙 이동 벡터는 동시기에 해빙에 설치된 Ice-Tethered Profiler (ITP) 등과 같은 해빙 부이의 이동 궤적과 비교함으로써 정확도 평가 및 검증이 가능함(Hyun and Kim, 2017).
- 영상레이더 기반 해빙 이동 추적 알고리즘의 결과 검증을 위해서 해빙 부이(트래커) 자료의 확보는 필수적이거나 2020년도에 계획되어 있던 현장 조사가 모두 취소되어 부득이하게 2019년에 확보되었던 과거 해빙 트래커 자료를 분석하고 간접적 결과 검증으로 기존 계획

에서 변경함.

- 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 설치함.



그림 3-3-6. 북극해 해빙에 이동 추적을 위한 트래커 설치 모습

- 해빙 트래커는 저온에 파손되지 않는 나무로 제작된 프레임에 부착 후 해빙 표면에서 일정 높이 위에 설치하여 강설 시 위성신호 수신과 위치정보 전송을 위한 안테나가 눈에 덮이지 않도록 조치함.
- Rover01 트래커는 2019년 8월 12일부터 12월 10일까지 위치가 전송되었고, Rover02 트래커는 2019년 8월 12일부터 9월 28일까지 위치가 전송이 이루어짐.
- 해빙 트래커로부터 지속적으로 수신되는 이동 정보를 도시함으로써 이동 궤적을 파악할 수 있고, 시간 인터플레이션 처리를 통해 해빙 이동 벡터 산출 결과에 대한 검증이 가능함.

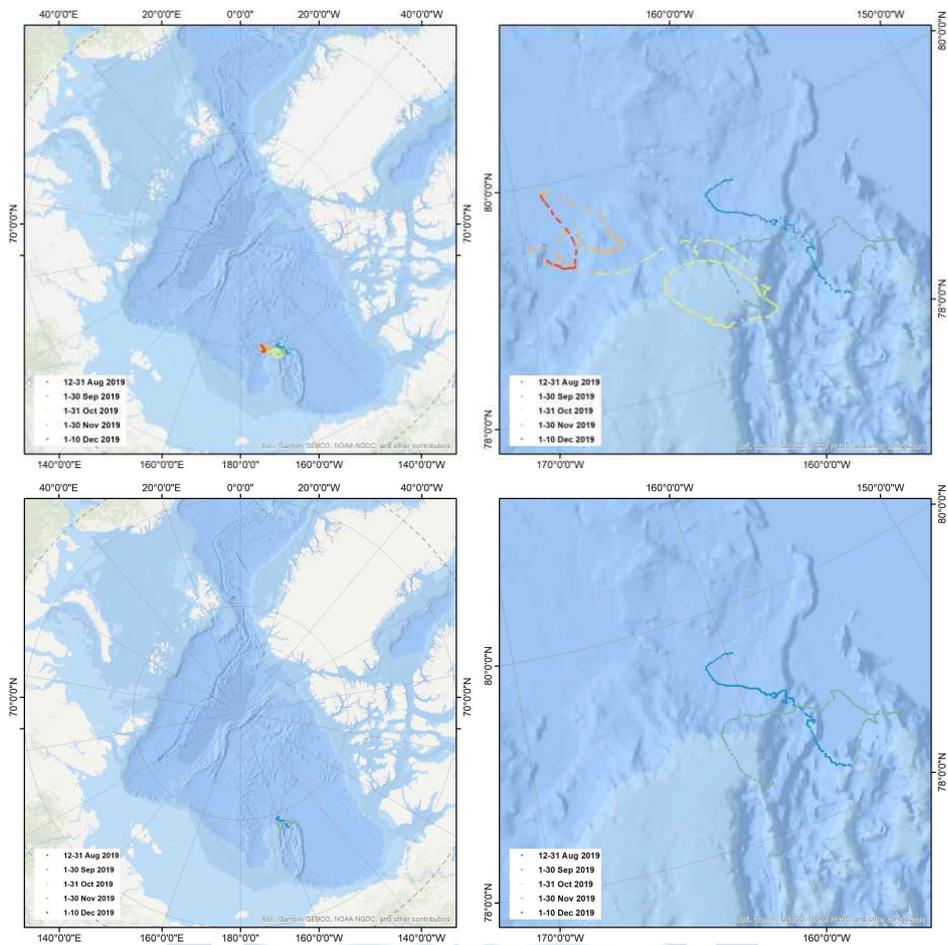


그림 3-3-7. 해빙 트래커 이동 추적 결과: (위) Rover01 이동 경로 기록, (아래) Rover02 이동 경로 기록

극지연구소

○ 해빙 트래커 자료 (2021)

- 코로나19 팬데믹으로 기 계획되었던 2021년 아라온호 북극 여름항차 해빙캠프 취소에 따른 신규 자료 획득 불가. 따라서 국제공동연구를 통해 확보한 MOSAiC Distributed Network (DN) 부이 자료를 이용한 대체연구 수행.
- 아래 그림은 MOSAiC 중심관측소인 RV Polarstern 주변의 반경 설정에 따른 Surface Velocity Profiler (SVP) 부이의 개수를 날짜별로 나타냄.

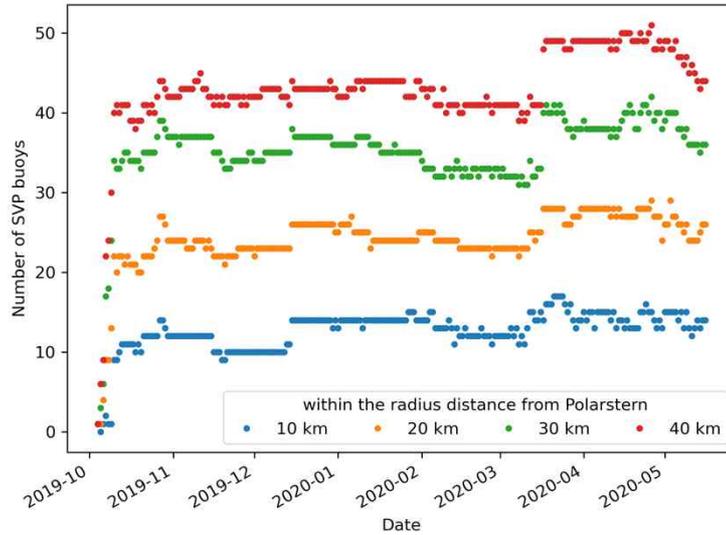


그림 3-3-8. 중심관측소 주변 반경 설정에 따른 날짜별 SVP 부이 개수

- 각 부이들의 위치를 추적하고 시간에 따른 변화를 분석하면 부이가 위치한 해빙의 발산, 수렴, 전단 등의 변형을 알 수 있음. 다음 그림은 이를 위한 불규칙 삼각망(TIN)의 구성을 MOSAiC 초기인 10월 15일과 중후기인 4월 15일에 대해 나타냄. 두 그림 모두에서 RV Polarstern이 중심으로 두고 반경 50 km 내에 위치한 부이들의 상태적인 위치를 도시함.

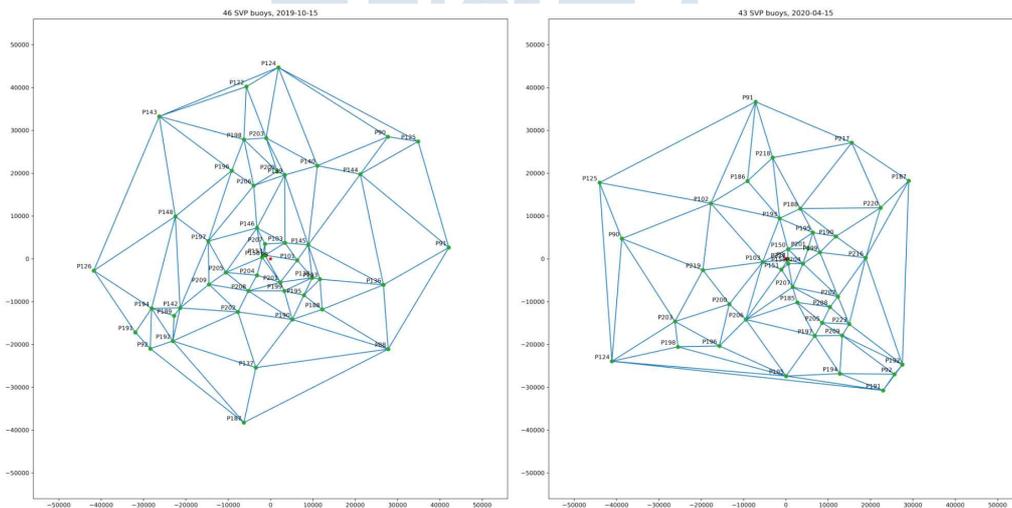


그림 3-3-9. 6개월간의 부이 삼각망의 변화

- 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 알 수 있음.

- 위성영상으로부터의 해빙 위치 추적을 격자화하고 이를 시계열적으로 분석하면 해빙의 변형을 추적할 수 있는 것이나, 측정간의 간격이 불규칙한 부이망과의 비교, 검증에 대한 연구가 향후 수행되어야 할 것으로 판단됨.

○ 해빙 트래커 자료 (2022)

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

표 3-3-1. 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, 위성영상의 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.



그림 3-3-10. 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 2일간은 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.

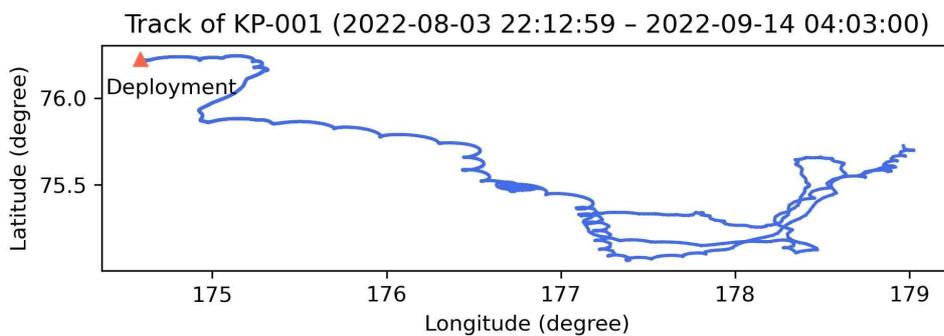


그림 3-3-11. 해빙캠프를 수행한 부빙에 설치한 KP-001 트래커의 표류 경로

3. 현장조사: 해빙 강도

○ 과거 해빙 코어 자료 (2020)

- 영상레이더 기반 해빙 굽힘강도 추정 알고리즘의 결과 검증을 위해서 해빙 코어 자료의

확보는 필수적이거나 코로나19 팬데믹으로 2020년도에 계획되어 있던 현장 조사가 모두 취소되어 부득이하게 2019년에 확보되었던 과거 해빙 코어 자료를 분석하고 해빙 두께를 이용하여 간접적 결과 검증으로 기존 계획에서 변경함.

- 2019년 8월 14일과 17일 두 번에 걸쳐 진행된 해빙캠프에서 총 5개의 해빙 코어 자료들을 확보함. 비교적 얇은 얼음에서 3개, 두꺼운 얼음에서 2개의 해빙 코어 자료를 확보함.
- 확보된 해빙 코어 자료들의 평균 두께는 81.5~144.5 cm, 평균 염도 (bulk salinity)는 0.538~1.1440 ppt, 온도는 1.06~-1.64 °C, 눈 두께는 6.0~8.3 cm의 분포를 가짐.
- 전반적으로 평균 염도는 매우 낮고 온도는 녹는점과 비슷하게 매우 높으며 여름을 버티고 8월 중순인 여름철에 확보된 해빙임을 고려하였을 때 일반적인 특징임.



표 3-3-2. 확보된 과거 해빙 코어 목록

Date: 2019/08/14 Alaska time					Date: 2019/08/17					Date: 2019/08/17				
Time: 14:19					Time: 10:36					Time: 11:37				
Longitude: 161.33599					Longitude: 163.6711167					Longitude: 163.6380472				
Latitude: 79.49332					Latitude: 78.45011389					Latitude: 78.45090556				
IC1 ICE01	Piece #	Thickn ess	Salinity	Temp.	IC2 ICE01	Piece #	Depth	Salinity	Temp.	IC2 ICE02	Piece #	Depth	Salinity	Temp.
	snow	6				snow	8.3				snow	6.5		
	1	10	0.2	-0.9		1	10	0.279			1	10	0.257	-1.0
	2	10	0.2	-1.1		2	10	0.227	-0.9		2	10	0.204	-1.0
	3	10	0.3	-1.0		3	10	0.194	-1.1		3	10	0.207	-1.0
	4	10	0.6	-1.2		4	10	0.353	-1.2		4	10	0.418	-1.0
	5	10	0.5	-1.4		5	10	0.608	-1.2		5	10	0.695	-1.1
	6	10	0.6	-1.4		6	10	0.85	-1.4		6	10	1.014	-1.2
	7	10	1.1	-1.5		7	10	0.988	-1.6		7	10	1.268	-1.4
8	11.5	0.8	-1.7	8	10	1.53	-1.7	8	10	1.373	-1.4			
IC1 ICE02	Piece #	Depth	Salinity	Temp.	9	10		-1.9	9	10	1.208	-1.3		
	snow	6.5			10	10	2.097	-1.9	10	10	1.247	-1.4		
	1	10	0.2	-0.7	11	10	2.216	-1.9	11	10	1.107	-1.7		
	2	10	0.2	-0.9	12	10	2.246	-2.0	12	10	1.186	-1.5		
	3	10	0.3	-0.9	13	10	2.531	-2.1	13	10	0.672	-1.4		
	4	10	0.6	-1.0	14	10	3.165	-2.1	14	10		-1.8		
	5	10	0.4	-1.0	15	4.5	2.869	-2.0	15	4.5	1.13	-1.7		
	6	10	0.7	-1.1										
	7	10	1.7	-1.4										
8	12.8	1.2	-1.5											
IC1 ICE03	Piece #	Depth	Salinity	Temp.										
	snow	6.6												
	1	10	0.1	-0.9										
	2	10	0.1	-1.0										
	3	10	0.3	-1.0										
	4	10	0.5	-1.0										
	5	10	0.7	-1.1										
	6	10	0.5	-1.2										
	7	10	1.2	-1.3										
	8	9	1.5	-1.5										
9	5.5	1.1	-1.5											

- 보통 두께에 따라 대기과 해수 온도에 민감하게 반응하지만 다른 두 지역에서 확보된 해빙 코어임에도 매우 비슷한 온도 프로파일을 보이는 것을 확인함.
- 확보된 모든 코어에서 해빙 깊이에 따라 직선으로 감소하는 경향성이 있으며 가장 두꺼운 해빙 코어 1개를 뺀 나머지 해빙 코어는 아랫면 온도가 녹는점 $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 보다 높음 (코어 하단 평균 온도 = $-1.68 \pm 0.20\text{ }^{\circ}\text{C}$). 모두 비슷한 온도 프로파일을 보이기 때문에 얇은 얼음이 두꺼운 얼음보다 평균 온도가 높음.
- 표면 염분은 약 0 ppt에서 깊이에 따라 증가하는 경향성을 보임. Brine drainage 와 높은 기온 (표면온도) 때문에 표면에서 염분이 가라앉은 것으로 보임.

- IC1에서 확보된 해빙코어들은 반경 40m 좁은 지역에서 확보되었으며 차이가 거의 없음.
- IC2에서 확보된 해빙코어는 각각 헬기로 이동하여 거리가 먼 지역에서 확보되었으며 0~90cm까지는 비슷한 경향성을 보이지만 100cm 이상에서는 큰 차이를 보이기 때문에 여름철에 확보된 해빙 코어들의 표면 특성만을 활용하여 해빙의 일반적인 경향성을 유추하기에는 어려운 상황임.

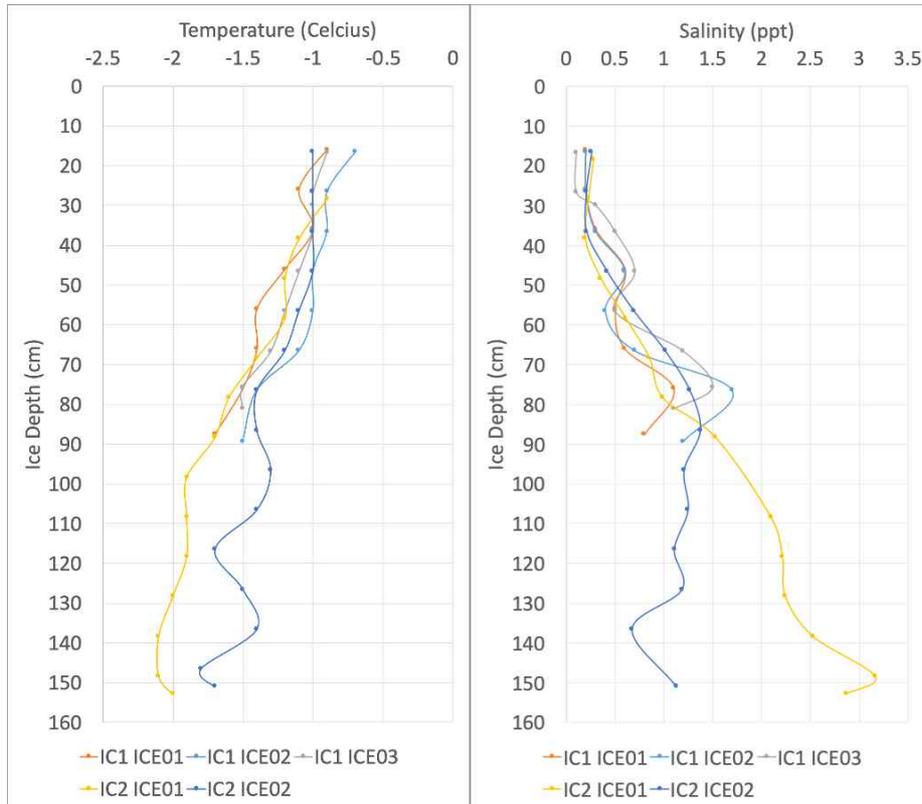


그림 3-3-12. 해빙 코어 깊이별 온도 및 염도 프로파일

- 결론적으로 겨울철 해빙 코어 자료를 바탕으로 기존 해빙 강도 알고리즘 검증에 여름철에 확보된 해빙 코어 자료를 활용하기엔 어려움이 있음. 예를 들어 Kovacs (1996)은 해빙 평균 염도와 해빙 두께 사이에 관계가 있음을 제안하였으며 이 알고리즘에 따르면 2019년에 확보된 해빙 코어들은 평균 약 4 ppt 이상의 값을 갖고 있어야 함.
- 따라서 본 연구에서 활용된 해빙 강도 알고리즘 검증을 위해서는 얼음이 얼기 시작하는 시기에서 겨울철 사이에 확보된 해빙 코어 자료가 필요함.

○ 해빙 코어 자료 (2021)

- 코로나19 팬데믹으로 인하여 2021년도에도 북극항해에 해빙캠프가 포함되지 않았음. 새로운 해빙 코어를 해빙캠프를 통해 확보하지 못함.
- 대안으로 타기관에서 2021년 5월에 진행된 북극해 현장조사 정보를 전달 받았으며 현장조사가 진행된 좌표는 아래 표와 같음.

표 3-3-3. 해빙 코어링 위치

날짜	위도	경도
2021/05/07	73.1308	80.05113
2021/05/11	73.88283	83.48533
2021/05/12~16	74 53.659	83 29.192
	73 54.403	83 33.225
	73 54.938	83 36.172
	73 52.551	84 55.637
	73 52.960	84 57.878
	73 53.596	84 56.424
	73 53.659	83 29.192
	73 54.403	83 33.225
	73 54.938	83 36.172
	73 54.948	83 36.163
	73 54.501	84 45.132
73 54.087	84 46.993	
73 53.170	84 50.657	

- 또한 현장조사 기간에 맞춰 다목적실용위성5호 촬영을 요청 및 자료 확보하였음.

○ 해빙 코어 자료 (2022)

- 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 용빙호가 많은 조건을 가지고 있었기 때문에 용빙호와의 거리와 해빙 위 적설을 고려하여 해빙 코어의 위치를 선정하였으며 시추 위치는 아래의 그림과 같음.

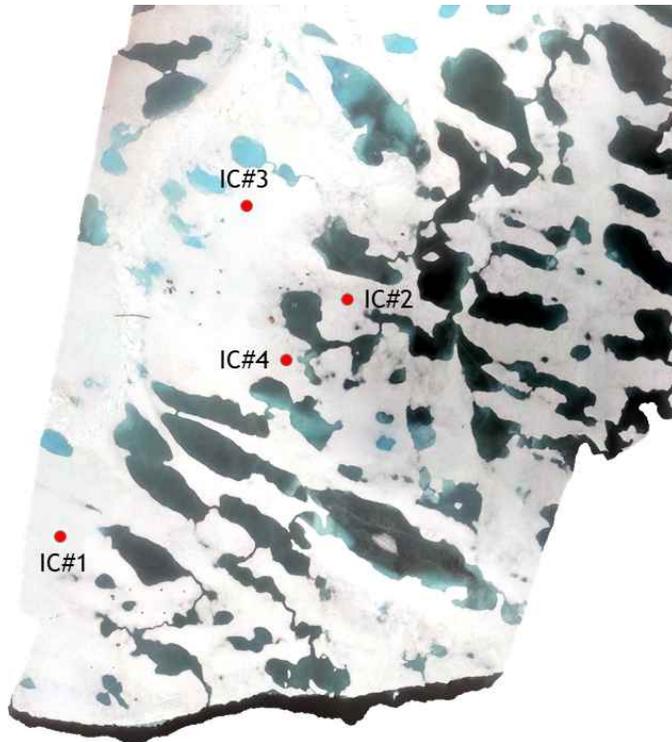


그림 3-3-13. 해빙 캠프 중 해빙 코어 수집 위치

- 사용한 ice corer는 직경 10 cm의 장비로 전동 드릴을 활용하여 해빙을 시추하였으며 톱을 이용하여 20 cm 간격으로 얼음을 절단하여 해빙 코어의 연직 구조를 관측함.
- 절단된 해빙 코어는 5 cm 길이로 드릴링 하여 코어 중심 온도를 측정 후 연직 깊이별로 코어를 분류하여 수집하였으며 완전히 해동된 후 절단된 코어의 염분을 psu 단위로 측정함.
- 염분 연직 분포의 경우 해빙 아래로 갈수록 염분이 증가하였으며 해당 연직구조는 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.

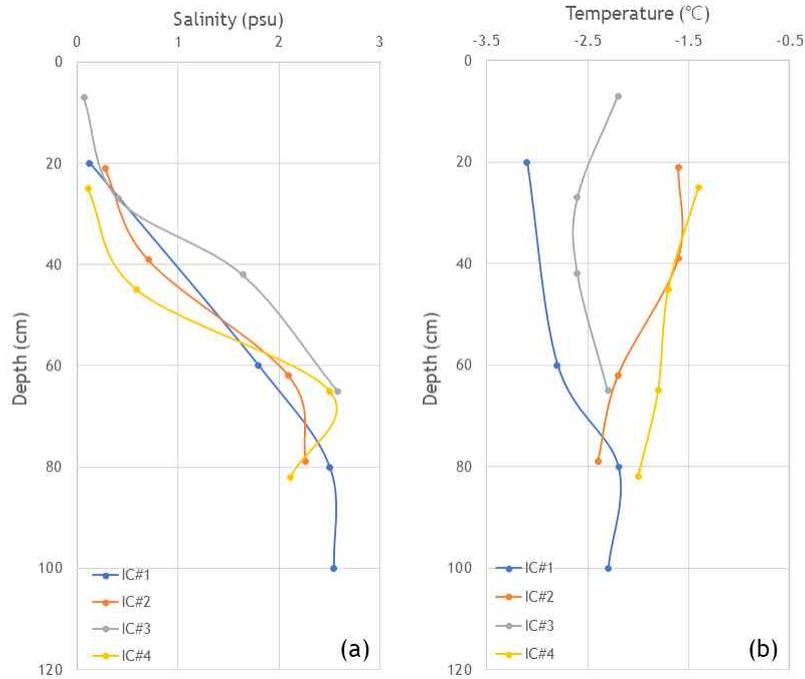


그림 3-3-14. 수집한 해빙 코어의 온도(a)와 염분(b)의 연직 분포

○ 해빙 두께 정보를 이용한 간접적 결과 검증

- 해빙 굽힘강도 검증은 해빙 코어 확보를 통한 해빙 염도와 온도 정보가 필수이나 코로나 19 팬데믹으로 인하여 북극 현장 조사 (해빙 캠프) 가 취소됨에 따라 해빙 코어 자료 확보가 불가능함.
- 일반적으로 물질의 두께와 강도가 비례하기 때문에 북극해 현장 조사가 진행된 지역의 해빙 두께 정보를 활용하여 강도를 추정 및 검증자료로 활용하고자 함.
- CS2SMOS (CryoSat-SMOS Merged Sea Ice Thickness) 자료는 레이더고도계인 CryoSat-2 자료를 이용하여 제작된 두께와 수동마이크로파 위성인 SMOS 자료를 이용하여 제작된 두께 자료를 각 위성들의 한계를 보완하기 위해 합병한 산출물임.
- CS2SMOS는 10월부터 4월까지, 북극의 결빙시기 자료만 제공하기 때문에 2018년 10월 15일 자료를 사용함.
- 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 추정함.
- 8월과 10월의 시간 차이로 인하여 보퍼트해 지역의 해빙 면적의 차이가 크며 해상도 차이 (100~500m vs. 25 km)로 인하여 직접적인 비교가 불가능하나 붉은색 동그라미 부분의 해빙 강도가 약한 것을 동시에 나타내고 전반적으로 동쪽 방향으로 해빙 강도가 증가하는

경향성을 보이는 것을 확인함.

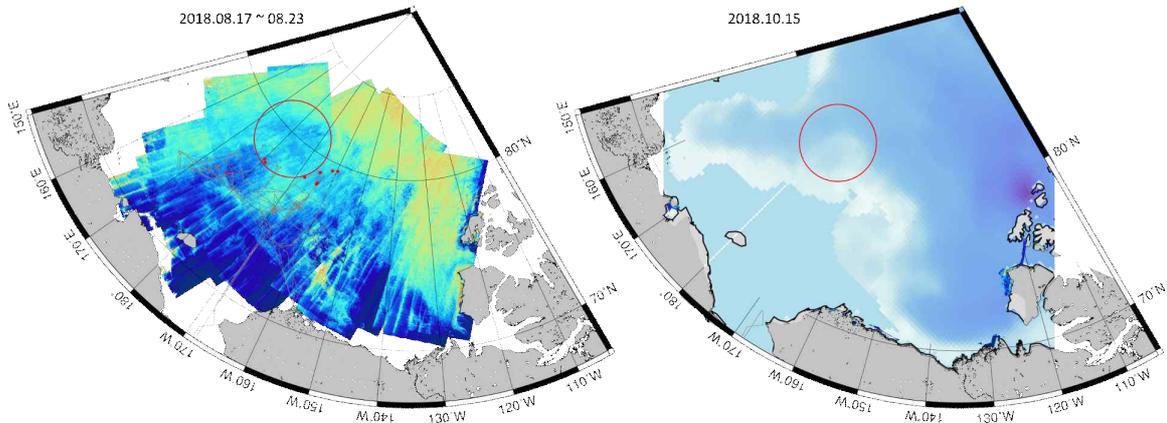


그림 3-3-15. 좌: SAR를 이용한 해빙 굵힘강도. 우: CS2SMOS두께를 이용한 해빙 굵힘강도

4. 현장조사: 동토

- 동토 현장조사 지역 사전조사를 위한 원격탐사 자료 수집
 - 다년간 동토층 변화 탐지를 위한 연구 사이트 결정
 - 알래스카 카운실 지역의 경우 극지연구소의 대표적 동토 모니터링 사이트로 상시 관측 자료등이 공동 활용되어질 수 있음
 - 구름이 없는 기 구축된 여름철 위성 및 무인기 영상을 수집, 방사보정, 기하보정 등 기본 전처리 작업 수행
 - 다음 그림은 알래스카 카운실 지역의 50cm급 Pleiades 스트레오 위성영상, 7cm급 무인기 초분광영상, 30m급 위성 초분광영상의 시공간적 분포를 비교함.

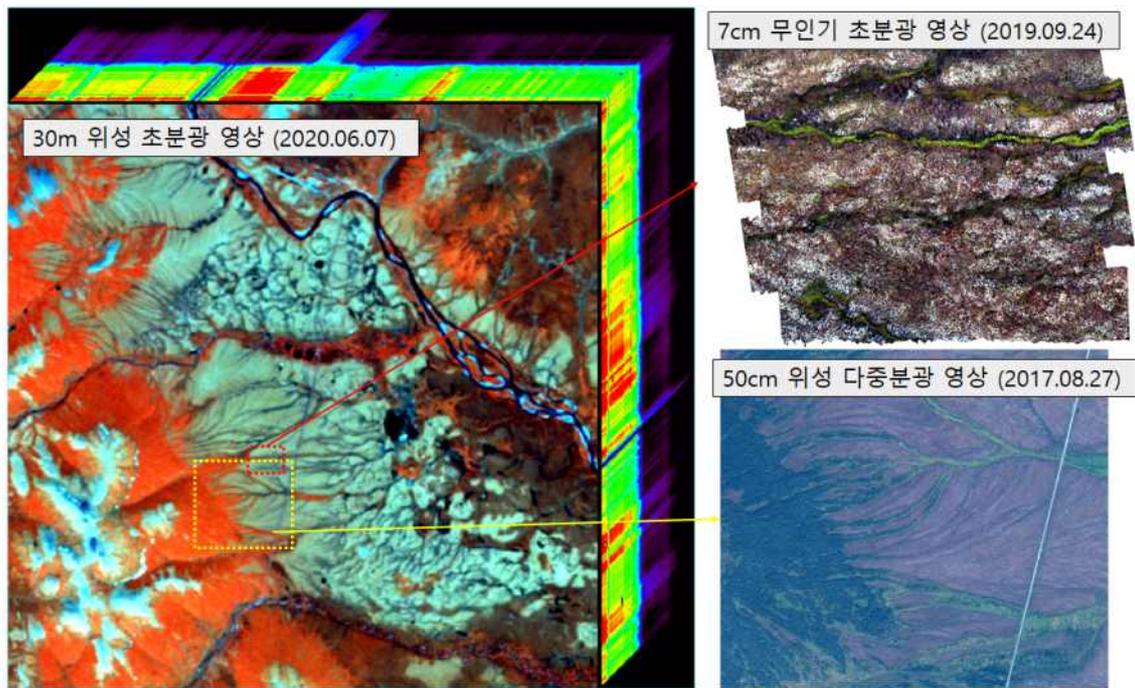


그림 3-3-16. 알래스카 카운실 지역의 원격탐사영상 자료

- 코로나19 팬데믹으로 인해 2021년 계획되었던 알래스카 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.
- 다음 그림은 국립농업과학원에서 무인기를 이용해 동시 획득한 RGB, 초분광, 라이다 영상으로 위의 통신 제약조건하에서 획득, 처리한 결과임.

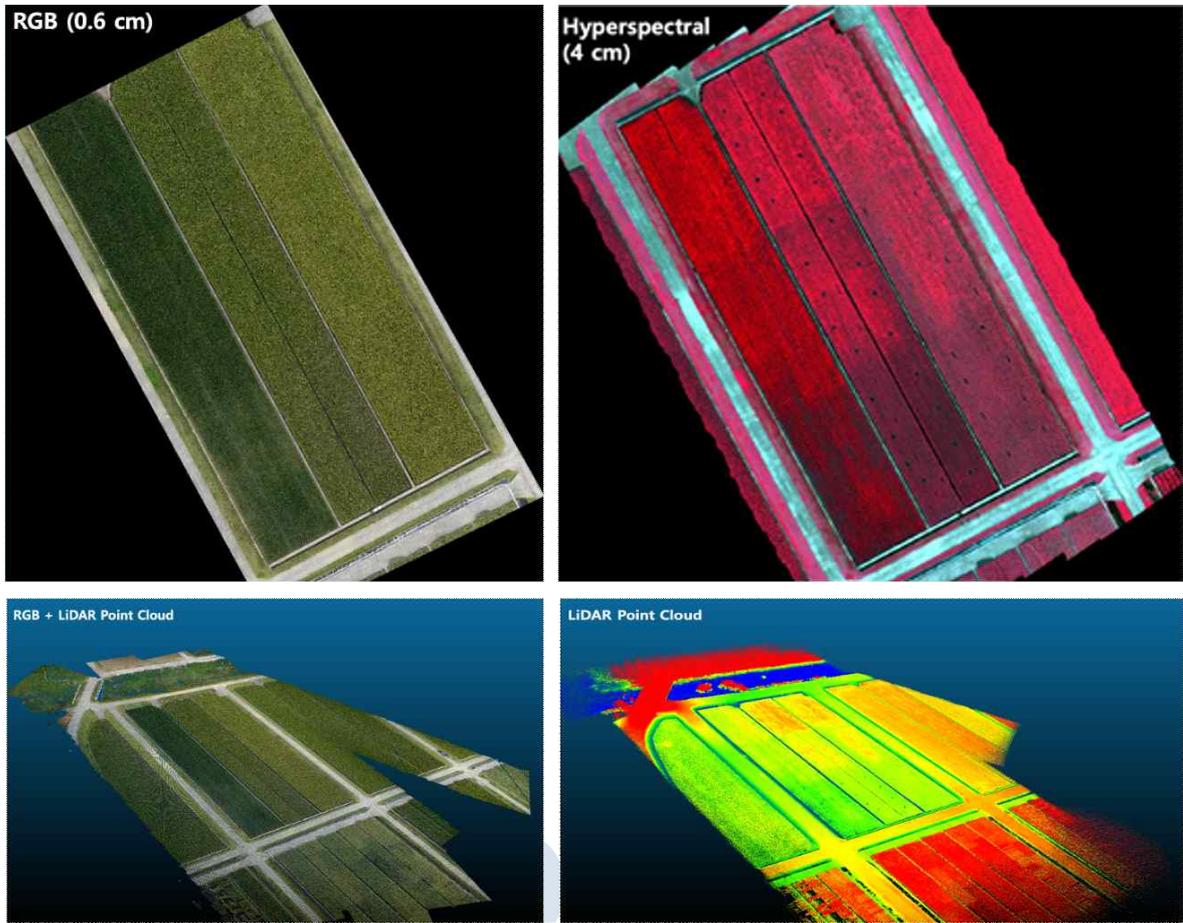


그림 3-3-17. 무인기를 통해 동시 획득한 RGB (0.6 cm), 초분광 (4 cm), 라이다 포인트클라우드, RGB-라이다 합성

극지연구소

- 알래스카 카운실 지역에 대해 PRISMA 초분광위성영상을 7월부터 9월까지 3개월간 촬영 요청을 하였으나, 긴 재방문 주기 및 날씨 문제로 영상 촬영에 실패하였음. 다음은 촬영 요청 및 실패 로그를 나타냄.

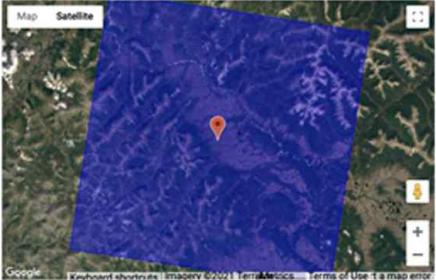
#1766 COMPLETED		DAILY ACQUIRABLE QUOTA: 1	
VALIDITY TIME RANGE			
Start epoch: 20. 7. 30 12:00 PM	Stop epoch: 20. 8. 27 12:00 PM		
AREA OF INTEREST			
Spot image: 30 x 30 km	Quota: 1		
Longitude [deg]	Latitude [deg]	Cloud Coverage [%]	
-163.7120330	64.8442170	10.00	
LookAngle Min	LookAngle Max	MinSunZenithAngle	MaxSunZenithAngle
-21.0000000	21.0000000	0.0000000	70.0000000
Council: AK, USA			
Contextual Processing Order			
None			
<input type="checkbox"/> Use GCP			
MAP VIEWER			
			
History			
7/29/20 12:14 AM			
Order 1766 SUBMITTED.			
7/30/20 1:45 PM			
PR 4742 ACCEPTED. null			
7/30/20 5:25 PM			
PR 4742 ACCEPTED. Request not geometrically feasible			
8/3/20 5:05 PM			
PR 4742 ACCEPTED. Request not plannable for bad weather forecast			
8/4/20 3:59 PM			
PR 4742 ACCEPTED. Request not geometrically feasible			
8/9/20 5:01 PM			
PR 4742 ACCEPTED. Request not plannable for bad weather forecast			
8/10/20 3:15 PM			
PR 4742 ACCEPTED. Request not geometrically feasible			
8/15/20 9:50 PM			
PR 4742 ACCEPTED. Request not plannable for bad weather forecast			
8/16/20 3:09 PM			
PR 4742 ACCEPTED. Request not geometrically feasible			
8/21/20 3:33 PM			
PR 4742 ACCEPTED. Request not plannable for bad weather forecast			
8/22/20 3:22 PM			
PR 4742 ACCEPTED. Request not geometrically feasible			
8/26/20 3:34 PM			
PR 4742 REJECTED. Request not geometrically feasible			
8/26/20 3:34 PM			
Order 1766 COMPLETED.			

그림 3-3-18. PRISMA 초분광 위성영상 촬영 시도 및 실패에 대한 로그

- 알래스카 카운실 지역 무인기를 이용한 다중센서 자료
 - 초분광, 라이다, 고해상도광학 영상 동시 획득

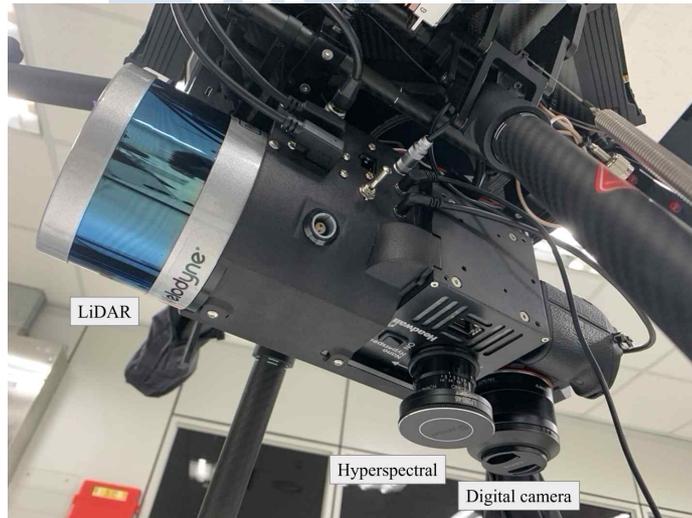


그림 3-3-19. 본 연구에서 사용된 다중센서 시스템

DJI MATRICE™ M600 Pro		Nano-Hyperspec®	
Diagonal wheelbase	1133mm	Wavelength range	400-1000 nm
Dimensions	1668 mm x 1518 mm x 727 mm with propellers, frame arms and GPS mount unfolded (including landing gear). 437 mm x 402 mm x 553 mm with propellers, frame arms and GPS mount folded (excluding landing gear)	Spatial bands	640
		Spectral bands	270
		Dispersion/pixel (nm/pixel)	2.2
		FWHM slit image	6 nm
Weight (with six TB47S batteries)	9.5 kg	Integrated 2 nd order filter	Yes
Max Takeoff Weight Recommended	15.5 kg	IR	2.5
Hovering Accuracy (P-GPS)	Vertical: ±0.5 m, Horizontal: ±1.5 m	Layout	Aberration-corrected concentric
Max Angular Velocity	Pitch: 300°/s, Yaw: 150°/s	Entrance slit width	20 µm
Max Pitch Angle	25 degrees	Camera technology	CMOS
Max wind resistance	8 m/s	Bit depth	12-bit
Max ascent speed	5 m/s	Maximum Achievable Frame Rate (Hz)	350
Max descent speed	3 m/s	Detector pixel pitch	7.4 µm
Max service ceiling above sea level	2170R propellers: 2500 m 219S propellers: 4500 m	Max Power (W)	13
Max speed	40 mph / 65 kph (no wind)	Storage capacity	480GB (~130 minutes at 100 fps)
Flight time	Depends on payload and flying conditions	Weight without lens, GPS (lb / kg)	1.2 / 0.5
Retractable landing gear	Standard	Operating Temperature	0°C to 50°C
Gimbal	Custom and stabilized for hyperspectral imaging	Nano-Hyperspec® <ul style="list-style-type: none"> Also available in sensor-only configurations 270 spectral bands 480GB on-board storage Max Frame Rate: 350Hz Small size, weight, power 	
Standard battery	4500mAh	<small>Maximum achievable frame rate is configuration dependent. Contact us to discuss your desired application.</small>	

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:	<ul style="list-style-type: none"> 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:	<ul style="list-style-type: none"> Laser Product Classification: Class 1 Eye-safe per IEC 60825-1:2007 & 2014 Wavelength: 903 nm
Mechanical/ Electrical/ Operational	<ul style="list-style-type: none"> 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°C³ Storage Temperature: -40°C to +105°C
Output:	<ul style="list-style-type: none"> 3D Lidar Data Points Generated: <ul style="list-style-type: none"> Single Return Mode: ~300,000 points per second Dual Return Mode: ~600,000 points per second 100 Mbps Ethernet Connection UDP Packets Contain: <ul style="list-style-type: none"> 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)



α7R III
42.4 MP
10 fps
ISO 32000

35mm lens



그림 3-3-20. 본 연구에서 사용된 무인기와 다중센서들의 스펙

- 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.

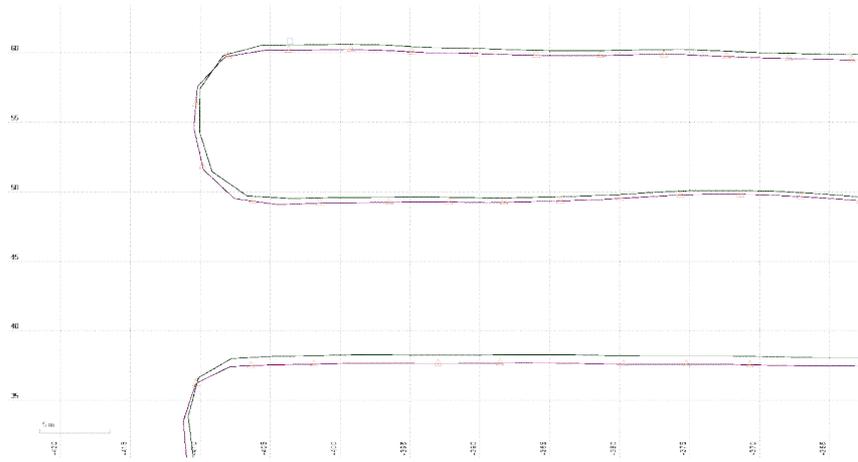


그림 3-3-21. PPK정보를 이용하지 않았을 경우 (핑크색), PPK정보를 이용하여 후보정한 경로 (초록색) 예시

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

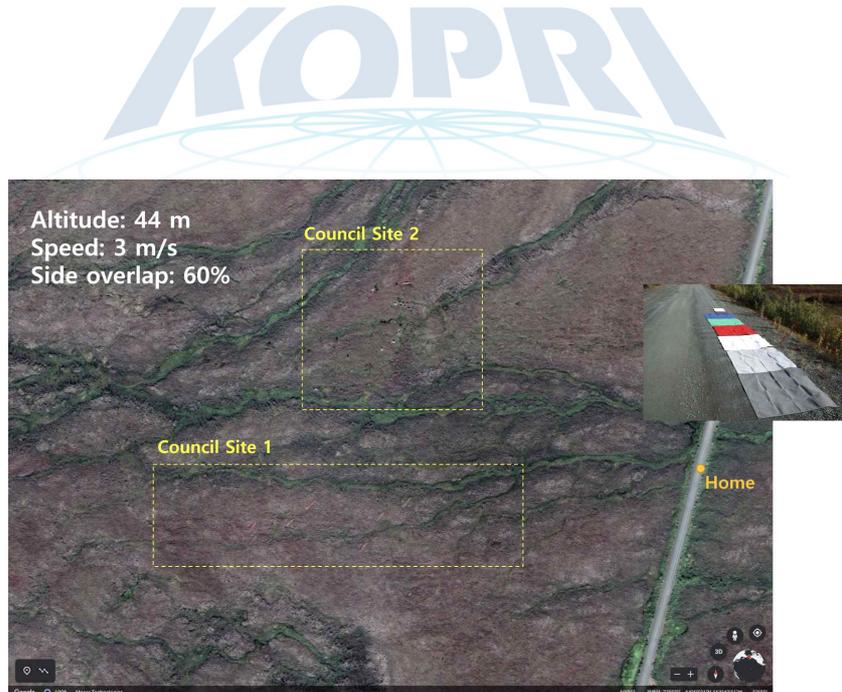


그림 3-3-22. 연구지역 개요 및 다중센서자료 획득 지역

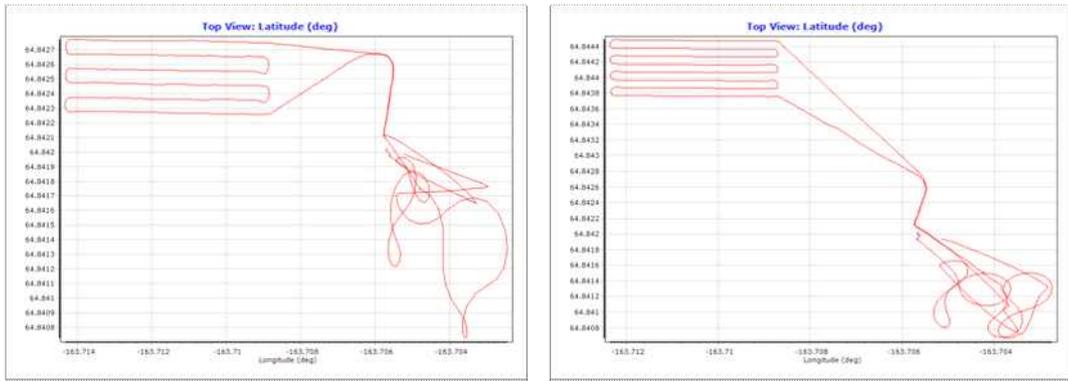


그림 3-3-23. Council Site 1과 2의 데이터 획득을 위한 비행 경로 (우측 하단은 GNSS/IMU 보정을 위한 비행)

- 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 차이에 의해 발생하는 줄무늬현상을 동시에 보정한 후, 분광반사 타겟의 분광반사율 정보를 이용한 밴드별 선형회귀모델을 통해 계산된 초분광영상의 분광반사율 변환 과정임.



그림 3-3-24. 파장별 분광타겟의 Radiance값(좌)과 선형회귀모델의 결정계수(우)

- 지표 기준 고도 약 44 m 높이에서 획득된 라이다 포인트 클라우드는 1 m²당 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.

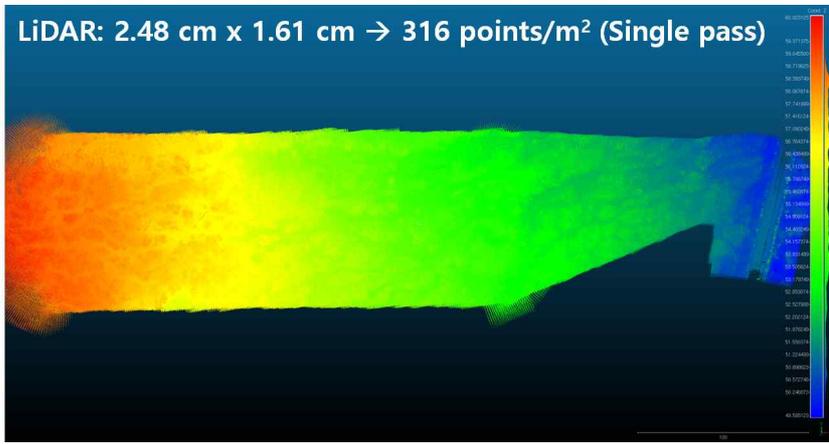


그림 3-3-25. Council Site 1의 라이다 포인트 클라우드

RGB mosaic: 0.6 cm GSD



그림 3-3-26. Council Site 1의 고해상도 RGB 모자이크 영상

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

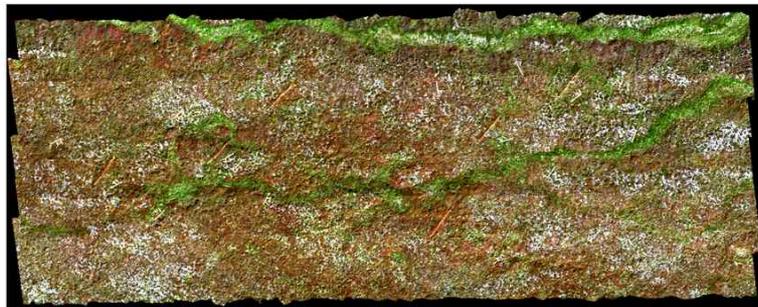


그림 3-3-27. Council Site 1의 초분광 모자이크 영상

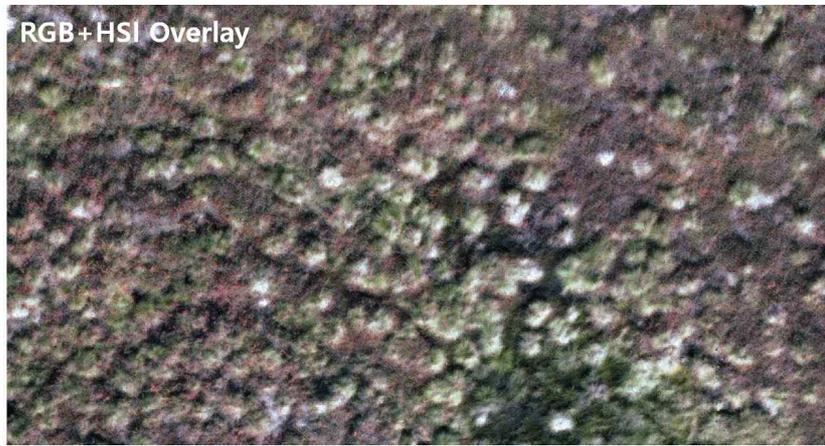


그림 3-3-28. RGB영상과 초분광영상의 기하학적 정합 확인

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



그림 3-3-29. 지상에서 획득한 좌표, 근접 사진(우)과 무인기에서 얻은 영상의 비교(좌)

- 열카르스트 분포 지역 고해상도 광학 원격탐사 시계열 데이터셋 구축
 - 영구 동토의 지반 내 용빙은 활동층(active layer) 깊이 증가, 지반 붕괴와 변형을 발생시키고, 이로부터 온실가스의 방출을 일으키는 열카르스트(thermocarst)가 발달됨.
 - 다양한 지형 형태로 나타나는 열카르스트의 생성과 진화 과정에 대한 정밀 모니터링을 위해 고해상도 광학 원격탐사 시계열 데이터셋 구축이 필요함
 - 구축을 위해 선정된 위성 자료는 Global Fiducials Library (GFL) 자료로 다수의 관측 지

점에 대해 과학 연구 목적의 주기적 장기 관측을 통해 획득되고 미국지질조사소(U.S. Geological Survey, USGS)에서 관리 중임.

- 열카르스트 지형의 정밀 탐지와 진화 과정 모니터링을 위해 알래스카 배로우(Barrow) 인근 열카르스트 분포 지역의 1 m 해상도의 고해상도 자료를 확보하고 이 중 구름이나 노이즈에 의해 품질이 저하된 영상을 제외한 후 총 10년 기간 동안 51건의 시계열 데이터셋을 구축함.

표 3-3-4. 열카르스트 분석을 위한 고해상도 시계열 위성 데이터셋 구축 내역

Year	Number of data
2005	4
2006	11
2007	3
2008	1
2009	3
2010	3
2011	1
2012	7
2013	12
2014	6
Total	51

- 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, 차년도의 분석 대상 열카르스트 지형 종류와 지역 확장을 위한 기반 마련함.

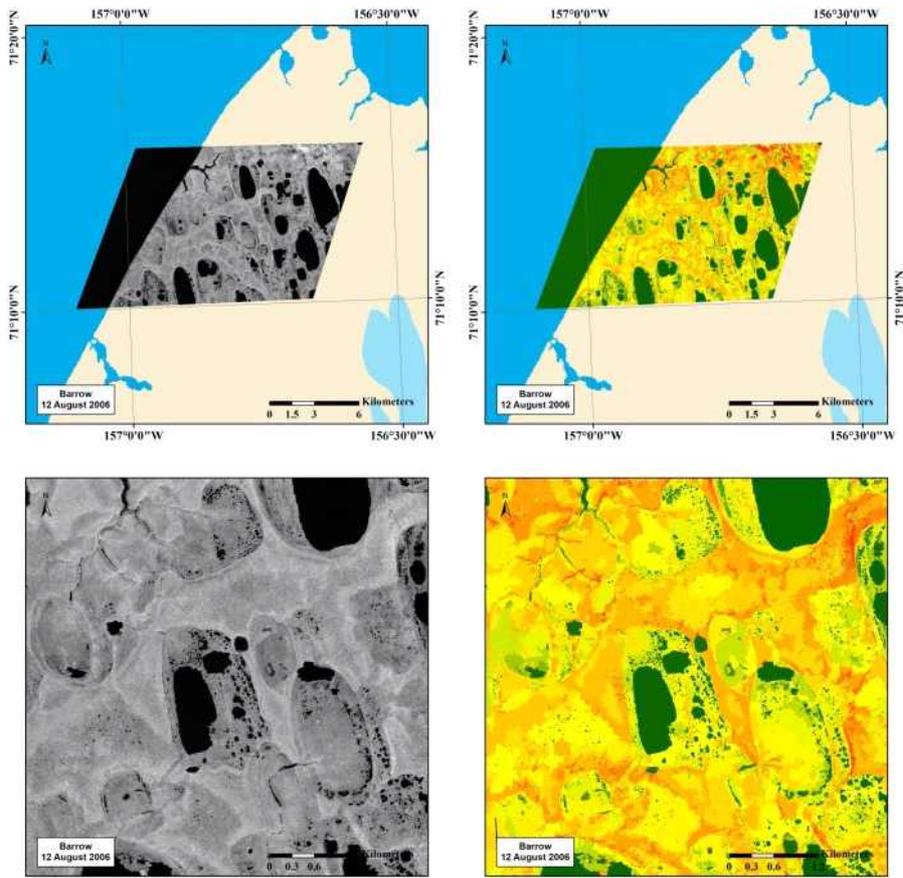


그림 3-3-30. 알래스카 배로우 인근 열카르스트 호수 분류를 위한 영상 객체 추출

극지연구소

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발 성과의 달성도 및 우수성

1. 연구수행의 적절성

표 4-1-1. 연구수행의 적절성

<p>1차년도 (2020년)</p>	<p>[북극 해빙 모니터링을 위한 다중위성 자료 분석 기반기술 개발]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 영상레이더 관측 기반 북극해 해빙 이동 벡터 산출 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 기존 알고리즘을 개선하여 이동 벡터 추출, 모자이킹, 수동형 마이크로파 관측 결과와의 검교정, 현장관측 GPS 트랙터를 이용한 결과 검증을 수행하고, 주기적인 산출물을 생성하는 기반기술을 개발 - (기존 한계 : 해외 유수의 해빙 연구 기관에서 제공하는 이동 벡터는 25 km급 저해상도로 이는 부빙간 상대적 운동(발산, 수렴, 보존)에 의한 해빙의 변형상(pressure ridge, lead)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 <ul style="list-style-type: none"> - 영상레이더 자료의 텍스처 분석을 기반으로 NIC 해빙 지도를 활용한 기계학습 알고리즘을 개발하고, 자동화된 처리과정을 통해 주기적인 산출물을 생성하는 기반기술을 개발 - (기존 한계 : 해빙의 유형은 생성환경 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 안전운항 지원을 위해 해빙 경계 위치가 실제 위치보다 보수적으로 표기되어 있음) ○ 수동형 원격탐사 기반 북극해 유년빙 두께 산출 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 넓은 공간 관측 범위를 통해 짧은 재관측 주기를 가지는 수동 마이크로파 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 맵핑에 1달의 시간이 소요) ○ 딥러닝을 이용한 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 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 수동 마이크로파 기반 관측 주기인 1일의 간극이 커서 종합적인 분석이 어려움) ○ SAR 위성을 활용한 북극 해빙 굽힘강도 산출 연구 (독자적 신기술) <ul style="list-style-type: none"> - 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 다중편파비(depolarization ratio, HV/HH)는 해빙 내 염분(brine)이나 공기방울(air bubble)에서 발생하는 다중산란(volume scattering)의 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 용빙호 특성화 연구 <ul style="list-style-type: none"> - 용빙호의 분포 면적과 단년빙/다년빙별 공간 분포 정량화 및 영상 기반 깊이 추정을 위해 북극해 해빙 표면 용빙호 분포 지역에 대한 고해상도 원격탐사 자료 구축과 객
-------------------------	--

	<p>체(object) 기반 형태 특성화 기반기술을 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - (기존 한계: 해빙 표면에 분포하는 용빙호(melt pond) 분포는 해빙 용융을 가속함으로써 해빙의 진화에 큰 영향을 미치나 주로 중-저해상도 광역 인공위성 데이터 기반의 분포 면적(fraction) 연구가 일반적임). <p>[동토 모니터링을 위한 위성 및 무인기 자료 분석 기반기술 개발]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 동토지역 분석자료 구축을 위한 관측 센서별 기하보정 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 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 선제되어야 함) ○ 동토 모니터링을 위한 다중센서자료 융합 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - data-to-data와 data-to-reference 방식의 정렬 기술을 개발. - (기존 한계 : 동일지역을 촬영한 이종의 다중 센서자료들을 통합하여 사용하기 위해 공간적 불일치를 잘 정렬해야 함) ○ 동토층의 지형 및 식생 변화 모니터링 <ul style="list-style-type: none"> - 초분광센서는 연속된 과장대역에서 분광 이미지를 획득할 수 있어 식생의 풍부도를 나타내는 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)를 비롯하여 다양한 원격탐사 지수 개발이 가능하므로, 이를 이용하여 동토층의 환경변화에 대한 정량적 관측 및 비교를 수행. <p>[북극 빙권요소 위성 관측 검보정을 위한 현장조사 및 자료 수집, 분석]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 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. <ul style="list-style-type: none"> - (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. <p>[국제공동연구를 통한 연구 역량 강화 (역사상 최대 국제공동북극관측연구에 한국 유일 참여)]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 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 수행 <ul style="list-style-type: none"> - (기존 한계: 겨울과 봄철의 북극 중앙의 관측이 절대적으로 부족하며, 이 계절의 해빙 조건이 매우 위험하여 최고 사양의 쇄빙연구선 조차 진입이 곤란하기 때문에 북극 기후의 프로세스에 대한 이해가 부족함). ○ MOSAiC 참여를 통해 원격탐사 분과에서 수행한 현장관측 자료 우선적 확보. <ul style="list-style-type: none"> - (기존 한계: 주요 빙권 요소 중 하나인 해빙의 결빙-성장-용빙-소멸의 연속적인 프로세스에 대한 현장관측 없이는 원격탐사 기반의 분석 결과를 검증할 수 없음)
2차년도 (2021년)	<p>[북극 해빙 특성에 적합한 다중위성자료 분석 기반기술 고도화 및 산출물 개발]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 영상레이더 기반 극지연 고유 해빙 이동 관측 기술 개선, MOSAiC 미션의 고해상도 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 <ul style="list-style-type: none"> - 수동형 마이크로파 자료의 밝기 온도 특성 분석 및 두께 추정 알고리즘 개발

	<ul style="list-style-type: none"> - (1차년도 대비: 얇은 해빙에 제한적으로 산출되던 수동형 마이크로파 관측 자료를 북극해 전 지역으로 확장할 수 있는 가능성 제시) ○ 딥러닝을 이용한 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 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) <ul style="list-style-type: none"> - 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 용빙호 특성화 연구 <ul style="list-style-type: none"> - 위성 비교 자료 구축 및 탐지 기술 개발 - (1차년도 대비: 고도계 측선 관측값과 기계학습을 이용한 새로운 용빙호 탐지 기술 개발) <p>[동토 모니터링을 위한 위성 및 무인기 자료 분석 기반기술 개발]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 동토 모니터링을 위한 다중센서자료 융합 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - data-to-data와 data-to-reference 방식의 정렬 개발 기술을 개선 - (1차년도 대비: 이중센서 자료 처리 기술 안정화) ○ 동토층의 지형 및 식생 변화 모니터링 <ul style="list-style-type: none"> - 코로나19로 인해 현장조사가 불가했던 상황을 타개하고자 극지환경을 재현할 수 있는 제약적 조건에서의 영상 촬영기술 시험 및 검증 <p>[북극 빙권요소 위성 관측 검보정을 위한 현장조사 및 자료 수집, 분석]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 해석위성자료의 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. <ul style="list-style-type: none"> - (1차년도 대비: 128정점의 증가된 해수샘플 생물-광 특성 분석) ○ 산업체가 수행했던 북극해빙 코어 자료를 추가로 확보하여 재분석 <p>[국제공동연구를 통한 연구 역량 강화]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ MOSAiC 참여를 통해 확보한 자료의 국제 공동 분석 수행 <ul style="list-style-type: none"> - (1차년도 대비: 해빙 이동의 추출 및 검증을 통한 국제공동논문 1편 출판)
3차년도 (2022년)	<p>[북극 해빙 특성의 정량화 및 시공간 변화 분석]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 해빙 변형 산출물 개발 및 시공간 변동 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 1~2차년도 기 개발물인 능동형 마이크로파 영상레이더 자료 기반의 해빙 이동 산출물을 기반으로 신규 변형 산출물 개발 완료. 현존 유일 타기관 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, 타기관이 배포하는 기존 해빙 유형 산출물에서의 비현실적인 불연속적 유형 변화 파악. - (1,2 차년도 연구와의 연속성: 기 개발 기술을 바탕으로 신규 활용 산출물의 개발 및 특성 분석) ○ 용빙호 시공간 변동 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 전북극해 용빙호 매핑 자료 5종 분석. 산출물간 적용 기법, 시공간 분포 양상, 정확도에 대한 비교 평가 완료. 부정확한 구름 필터링이 용빙호 비율에 있어 용빙기와 그 전후 시기에서 각각 과소추정과 과대추정을 야기. 자료 정확도와 장기 산출 연속성을 고려하여 변동성 파악을 위한 최적의 산출물 선정. - (1,2 차년도 연구와의 연속성: 기 개발 기술의 시공간 적용 범위 확장 테스트) ○ 동토 변화 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 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 비교를 수행. - (1,2 차년도 연구와의 연속성: 기 개발 기술의 실제 현장조사 적용 및 평가) <p>[북극 빙권요소 위성 관측 검보정을 위한 현장조사 및 자료 수집, 분석]</p>

<ul style="list-style-type: none"> ○ 해석위성자료의 신뢰성 확보를 위해 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역 약 61개의 정점 및 항해경로상에서 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, 항해경로상 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 예정. ○ 알래스카 카운실 지역 무인기 LiDAR, 초분광, RGB 영상 및 식생 레이블을 위한 현장 사진 획득 <p>- (1,2 차년도 코로나19로 인한 현장활동 제약에서 벗어나 당초 목표한 현장실험 수행)</p> <p>[국제공동연구를 통한 연구 역량 강화]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 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 진행중 (1,2 차년도 국제협력관계의 지속 및 연구적 확장)

2. 연구개발 목표 달성도

가. 연차별 목표 대비 달성도

표 4-1-2. 연차별 목표 대비 달성도

구분	연구목표 달성내용				계획대비 연구실적 달성율 (%) (B)
	세부연구 목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 (2020)	1-1. 빙권 구성요소 특성에 적합한 다중위성 자료 분석 기술 개발	1-1-1. 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류를 위한 자료 구축 및 자료 산출을 위한 원형 알고리즘 개발	0.68	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sentinel-1 기반 추출 영상텍스처와 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
		1-1-2. 수동형 마이크로파 원격탐사 기반 북극 해빙 두께 산출을 위한 자료 구축 및 자료 산출을 위한 원형 알고리즘 개발		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 해빙 두께 산출 알고리즘 개발을 위한 자료 구축 완료 AMSR2(수동형): 2012.07.~2019.12. CryoSat-2 (능동형): 2015.10.~2019.12. ICESat-2 (능동형): 2018.10.~2020.03. ECMWF 재분석장: 2012.01.~2019.12. ✓ 해빙 방출율 산출을 위한 원형 알고리즘 개발 완료 ✓ 해빙 두께 산출 위한 원형 기술 확보 	
		1-1-3. 딥러닝을 이용한 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발		<ul style="list-style-type: none"> ✓ AMSR2와 딥러닝을 이용한 겨울철 모든 해빙종류에 대한 CryoSat-2 해빙두께 산출 정확도에 준하는 해빙두께 산출 모델 개발 완료 (CryoSat-2 대비 6cm 내외의 오차) 	
		1-1-4. 다중편파 영상레이더 후방산란 및 편파분석 자료와 북극 현장자료 사이의 상관 분석을 통한 북극 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 개발		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 ✓ 입사각효과가 보정된 Sentinel-1 영상레이더 후방산란계수의 다중편파비 	

				(HV/HH)와 2017~2018년에 확보된 북극 해빙 코어 자료에서 유도된 brine volume과 로그회기모델분석을 수행하여 해빙 급침강도 산출 알고리즘 개발 완료	
		1-1-5. 해빙 표면 용빙호 분포 광학 원격탐사 자료 구축 및 해빙 표면 용빙호 면적과 형태 특성화 기술개발		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 북극해 현장에서 획득된 고해상도 영상 2,498장 활용 해빙 표면 용빙호 분포 분석을 위한 광학 원격탐사 자료 구축 완료 ✓ 영상 분할(segmentation) 후 생성된 객체(object) 기반 해빙 표면 용빙호 면적과 형태 특성화 기술 개발 완료 	
		1-1-6. 동토의 지형 및 식생변화 모니터링을 위한 무인기 기반 초분광/라이다 데이터 전처리 기술 개발		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 라이다 포인트 클라우드 기반 수치표고모델 생성 기술 확보 ✓ 수치표고모델을 이용한 초분광 자료의 정밀 기하보정 기술 개발 완료 	
	1-2. 위성 관측 결과와 과거 현장조사 및 고해상도 위성영상 분석	1-2-1. 북극 해수 광 특성을 측정 및 현장자료 수집을 통해 북극 빙권 해색위성 관측 자료의 검보정 자료 확보	0.32	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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
1-2-2. 북극해 해빙 이동 벡터 산출 결과 검증을 위한 GPS 추적시스템 설치 및 자료수집		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 북극해 해빙 현장 연구 지점에 해빙 이동을 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 			
1-2-3. 북극해 해빙 급침강도 산출 결과 검증을 위한 과거 해빙 코어 자료 분석과 해빙 두께 정보를 이용하여 간접적으로 해빙 강도 결과를 검증		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 영상 레이다 자료에서 추정된 강도(2018.08.17.~23.)와 비교 검증함. 			
1-2-4. 위성 초분광/광학 자료와 기 구축된 무인기 자료를 이용한 처리 기법 개발 및 현장조사 지역 사전 조사		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 			
	소계	1.0		100	
2년차 (2021)	2-1. 빙권 구성요소 특성에 적합한 자료 분석 기법 기술 고도화	2-1-1. 영상레이더 원격탐사 기반 북극 해빙 이동 벡터 추출 및 유형 분류 기술 고도화	0.8	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 고해상 X-밴드 영상에의 적용과 이중 센서 융합 활용 확장 및 검증 완료. 	100
		2-1-2. 수동형 마이크로파 원격탐사/딥러닝을 이용한 해빙 두께 산출 기술 고도화		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 	
		2-1-3. 북극 해빙 급침강도 산출 기술 고도화		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 수동마이크로파와 대기모델자료를 활용한 저해상도 대안산출물 시계열 제작 완료. ✓ 대안산출물과 영상레이더 다중편파자료로부터 제작된 산출물 비교 분석. ✓ 급침강도 산출 알고리즘 개선을 위한 추가 해빙코어 자료 확보. 	

		2-1-4. 다중 광학 원격탐사 기반 해빙 표면 용빙호 분포 탐지 및 매핑		✓ 고해상도 광학영상과 고도계 자료를 융합하여 용빙호의 분포 탐지 및 매핑 검증	
		2-1-5. 무인기 기반 초분광/라이다 데이터 융합분석 기술 개발		✓ RGB-초분광-라이다 정밀정합 기술 개발 및 검증 완료.	
	2-2. 위성 관측 결과 정밀한 위북현장조사	2-2-1. 북극 해수 광 특성 측정 및 현장자료 수집	0.2	✓ 북극 해수 광 특성 자료(식물플랑크톤, NAP, CDOM에 대한 흡광계수) 및 현장 자료 (클로로필 및 부유물질 농도), Underway를 포함한 총 128개 포인트에 대한 자료 확보 완료.	100
		2-2-2. 북극해 해빙 코어 자료 수집 및 분석		✓ 코로나19로 인한 해빙캠프 취소. 검증용 대체물 생산 및 분석으로 대체.	
		2-2-3. 북극해 해빙 위치추적 자료 수집 및 분석		✓ 코로나19로 인한 해빙캠프 취소. 기확보 MOSAiC 부이 자료 분석으로 대체.	
		2-2-4. 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	
	소계		1.0		100
3년차 (2022)	3-1. 위성 관측 결과 정밀한 위북현장조사	3-1-1. 해빙 시공간 변동성 및 환경요소 간의 상관성 분석	0.6	✓ 영상레이더 기반 해빙 이동 산출물을 기반으로 신규 변형 산출물 개발 완료 ✓ 해빙 이동/변형과 유형간 시공간 매칭에서의 불연속적 변화 탐지 및 원인 해석 완료	100
		3-1-2. 다중 광학 원격탐사 센서 기반 해빙 표면 용빙호 시공간 변동 분석		✓ 리드 발생 위치와 용빙호의 분포를 비교하여 동역학적 요인이 용빙호 비율에 미치는 영향 분석	
		3-1-3. 시계열 초분광 및 수치표면모델 자료 융합을 통한 동토 특성 변화 연구		✓ 수치표면모델을 이용한 2019년 대비 스노우펜스 주변 지형 변화 분석	
	3-2. 현장 기반 위성 관측 결과 정밀한 위북현장조사	3-2-1. 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.	100
		3-2-2. 북극 해빙 코어 자료 확보		✓ 2022년 8월 14일과 17일에 진행된 해빙캠프에서 확보한 다년생 해빙코어 3개에서 염분과 온도 프로파일을 분석 완료.	
		3-2-3. 북극 해빙 이동 위치추적 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	
		3-2-4. 동토지역 초분광/라이다 자료 구축		✓ 무인기를 이용하여 카운실 지역의 극지연구소 거점 연구사이트에서 LiDAR, 초분광, RGB 자료 획득	
	소계		1.0		100

나. 위탁과제 목표달성도 및 본과제에 대한 기여 내용

표 4-1-3. 위탁과제 목표달성도 및 본과제에 대한 기여 내용

위탁과제명		연차별 연구목표	목표달성도 (%)	본과제 목표달성에 대한 기여 및 활용 내용
1	위성관측을 통한 북극 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출 및 분석	✓ 선진기관 및 선행 연구를 바탕으로 북극 지역의 복사 강제력의 산출 기준 제시	100	기후 변화와 관련된 북극 해빙의 변동 추이를 해석하는 본 과제의 최종 목표 달성을 위해 북극 해빙의 변동성의 원인 파악에 있어 주

		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 복사강제력 산출을 위한 위성기반 자료 수집 및 전처리 ✓ 북극 지역에서 복사강제력 산출 		<p>요 요소 중 하나인 복사강제력의 변동성 분석 필요. 본 위탁연구의 경우 이 역할 100% 수행.</p>
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Albedo, Surface Temperature 기반 복사강제력 통합 및 분석 ✓ 계절에 따른 주도적 (Albedo, Surface Temperature) 요인 분석 ✓ Warming에 대해 주도적 역할 하는 해역 경향성 파악 	100	
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 해빙 표면온도 산출과 복사강제력을 활용한 피드백 효과 평가 	100	
2	<p>마이크로파 위성을 이용한 북극 해빙 거칠기와 해빙두께 변화 연구</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 마이크로파 위성을 이용한 북극해빙 거칠기 알고리즘 개선 ✓ 북극해빙 거칠기 변동성 분석 연구- 마이크로파 위성을 이용한 북극해빙 거칠기 알고리즘 개선 ✓ 북극해빙 거칠기 변동성 분석 연구 	100	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 본 과제의 주요 해빙 특성 인자 중 하나인 거칠기를 제공하는 방법을 개발하고, 그 변동성을 분석하는 역할 수행 ✓ 본 과제의 유년빙 두께 산출을 위한 선별하는 경계치 산정이 필요하며, 본 위탁과제는 이를 제공함으로써 역할 100% 수행
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 마이크로파 위성을 이용한 해빙 거칠기 변동성 분석 ✓ 거칠기 기반 해빙 두께 변동성 분석 	100	
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 해빙 두께와 거칠기 동시 변화 연구 	100	
3	<p>위성 기반 북극 해빙 특성 분석 알고리즘 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 고해상도 관측자료를 활용한 북극 해빙 lead 육안 탐지 및 샘플링 ✓ ICESat-2 위성 관측자료 활용한 북극 해빙 lead 특성 분석 및 탐지 알고리즘 개발 ✓ 다중 위성을 활용한 lead 너비 추정 알고리즘 개발 	100	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 본 과제의 주요 해빙 특성 인자 중 하나인 리드/용빙호 탐지 및 비율의 변동성과 환경요인과의 관계 분석 필요. 본 위탁연구의 경우 이 역할 100% 수행 ✓ 본 과제의 해빙 유형 분류 기술 개발에 있어, 리드 위치에 대한 검증에 활용할 수 있는 별도의 기술/자료가 필요하며, 본 위탁과제는 리드 탐지에 대한 독립적 기술을 제공함으로써 역할 100% 수행
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 북극 해빙 용빙호 레퍼런스 구축 ✓ 용빙호 탐지 알고리즘 개발 	100	
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 리드 및 용빙호 비율에 따른 북극 해빙 변화 영향 분석 및 해빙 변화 예측 	100	
4	<p>위성기반 해빙 이동 추적 기술 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 위성기반 해빙 자료 수집 및 DB 구축 ✓ 해역별/시기별 해빙의 시/공간적 특성 파악을 위한 위성 및 재분석 자료 분석 ✓ 북극해 해빙 변화 주제도 제작 및 추적 입자 모델 개선 	100	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 본 과제의 해빙 이동 벡터 산출 기술 개발에 있어 결과의 검증 및 성능 평가에 활용할 수 있는 독립적 기술이 필요하며, 본 위탁과제는 이를 제공함으로써 역할 100% 수행
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 위성자료 기반 고해상도/저해상도 해빙 이동장 구축 ✓ 위성자료 기반 해빙 시공간 변화 추출 기술 개발 	100	
		<ul style="list-style-type: none"> ✓ 북극해 해빙 이동 변화에 영향을 미치는 요인 분석 	100	

○ 연구개발 요소와 본과제-위탁과제 분담 개발 관계

- 해빙특성요소 중 주관기관보다 연구전문성이 있는, 또는 분담개발이 필요한 요소에 대해서 위탁기관에서 담당함.
- 다음 그림은 본과제-위탁과제의 연구개발 분담 관계도를 나타냄.



그림 4-1-1. 연구개발 요소와 본과제-위탁과제 분담 개발 관계도

- 위탁기관인 부경대학교에서는 위성 해빙 산출물들의 특성 조합으로부터 정량화될 수 있는 해빙의 복사강제력을 분석, 활용하는 연구를 선제적으로 함으로써 현재 진행되는 산출물 개발이 목표로 해야 할 달성조건에 대한 검토 및 2단계 최종목표 달성을 위한 분석방법 개발을 수행하는 독자적 임무를 가짐.
- 위탁기관인 세종대학교에서는 이론적 모델을 기반으로 해빙 두께를 추정하고 본과제에서는 딥러닝 기반의 실험적 모델로부터 두께 추정을 시도하기 때문에 상호 검증에 활용 가능함. 또한 세종대학교는 이론모델을 확장하여 해빙의 거칠기라는 새로운 해빙 특성 변수를 개발하는 독자적 임무를 가짐.
- 위탁기관인 울산과학기술원에서는 본과제 수행 인력이 전문성을 가지지 않은 위성 고도계의 자료 해석에 있어 전문적인 지식을 가지고 있으며, 이를 활용해 수~수십 cm 수준의 고도 변화로부터 해빙 표면 특성을 분리해야 하는 용빙호 및 리드, 리지의 탐지 기술을 개발하는 독자적 임무를 가짐.
- 위탁기관인 한국해양과학기술원에서는 본과제의 개발 요소 중 하나인 해빙 이동에 있어 그 변동성과 환경적 요인을 해양 요소와 접목시켜 보다 전문적인 분석을 수행하는 독자적 임무를 가짐.

3. 대표적 우수성과

표 4-1-4. 대표적 우수성과 1

<p>우수성과 1</p>	<p>인공위성 영상레이더를 이용한 고착빙 탐지 (mrnIF 97.6 SCI(E) 논문 게재)</p>
<p>성과 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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.
<p>성과의 우수성</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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.
<p>Figure 243 consists of two parts. On the left is a bar chart titled 'Mean Decrease Accuracy' with a y-axis from 0 to 60. The x-axis lists features: Corr, STD, Slope, IncangMean, Intercept, IncangSTD, and Mean. The bars show decreasing accuracy from left to right. On the right are six panels (a-f) showing satellite imagery of sea ice. Panels (a) and (b) are grayscale images. Panel (c) shows a color-coded map with a legend: light blue for 'SD: Glacier Ice, First-Year Ice IC: 9/10-10/10', red for 'SD: Glacier Ice, First-Year Ice IC: 10/10', and yellow for 'F: Fast Ice IC: 10/10'. Panels (d), (e), and (f) show the same area with different detection results overlaid in red and yellow.</p>	
<p>그림 243 (좌) 고착빙 탐지 기계학습 알고리즘의 입력 피쳐 중요도, (우) 고착빙 탐지 결과 예시</p>	
<p>증빙자료</p>	<p>Object-based landfast sea ice detection over West Antarctica using time series ALOS PALSAR data, Remote Sensing of Environment (mrnIF 97.6), 2020년 3월 출판</p>

표 4-1-5. 대표적 우수성과 2

<p>우수성과 2</p>	<p>인공위성과 재분석 자료의 기계학습을 통한 월별 해빙 농도 예측 (mrnIF 94.3 SCI(E) 논문 게재)</p>
<p>성과 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 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.
<p>성과의 우수성</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 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.
<p>(a) SIC (NSIDC, %) (b) SIC (RF, %) (c) SIC (CNN, %) (d) SIC anomaly (NSIDC, %)</p> <p>(e) Error (RF-NSIDC, RMSE = 5.82%; nRMSE = 29.57%) (f) Error (CNN-NSIDC, RMSE = 4.71%; nRMSE = 23.95%)</p> <p>그림 244 실제 해빙 농도와 예측 (RF 및 CNN 기반) 해빙 농도의 비교</p>	
<p>증빙자료</p>	<p>Prediction of monthly Arctic sea ice concentrations using satellite and reanalysis data based on convolutional neural networks, Cryosphere (mrnIF 94.3), 2020년 3월 출판</p>

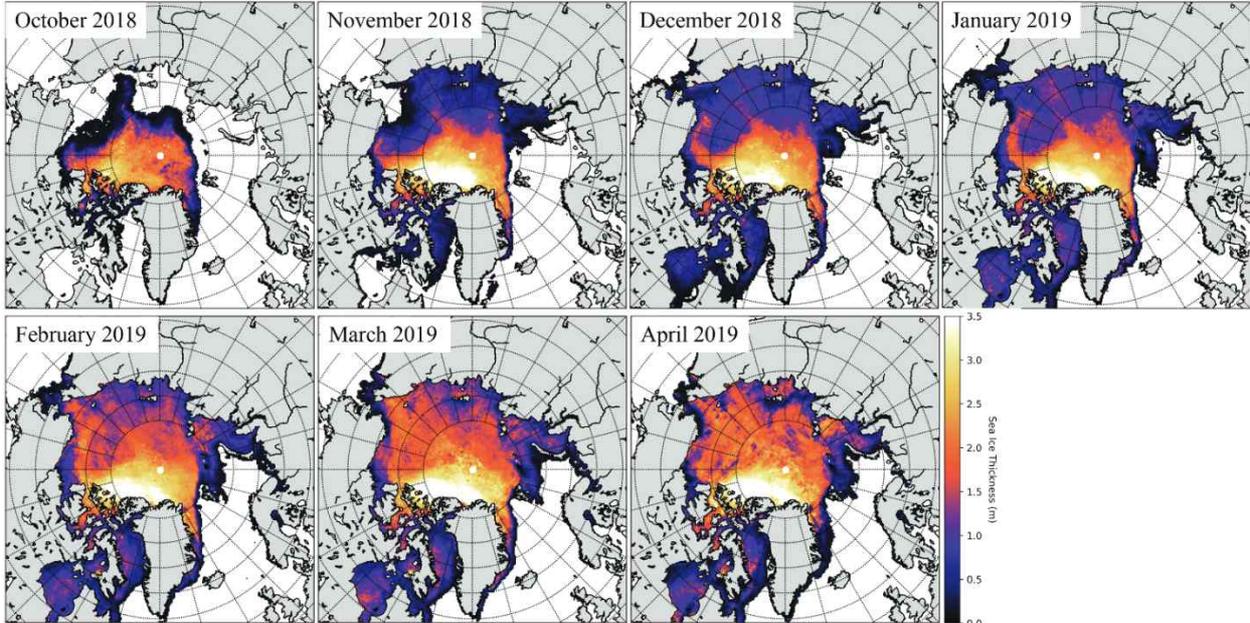
표 4-1-6. 대표적 우수성과 3

<p>우수성과 3</p>	<p>인공위성 영상레이더 기반 해빙 유형 분류 (mrnIF 94.3 SCI(E) 논문 게재)</p>
<p>성과 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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.
<p>성과의 우수성</p>	<ul style="list-style-type: none"> 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 기반으로 최초의 다중 해빙 유형 분류 알고리즘을 개발함.
<p>그림 245 개발된 해빙 유형 분류 알고리즘 적용 결과와 NIC 주간 해빙 지도의 비교</p>	
<p>증빙자료</p>	<p>Classification of sea ice types in Sentinel-1 synthetic aperture radar images, Cryosphere (mrnIF 94.3), 2020년 8월 출판</p>

표 4-1-7. 대표적 우수성과 4

<p>우수성과 4</p>	<p>무인기를 이용한 해빙 표면 수치표면모델 생성 기술 개발 (mrnIF 100 SCI(E) 논문 게재)</p>
<p>성과 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 무인기를 이용한 해빙 표면 수치표면모델(DSM) 생성 기술 개발 표면 텍스처가 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.
<p>성과의 우수성</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 무인기 기반 해빙 수치표면모델 제작을 위한 최고 성능의 기술 개발 - 기존 방법의 알려진 성능인 RMSE 26 cm를 크게 상회하는 RMSE 8 cm 달성 ○ mrnIF 최상위 저널에 성과 게재 - SCIE 목록 중 Geography, Physical 카테고리 소속 50개 저널 중 IF 1위 저널에 논문 게재
<div style="text-align: center;"> <p>The flowchart illustrates the process of generating a georeferenced DSM from drone images and LiDAR data. It is divided into several main stages:</p> <ul style="list-style-type: none"> LiDAR scanning data path: Starts with 'LiDAR scanning data', followed by 'Matching constraints determination' (Merging scanning points, Coloring point cloud, Point cloud), 'Registration (LiDAR to Drone)', 'Registered point cloud', 'Matching indicator analysis', and 'Matching constraints'. Drone images path: Starts with 'Drone images', followed by 'Initial DSM generation' (Sensor modeling, Dense image matching), leading to 'Drone mosaic' and 'Drone DSM (Initial DSM)'. Optimal search window selection path: Starts with 'Surface texture analysis', followed by 'Match inspection', leading to 'Enhanced initial DSM' and 'Optimized window sizes'. Sea-ice surface reconstruction path: Starts with 'Robust vertical positioning', followed by 'Match inspection', 'Corrected DSM', 'Registration (Drone to LiDAR)', and finally 'Georeferenced DSM'. <p>Arrows indicate the flow of data and information between these stages, showing how the 'Registered point cloud' and 'Matching constraints' from the LiDAR path, and the 'Drone DSM (Initial DSM)' and 'Optimized window sizes' from the drone path, are used in the 'Sea-ice surface reconstruction' path to produce the final 'Georeferenced DSM'.</p> </div> <p>개발한 무인기 기반 해빙 수치표면모델 제작 방법의 흐름도</p>	
<p>증빙자료</p>	<p>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 Photogrammetry and Remote Sensing, 172:147-159, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.12.008</p>

표 4-1-8. 대표적 우수성과 5

<p>우수성과 5</p>	<p>AMSR2 수동마이크로파 센서 기반 일간 북극 해빙두께 산출 인공지능 모델 개발 (mrnIF 95.9 SCI(E) 논문 게재)</p>
<p>성과 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수동마이크로파 기반 일간 북극 해빙두께 산출 인공지능모델 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 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 입력 피쳐간 합성을 통해 극복
<p>성과의 우수성</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 세계 최초로 겨울철 북극 전체에 대한 일간 해빙두께 지도 작성 <ul style="list-style-type: none"> - 고도계 자료와 비교시 약 10cm의 정확도 오차로 해빙두께 산출 ○ mrnIF 상위 10% 저널에 성과 게재 <ul style="list-style-type: none"> - SCIE 목록 중 Geography, Physical 카테고리 소속 60개 저널 중 IF 4위 저널에 논문 게재
<div style="text-align: center;">  <p>수동마이크로파 자료로부터 산출된 일간 해빙두께 지도</p> </div>	
<p>증빙자료</p>	<p>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</p>

4. 정량적 연구성과

가. 연차별 목표 대비 달성도

표 4-1-9. 연차별 목표 대비 달성도

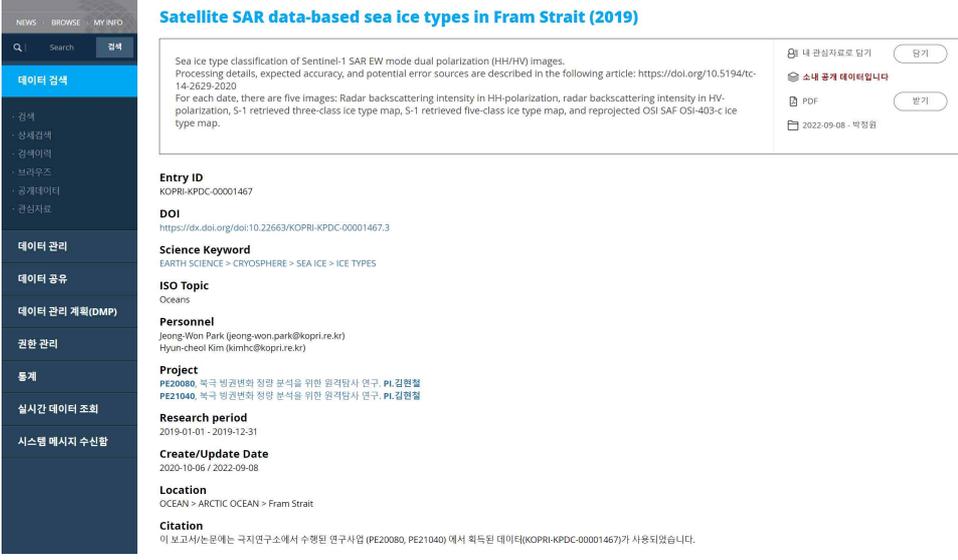
년도 (과제 연차)	성과목표	지표	목표치 (A)	달성치 (B)	가중치% (C)	평가기준	달성도(%)		
							(D=B/A)	(D*A)	
2020 (1차 년도)	북극 빙권 구성요소 위성링을 모니터링을 위한기술 기반기술 구축	해빙형 지도	52건	52건	20	(평가방법) 다양한 유형의 해빙이 혼재하는 Fram Strait 지역에 대한 2km 공간해상도의 3중 (해수, 단년빙, 다년빙) 분포도 위성 산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	1.0	20	
		해빙동 지도	12건	12건	10	(평가방법) 해빙의 이동이 빠르고 방향이 일정한 Fram Strait 지역에 대한 2km 공간해상도의 해빙 이동 벡터 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	1.0	10	
		해빙강 지도	2건	2건	10	(평가방법) 북극해 현장조사 자료가 존재하는 지역에 대한 500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 현장조사 자료 기록 및 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	1.0	10	
	과거 현장조사 및 고해상 위성자료 분석기반 북극빙권 위성링 결과	현장 관측을 통한 공해상 영상 산출물	1건	1건	10	(평가방법) 북극해 해빙에 대한 표면특성 관측 목적 10 cm 공간해상도의 영상 산출물 건수 확인 (근거자료) 영상 산출물 메타데이터 기록	1.0	10	
		위성 영상 수치 표면 모델	1건	1건	10	(평가방법) 동토 지역에 대한 1m 공간해상도의 영상 및 수치표면모델 산출물 건수 확인 (근거자료) 영상 산출물 메타데이터 기록	1.0	10	
	관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	3건	8건	40	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	1.0 (초과달성 2.66)	40	
	계					100	-	-	100
	2021 (2차 년도)	북극 빙권 구성요소 위성링 기술 고도화	해빙형 지도	52건	52건	8	(측정방법) 다양한 유형의 해빙이 혼재하는 Fram Strait 지역에 대한 2km 공간해상도의 5중 (해수, 단년빙, 다년빙) 분포도 위성 산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터기록 (KPDC 등록)	1.0	8
			해빙동 지도	52건	52건	8	(측정방법) 해빙의 이동이 빠르고 방향이 일정한 Fram Strait 지역에 대한 2km 공간해상도의 해빙 이동 벡터 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터기록 (KPDC 등록)	1.0	8
해빙강 도			2건	2건	7	(측정방법) 북극해 현장조사 자료가 존재하는 지역에 대한	1.0	7	

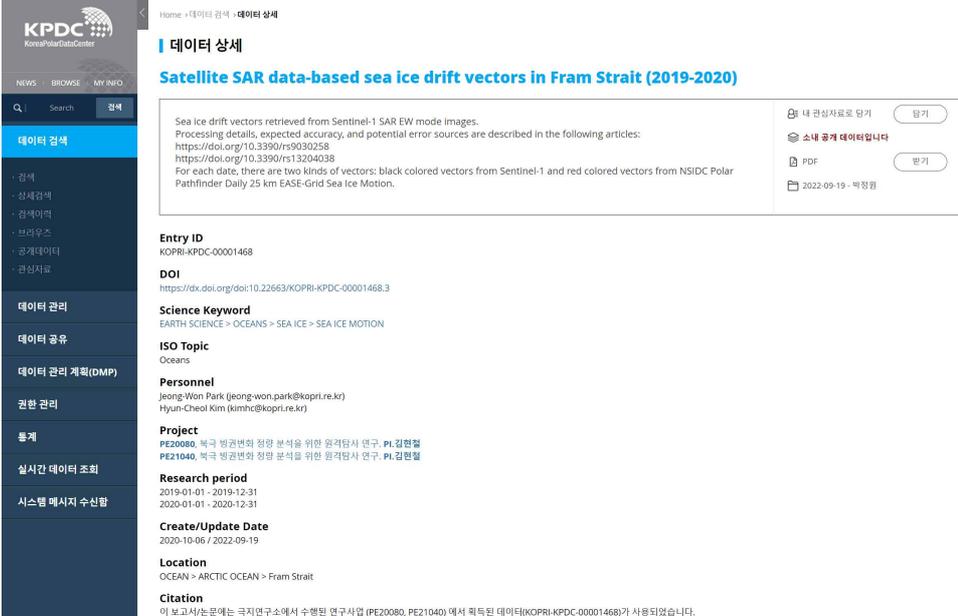
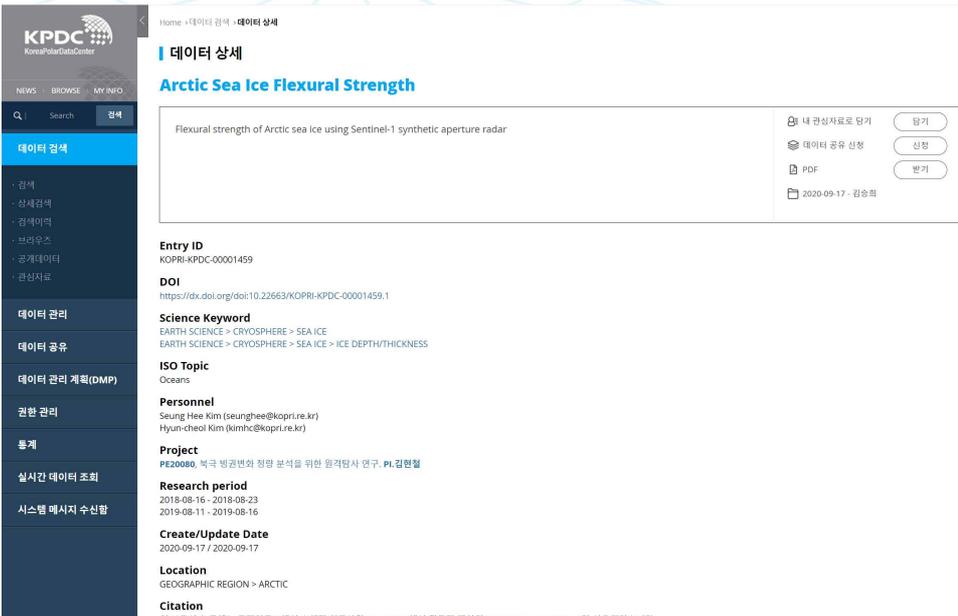
	지도					500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 현장조사 자료 기록 및 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)			
		해빙계 지도	12건	12건	7	(측정방법) 북극해 지역에 대한 25km 공간해상도의 해빙 두께지도 산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 자료 기록 (KPDC 등록)	1.0	7	
	현장조사 기반권축 결과	해빙 코어	3개	3개	10	(측정방법) 북극해 해빙 코어 개수 확인 (근거자료) 해빙 코어 사진 및 얼음 특성 (두께, 염도, 온도) 기록	1.0	10	
		현장을 통한 동해상 영상 산출물	1건	1건	10	(측정방법) 북극해 또는 연안 해빙에 대한 표면특성 관측 목적 10cm 공간해상도의 영상 산출물 건수 확인 (근거자료) 영상 산출물 메타데이터 기록	1.0	10	
		무인기 영상 지표면 모델	1건	1건	10	(측정방법) 동토 지역에 대한 10cm 공간해상도의 영상 및 수치표면모델 산출물 건수 확인 (근거자료) 영상 산출물 메타데이터 기록	1.0	10	
	관련 논문	mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	2건	4건	20	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	1.0 (초과달성 2.0)	20	
		mrnIF 80 이상 논문 수	1건	3건	20	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	1.0 (초과달성 3.0)	20	
	계				100	-	-	100	
	2022 (3차년도)	북극해 빙권 특성변화 분석	해빙형도 지도	12건	12건	20	(측정방법) 위도 60도 이상 북극해 전역에 대한 2km 공간해상도의 해빙 유형별 변형률 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	1.0	20
			해빙강도 지도	12건	12건	10	(측정방법) 북극해 전 지역에 대한 500m 공간해상도의 해빙강도 위성산출물 건수 확인 (근거자료) 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)	1.0	10
현장조사 기반권축 결과		해빙 코어	3개	3개	20	(측정방법) 북극해 해빙 코어 개수 확인 (근거자료) 해빙 코어 사진 및 얼음 특성 (두께, 염도, 온도) 기록	1.0	20	
관련 논문		mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수	3년 누적 5건	3년 누적 8건	10	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	1.0 (초과달성 1.60)	10	
		mrnIF 80 이상 90 미만	3년 누적 4건	3년 누적 4건	30	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서	1.0	30	

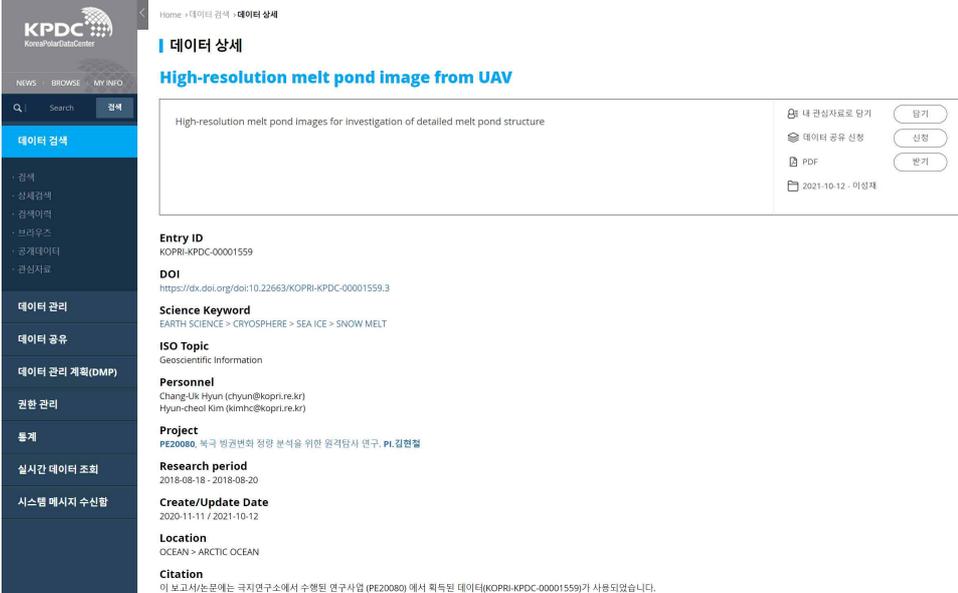
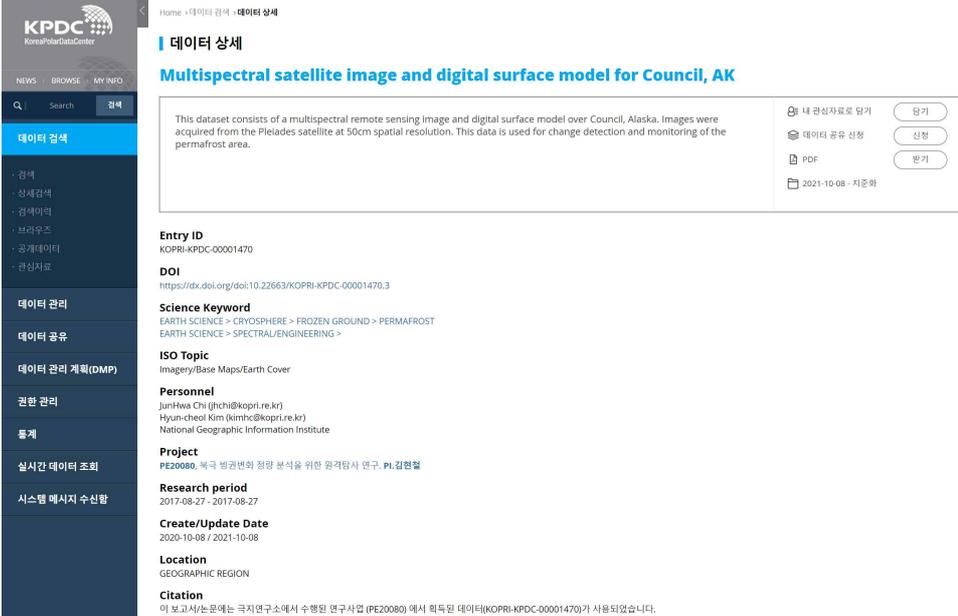
		논문 수				제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수		
		mrnIF 90 이상 논문 수	3년 누적 1건	3년 누적 6건	10	(평가방법) 연구사업 참여자가 공저자이고 본과제 사사가 기입된 논문 중 JCR에서 제공하는 SCI(E) 학술지의 IF를 기반으로 카테고리별 mrnIF를 도출 (근거자료) 게재 건수	1.0 (초과달성 6.00)	10
					100			100

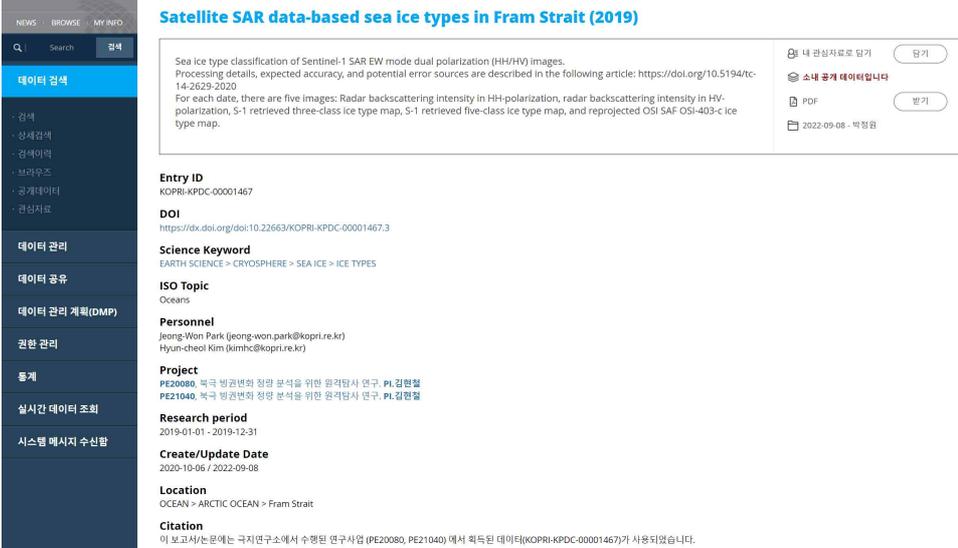
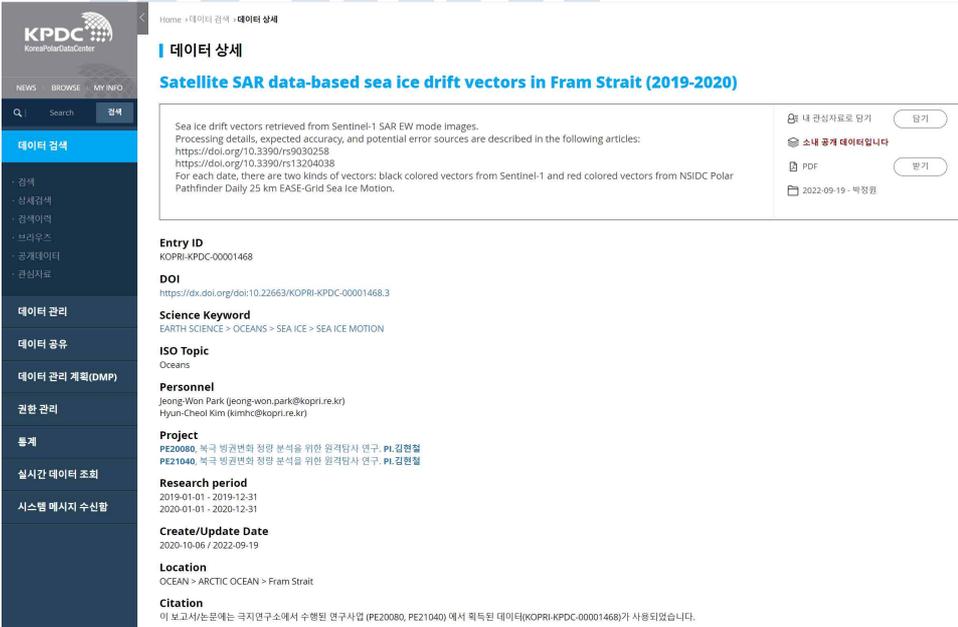
나. 증빙자료

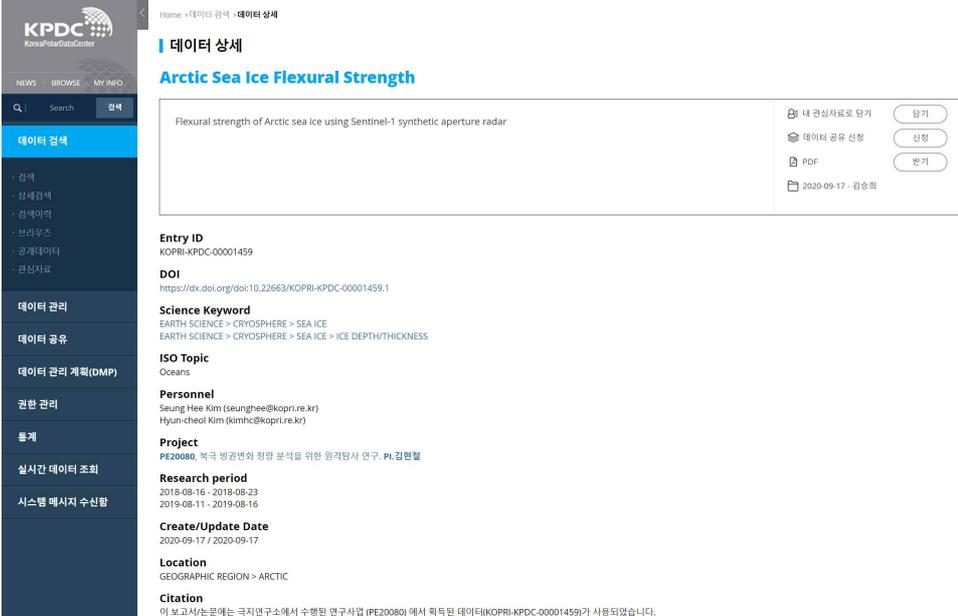
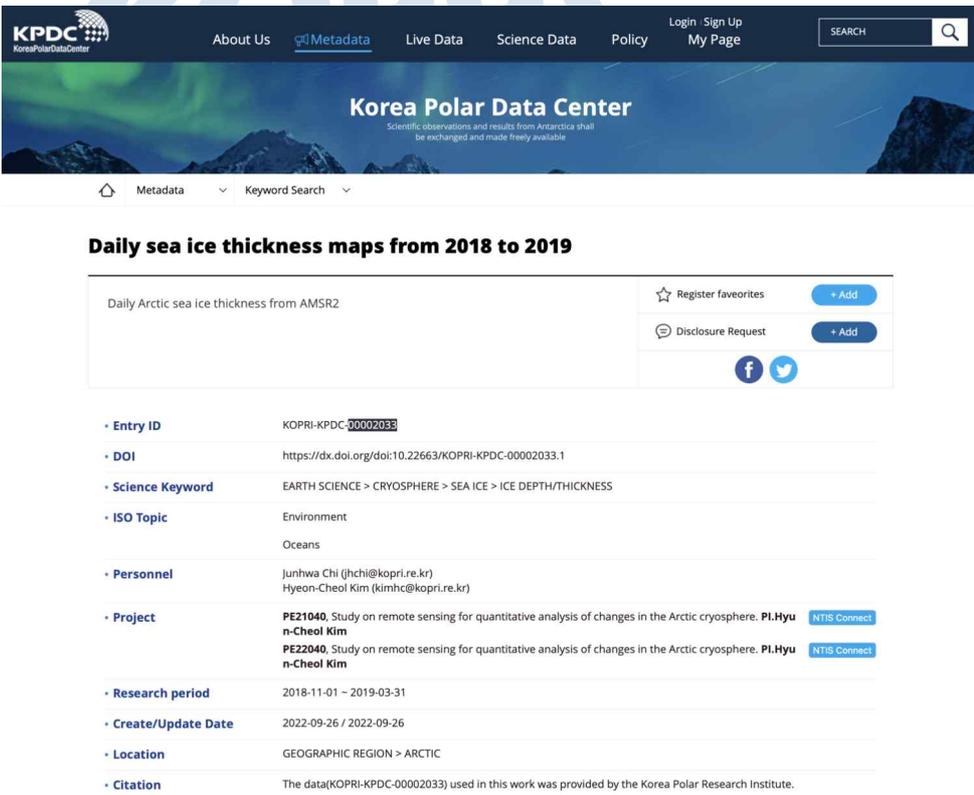
표 4-1-10. 증빙자료

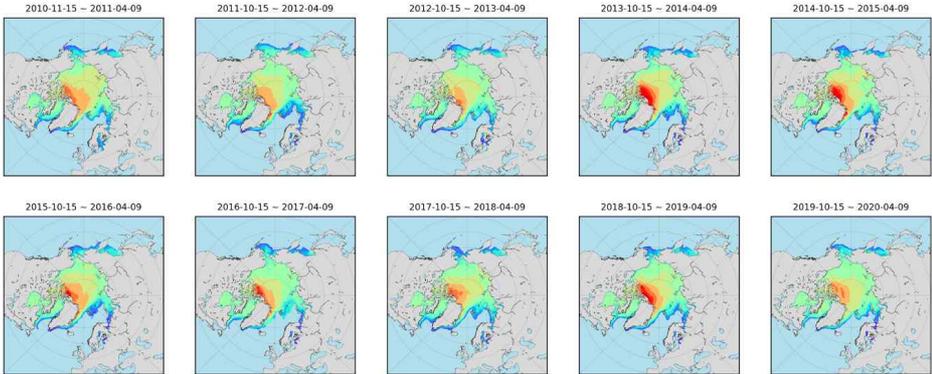
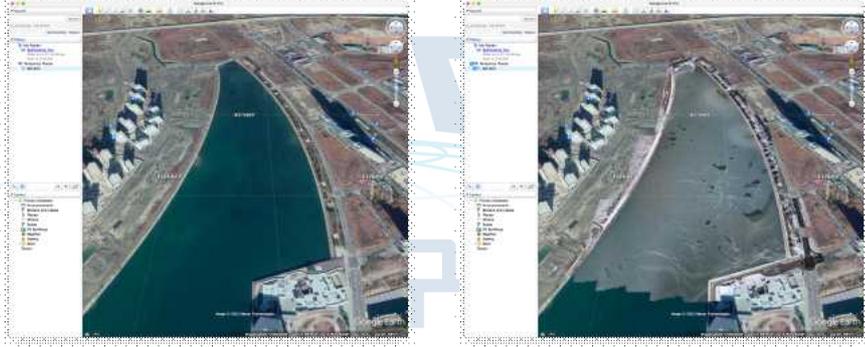
성과목표	성과지표	
북극 빙권 구성요소 위성 모니터링을 위한 기반기술 구축	해빙 유형 지도	<ul style="list-style-type: none"> - 근거자료: 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록) - 목표: 52건 - 달성: 52건, 100% - 달성 상세 내용 <p>2019년 Sentinel-1의 프람 해협 관측 영상을 이용하여 각 주에 해당하는 해빙 유형 3종 분류 지도를 작성하고 OSI-SAF 해빙 유형 지도와 1:1 비교를 수행한 자료 52건을 KPDC에 등록 (KOPRI-KPDC-00001467)</p> 
	해빙 이동 지도	<ul style="list-style-type: none"> - 근거자료: 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록) - 목표: 12건 - 달성 12건, 100% - 달성 상세 내용 <p>2019년 Sentinel-1의 프람 해협 관측 영상을 이용하여 각 월에 해당하는 해빙 이동 벡터 지도를 작성하고 NSIDC Polar Pathfinder 해빙 이동 지도와 1:1 비교를 수행한 자료 12건을 KPDC에 등록 (KOPRI-KPDC-00001468)</p>

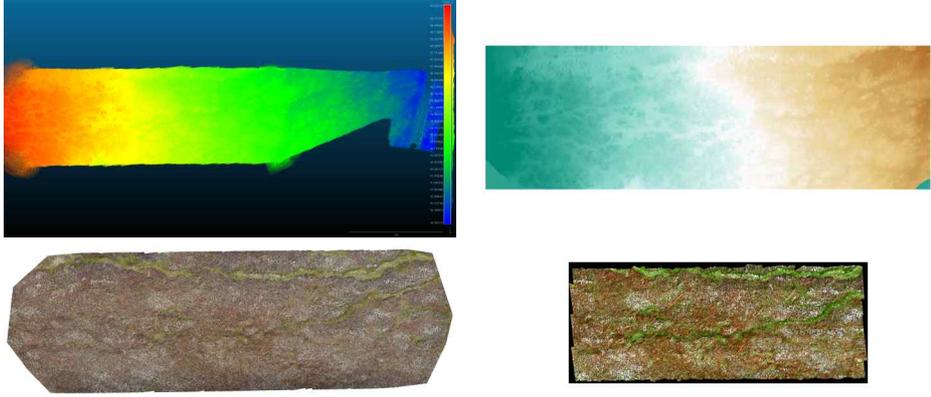
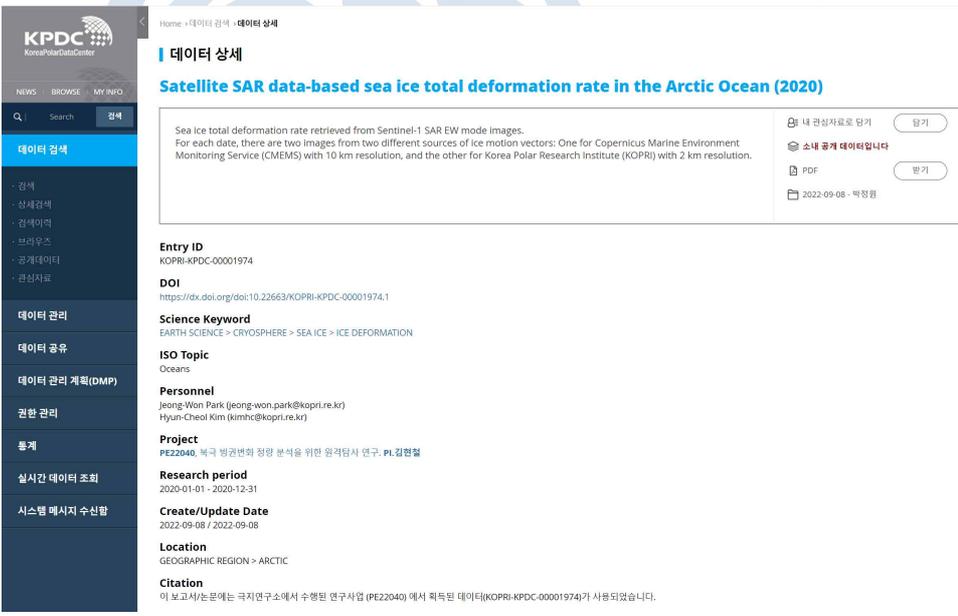
		 <p>Home > 데이터 검색 > 데이터 상세</p> <h3>데이터 상세</h3> <h4>Satellite SAR data-based sea ice drift vectors in Fram Strait (2019-2020)</h4> <p>Sea ice drift vectors retrieved from Sentinel-1 SAR EW mode images. Processing details, expected accuracy, and potential error sources are described in the following articles: https://doi.org/10.3390/rs9030258 https://doi.org/10.3390/rs13204038 For each date, there are two kinds of vectors: black colored vectors from Sentinel-1 and red colored vectors from NSIDC Polar Pathfinder Daily 25 km EASE-Grid Sea Ice Motion.</p> <p>내 관심자료로 담기 <input type="button" value="담기"/> 소내 공개 데이터입니다 <input type="button" value="공개"/> PDF <input type="button" value="받기"/> 2022-09-19 - 역정렬</p> <p>Entry ID KOPRI-KPDC-00001468</p> <p>DOI https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001468.3</p> <p>Science Keyword EARTH SCIENCE > OCEANS > SEA ICE > SEA ICE MOTION</p> <p>ISO Topic Oceans</p> <p>Personnel Jeong-Won Park (jeong-won.park@kopri.re.kr) Hyun-Cheol Kim (kimhc@kopri.re.kr)</p> <p>Project PE20080, 북극 빙권변의 정량 분석을 위한 원격탐사 연구, PI 김현철 PE21040, 북극 빙권변의 정량 분석을 위한 원격탐사 연구, PI 김현철</p> <p>Research period 2019-01-01 - 2019-12-31 2020-01-01 - 2020-12-31</p> <p>Create/Update Date 2020-10-06 / 2022-09-19</p> <p>Location OCEAN > ARCTIC OCEAN > Fram Strait</p> <p>Citation 이 보고서는 문헌에는 극지연구소에서 수행된 연구사업 (PE20080, PE21040) 에서 획득된 데이터(KOPRI-KPDC-00001468)가 사용되었습니다.</p>
	<p>해빙 강도 지도</p>	<p>- 근거자료: 현장조사 자료 기록 및 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록)</p> <p>- 목표: 2건</p> <p>- 달성 2건, 100%</p> <p>- 달성 상세 내용</p> <p>2018년과 2019년에 진행된 북극 해빙캠프 기간에 맞춰 현장조사가 진행된 보퍼트해가 포함된 북극해 지역을 촬영한 Sentinel-1 HH/HV 편파 자료를 활용하여 해빙강도 지도 2건 제작 (2018년 8월 17일, 2019년 8월 11일) 및 KPDC 등록 (KOPRI-KPDC-00001459)</p>  <p>Home > 데이터 검색 > 데이터 상세</p> <h3>데이터 상세</h3> <h4>Arctic Sea Ice Flexural Strength</h4> <p>Flexural strength of Arctic sea ice using Sentinel-1 synthetic aperture radar</p> <p>내 관심자료로 담기 <input type="button" value="담기"/> 데이터 공유 신청 <input type="button" value="신청"/> PDF <input type="button" value="받기"/> 2020-09-17 - 김승희</p> <p>Entry ID KOPRI-KPDC-00001459</p> <p>DOI https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001459.1</p> <p>Science Keyword EARTH SCIENCE > CRYOSPHERE > SEA ICE EARTH SCIENCE > CRYOSPHERE > SEA ICE > ICE DEPTH/THICKNESS</p> <p>ISO Topic Oceans</p> <p>Personnel Seung Hee Kim (seunghee@kopri.re.kr) Hyun-cheol Kim (kimhc@kopri.re.kr)</p> <p>Project PE20080, 북극 빙권변의 정량 분석을 위한 원격탐사 연구, PI 김현철</p> <p>Research period 2018-08-16 - 2018-08-23 2019-08-11 - 2019-08-16</p> <p>Create/Update Date 2020-09-17 / 2020-09-17</p> <p>Location GEOGRAPHIC REGION > ARCTIC</p> <p>Citation 이 보고서는 문헌에는 극지연구소에서 수행된 연구사업 (PE20080) 에서 획득된 데이터(KOPRI-KPDC-00001459)가 사용되었습니다.</p>
<p>과거 현장조사 및 고해상 위성자료 분석 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검증</p>	<p>현장 관측을 통한 공해상 영상 산출물</p>	<p>- 근거자료: 영상 산출물 메타데이터 기록</p> <p>- 목표: 1건</p> <p>- 달성 1건, 100%</p> <p>- 달성 상세 내용</p> <p>북극해 해빙 현장조사 시 획득된 무인기 기반 고해상도 용빙호 영상을 이용하여 개별 용빙호의 형태와 구조에 대한 관측이 가능한 10 cm 미만 공간해상도의 영상 모자이크를 2건 생산하고 KPDC에 메타데이터를 등록 (KOPRI-KPDC-00001559)</p>

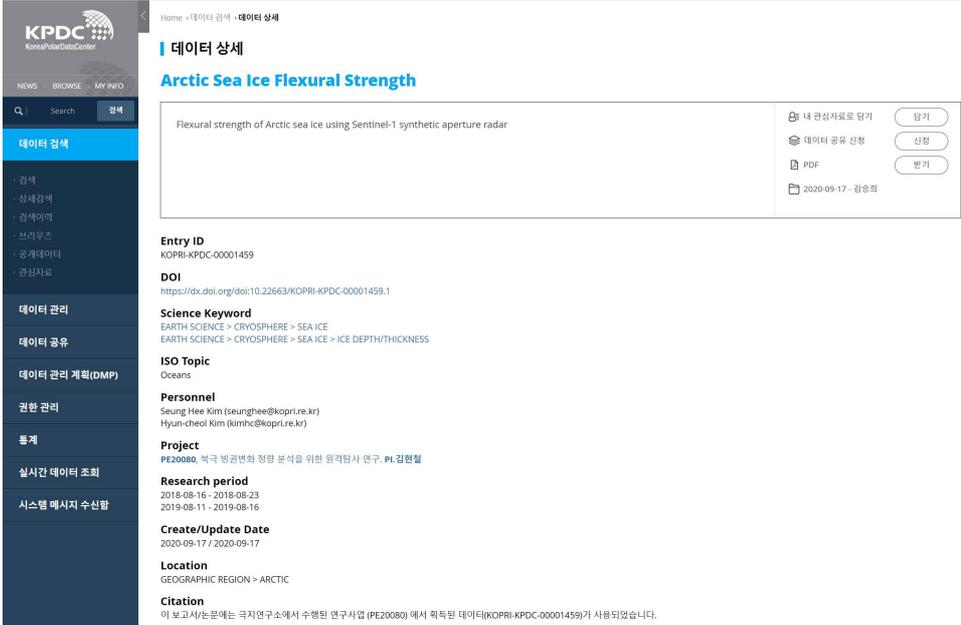
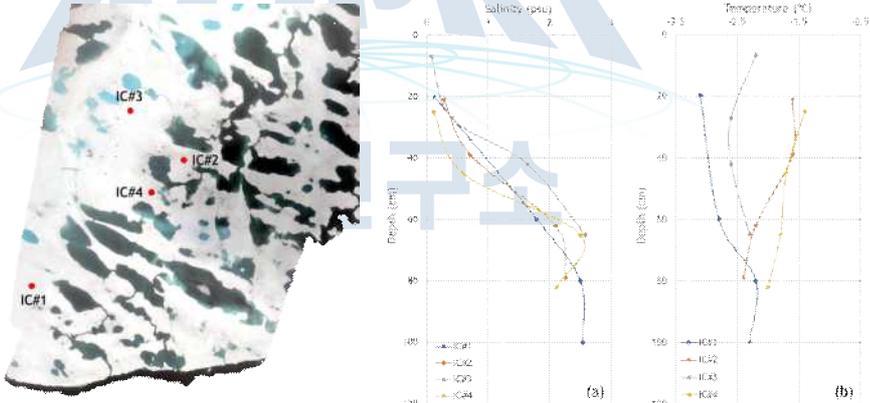
		 <p>Home > 데이터 검색 > 데이터 상세</p> <h3>데이터 상세</h3> <h4>High-resolution melt pond image from UAV</h4> <p>High-resolution melt pond images for investigation of detailed melt pond structure</p> <p>내 관심자료로 담기 데이터 공유 신청 PDF 2021-10-12 - 이형태</p> <p>Entry ID KOPRI-KPDC-00001559</p> <p>DOI https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001559.3</p> <p>Science Keyword EARTH SCIENCE > CRYOSPHERE > SEA ICE > SNOW MELT</p> <p>ISO Topic Geoscientific Information</p> <p>Personnel Chang-Uk Hyun (chyun@kopri.re.kr) Hyun-cheol Kim (kimhc@kopri.re.kr)</p> <p>Project PE20080, 북극 빙권변의 정량 분석을 위한 원격탐사 연구, PL김현철</p> <p>Research period 2018-08-18 - 2018-08-20</p> <p>Create/Update Date 2020-11-11 / 2021-10-12</p> <p>Location OCEAN > ARCTIC OCEAN</p> <p>Citation 이 보고서는 문에는 극지연구소에서 수행된 연구사업 (PE20080) 에서 획득된 데이터(KOPRI-KPDC-00001559)가 사용되었습니다.</p>
	<p>위성 영상 및 수치표면 모델</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 근거자료: 영상 산출물 메타데이터 기록 - 목표: 1건 - 달성 1건, 100% - 달성 상세 내용 <p>2017년 8월 Pleiades 위성으로부터 획득된 알래스카 카운실 지역 50cm급 스테레오 다중분광영상과 그로부터 생성된 수치표면모델 자료를 KPDC에 등록 (KOPRI-KPDC-00001470)</p>  <p>Home > 데이터 검색 > 데이터 상세</p> <h3>데이터 상세</h3> <h4>Multispectral satellite image and digital surface model for Council, AK</h4> <p>This dataset consists of a multispectral remote sensing image and digital surface model over Council, Alaska. Images were acquired from the Pleiades satellite at 50cm spatial resolution. This data is used for change detection and monitoring of the permafrost area.</p> <p>내 관심자료로 담기 데이터 공유 신청 PDF 2021-10-08 - 지준하</p> <p>Entry ID KOPRI-KPDC-00001470</p> <p>DOI https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001470.3</p> <p>Science Keyword EARTH SCIENCE > CRYOSPHERE > FROZEN GROUND > PERMAFROST EARTH SCIENCE > SPECTRAL/ENGINEERING ></p> <p>ISO Topic Imagery/Base Maps/Earth Cover</p> <p>Personnel JunHwa Chi (jhchi@kopri.re.kr) Hyun-cheol Kim (kimhc@kopri.re.kr) National Geographic Information Institute</p> <p>Project PE20080, 북극 빙권변의 정량 분석을 위한 원격탐사 연구, PL김현철</p> <p>Research period 2017-08-27 - 2017-08-27</p> <p>Create/Update Date 2020-10-08 / 2021-10-08</p> <p>Location GEOGRAPHIC REGION</p> <p>Citation 이 보고서는 문에는 극지연구소에서 수행된 연구사업 (PE20080) 에서 획득된 데이터(KOPRI-KPDC-00001470)가 사용되었습니다.</p>
<p>북극 빙권 구성요소 위성 모니터링 기술 고도화</p>	<p>해빙 유형 지도</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 근거자료: 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록) - 목표: 52건 - 달성: 52건, 100% - 달성 상세 내용 <p>2019년 Sentinel-1의 프람 해협 관측 영상을 이용하여 각 주에 해당하는 해빙 유형 5중 분류 지도를 작성하고 OSI-SAF 해빙 유형 지도와 1:1 비교를 수행한 자료 52건을 KPDC에 등록 (KOPRI-KPDC-00001467)</p> <p>※ 기존 게재 번호에 데이터를 추가하여 업데이트 하였기에 동일 ID를 가짐</p>

		 <p>Satellite SAR data-based sea ice types in Fram Strait (2019)</p> <p>Sea ice type classification of Sentinel-1 SAR EW mode dual polarization (HH/HV) images. Processing details, expected accuracy, and potential error sources are described in the following article: https://doi.org/10.5194/tc-14-2629-2020</p> <p>For each date, there are five images: Radar backscattering intensity in HH-polarization, radar backscattering intensity in HV-polarization, S-1 retrieved three-class ice type map, S-1 retrieved five-class ice type map, and reprojected OSI SAF OSI-403-c ice type map.</p> <p>Entry ID KOPRI-KPDC-00001467</p> <p>DOI https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001467.3</p> <p>Science Keyword EARTH SCIENCE > CRYOSPHERE > SEA ICE > ICE TYPES</p> <p>ISO Topic Oceans</p> <p>Personnel Jeong-Won Park (jeong-won.park@kopri.re.kr) Hyun-cheol Kim (kimhc@kopri.re.kr)</p> <p>Project PE20080, 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구, PI.김현철 PE21040, 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구, PI.김현철</p> <p>Research period 2019-01-01 - 2019-12-31</p> <p>Create/Update Date 2020-10-06 / 2022-09-08</p> <p>Location OCEAN > ARCTIC OCEAN > Fram Strait</p> <p>Citation 이 보고서는 문에는 극지연구소에서 수행된 연구사업 (PE20080, PE21040) 에서 획득된 데이터(KOPRI-KPDC-00001467)가 사용되었습니다.</p>
<p>해빙 이동 지도</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 근거자료: 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록) - 목표: 52건 - 달성 52건, 100% - 달성 상세 내용 <p>2020년 Sentinel-1의 프람 해협 관측 영상을 이용하여 각 주에 해당하는 해빙 이동 벡터 지도를 작성하고 NSIDC Polar Pathfinder 해빙 이동 지도와 1:1 비교를 수행한 자료 52건을 KPDC에 등록 (KOPRI-KPDC-00001468)</p> <p>※ 기존 게재 번호에 데이터를 추가하여 업데이트 하였기에 동일 ID를 가짐</p>	 <p>Satellite SAR data-based sea ice drift vectors in Fram Strait (2019-2020)</p> <p>Sea ice drift vectors retrieved from Sentinel-1 SAR EW mode images. Processing details, expected accuracy, and potential error sources are described in the following articles: https://doi.org/10.3390/rs9030258 https://doi.org/10.3390/rs13204038</p> <p>For each date, there are two kinds of vectors: black colored vectors from Sentinel-1 and red colored vectors from NSIDC Polar Pathfinder Daily 25 km EASE-Grid Sea Ice Motion.</p> <p>Entry ID KOPRI-KPDC-00001468</p> <p>DOI https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001468.3</p> <p>Science Keyword EARTH SCIENCE > OCEANS > SEA ICE > SEA ICE MOTION</p> <p>ISO Topic Oceans</p> <p>Personnel Jeong-Won Park (jeong-won.park@kopri.re.kr) Hyun-Cheol Kim (kimhc@kopri.re.kr)</p> <p>Project PE20080, 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구, PI.김현철 PE21040, 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구, PI.김현철</p> <p>Research period 2019-01-01 - 2019-12-31 2020-01-01 - 2020-12-31</p> <p>Create/Update Date 2020-10-06 / 2022-09-19</p> <p>Location OCEAN > ARCTIC OCEAN > Fram Strait</p> <p>Citation 이 보고서는 문에는 극지연구소에서 수행된 연구사업 (PE20080, PE21040) 에서 획득된 데이터(KOPRI-KPDC-00001468)가 사용되었습니다.</p>
<p>해빙 강도 지도</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 근거자료: 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록) 목표: 2건 달성: 2건, 100% 달성 상세 내용 <p>대체 산출물을 활용하여 기존 알고리즘을 고도화 시켰으며 2021년 4월과 5월에 해당되는 Sentinel-1 영상을 활용하여 500m 해상도 해빙강도 산출물 제작 및 KPDC 등록 완료 (KOPRI-KPDC-00001459)</p> <p>※ 기존 게재 번호에 데이터를 추가하여 업데이트 하였기에 동일 ID를 가짐</p>	

		 <p>Home > 데이터 검색 > 데이터 상세</p> <h3>데이터 상세</h3> <h4>Arctic Sea Ice Flexural Strength</h4> <p>Flexural strength of Arctic sea ice using Sentinel-1 synthetic aperture radar</p> <p>내 관심자료로 담기 데이터 공유 신청 PDF 2020-09-17 - 검증됨</p> <p>Entry ID KOPRI-KPDC-00001459</p> <p>DOI https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00001459.1</p> <p>Science Keyword EARTH SCIENCE > CRYOSPHERE > SEA ICE EARTH SCIENCE > CRYOSPHERE > SEA ICE > ICE DEPTH/THICKNESS</p> <p>ISO Topic Oceans</p> <p>Personnel Seung Hee Kim (seunghee@kopri.re.kr) Hyun-cheol Kim (kimhc@kopri.re.kr)</p> <p>Project PE20080, 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구, PI 김현철</p> <p>Research period 2018-08-16 - 2018-08-23 2019-08-11 - 2019-08-16</p> <p>Create/Update Date 2020-09-17 / 2020-09-17</p> <p>Location GEOGRAPHIC REGION > ARCTIC</p> <p>Citation 이 보고서는 문에는 극지연구소에서 수행된 연구사업 (PE20080) 에서 획득된 데이터(KOPRI-KPDC-00001459)가 사용되었습니다.</p>
	해빙 두께 지도	<p>- 근거자료: 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록) 목표: 12건 달성: 12건, 100% 달성 상세 내용 인공지능 기법을 이용하여 수동마이크로파 자료로부터 일간 해빙두께 산출물 제작 및 KPDC 등록 완료 (KOPRI-KPDC-00002033)</p>  <p> KPDC Korea Polar Data Center</p> <p>About Us Metadata Live Data Science Data Policy Login Sign Up My Page SEARCH</p> <p>Korea Polar Data Center Scientific observations and results from Antarctica shall be exchanged and made freely available</p> <p>Metadata Keyword Search</p> <h3>Daily sea ice thickness maps from 2018 to 2019</h3> <p>Daily Arctic sea ice thickness from AMSR2</p> <p>Register favorites + Add Disclosure Request + Add</p> <p>Entry ID KOPRI-KPDC-00002033 DOI https://dx.doi.org/doi:10.22663/KOPRI-KPDC-00002033.1 Science Keyword EARTH SCIENCE > CRYOSPHERE > SEA ICE > ICE DEPTH/THICKNESS ISO Topic Environment Oceans Personnel Junhwa Chi (jhchi@kopri.re.kr) Hyeon-Cheol Kim (kimhc@kopri.re.kr) Project PE21040, Study on remote sensing for quantitative analysis of changes in the Arctic cryosphere. PI.Hyu n-Cheol Kim NTIS Connect PE22040, Study on remote sensing for quantitative analysis of changes in the Arctic cryosphere. PI.Hyu n-Cheol Kim NTIS Connect Research period 2018-11-01 ~ 2019-03-31 Create/Update Date 2022-09-26 / 2022-09-26 Location GEOGRAPHIC REGION > ARCTIC Citation The data(KOPRI-KPDC-00002033) used in this work was provided by the Korea Polar Research Institute.</p>
현장조사 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검증	해빙 코어	<p>- 근거자료: 해빙 코어 사진 및 얼음 특성 (두께, 염도, 온도) 기록 대체 산출물 목표: 3개 달성: 3건, 100% 달성 상세 내용 또는 미달성 사유 코로나19로 인하여 2021년 북극 해빙캠프가 취소됨. 목적 달성을 위해 독</p>

	<p>립적 대체산출물을 제작하고 기존 알고리즘 개선에 활용함.</p>  <p>북극 해빙강도 고도화에 사용된 대체산출물 연평균</p>
<p>현장 관측을 통한 공해상 영상 산출물</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 근거자료: 영상 산출물 메타데이터 기록 - 목표: 1건 - 달성: 1건, 100% - 달성 상세 내용 또는 미달성 사유 <p>북극해 또는 연안 해빙에 대한 표면특성을 관측하기 위하여 결빙시기의 호수를 무인기로 촬영하여 개별 용빙호의 형태와 구조에 대한 관측이 가능한 20cm 미만 공간해상도의 영상 모자이크를 1건 생산함. (코로나19로 인해 북극해 현장조사 수행이 어려워 국내 유사 지역에서의 영상 산출물로 대체함)</p>  <p>취득한 무인기 영상자료를 구글어스에 올리기 전(왼쪽)과 후(오른쪽)</p>
<p>무인기 영상 및 수치표면 모델</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 근거자료: 영상 산출물 메타데이터 기록 - 목표: 1건 - 달성: 1건 / 100% - 달성 상세 내용 또는 미달성 사유 <p>국내 자료 획득-처리 완료. (코로나19로 인해 북극해 현장조사 수행이 어려워 국내에서 극지환경을 고려한 통신조건을 제한한 영상 산출물로 대체함)</p>

		 <p>알래스카 카운실 지역 LiDAR 포인트클라우드 (좌상), 수치표면모델 (우상), RGB 정사영상 (좌하), 초분광 정사영상 (우하)</p>
<p>북극 빙권 구성요소 특성변화 분석</p>	<p>해빙 변형 지도</p>	<p>- 근거자료: 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록) - 목표: 12건 - 달성 12건, 100% - 달성 상세 내용</p> <p>2020년 Sentinel-1의 북극해 전체 관측 영상을 이용하여 각 월의 중간일에 해당하는 해빙 이동 벡터를 2km 해상도로 추출하고, 이동장으로부터 발산과 전단을 계산하여 총 변형율을 산출한 후, 해외기관 CMEMS에서 동일 위성을 사용하여 개발한 10km 해상도의 이동 벡터로부터의 총 변형율 지도와 1:1 비교를 수행한 자료 12건을 KPDC에 등록 (KOPRI-KPDC-00001974)</p>  <p>- 근거자료: 위성산출물 메타데이터 기록 (KPDC 등록) 목표 : 12건 달성 : 12건, 100% 달성 상세 내용 Sentienl-1 북극해 전체 관측 영상 활용하여 2020년부터 2021년까지 매월 해빙 강도 산출물 500m 해상도로 제작 (KOPRI-KPDC-00001459) ※ 기존 게재 번호에 데이터를 추가하여 업데이트 하였기에 동일 ID를 가짐</p>

		
<p>현장조사 기반 북극 빙권 위성 관측 결과 검정</p>	<p>해빙 코어</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 근거자료: 해빙 코어 사진 및 얼음 특성 (두께, 염도, 온도) 기록 - 목표: 3개 - 달성: 4건, 100% - 달성 상세 내용 2022년 북극 해빙캠프에서 다년빙의 상부 1m 코어 4개를 획득하고, 그 특성을 기록함.  <p>해빙코어의 취득 위치(왼쪽 사진)와 깊이별 온도-염도 특성(오른쪽 그래프)</p>
<p>관련 논문</p>	<p>mrnIF 40 이상 80 미만 논문 수</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 근거자료: 게재 기록 (DOI 전자링크 포함) - 목표: 3년 누적 5건 - 달성: 8건, 160% (초과달성)

		<table border="1"> <thead> <tr> <th>번호</th> <th>논문명, 전자링크(DOI)</th> <th>저자</th> <th>학술지명</th> <th>게재일</th> <th>mrnIF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Robust Mosaicking of Lightweight UAV Images Using Hybrid Image Transformation Modeling (https://doi.org/10.3390/rs12061002)</td> <td>김재인 외 2</td> <td>Remote Sens.</td> <td>2020. 03.20.</td> <td>79.3</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Evolution of Backscattering Coefficients of Drifting Multi-Year Sea Ice during End of Melting and Onset of Freeze-up in the Western Beaufort Sea (https://doi.org/10.3390/rs12091378)</td> <td>김승희 외 10</td> <td>Remote Sens.</td> <td>2020. 04.27.</td> <td>79.3</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Surface roughness signatures of summer arctic snow-covered sea ice in X-band dual-polarimetric SAR (https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1767857)</td> <td>한향선 외 8</td> <td>GISci. Remote Sens.</td> <td>2020. 05.22.</td> <td>72.4</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Characteristics of the Reanalysis and Satellite-Based Surface Net Radiation Data in the Arctic (https://doi.org/10.1155/2020/8825870)</td> <td>서민지 외 6</td> <td>J. Sens.</td> <td>2020. 09.17.</td> <td>51.6</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>Spatial and Temporal Variability of Minimum Brightness Temperature at the 6.925 GHz Band of AMSR2 for the Arctic and Antarctic Oceans (https://doi.org/10.3390/rs13112122)</td> <td>권영주 외 5</td> <td>Remote Sens.</td> <td>2021. 05.28.</td> <td>72.4</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>Retrieval of Summer Sea Ice Concentration in the Pacific Arctic Ocean from AMSR2 Observations and Numerical Weather Data Using Random Forest Regression (https://doi.org/10.3390/rs13122283)</td> <td>한향선 외 3</td> <td>Remote Sens.</td> <td>2021. 06.10.</td> <td>72.4</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>Phytoplankton Bloom Changes under Extreme Geophysical Conditions in the Northern Bering Sea and the Southern Chukchi Sea (https://doi.org/10.3390/rs13204035)</td> <td>박진구 외 3</td> <td>Remote Sens.</td> <td>2021. 10.09.</td> <td>72.4</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>Feasibility Study on Estimation of Sea Ice Drift from KOMPSAT-5 and COSMO-SkyMed SAR Images (https://doi.org/10.3390/rs13204038)</td> <td>박정원 외 8</td> <td>Remote Sens.</td> <td>2021. 10.09.</td> <td>72.4</td> </tr> </tbody> </table>	번호	논문명, 전자링크(DOI)	저자	학술지명	게재일	mrnIF	1	Robust Mosaicking of Lightweight UAV Images Using Hybrid Image Transformation Modeling (https://doi.org/10.3390/rs12061002)	김재인 외 2	Remote Sens.	2020. 03.20.	79.3	2	Evolution of Backscattering Coefficients of Drifting Multi-Year Sea Ice during End of Melting and Onset of Freeze-up in the Western Beaufort Sea (https://doi.org/10.3390/rs12091378)	김승희 외 10	Remote Sens.	2020. 04.27.	79.3	3	Surface roughness signatures of summer arctic snow-covered sea ice in X-band dual-polarimetric SAR (https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1767857)	한향선 외 8	GISci. Remote Sens.	2020. 05.22.	72.4	4	Characteristics of the Reanalysis and Satellite-Based Surface Net Radiation Data in the Arctic (https://doi.org/10.1155/2020/8825870)	서민지 외 6	J. Sens.	2020. 09.17.	51.6	5	Spatial and Temporal Variability of Minimum Brightness Temperature at the 6.925 GHz Band of AMSR2 for the Arctic and Antarctic Oceans (https://doi.org/10.3390/rs13112122)	권영주 외 5	Remote Sens.	2021. 05.28.	72.4	6	Retrieval of Summer Sea Ice Concentration in the Pacific Arctic Ocean from AMSR2 Observations and Numerical Weather Data Using Random Forest Regression (https://doi.org/10.3390/rs13122283)	한향선 외 3	Remote Sens.	2021. 06.10.	72.4	7	Phytoplankton Bloom Changes under Extreme Geophysical Conditions in the Northern Bering Sea and the Southern Chukchi Sea (https://doi.org/10.3390/rs13204035)	박진구 외 3	Remote Sens.	2021. 10.09.	72.4	8	Feasibility Study on Estimation of Sea Ice Drift from KOMPSAT-5 and COSMO-SkyMed SAR Images (https://doi.org/10.3390/rs13204038)	박정원 외 8	Remote Sens.	2021. 10.09.	72.4
번호	논문명, 전자링크(DOI)	저자	학술지명	게재일	mrnIF																																																			
1	Robust Mosaicking of Lightweight UAV Images Using Hybrid Image Transformation Modeling (https://doi.org/10.3390/rs12061002)	김재인 외 2	Remote Sens.	2020. 03.20.	79.3																																																			
2	Evolution of Backscattering Coefficients of Drifting Multi-Year Sea Ice during End of Melting and Onset of Freeze-up in the Western Beaufort Sea (https://doi.org/10.3390/rs12091378)	김승희 외 10	Remote Sens.	2020. 04.27.	79.3																																																			
3	Surface roughness signatures of summer arctic snow-covered sea ice in X-band dual-polarimetric SAR (https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1767857)	한향선 외 8	GISci. Remote Sens.	2020. 05.22.	72.4																																																			
4	Characteristics of the Reanalysis and Satellite-Based Surface Net Radiation Data in the Arctic (https://doi.org/10.1155/2020/8825870)	서민지 외 6	J. Sens.	2020. 09.17.	51.6																																																			
5	Spatial and Temporal Variability of Minimum Brightness Temperature at the 6.925 GHz Band of AMSR2 for the Arctic and Antarctic Oceans (https://doi.org/10.3390/rs13112122)	권영주 외 5	Remote Sens.	2021. 05.28.	72.4																																																			
6	Retrieval of Summer Sea Ice Concentration in the Pacific Arctic Ocean from AMSR2 Observations and Numerical Weather Data Using Random Forest Regression (https://doi.org/10.3390/rs13122283)	한향선 외 3	Remote Sens.	2021. 06.10.	72.4																																																			
7	Phytoplankton Bloom Changes under Extreme Geophysical Conditions in the Northern Bering Sea and the Southern Chukchi Sea (https://doi.org/10.3390/rs13204035)	박진구 외 3	Remote Sens.	2021. 10.09.	72.4																																																			
8	Feasibility Study on Estimation of Sea Ice Drift from KOMPSAT-5 and COSMO-SkyMed SAR Images (https://doi.org/10.3390/rs13204038)	박정원 외 8	Remote Sens.	2021. 10.09.	72.4																																																			
관련 논문	<p>mrnIF 80 이상 90 미만 논문 수</p> <p>- 근거자료: 게재 기록 (DOI 전자링크 포함) - 목표: 3년 누적 4건 - 달성: 4건, 100%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>번호</th> <th>논문명</th> <th>저자</th> <th>학술지명</th> <th>게재일</th> <th>mrnIF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Fractal Analysis and Texture Classification of High-Frequency Multiplicative Noise in SAR Sea-Ice Images Based on a Transform-Domain Image Decomposition Method (https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976815)</td> <td>Iman H. S. 외 1</td> <td>IEEE Access</td> <td>2020. 02.27.</td> <td>85.7</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>A Novel SAR Fractal Roughness Modeling of Complex Random Polar Media and Textural Synthesis Based on a Numerical Scattering Distribution Function Processing (https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3084822)</td> <td>Iman H. S. 외 1</td> <td>IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.</td> <td>2021. 05.28.</td> <td>85.7</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Evaluation of Sea Ice Radiative Forcing according to Surface Albedo and Skin Temperature over the Arctic from 1982-2015 (https://doi.org/10.3390/rs14112512)</td> <td>성노훈 외 10</td> <td>Remote Sens.</td> <td>2022. 05.24.</td> <td>86.9</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Variability of Near-Surface Salinity in the Nordic Seas Over the Past Three Decades (1991-2019) (https://doi.org/10.3389/fmars.2022.969159)</td> <td>박지은 외 2</td> <td>Front. Mar. Sci.</td> <td>2022. 09.14.</td> <td>88.6</td> </tr> </tbody> </table>	번호	논문명	저자	학술지명	게재일	mrnIF	1	Fractal Analysis and Texture Classification of High-Frequency Multiplicative Noise in SAR Sea-Ice Images Based on a Transform-Domain Image Decomposition Method (https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976815)	Iman H. S. 외 1	IEEE Access	2020. 02.27.	85.7	2	A Novel SAR Fractal Roughness Modeling of Complex Random Polar Media and Textural Synthesis Based on a Numerical Scattering Distribution Function Processing (https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3084822)	Iman H. S. 외 1	IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.	2021. 05.28.	85.7	3	Evaluation of Sea Ice Radiative Forcing according to Surface Albedo and Skin Temperature over the Arctic from 1982-2015 (https://doi.org/10.3390/rs14112512)	성노훈 외 10	Remote Sens.	2022. 05.24.	86.9	4	Variability of Near-Surface Salinity in the Nordic Seas Over the Past Three Decades (1991-2019) (https://doi.org/10.3389/fmars.2022.969159)	박지은 외 2	Front. Mar. Sci.	2022. 09.14.	88.6																									
번호	논문명	저자	학술지명	게재일	mrnIF																																																			
1	Fractal Analysis and Texture Classification of High-Frequency Multiplicative Noise in SAR Sea-Ice Images Based on a Transform-Domain Image Decomposition Method (https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976815)	Iman H. S. 외 1	IEEE Access	2020. 02.27.	85.7																																																			
2	A Novel SAR Fractal Roughness Modeling of Complex Random Polar Media and Textural Synthesis Based on a Numerical Scattering Distribution Function Processing (https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3084822)	Iman H. S. 외 1	IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.	2021. 05.28.	85.7																																																			
3	Evaluation of Sea Ice Radiative Forcing according to Surface Albedo and Skin Temperature over the Arctic from 1982-2015 (https://doi.org/10.3390/rs14112512)	성노훈 외 10	Remote Sens.	2022. 05.24.	86.9																																																			
4	Variability of Near-Surface Salinity in the Nordic Seas Over the Past Three Decades (1991-2019) (https://doi.org/10.3389/fmars.2022.969159)	박지은 외 2	Front. Mar. Sci.	2022. 09.14.	88.6																																																			
관련 논문	<p>mrnIF 90 이상 논문 수</p> <p>- 근거자료: 게재 기록 (DOI 전자링크 포함) - 목표: 3년 누적 1건 - 달성: 6건, 600% (초과달성)</p>																																																							

번호	논문명	저자	학술지명	게재일	mmIF
1	Object-based landfast sea ice detection over West Antarctica using time series ALOS PALSAR data (https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111782)	김미애 외 4	Remote Sens. Environ.	2020. 03.24.	97.6
2	Prediction of monthly Arctic sea ice concentrations using satellite and reanalysis data based on convolutional neural networks (https://doi.org/10.5194/tc-14-1083-2020)	김영준 외 4	Cryosphere	2020. 03.25.	94.3
3	Classification of sea ice types in Sentinel-1 synthetic aperture radar images (https://doi.org/10.5194/tc-14-2629-2020)	박정원 외 5	Cryosphere	2020. 08.20.	94.3
4	Digital surface model generation for drifting Arctic sea ice with low-textured surfaces based on drone images (https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.12.008)	김재인 외 3	ISPRS-J. Photogramm. Remote Sens.	2020. 12.31.	100.0
5	Retrieval of daily sea ice thickness from AMSR2 passive microwave data using ensemble convolutional neural networks (https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1943213)	지준화 외 1	GISci. Remote Sens.	2021. 07.14.	93.2
6	Ross Sea Dissolved Organic Matter Optical Properties During an Austral Summer: Biophysical Influences (https://doi.org/10.3389/fmars.2021.749096)	Euroco J. D'Sa 외 3	Front. Mar. Sci.	2021. 10.27.	93.3

5. KPDC 등록 이행실적

표 4-1-11. KPDC 등록 이행실적

데이터 이름 ¹⁾	메타데이터 ID ²⁾	메타데이터 제목 ³⁾	원시데이터 등록여부 ⁴⁾
해빙 이동 지도	KOPRI-KPDC-00001467	Satellite SAR data-based sea ice types in Fram Strait (2019)	등록
해빙 유형 지도	KOPRI-KPDC-00001468	Satellite SAR data-based sea ice drift vectors in Fram Strait (2019-2020)	등록
해빙 변형 지도	KOPRI-KPDC-00001974	Satellite SAR data-based sea ice total deformation rate in the Arctic Ocean (2020)	등록
해빙 굽힘강도 지도	KOPRI-KPDC-00001459	Arctic Sea Ice Flexural Strength	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 두께 지도	KOPRI-KPDC-00002033	Daily sea ice thickness maps from 2018 to 2019	등록
원시데이터 등록률 ⁵⁾			100 %

주) 1) 과제계획서 제출시 첨부되는 데이터관리계획서에 기재된 데이터 이름

2) 3) KPDC에 등록된 메타데이터 ID 및 제목

- 4) KPDC에 등록된 메터데이터의 원시데이터 등록여부
- 5) 메터데이터 등록 건수 대비 원시데이터 등록비율

6. 기타 성과

가. 인력활용/양성 성과

1) 인력지원 성과

표 4-1-12. 인력지원 성과

지원 총인원	지원 대상 (학위별, 취득자)				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타지역
28	6	15	7	0	17	11	13	0	15

○ 연수연구원 지원

- 연수연구원 김재인 박사는 극지에서서의 무인기 활용에 관한 연구를 수행했으며, 연구 성과를 국제학술지에 제1저자로 2편을 게재하였고, 한국항공우주연구원으로 이직함.
- 연수연구원 Iman 박사는 극지 해빙 촬영 영상 내의 전자기적 신호 특성에 관한 연구를 수행하고 있으며, 연구성과를 국제학술지에 제1저자로 2편을 게재함.
- 연수연구원 권영주 박사는 수동형 마이크로파 센서 기반 북극 해빙의 물리 특성 연구를 수행했으며, 연구성과를 국제학술지에 제1저자로 1편을 게재하였고, 한국과학기술원으로 이직함.
- 연수연구원 박지은 박사는 위성 자료를 활용한 북극 표층 염분 환경 변화 분석 연구를 수행하고 있으며, 연구성과를 국제학술지에 제1저자로 1편을 게재함.
- 연수연구원 서민지 박사는 위성 자료를 활용한 북극 식생 환경 변화 분석 연구를 수행하고 있음.

○ 학문후속세대 양성

- 박사학위과정 학생 17명 지원 (부경대학교 5명, 세종대학교 6명, 울산과학기술원 5명, 한국해양과학기술원 1명)
- 석사학위과정 학생 7명 지원 (부경대학교 3명, 세종대학교 2명, 울산과학기술원 2명)

나. 국제화/협력 성과

1) 국내·외 공동 연구협력 실적 (위탁연구 제외)

표 4-1-12. 국내·외 공동 연구협력 실적 (위탁연구 제외)

연구협력 파트너	수행형태	연구협력 내용(목표)	수행 결과 및 우수성
독일 AWI 및 MOSAiC 국제공동연구팀	공동	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 쇄빙선 Polarstern의 표류 궤적을 따라 아리랑 및 기타 위성 영상 분석을 통해 해빙 표면의 시계열 변화 모니터링 수행 ✓ 현장관측 자료와의 연계를 통한 해빙 특성 산출 알고리즘 개발/검증 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 전세계 20개국 중 본 연구과제가 한국 대표로 참여   <ul style="list-style-type: none"> ✓ 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 공동 SCI 논문 1편 게재
노르웨이 NERSC	공동	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 유럽 위성자료 공유 및 해빙 예측 기술 공유 방안 논의 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ EU의 INTAROS (국제공동 북극관측) 프로그램에 본 연구과제가 한국 대표로 참여  
미국 IARC	공동	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 북극 공동 현장관측 계획 및 상호 교류 논의 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 상방 조사 소나(SONAR) 관측 자료를 통한 북극해 (세베르나야제물라제도 북쪽 연안) 해빙두께 공동 분석 진행중

2) 인력교류 성과

표 4-1-13. 인력교류 성과

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

○ 외국 연구자 유치 1건

- 2022년 9월 19일부터 24일까지 연구협력 파트너인 노르웨이 NERSC의 해빙원격탐사/모델링 전문가 Anton Korosov 박사를 초청하여 해빙 원격탐사 연구 기술에 대한 지식 교류 세미나를 진행
- 또한 2단계에서 수행 예정인 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 협의함.

3) 학술회의 개최 성과

표 4-1-14. 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 (ISRS)	원격탐사	3+a (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 (홍보)
GeoAI 데이터학회 추계학술대회	인공지능 / 원격탐사	1	300	2021.11.24.-26. (3일)	부산	3 (특별세션) 2 (홍보부스)
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 (예정)
GeoAI 데이터학회 추계학술대회	인공지능 / 원격탐사	1	300	2022.11.15.-18. (4일)	제주	2 (예정)

○ 개최 의의 및 효과

- 과제 관련 연구 수행 결과 발표를 통한 극지연구소에서 수행 중인 과제 홍보,
- 북극 해빙 예측을 위한 위성/모델링 융합연구 활성화 방안 마련 및 극지원격탐사 분야 국내외 연구 네트워크 구축

다. 기타 성과

표 4-1-15. 위성탐사빙권정보센터 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(플라이터) 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 제 2차관 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.	산업통산자원부 MOU 관련 참석자 방소		
2022.04.20.	KBS 인터뷰		
2022.06.15.	한-중해양과학공동연구센터 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		
			

제 2 절 연구개발 성과 및 의의

표 4-2-1. 연구개발 성과 및 의의

구분	주요 내용
<p>자체 종합 평가 의견</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 본 과제의 최종 목표는 “온난화에 의한 북극 빙권 변화의 특성을 이해하고 그 변화량을 정량적으로 산정”하는 것임. ○ 이를 위해 1단계에서는 원격탐사로 관측할 수 있는 해빙의 다양한 특성을 주요 연구 대상으로 하였으며, 단계 목표는 북극 빙권 변화 파악을 위한 “<u>위성 원격탐사 산출물 개발</u>”임 ○ 1단계 연구 수행을 통해, <ol style="list-style-type: none"> 1) 두께, 이동, 유형의 3종에 대해서 시공간 해상도를 크게 개선함. 2) 굽힘강도, 거칠기의 2종에 대해 기존에 없던 산출물을 신규 개발함. 3) 변형, 리드, 용빙호의 3종에 대해 기존에 있었으나 시기적으로 단절된 산출물을 지속 개발함. ○ 코로나19로 인한 국내외 연구협력기회 축소 및 현장연구의 제한에도 불구하고 다수의 화상회의 개최, 목표 달성에 부합하는 대체연구 수행, 건실한 연구관리 및 수행으로 당초의 성과목표를 100% 달성함. ○ 1단계의 결과로 분석 대상 요소 증대 및 분석 가능 스케일의 개선을 이룸으로써 2단계에서 수행할 다각적/종합적인 빙권변화양상 분석의 기반 연구를 충실히 이행함.
<p>1차년 (2020년) 성과 및 의의</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해빙 유형 : 기존 해외기관(NSIDC)의 수-수십 km 공간해상도 벡터 지도를 영상레이더 영상에 학습시켜 향상된 2km 공간해상도의 자동화된 3종 유형 분류 지도 작성 원형 알고리즘 개발 <ul style="list-style-type: none"> → Sentinel-1 영상레이더 기반 극지역 고유 해빙 유형 분류 자동화 기술 개발 ○ 해빙 이동: 피쳐트래킹과 패턴매칭의 하이브리드 알고리즘의 영상레이더 자료에의 적용을 통해 기존 해외기관(CMEMS)의 10km 공간해상도보다 향상된 2km 공간해상도 및 정밀도의 해빙 이동 벡터 지도 작성 원형 알고리즘 개발 <ul style="list-style-type: none"> → Sentinel-1 영상레이더 기반 극지역 고유 해빙 이동 관측 기술 개발 ○ 해빙 두께: 능동/수동형 마이크로파 원격탐사 자료 및 재분석장을 이용한 해빙 방출을 산출 원형 알고리즘 개발 <ul style="list-style-type: none"> → 새로운 이론 기반 마이크로파 방출을 계산 방법 개발 ○ 해빙 두께 (딤러닝): 고도계/수동마이크로파 위성 궤 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발 <ul style="list-style-type: none"> → 수동마이크로파 궤와 인공지능 기법을 이용해 1개월의 고도계 기반 해빙두께 관측 주기를 1일 단위로 산출할 수 있는 모델 개발 ○ 해빙 굽힘강도: 능동 마이크로파 원격탐사 자료 및 여름철 북극 탐사에서 확보된 해빙 코어 자료를 활용하여 굽힘강도 산출 알고리즘 개발 <ul style="list-style-type: none"> → 굽힘강도라는 새로운 해빙 관련 산출물 개발 ○ 용빙호: 무인기 광학 자료 구축 및 용빙호 매핑 <ul style="list-style-type: none"> → 해빙 표면의 용빙호 현장 관측 영상을 획득, 처리하여 용빙호의 특성을 분류하는 프로토콜 정의 및 관련 처리 기술 개발 ○ 동토: 다중센서자료 융합 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> → 동일 지역을 동시 촬영한 이중 센서자료의 공간적 불일치 방법 개발 ○ 해수조사: 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역에서 현장관측 수행 <ul style="list-style-type: none"> → 70정점의 해수샘플 생물-광 특성 분석 ○ 해빙트래커: 해빙캠프 취소로 과거 해빙 트래커 자료 확보 및 분석 <ul style="list-style-type: none"> → 2개 트래커 자료 확보 및 해빙 이동 벡터 산출 결과에 대한 검증 ○ 해빙 코어: 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘에 활용할 자료 확보 <ul style="list-style-type: none"> → 기 확보된 해빙 코어자료 보완 ○ 동토 현장조사/기술: 무인기 다중센서 운용 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> → 효율적인 현장조사를 위한 무인기 및 센서 운용 프로토콜 정립

<p>2차년 (2021년) 성과 및 의의</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해빙 이동: 기술개선, MOSAiC 미션의 고해상 영상레이더로의 확장 적용 및 평가 → 1차년도 생산 기술의 고도화로 적용 가능 센서 확장 및 개선된 정밀도 검증 ○ 해빙 유형: 기술개선, 분류 유형의 확장 적용 및 평가 수행 → 1차년도 생산 기술의 고도화로 기존 3종 분류에서 5종 분류로 확대하고 결과 검증 ○ 해빙 두께: 수동형 마이크로파 자료의 밝기 온도 특성 분석 및 두께 추정 알고리즘 개발 → 얇은 해빙에 제한적으로 산출되던 수동형 마이크로파 관측 자료를 북극해 전 지역으로 확장할 수 있는 가능성 제시 ○ 해빙 두께 (딥러닝): 고도계/수동마이크로파 위성자료 융합 북극 해빙두께 산출 모델 개발 → 고도계/수동마이크로파 융합 해빙두께 산출의 한계점 발견을 통한 향후 개선 방향 수립 ○ 해빙 강도: 기 확보된 해빙 코어 및 해빙 두께와 대기 온도 자료를 활용하여 제작된 대안 산출물을 이용하여 고해상도 해빙 굽힘강도 산출 알고리즘 고도화 → 알고리즘 고도화로 인해 굽힘강도 평균오차 감소 ○ 용빙호: 위성 비교 자료 구축 및 탐지 기술 개발 → 고도계 측선 관측값과 기계학습을 이용한 새로운 용빙호 탐지 기술 개발 ○ 동토: 동토 모니터링을 위한 다중센서자료 융합 기술 개발 → 이중센서 자료 처리 기술 안정화 ○ 해수조사: 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역에서 현장관측 수행 → 128정점의 해수샘플 생물-광 특성 분석 ○ 해빙트래커: 해빙캠프 취소로 과거 해빙 트래커 자료 확보 및 분석 → MOSAiC 미션에서의 100여개 트래커 자료 확보 및 해빙 이동 벡터 산출 결과에 대한 검증 ○ 해빙코어: 현장조사 불가로 인하여 해빙 두께와 대기 온도 자료를 기존에 알려진 경험식에 대입하여 고해상도 굽힘강도 산출 알고리즘 고도화에 사용될 대안 산출물 제작 → 부족한 해빙 코어 자료 개수 보완이 가능하며 비교 검증이 가능할 것으로 기대 ○ 동토 현장조사/기술: 무인기 다중센서 운용 기술 개발 → 다양한 국내 테스트를 통한 운용 프로토콜 개선
<p>3차년 (2022년) 성과 및 의의</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해빙 변형: 영상레이더 기반 극지연 고유 해빙 변형 산출물 생산 기술 개발 → 해외기관 OSI-SAF의 자료와 비교분석하여 극지연 자료의 우수성 확인 ○ 해빙 굽힘강도: 북극 해빙 굽힘강도 산출물 10년 장기 시계열 확보 및 북극해를 17개 해역으로 나누어 지역별 변화량 산출 및 분석 → 장기 산출물 분석을 통해 Northern Sea Route 지역에서 해빙 강도 감소 특성 확인 ○ 용빙호: 다중 광학 원격탐사 센서 기반 대표적 용빙호 시공간 분포 자료 5종간 특성 분석 → 자료별 장단점 분석 및 차후 장기 데이터셋 활용을 위한 최적의 자료 선정 ○ 동토 변화 모니터링: 동토 변화 모니터링을 위한 시계열 지형 자료 분석 → 2019년에 획득된 LiDAR 포인트클라우드 기반의 수치표면모델과 비교를 통해 지난 3년간 카운실 지역 동토층 변화 파악 ○ 해수조사: 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역에서 현장관측 수행 → 61정점의 해수샘플 생물-광 특성 분석 진행 중. ○ 해빙트래커: 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역에서 현장관측 수행 → 3개의 해빙트래커 설치 후 추적 진행중. 해빙 이동 산출물 검증에 활용 예정. ○ 해빙코어: 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역에서 현장관측 수행 → 4개의 해빙코어 확보 후 분석 진행중. 해빙 굽힘강도 산출물 검증에 활용 예정. ○ 동토 현장조사/기술: 무인기 다중센서 운용 기술 개발 → 알래스카 현장조사를 통한 무인기 다중센서 운용 현지 테스트 수행.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 연구결과의 활용방안

- 지속 가능한 “미래의 지구 (Future Earth)”를 위한 전 지구 환경변화에 효과적으로 대응할 수 있는 지식기반 획득을 위한 연구에 활용
- 북극권역 위성정보 제공을 통한 극지역 기후변화 연구에 활용
- 위성 보유국으로서의 북극 빙권에 대한 신뢰성 있는 자료 생산을 통해 국제적 활용 분야 확대
- 위성정보 활용 고도화를 통한 북극 빙권 연구 분야 국제적 위상 제고
- 아리랑 위성정보 활용 분야 확대를 통한 위성정보 수입대체 효과 기대
- 북극항로 개척을 위한 북극해 해빙, 해양 변화 기초정보로 활용
- 극지역 항해 정보 제공 및 안전 대처에 필요한 시스템 구축에 활용
- 해빙, 해양의 물리적 특성에 대한 정량적 산출물 제공
- 해양/해빙 인공위성 산출물 안정화 및 고도화를 위한 증빙자료로써 활용
- 초고해상도 원격탐사 표면 공간 정보 제공을 위한 기초자료수집체계 정립에 활용
- 위성기반 정보망에 기반을 둔 e-navigation 북극해 항로 첨단화 관련 산업발전에 기여
- 극지연구소 인프라를 활용한 광역 규모의 중장기 환경변화 관측 연구에 본 연구에서 도출한 결과 이용을 통해 국제사회에 기여 및 핵심기관으로 부상하는 기반 마련에 활용.
- 한국주도형 극지 인공위성 원격탐사 연구에 활용 가능한 결과를 제공하여, 활발한 극지관측 위성개발의 기초자료로 활용하고, 한국주도형 극지관측 위성개발의 필요성 제기를 위한 기본 자료로 활용
- 빙권 변화가 극지 환경에 미치는 영향 이해, 한반도 이상기후 이해 증진과 더불어 정부 정책의 적극적 실천에 기여
- 북극권 개발 및 동토 변화에 따른 북극권 환경오염 모니터링을 통해 빙권 변화에 따른 북극권 친환경 개발 가이드라인 제공

- 북극권 국가에 도움이 되는 기후모델(물순환모델) 제공
- 극지 빙권변화 파악에 따른 수산자원 확보에 필요한 고부가가치 정보 생산
- 기후 예측 시스템 가동에 중요한 입력 자료 생산 기술 확보
- 국제연구 프로젝트 적극적 참여를 통한 북극권 진출의 당위성 제고



제 2 절 기대성과 및 파급효과

○ 과학/기술적 분야

- 북극 해빙, 해양의 변화량 산출 알고리즘 고도화 및 시공간적으로 고해상의 변화정보 생성
- 기후예측 모델의 입력항목(해빙) 정밀도 향상
- 한국 개발 아리랑 위성의 빙권 관측 기능 고도화를 위한 기술 개발
- 극지 활용 가능 무인항공기 기반 고해상 원격탐사 기술 개발
- 인공위성 및 현장관측을 통해 빙권 구성요소의 특성 변동 파악 기술 기반 마련
- 부처 간 협동 연구가 가능한 연구사업으로 미래부의 아리랑위성의 국제적 활용성 증대 및 한국 극지연구의 첨단기술력 과시(위성과 쇄빙연구선 공동 활용)
- 국가 위성영상의 품질 신뢰도 증대에 기여 및 국제사회에서의 한국형 위성 활용도 증대
- 코로나 등 재난으로 인한 현장 관측 공백 해소에 기여
- 국내 극지 원격탐사 전문인력 양성을 위한 환경 조성 효과 수립
- 장기 모니터링을 위한 지속 및 후속 과제 당위성 기반 마련
- 국내외 최초 원격탐사 빙권정보제공을 위한 고도화된 시스템 구축 사례로써 국제적 위상 제고

○ 사회/경제적 분야

- 북극권 해빙, 해양의 변화 정밀 관측 4차 산업 관측 기술 확보
- 극지 기후변화 예측 및 신기술 수요 확대 대응
- 정확한 북극 빙권 변동 모니터링과 북극 기후 변동 관련 기상 예측 한계 확대
- 극지연구소 인프라를 활용한 광역 규모의 중장기 환경변화 관측 연구를 통해 국제사회에 기여 및 핵심기관으로 부상
- 한국주도형 극지원격탐사연구가 가능하게 되며, 이를 계기로 활발한 극지관측을 위한 위성 개발의 필요성을 공론화할 수 있음
- 기후변화에 따른 해양 이산화탄소 및 생산력 변동 요인을 파악함으로써 기후변화 대응 국가 전략을 수립하는 과학적 근거 마련

- 해외 위성자료 활용 시 장당 평균 1천만 원 이상 소요, 아리랑 위성영상 분석기술 개발 시 해외위성자료의 수입비용 90% 이상 절감
 - 국내 극지 원격탐사 관련 연구 산업의 활성화 및 활용 분야 정립
 - 국내 극지 인공위성 탑재체 개발을 위한 당위성 및 기술력 확보 수요 요구 촉진
- 정책 분야
- 극지 빙권 연구를 통한 기후변화 대응
 - 북극 빙권 변화가 극지 환경에 미치는 영향과 한반도 이상기후 이해를 통한 효과적 정부 정책 수립
 - 기후요인과의 연관성 결과를 통해 국제환경이슈에 대응할 수 있는 국가적 역량 제고



제 6 장 참고문헌

- 박광섭, 김현철, 이태희, 손영백, 2018. 북극해에서 입자추적 방법을 이용한 유빙 추적 연구, 대한원격탐사학회, 34(6-2), 1299-1310.
- 김현아, 박진구, 김현철, 손영백, 2017. 북극해에서 다중위성 자료를 이용한 표층수온, 해빙농도 및 클로로필의 장기 변화, 33(6), 901-915.
- 오민기, 김현철, 2018. 베링해 해빙 상태와 척치해 해빙 변화 간의 연관성 분석: 정보 엔트로피 접근, 대한원격탐사학회, 34(6), 1229-1238.
- Aagaard, K. and Carmack, E.C., 1989. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C10), pp.14485-14498.
- Ackley, S., Hibler, W., Kugzruk, F., Kovacs, A. and Weeks, W., 1974, August. Thickness and roughness variations of Arctic multi-year sea ice. In *Ocean'74-IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment* (pp. 109-117). IEEE.
- AlJassar, H.K., Temimi, M., Entekhabi, D., Petrov, P., AlSarraf, H., Kokkalis, P. and Roshni, N., 2019. Forward simulation of multi-frequency microwave brightness temperature over desert soils in Kuwait and comparison with satellite observations. *Remote Sensing*, 11(14), p.1647.
- Andersen, S., Tonboe, R., Kaleschke, L., Heygster, G. and Pedersen, L.T., 2007. Intercomparison of passive microwave sea ice concentration retrievals over the high concentration Arctic sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C8).
- Antipov, G., Baccouche, M. and Dugelay, J.L., 2017, September. Face aging with conditional generative adversarial networks. In *2017 IEEE international conference on image processing (ICIP)* (pp. 2089-2093). IEEE.
- Archer, K.J. and Kimes, R.V., 2008. Empirical characterization of random forest variable importance measures. *Computational statistics & data analysis*, 52(4), pp.2249-2260.
- Arrigo, K.R. and van Dijken, G.L., 2004. Annual cycles of sea ice and phytoplankton in Cape Bathurst polynya, southeastern Beaufort Sea, Canadian Arctic. *Geophysical Research Letters*, 31(8).
- Arrigo, K.R. and van Dijken, G.L., 2011. Secular trends in Arctic Ocean net primary production. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C9).

- Arrigo, K.R. and van Dijken, G.L., 2015. Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progress in oceanography*, 136, pp.60-70.
- Årthun, M., Eldevik, T., Smedsrud, L.H., Skagseth, Ø. and Ingvaldsen, R.B., 2012. Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents Sea ice variability and retreat. *Journal of Climate*, 25(13), pp.4736-4743.
- Baldwin, D., Tschudi, M., Pacifici, F. and Liu, Y., 2017. Validation of Suomi-NPP VIIRS sea ice concentration with very high-resolution satellite and airborne camera imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, pp.122-138.
- Beitsch, A., Kaleschke, L. and Kern, S., 2014. Investigating high-resolution AMSR2 sea ice concentrations during the February 2013 fracture event in the Beaufort Sea. *Remote Sensing*, 6(5), pp.3841-3856.
- Belchansky, G.I., Douglas, D.C. and Platonov, N.G., 2004. Duration of the Arctic sea ice melt season: Regional and interannual variability, 1979-2001. *Journal of Climate*, 17(1), pp.67-80.
- Beszczyńska-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 Journal of Marine Science*, 69(5), pp.852-863.
- Bintanja, R. and Van der Linden, E.C., 2013. The changing seasonal climate in the Arctic. *Scientific reports*, 3(1), pp.1-8.
- Bintanja, R. and Krikkken, F., 2016. Magnitude and pattern of Arctic warming governed by the seasonality of radiative forcing. *Scientific Reports*, 6(1), p.38287.
- Bliss, A.C., Steele, M., Peng, G., Meier, W.N. and Dickinson, S., 2019. Regional variability of Arctic sea ice seasonal change climate indicators from a passive microwave climate data record. *Environmental Research Letters*, 14(4), p.045003.
- Block, K. and Mauritsen, T., 2013. Forcing and feedback in the MPI ESM LR coupled model under abruptly quadrupled CO₂. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(4), pp.676-691.
- Boé, J., Hall, A. and Qu, X., 2009. September sea-ice cover in the Arctic Ocean projected to vanish by 2100. *Nature Geoscience*, 2(5), pp.341-343.
- Boisvert, L.N., Petty, A.A. and Stroeve, J.C., 2016. The impact of the extreme winter 2015/16 Arctic cyclone on the Barents-Kara Seas. *Monthly Weather Review*, 144(11),

pp.4279-4287.

- Bony, S., Colman, R., Kattsov, V.M., Allan, R.P., Bretherton, C.S., Dufresne, J.L., Hall, A., Hallegatte, S., Holland, M.M., Ingram, W. and Randall, D.A., 2006. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes?. *Journal of Climate*, 19(15), pp.3445-3482.
- Bright, R.M. and O'Halloran, T.L., 2019. Developing a monthly radiative kernel for surface albedo change from satellite climatologies of Earth's shortwave radiation budget: CACK v1. 0. *Geoscientific Model Development*, 12(9), pp.3975-3990.
- Bröhan, D. and Kaleschke, L., 2014. A nine-year climatology of Arctic sea ice lead orientation and frequency from AMSR-E. *Remote Sensing*, 6(2), pp.1451-1475.
- Cao, Y., Liang, S., Chen, X. and He, T., 2015. Assessment of sea ice albedo radiative forcing and feedback over the Northern Hemisphere from 1982 to 2009 using satellite and reanalysis data. *Journal of Climate*, 28(3), pp.1248-1259.
- Cao, Y., Liang, S., He, T. and Chen, X., 2016. Evaluation of four reanalysis surface albedo data sets in Arctic using a satellite product. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(3), pp.384-388.
- Cavalieri, D.J., Gloersen, P. and Campbell, W.J., 1984. Determination of sea ice parameters with the Nimbus 7 SMMR. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D4), pp.5355-5369.
- Cavalieri, D.J., Crawford, J.P., Drinkwater, M.R., Eppler, D.T., Farmer, L.D., Jentz, R.R. and Wackerman, C.C., 1991. Aircraft active and passive microwave validation of sea ice concentration from the Defense Meteorological Satellite Program Special Sensor Microwave Imager. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C12), pp.21989-22008.
- Cavalieri, D.J., 1994. A microwave technique for mapping thin sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C6), pp.12561-12572.
- Cavalieri, D.J. and Parkinson, C.L., 2012. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010. *The Cryosphere*, 6(4), pp.881-889.
- Chase, J.R. and Holyer, R.J., 1990. Estimation of sea ice type and concentration by linear unmixing of Geosat altimeter waveforms. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C10), pp.18015-18025.

- Chen, K., Wang, J., Chen, L.C., Gao, H., Xu, W. and Nevatia, R., 2015. Abc-cnn: An attention based convolutional neural network for visual question answering. *arXiv preprint arXiv:1511.05960*.
- Chen, X., Liang, S., Cao, Y., He, T. and Wang, D., 2015. Observed contrast changes in snow cover phenology in northern middle and high latitudes from 2001-2014. *Scientific reports*, 5(1), pp.1-9.
- Chen, X., Liang, S. and Cao, Y., 2016. Satellite observed changes in the Northern Hemisphere snow cover phenology and the associated radiative forcing and feedback between 1982 and 2013. *Environmental Research Letters*, 11(8), p.084002.
- Chen, X., Long, D., Hong, Y., Liang, S. and Hou, A., 2017. Observed radiative cooling over the Tibetan Plateau for the past three decades driven by snow cover induced surface albedo anomaly. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(12), pp.6170-6185.
- Chen, X., Yang, Y. and Yin, C., 2021. Contribution of Changes in Snow Cover Extent to Shortwave Radiation Perturbations at the Top of the Atmosphere over the Northern Hemisphere during 2000-2019. *Remote Sensing*, 13(23), p.4938.
- Cheng, S., Aydoğdu, A., Rampal, P., Carrassi, A. and Bertino, L., 2020, December. Probabilistic forecasts of sea ice trajectories in the Arctic: impact of uncertainties in surface wind and ice cohesion. In *Oceans* (Vol. 1, No. 4, pp. 326-342). MDPI.
- Chi, J., Kim, H.C. and Kang, S.H., 2016. Machine learning-based temporal mixture analysis of hypertemporal Antarctic sea ice data. *Remote Sensing Letters*, 7(2), pp.190-199.
- 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), p.1305.
- 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, p.111204.
- Cho, K. and Naoki, K., 2015, October. Advantages of AMSR2 for monitoring sea ice from space. In *Asian Conference on Remote Sensing, Manila, Philippines* (pp. 19-23).
- 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: Oceans*, 84(C9), pp.5699-5706.

- Chouzenoux, E., Legendre, M., Moussaoui, S. and Idier, J., 2013. Fast constrained least squares spectral unmixing using primal-dual interior-point optimization. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(1), pp.59-69.
- Christiansen, B., 2001. Downward propagation of zonal mean zonal wind anomalies from the stratosphere to the troposphere: Model and reanalysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D21), pp.27307-27322.
- Chu, C., Chen, C., Nolte, L.P. and Zheng, G., 2014. Fully automatic cephalometric x-ray landmark detection using random forest regression and sparse shape composition. *submitted to Automatic Cephalometric X-ray Landmark Detection Challenge*.
- Cohen, J., Screen, J.A., Furtado, J.C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J. and Jones, J., 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature geoscience*, 7(9), pp.627-637.
- Comeau, D., Giannakis, D., Zhao, Z. and Majda, A.J., 2019. Predicting regional and pan-Arctic sea ice anomalies with kernel analog forecasting. *Climate Dynamics*, 52, pp.5507-5525.
- Comiso, J.C., 1986. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C1), pp.975-994.
- Comiso, J.C., 1995. *SSM/I sea ice concentrations using the bootstrap algorithm* (Vol. 1380). National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center.
- Comiso, J.C., Cavalieri, D.J., Parkinson, C.L. and Gloersen, P., 1997. Passive microwave algorithms for sea ice concentration: A comparison of two techniques. *Remote sensing of Environment*, 60(3), pp.357-384.
- Comiso, J.C., 2003. Warming trends in the Arctic from clear sky satellite observations. *Journal of Climate*, 16(21), pp.3498-3510.
- Comiso, J.C., Cavalieri, D.J. and Markus, T., 2003. Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), pp.243-252.
- Comiso, J.C., 2006. Abrupt decline in the Arctic winter sea ice cover. *Geophysical Research Letters*, 33(18).
- Comiso, J.C., 2012. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover. *Journal of climate*, 25(4), pp.1176-1193.

- Cooke, C.L. and Scott, K.A., 2019. Estimating sea ice concentration from SAR: Training convolutional neural networks with passive microwave data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(7), pp.4735-4747.
- Crane, R.G., 1978. Seasonal variations of sea ice extent in the Davis Strait-Labrador Sea area and relationships with synoptic-scale atmospheric circulation. *Arctic*, pp.434-447.
- Dai, M., Arbetter, T.E. and Meier, W.N., 2006. Data assimilation of sea-ice motion vectors: sensitivity to the parameterization of sea-ice strength. *Annals of Glaciology*, 44, pp.357-360.
- Dawson, A., 2016. eofs: A library for EOF analysis of meteorological, oceanographic, and climate data. *Journal of Open Research Software*, 4(1).
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, D.P. and Bechtold, P., 2011. The ERA Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656), pp.553-597.
- Deser, C., Tomas, R.A. and Peng, S., 2007. The transient atmospheric circulation response to North Atlantic SST and sea ice anomalies. *Journal of Climate*, 20(18), pp.4751-4767.
- Deser, C. and Teng, H., 2008. Evolution of Arctic sea ice concentration trends and the role of atmospheric circulation forcing, 1979-2007. *Geophysical Research Letters*, 35(2).
- Devasthale, A., Sedlar, J., Koenigk, T. and Fetzer, E.J., 2013. The thermodynamic state of the Arctic atmosphere observed by AIRS: comparisons during the record minimum sea ice extents of 2007 and 2012. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(15), pp.7441-7450.
- Dierking, W., 1995. Laser profiling of the ice surface topography during the Winter Weddell Gyre Study 1992. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 100(C3), pp.4807-4820.
- Dierking, W., 2009. Mapping of different sea ice regimes using images from Sentinel-1 and ALOS synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(3), pp.1045-1058.
- Dierking, W., 2013. Sea ice monitoring by synthetic aperture radar. *Oceanography*, 26(2), pp.100-111.
- Ding, Q., Wallace, J.M., Battisti, D.S., Steig, E.J., Gallant, A.J., Kim, H.J. and Geng, L., 2014. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and

Greenland. *Nature*, 509(7499), pp.209-212.

Doble, M.J., Skourup, H., Wadhams, P. and Geiger, C.A., 2011. The relation between Arctic sea ice surface elevation and draft: A case study using coincident AUV sonar and airborne scanning laser. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C8).

Dokken, T.M. and Jansen, E., 1999. Rapid changes in the mechanism of ocean convection during the last glacial period. *Nature*, 401(6752), pp.458-461.

Doney, S.C., Ruckelshaus, M., Emmett Duffy, J., Barry, J.P., Chan, F., English, C.A., Galindo, H.M., Grebmeier, J.M., Hollowed, A.B., Knowlton, N. and Polovina, J., 2012. Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual review of marine science*, 4, pp.11-37.

Donoser, M., Riemenschneider, H. and Bischof, H., 2010, August. Shape guided maximally stable extremal region (mser) tracking. In *2010 20th international conference on pattern recognition* (pp. 1800-1803). IEEE.

Drobot, S., 2003. Long-range statistical forecasting of ice severity in the Beaufort-Chukchi Sea. *Weather and Forecasting*, 18(6), pp.1161-1176.

Drobot, S.D., Maslanik, J.A. and Fowler, C., 2006. A long range forecast of Arctic summer sea ice minimum extent. *Geophysical Research Letters*, 33(10).

Drüe, C. and Heinemann, G., 2004. High resolution maps of the sea ice concentration from MODIS satellite data. *Geophysical research letters*, 31(20).

Eicken, H. and Salganek, M. eds., 2010. *Field techniques for Sea-ice Research*. University of Alaska Press.

El Askary, H., Allali, M., Rakovski, C., Prasad, A., Kafatos, M. and Struppa, D., 2012. Computational methods for climate data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 4(4), pp.359-374.

Emery, W.J., Fowler, C. and Maslanik, J., 1994. Arctic sea ice concentrations from special sensor microwave imager and advanced very high resolution radiometer satellite data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C9), pp.18329-18342.

Emery, W.J., Fowler, C.W. and Maslanik, J.A., 1997. Satellite derived maps of Arctic and Antarctic sea ice motion: 1988 to 1994. *Geophysical Research Letters*, 24(8), pp.897-900.

- Ertürk, A. and Plaza, A., 2015. Informative change detection by unmixing for hyperspectral images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(6), pp.1252-1256.
- Farooq, U., Rack, W., McDonald, A. and Howell, S., 2020. Long-term analysis of sea ice drift in the western Ross Sea, Antarctica, at high and low spatial resolution. *Remote Sensing*, 12(9), p.1402.
- Flanner, M.G., Shell, K.M., Barlage, M., Perovich, D.K. and Tschudi, M.A., 2011. Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008. *Nature Geoscience*, 4(3), pp.151-155.
- Forkuor, G., Dimobe, K., Serme, I. and Tondoh, J.E., 2018. Landsat-8 vs. Sentinel-2: examining the added value of sentinel-2's red-edge bands to land-use and land-cover mapping in Burkina Faso. *GIScience & remote sensing*, 55(3), pp.331-354.
- Fors, A.S., Brekke, C., Gerland, S., Doulgeris, A.P. and Beckers, J.F., 2015. Late summer Arctic sea ice surface roughness signatures in C-band SAR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(3), pp.1199-1215.
- Francis, J.A. and Hunter, E., 2006. New insight into the disappearing Arctic sea ice. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 87(46), pp.509-511.
- Francis, J.A. and Vavrus, S.J., 2015. Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. *Environmental Research Letters*, 10(1), p.014005.
- Ghimire, B., Rogan, J. and Miller, J., 2010. Contextual land-cover classification: incorporating spatial dependence in land-cover classification models using random forests and the Getis statistic. *Remote Sensing Letters*, 1(1), pp.45-54.
- Gignac, C., Bernier, M., Chokmani, K. and Poulin, J., 2017. IceMap250-Automatic 250 m sea ice extent mapping using MODIS data. *Remote Sensing*, 9(1), p.70.
- Giles, K.A., Laxon, S.W. and Ridout, A.L., 2008. Circumpolar thinning of Arctic sea ice following the 2007 record ice extent minimum. *Geophysical Research Letters*, 35(22).
- Girard-Ardhuin, F. and Ezraty, R., 2012. Enhanced Arctic sea ice drift estimation merging radiometer and scatterometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(7), pp.2639-2648.
- Gloersen, P. and Cavalieri, D.J., 1986. Reduction of weather effects in the calculation of sea ice concentration from microwave radiances. *Journal of Geophysical Research: Oceans*,

91(C3), pp.3913-3919.

- Gong, D. and Wang, S., 1999. Definition of Antarctic oscillation index. *Geophysical research letters*, 26(4), pp.459-462.
- Goosse, H., Kay, J.E., Armour, K.C., Bodas-Salcedo, A., Chepfer, H., Docquier, D., Jonko, A., Kushner, P.J., Lecomte, O., Massonnet, F. and Park, H.S., 2018. Quantifying climate feedbacks in polar regions. *Nature communications*, 9(1), p.1919.
- Gorodetskaya, I.V., Tremblay, L.B., Liepert, B., Cane, M.A. and Cullather, R.I., 2008. The influence of cloud and surface properties on the Arctic Ocean shortwave radiation budget in coupled models. *Journal of Climate*, 21(5), pp.866-882.
- Groves, D.G. and Francis, J.A., 2002. Variability of the Arctic atmospheric moisture budget from TOVS satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D24), pp.ACL-18.
- Grumbine, R.W., 1998. Virtual floe ice drift forecast model intercomparison. *Weather and forecasting*, 13(3), pp.886-890.
- Guemas, V., Blanchard Wrigglesworth, E., Chevallier, M., Day, J.J., Déqué, M., Doblus Reyes, F.J., Fučkar, N.S., Germe, A., Hawkins, E., Keeley, S. and Koenigk, T., 2016. A review on Arctic sea ice predictability and prediction on seasonal to decadal time scales. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(695), pp.546-561.
- Guidotti, R., Monreale, A., Ruggieri, S., Turini, F., Giannotti, F. and Pedreschi, D., 2018. A survey of methods for explaining black box models. *ACM computing surveys (CSUR)*, 51(5), pp.1-42.
- Guo, Z. and Du, S., 2017. Mining parameter information for building extraction and change detection with very high-resolution imagery and GIS data. *GIScience & Remote Sensing*, 54(1), pp.38-63.
- Gutowski, W.J., Wei, H., Vörösmarty, C.J. and Fekete, B.M., 2007. Influence of Arctic wetlands on Arctic atmospheric circulation. *Journal of Climate*, 20(16), pp.4243-4254.
- Haas, C., 1998. Evaluation of ship-based electromagnetic-inductive thickness measurements of summer sea-ice in the Bellingshausen and Amundsen Seas, Antarctica. *Cold Regions Science and Technology*, 27(1), pp.1-16.
- Haine, T.W. and Martin, T., 2017. The Arctic-Subarctic sea ice system is entering a seasonal regime: Implications for future Arctic amplification. *Scientific Reports*, 7(1),

p.4618.

- Hakkinen, S., Proshutinsky, A. and Ashik, I., 2008. Sea ice drift in the Arctic since the 1950s. *Geophysical Research Letters*, 35(19).
- Hall, A., 2004. The role of surface albedo feedback in climate. *Journal of climate*, 17(7), pp.1550-1568.
- Hall, D.K., Key, J.R., Casey, K.A., Riggs, G.A. and Cavalieri, D.J., 2004. Sea ice surface temperature product from MODIS. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 42(5), pp.1076-1087.
- Han, H., Lei, R., Lu, P. and Li, Z., 2020. Features of sea ice motion observed with ice buoys from the central Arctic Ocean to Fram Strait. *Advances in Polar Science*.
- 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), pp.468-477.
- 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, pp.343-362.
- Han, K.H., Jang, J.C., Ryu, S., Sohn, E.H. and Hong, S., 2022. Hypothetical Visible Bands of Advanced Meteorological Imager Onboard the Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2A Using Data-To-Data Translation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, pp.8378-8388.
- Hanna, E., Cropper, T.E., Jones, P.D., Scaife, A.A. and Allan, R., 2015. Recent seasonal asymmetric changes in the NAO (a marked summer decline and increased winter variability) and associated changes in the AO and Greenland Blocking Index. *International Journal of Climatology*, 35(9), pp.2540-2554.
- Hannachi, A., 2007. Pattern hunting in climate: a new method for finding trends in gridded climate data. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(1), pp.1-15.
- Hannachi, A., 2004. A primer for EOF analysis of climate data. *Department of Meteorology, University of Reading*, 1, p.29.
- Hannachi, A., Finke, K. and Trendafilov, N., 2022. Common EOFs: a tool for multi-model comparison and evaluation. *Climate Dynamics*, pp.1-15.

- Hassol, S., 2004. *Impacts of a warming Arctic-Arctic climate impact assessment*. Cambridge University Press.
- Heorton, H.D., Tsamados, M., Cole, S.T., Ferreira, A.M., Berbellini, A., Fox, M. and Armitage, T.W., 2019. Retrieving sea ice drag coefficients and turning angles from in situ and satellite observations using an inverse modeling framework. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(8), pp.6388-6413.
- Heygster, G., Hendricks, S., Kaleschke, L., Mills, P., Stammer, D., Tonboe, R. and Haas, C., 2009. L-band radiometry for sea-ice applications. *Final Report for ESA, SMOSIce*.
- Hibler III, W.D., 1972. Removal of aircraft altitude variation from laser profiles of the Arctic ice pack. *Journal of Geophysical Research*, 77(36), pp.7190-7195.
- Holland, M.M. and Stroeve, J., 2011. Changing seasonal sea ice predictor relationships in a changing Arctic climate. *Geophysical Research Letters*, 38(18).
- Hong, D.B. and Yang, C.S., 2018. Automatic discrimination approach of sea ice in the Arctic Ocean using Sentinel-1 Extra Wide Swath dual-polarized SAR data. *International journal of remote sensing*, 39(13), pp.4469-4483.
- Hong, S., 2009. Detection of Asian dust (Hwangsa) over the Yellow Sea by decomposition of unpolarized infrared reflectivity. *Atmospheric Environment*, 43(37), pp.5887-5893.
- Hong, S., 2009. Retrieval of refractive index over specular surfaces for remote sensing applications. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1), p.033560.
- Hong, S., Shin, I. and Ou, M.L., 2010. Comparison of the infrared surface emissivity model (ISEM) with a physical emissivity model. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(2), pp.345-352.
- Hong, S. and Shin, I., 2010. Global trends of sea ice: Small-scale roughness and refractive index. *Journal of Climate*, 23(17), pp.4669-4676.
- Hong, S., 2010. Decomposition of unpolarized emissivity. *International Journal of Remote Sensing*, 31(8), pp.2109-2114.
- Hong, S., 2010. Detection of small-scale roughness and refractive index of sea ice in passive satellite microwave remote sensing. *Remote sensing of Environment*, 114(5), pp.1136-1140.
- Hong, S., 2010. Surface roughness and polarization ratio in microwave remote sensing.

International Journal of Remote Sensing, 31(10), pp.2709-2716.

- Hong, S. and Shin, I., 2011. A physically-based inversion algorithm for retrieving soil moisture in passive microwave remote sensing. *Journal of hydrology*, 405(1-2), pp.24-30.
- Hong, S., 2013. Polarization conversion for specular components of surface reflection. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(6), pp.1469-1472.
- Hong, S. and Shin, I., 2013. Wind speed retrieval based on sea surface roughness measurements from spaceborne microwave radiometers. *Journal of applied meteorology and climatology*, 52(2), pp.507-516.
- Hong, S., Shin, I., Byun, Y., Seo, H.J. and Kim, Y., 2014. Analysis of sea ice surface properties using ASH and Hong approximations in satellite remote sensing. *Remote Sensing Letters*, 5(2), pp.139-147.
- Huiying, L., Huadong, G. and Lu, Z., 2014, March. Sea ice classification using dual polarization SAR data. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 17, No. 1, p. 012115). IOP Publishing.
- Howell, S.E. and Brady, M., 2019. The dynamic response of sea ice to warming in the Canadian Arctic Archipelago. *Geophysical Research Letters*, 46(22), pp.13119-13125.
- Iordache, M.D., Bioucas-Dias, J.M. and Plaza, A., 2011. Sparse unmixing of hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(6), pp.2014-2039.
- Isola, P., Zhu, J.Y., Zhou, T. and Efros, A.A., 2017. Image-to-image translation with conditional adversarial networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1125-1134).
- Ivanova, N., Johannessen, O.M., Pedersen, L.T. and Tonboe, R.T., 2014. Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: A comparison of eleven sea ice concentration algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(11), pp.7233-7246.
- Janout, M.A., Aksenov, Y., Hölemann, J.A., Rabe, B., Schauer, U., Polyakov, I.V., Bacon, S., Coward, A.C., Karcher, M., Lenn, Y.D. and Kassens, H., 2015. Kara Sea freshwater transport through Vilkitsky Strait: Variability, forcing, and further pathways toward the western Arctic Ocean from a model and observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(7), pp.4925-4944.

- Ji, L., Geng, X., Sun, K., Zhao, Y. and Gong, P., 2015. Modified N-FINDR endmember extraction algorithm for remote-sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 36(8), pp.2148-2162.
- Jo, S., Kim, H.C., Kwon, Y.J. and Hong, S., 2019. Circumpolar Thin Arctic Sea Ice Thickness and Small-Scale Roughness Retrieval Using Soil Moisture and Ocean Salinity and Soil Moisture Active Passive Observations. *Remote Sensing*, 11(23), p.2835.
- Johannessen, O.M., Bengtsson, L., Miles, M.W., Kuzmina, S.I., Semenov, V.A., Alekseev, G.V., Nagurnyi, A.P., Zakharov, V.F., Bobylev, L.P., Pettersson, L.H. and Hasselmann, K., 2004. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 56(4), pp.328-341.
- Jonko, A.K., Shell, K.M., Sanderson, B.M. and Danabasoglu, G., 2012. Climate feedbacks in CCSM3 under changing CO₂ forcing. Part I: Adapting the linear radiative kernel technique to feedback calculations for a broad range of forcings. *Journal of Climate*, 25(15), pp.5260-5272.
- Kaleschke, L., Lüpkes, C., Vihma, T., Haarpaintner, J., Bochert, A., Hartmann, J. and Heygster, G., 2001. SSM/I sea ice remote sensing for mesoscale ocean-atmosphere interaction analysis. *Canadian journal of remote sensing*, 27(5), pp.526-537.
- Kaleschke, L., Maaß, N., Haas, C., Hendricks, S., Heygster, G. and Tonboe, R.T., 2010. A sea-ice thickness retrieval model for 1.4 GHz radiometry and application to airborne measurements over low salinity sea-ice. *The Cryosphere*, 4(4), pp.583-592.
- Kang, D., Im, J., Lee, M.I. and Quackenbush, L.J., 2014. The MODIS ice surface temperature product as an indicator of sea ice minimum over the Arctic Ocean. *Remote sensing of environment*, 152, pp.99-108.
- Karlsson, K.G., Anttila, K., Trentmann, J., Stengel, M., Fokke Meirink, J., Devasthale, A., Hanschmann, T., Kothe, S., Jylskeläinen, E., Sedlar, J. and Benas, N., 2017. CLARA-A2: the second edition of the CM SAF cloud and radiation data record from 34 years of global AVHRR data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(9), pp.5809-5828.
- Karvonen, J., Simila, M. and Makynen, M., 2005. Open water detection from Baltic Sea ice Radarsat-1 SAR imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2(3),

pp.275-279.

- Karvonen, J., 2012. Operational SAR-based sea ice drift monitoring over the Baltic Sea. *Ocean Science*, 8(4), pp.473-483.
- Karvonen, J., 2014. A sea ice concentration estimation algorithm utilizing radiometer and SAR data. *The Cryosphere*, 8(5), pp.1639-1650.
- Karvonen, J., 2017. Baltic sea ice concentration estimation using SENTINEL-1 SAR and AMSR2 microwave radiometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(5), pp.2871-2883.
- Kauker, F., Kaminski, T., Karcher, M., Giering, R., Gerdes, R. and Voßbeck, M.: Adjoint analysis of the 2007 all time Arctic sea-ice minimum, *Geophys. Res. Lett.*, 36(3), doi:10.1029/2008gl036323, 2009.
- Kay, J.E., L'Ecuyer, T., Gettelman, A., Stephens, G. and O'Dell, C., 2008. The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum. *Geophysical Research Letters*, 35(8).
- Kern, S., Kaleschke, L. and Clausi, D.A., 2003. A comparison of two 85-GHz SSM/I ice concentration algorithms with AVHRR and ERS-2 SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(10), pp.2294-2306.
- Kern, S., Rösel, A., Pedersen, L.T., Ivanova, N., Saldo, R. and Tonboe, R.T., 2016. The impact of melt ponds on summertime microwave brightness temperatures and sea-ice concentrations. *The Cryosphere*, 10(5), pp.2217-2239.
- King, J.C. and Comiso, J.C., 2003. The spatial coherence of interannual temperature variations in the Antarctic Peninsula. *Geophysical Research Letters*, 30(2).
- Komarov, A.S. and Barber, D.G., 2013. Sea ice motion tracking from sequential dual-polarization RADARSAT-2 images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(1), pp.121-136.
- Korosov, A., Hansen, M., Dagestad, K.F., Yamakawa, A., Vines, A. and Riechert, M., 2016. Nansat: A scientist-orientated python package for geospatial data processing. *Journal of Open Research Software*, 4(1).
- Korosov, A.A. and Rampal, P., 2017. A combination of feature tracking and pattern matching with optimal parametrization for sea ice drift retrieval from SAR data. *Remote Sensing*, 9(3), p.258.

- Kumar, A., Perlwitz, J., Eischeid, J., Quan, X., Xu, T., Zhang, T., Hoerling, M., Jha, B. and Wang, W., 2010. Contribution of sea ice loss to Arctic amplification. *Geophysical Research Letters*, 37(21).
- Kumar, A., Yadav, J. and Mohan, R., 2021. Spatio-temporal change and variability of Barents-Kara sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications. *Science of The Total Environment*, 753, p.142046.
- Kwok, R., Curlander, J.C., McConnell, R. and Pang, S.S., 1990. An ice-motion tracking system at the Alaska SAR facility. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 15(1), pp.44-54.
- Kwok, R., Cunningham, G.F., Wensnahan, M., Rigor, I., Zwally, H.J. and Yi, D., 2009. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003-2008. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C7).
- Kwok, R., Spreen, G. and Pang, S., 2013. Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(5), pp.2408-2425.
- Lavelle, J., Tonboe, R., Tian, T., Pfeiffer, R.H. and Howe, E., 2016. Product user manual for the OSI SAF AMSR-2 global sea ice concentration. *Product OSI-408. Copenhagen, Denmark: Danish Meteorological Institute.*
- Lavergne, T., Eastwood, S., Teffah, Z., Schyberg, H. and Breivik, L.A., 2010. Sea ice motion from low resolution satellite sensors: An alternative method and its validation in the Arctic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C10).
- Laxon, S., Peacock, N. and Smith, D., 2003. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region. *Nature*, 425(6961), pp.947-950.
- Lee, S.M., Sohn, B.J. and Kim, S.J., 2017. Differentiating between first year and multiyear sea ice in the Arctic using microwave retrieved ice emissivities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(10), pp.5097-5112.
- Lei, R., Gui, D., Hutchings, J.K., Wang, J. and Pang, X., 2019. Backward and forward drift trajectories of sea ice in the northwestern Arctic Ocean in response to changing atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 39(11), pp.4372-4391.
- Li, Z., Zhang, W., Stuecker, M.F., Xu, H., Jin, F.F. and Liu, C., 2019. Different effects of two ENSO types on Arctic surface temperature in boreal winter. *Journal of Climate*,

32(16), pp.4943-4961.

- Lind, S., Ingvaldsen, R.B. and Furevik, T., 2018. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature climate change*, 8(7), pp.634-639.
- Lindsay, R., Wensnahan, M., Schweiger, A. and Zhang, J., 2014. Evaluation of seven different atmospheric reanalysis products in the Arctic. *Journal of Climate*, 27(7), pp.2588-2606.
- Lindsey, R. and Scott, M., 2019. Climate Change: Arctic sea ice summer minimum. *Climate.gov. September, 26*.
- Manak, D.K. and Mysak, L.A., 1989. On the relationship between arctic sea ice anomalies and fluctuations in Northern Canadian air temperature and river discharge. *Atmosphere-Ocean*, 27(4), pp.682-691.
- Manninen, A.T., 1997. Surface roughness of Baltic sea ice. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102(C1), pp.1119-1139.
- Marcianesi, F., Aulicino, G. and Wadhams, P., 2021. Arctic sea ice and snow cover albedo variability and trends during the last three decades. *Polar Science*, 28, p.100617.
- Markus, T. and Cavalieri, D.J., 2000. An enhancement of the NASA Team sea ice algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(3), pp.1387-1398.
- Maslanik, J.A., 1992. Effects of weather on the retrieval of sea ice concentration and ice type from passive microwave data. *International Journal of Remote Sensing*, 13(1), pp.37-54.
- Meier, W.N., 2005. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic peripheral seas. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 43(6), pp.1324-1337.
- Meier, W.N. and Stewart, J.S., 2019. Assessing uncertainties in sea ice extent climate indicators. *Environmental Research Letters*, 14(3), p.035005.
- Meissner, T. and Manaster, A., 2021. SMAP salinity retrievals near the sea-ice edge using multi-channel AMSR2 brightness temperatures. *Remote sensing*, 13(24), p.5120.
- Miernecki, M., Kaleschke, L., Maaß, N., Hendricks, S. and Søbjaerg, S.S., 2020. Effects of decimetre-scale surface roughness on L-band brightness temperature of sea ice. *The*

Cryosphere, 14(2), pp.461-476.

Miller, P.A., Laxon, S.W., Feltham, D.L. and Cresswell, D.J., 2006. Optimization of a sea ice model using basinwide observations of Arctic sea ice thickness, extent, and velocity. *Journal of Climate*, 19(7), pp.1089-1108.

Moore, G.K., Holdsworth, G. and Alverson, K., 2002. Climate change in the North Pacific region over the past three centuries. *Nature*, 420(6914), pp.401-403.

Muckenhuber, S., Korosov, A.A. and Sandven, S., 2016. Open-source feature-tracking algorithm for sea ice drift retrieval from Sentinel-1 SAR imagery. *The Cryosphere*, 10(2), pp.913-925.

Muckenhuber, S. and Sandven, S., 2017. Open-source sea ice drift algorithm for Sentinel-1 SAR imagery using a combination of feature tracking and pattern matching. *The Cryosphere*, 11(4), pp.1835-1850.

Nolin, A.W. and Mar, E., 2018. Arctic sea ice surface roughness estimated from multi-angular reflectance satellite imagery. *Remote Sensing*, 11(1), p.50.

Olaso, E. and Notz, D., 2014. Drivers of variability in Arctic sea ice drift speed. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(9), pp.5755-5775.

Pabi, S., van Dijken, G.L. and Arrigo, K.R., 2008. Primary production in the Arctic Ocean, 1998-2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8).

Parkinson, C.L. and Cavalieri, D.J., 2008. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C7).

Parkinson, C.L. and Comiso, J.C., 2013. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm. *Geophysical Research Letters*, 40(7), pp.1356-1361.

Pațilea, C., Heygster, G., Huntemann, M. and Spreen, G., 2019. Combined SMAP-SMOS thin sea ice thickness retrieval. *The Cryosphere*, 13(2), pp.675-691.

Pendergrass, A.G., Conley, A. and Vitt, F.M., 2018. Surface and top-of-atmosphere radiative feedback kernels for CESM-CAM5. *Earth System Science Data*, 10(1), pp.317-324.

Perovich, D.K. and Polashenski, C., 2012. Albedo evolution of seasonal Arctic sea ice. *Geophysical Research Letters*, 39(8).

Peterson, B.J., Holmes, R.M., McClelland, J.W., Vorosmarty, C.J., Lammers, R.B.,

- Shiklomanov, A.I., Shiklomanov, I.A. and Rahmstorf, S., 2002. Increasing river discharge to the Arctic Ocean. *science*, 298(5601), pp.2171-2173.
- Peterson, I.K., Prinsenberg, S.J. and Holladay, J.S., 2008. Observations of sea ice thickness, surface roughness and ice motion in Amundsen Gulf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C6).
- Pistone, K., Eisenman, I. and Ramanathan, V., 2014. Observational determination of albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), pp.3322-3326.
- Pithan, F. and Mauritsen, T., 2014. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature geoscience*, 7(3), pp.181-184.
- Plueddemann, A.J., Krishfield, R., Takizawa, T., Hatakeyama, K. and Honjo, S., 1998. Upper ocean velocities in the Beaufort Gyre. *Geophysical research letters*, 25(2), pp.183-186.
- Post, E., Forchhammer, M.C., Bret-Harte, M.S., Callaghan, T.V., Christensen, T.R., Elberling, B., Fox, A.D., Gilg, O., Hik, D.S., Høye, T.T. and Ims, R.A., 2009. Ecological dynamics across the Arctic associated with recent climate change. *science*, 325(5946), pp.1355-1358.
- Rainville, L. and Woodgate, R.A., 2009. Observations of internal wave generation in the seasonally ice free Arctic. *Geophysical Research Letters*, 36(23).
- Rampal, P., Weiss, J. and Marsan, D., 2009. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979-2007. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C5).
- Rampal, P., Weiss, J., Marsan, D. and Bourgoin, M., 2009. Arctic sea ice velocity field: General circulation and turbulent like fluctuations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C10).
- Reynolds, R.W., Smith, T.M., Liu, C., Chelton, D.B., Casey, K.S. and Schlax, M.G., 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of climate*, 20(22), pp.5473-5496.
- Riihelä, A., Laine, V., Manninen, T., Palo, T. and Vihma, T., 2010. Validation of the Climate-SAF surface broadband albedo product: Comparisons with in situ observations over Greenland and the ice-covered Arctic Ocean. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), pp.2779-2790.

- dos Santos, C.M., Escobedo, J.F., Teramoto, E.T. and da Silva, S.H.M.G., 2016. Assessment of ANN and SVM models for estimating normal direct irradiation (H_b). *Energy Conversion and Management*, 126, pp.826-836.
- Screen, J.A., Deser, C. and Simmonds, I., 2012. Local and remote controls on observed Arctic warming. *Geophysical Research Letters*, 39(10).
- Seo, M., Kim, H.C., Lee, K.S., Seong, N.H., Lee, E., Kim, J. and Han, K.S., 2020. Characteristics of the Reanalysis and Satellite-Based Surface Net Radiation Data in the Arctic. *Journal of Sensors*, 2020, pp.1-13.
- Serreze, M.C., Holland, M.M. and Stroeve, J., 2007. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *science*, 315(5818), pp.1533-1536.
- Serreze, M.C. and Barry, R.G., 2011. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and planetary change*, 77(1-2), pp.85-96.
- Shell, K.M., Kiehl, J.T. and Shields, C.A., 2008. Using the radiative kernel technique to calculate climate feedbacks in NCAR's Community Atmospheric Model. *Journal of Climate*, 21(10), pp.2269-2282.
- Shimada, K., Kamoshida, T., Itoh, M., Nishino, S., Carmack, E., McLaughlin, F., Zimmermann, S. and Proshutinsky, A., 2006. Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*, 33(8).
- Sigmond, M., Fyfe, J.C. and Swart, N.C., 2018. Ice-free Arctic projections under the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 8(5), pp.404-408.
- Simila, M., Arjas, E., Makynen, M. and Hallikainen, M.T., 2001. A Bayesian classification model for sea ice roughness from scatterometer data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 39(7), pp.1586-1595.
- Smedsrud, L.H., Esau, I., Ingvaldsen, R.B., Eldevik, T., Haugan, P.M., Li, C., Lien, V.S., Olsen, A., Omar, A.M., Otterå, O.H. and Risebrobakken, B., 2013. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics*, 51(3), pp.415-449.
- Smedsrud, L.H., Halvorsen, M.H., Stroeve, J.C., Zhang, R. and Kloster, K., 2017. Fram Strait sea ice export variability and September Arctic sea ice extent over the last 80 years. *The Cryosphere*, 11(1), pp.65-79.
- Smith, C.J., Kramer, R.J., Myhre, G., Forster, P.M., Soden, B.J., Andrews, T., Boucher, O.,

- Faluvegi, G., Fläschner, D., Hodnebrog, Ø. and Kasoar, M., 2018. Understanding rapid adjustments to diverse forcing agents. *Geophysical Research Letters*, 45(21), pp.12-023.
- Smith, C.J., Kramer, R.J. and Sima, A., 2020. The HadGEM3-GA7. 1 radiative kernel: the importance of a well-resolved stratosphere. *Earth System Science Data*, 12(3), pp.2157-2168.
- Soden, B.J., Held, I.M., Colman, R., Shell, K.M., Kiehl, J.T. and Shields, C.A., 2008. Quantifying climate feedbacks using radiative kernels. *Journal of Climate*, 21(14), pp.3504-3520.
- Son, Y.S., Kim, H.C. and Lee, S.J., 2018. ASTER-Derived High-Resolution Ice Surface Temperature for the Arctic Coast. *Remote Sensing*, 10(5), p.662.
- Spren, G., Kwok, R. and Menemenlis, D., 2011. Trends in Arctic sea ice drift and role of wind forcing: 1992-2009. *Geophysical Research Letters*, 38(19).
- Steffen, K. and Schweiger, A., 1991. NASA team algorithm for sea ice concentration retrieval from Defense Meteorological Satellite Program special sensor microwave imager: Comparison with Landsat satellite imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C12), pp.21971-21987.
- Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., Salzmann, M., Schmidt, H., Bader, J., Block, K. and Brokopf, R., 2013. Atmospheric component of the MPI M Earth system model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(2), pp.146-172.
- Sumata, H., Lavergne, T., Girard Arduin, F., Kimura, N., Tschudi, M.A., Kauker, F., Karcher, M. and Gerdes, R., 2014. An intercomparison of Arctic ice drift products to deduce uncertainty estimates. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(8), pp.4887-4921.
- Talley, L.D., 2011. *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Academic press.
- Thackeray, C.W. and Hall, A., 2019. An emergent constraint on future Arctic sea-ice albedo feedback. *Nature Climate Change*, 9(12), pp.972-978.
- Thomas, M., France, J., Crabeck, O., Hall, B., Hof, V., Notz, D., Rampai, T., Riemenschneider, L., Tooth, O.J., Tranter, M. and Kaiser, J., 2021. The Roland von Glasow Air-Sea-Ice Chamber (RvG-ASIC): an experimental facility for studying

- ocean-sea-ice-atmosphere interactions. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(3), pp.1833-1849.
- Thomas, M., Geiger, C.A. and Kambhamettu, C., 2008. High resolution (400 m) motion characterization of sea ice using ERS-1 SAR imagery. *Cold regions science and technology*, 52(2), pp.207-223.
- Thompson, D.W. and Wallace, J.M., 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical research letters*, 25(9), pp.1297-1300.
- Thompson, D.W., Lee, S. and Baldwin, M.P., 2003. Atmospheric processes governing the northern hemisphere annular mode/North Atlantic oscillation. *The North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact*, 134, pp.81-112.
- Tian-Kunze, X., Kaleschke, L., Maaß, N., Mäkynen, M., Serra, N., Drusch, M. and Krumpfen, T., 2014. SMOS-derived thin sea ice thickness: algorithm baseline, product specifications and initial verification. *The Cryosphere*, 8(3), pp.997-1018.
- Tietsche, S., Alonso-Balmaseda, M., Rosnay, P., Zuo, H., Tian-Kunze, X. and Kaleschke, L., 2018. Thin Arctic sea ice in L-band observations and an ocean reanalysis. *The Cryosphere*, 12(6), pp.2051-2072.
- Timmermans, M.L., Toole, J., Proshutinsky, A., Krishfield, R. and Plueddemann, A., 2008. Eddies in the Canada Basin, Arctic Ocean, observed from ice-tethered profilers. *Journal of Physical Oceanography*, 38(1), pp.133-145.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K., 1981. Microwave remote sensing: Active and passive. volume 1-microwave remote sensing fundamentals and radiometry.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K., 1986. Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 3-From theory to applications.
- Von Saldern, C., Haas, C. and Dierking, W., 2006. Parameterization of Arctic sea-ice surface roughness for application in ice type classification. *Annals of glaciology*, 44, pp.224-230.
- Walsh, J.E., 1978. Temporal and spatial scales of the Arctic circulation. *Monthly Weather Review*, 106(11), pp.1532-1544.
- Wang, Q., Wekerle, C., Danilov, S., Wang, X. and Jung, T., 2018. A 4.5 km resolution Arctic Ocean simulation with the global multi-resolution model FESOM 1.4.

Geoscientific Model Development, 11(4), pp.1229-1255.

- Wang, X. and Key, J.R., 2005. Arctic surface, cloud, and radiation properties based on the AVHRR Polar Pathfinder dataset. Part II: Recent trends. *Journal of Climate*, 18(14), pp.2575-2593.
- Wielicki, B.A., Wong, T., Loeb, N., Minnis, P., Priestley, K. and Kandel, R., 2005. Changes in Earth's albedo measured by satellite. *Science*, 308(5723), pp.825-825.
- Winton, M., 2006. Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it?. *Geophysical Research Letters*, 33(3).
- Winton, M., 2008. Sea ice-albedo feedback and nonlinear Arctic climate change. *Arctic sea ice decline: Observations, projections, mechanisms, and implications*, *Geophys. Monogr.*, 180, pp.111-131.
- Woodgate, R.A., Aagaard, K. and Weingartner, T.J., 2006. Interannual changes in the Bering Strait fluxes of volume, heat and freshwater between 1991 and 2004. *Geophysical Research Letters*, 33(15).
- Wu, S.T. and Fung, A.K., 1972. A noncoherent model for microwave emissions and backscattering from the sea surface. *Journal of Geophysical Research*, 77(30), pp.5917-5929.
- Xiao, L., Che, T., Chen, L., Xie, H. and Dai, L., 2017. Quantifying snow albedo radiative forcing and its feedback during 2003-2016. *Remote Sensing*, 9(9), p.883.
- Zhu, X.X., Montazeri, S., Ali, M., Hua, Y., Wang, Y., Mou, L., Shi, Y., Xu, F. and Bamler, R., 2021. Deep learning meets SAR: Concepts, models, pitfalls, and perspectives. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 9(4), pp.143-172.
- Yu, Y., Xiao, W., Zhang, Z., Cheng, X., Hui, F. and Zhao, J., 2021. Evaluation of 2-m air temperature and surface temperature from ERA5 and ERA-I using buoy observations in the arctic during 2010-2020. *Remote Sensing*, 13(14), p.2813.
- Zhang, J., Rothrock, D.A. and Steele, M., 2017. Projections of an ice-diminished Arctic Ocean-retrospection and future projection. *Polar Science Center. Washington University of Washington. Disponível em: <http://psc.apl.uw.edu/research/projects/projections-of-an-ice-diminished-arctic-ocean/>. Acesso em, 3.*
- Zhang, M., An, J., Zhang, J., Yu, D., Wang, J. and Lv, X., 2020. Enhanced delaunay triangulation sea ice tracking algorithm with combining feature tracking and pattern

matching. *Remote Sensing*, 12(3), p.581.

Zhou, X., Yang, X., Li, Z., Yu, Y., Bi, H., Ma, S. and Li, X., 2013. Estimation of tropical cyclone parameters and wind fields from SAR images. *Science China Earth Sciences*, 56, pp.1977-1987.

Zuidema, P., Baker, B., Han, Y., Intrieri, J., Key, J., Lawson, P., Matrosov, S., Shupe, M., Stone, R. and Uttal, T., 2005. An Arctic springtime mixed-phase cloudy boundary layer observed during SHEBA. *Journal of the atmospheric sciences*, 62(1), pp.160-176.

Zwally, H.J., 1983. *Antarctic sea ice, 1973-1976: Satellite passive-microwave observations* (Vol. 459). Scientific and Technical Information Branch, National Aeronautics and Space Administration.

Zwally, H.J., Comiso, J.C., Parkinson, C.L., Cavalieri, D.J. and Gloersen, P., 2002. Variability of Antarctic sea ice 1979-1998. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C5), pp.9-1.



뒷 면

(국내 과제용)

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.