

# 위성기반 해빙 이동 추적 기술 개발

Tracing the sea ice movement using satellite data



한국해양과학기술원

위성기반 해빙 이동 추적 기술 개발

한국해양과학기술원



# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 빙권 정량 분석을 위한 원격탐사 연구” 과제의 위탁연구  
“위성기반 해빙 이동 추적 기술 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2023 . 01 . 25

총괄연구책임자	: 김 현 철
위탁연구기관명	: 한국해양과학기술원
위탁연구책임자	: 손 영 백
위탁참여연구원	: 이 태 희
	: 권 순 열
	: 명 성 관

## 보고서 초록

위탁연구과제명	위성기반 해빙 이동 추적 기술 개발				
위탁연구책임자	손영백	해당단계 참여연구원수	총 : 4 명 내부 : 4 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	50,000,000
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 제주특성연구센터		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요 약				보고서면수	80
<p>○ 위성기반 해빙 시/공간 변화 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 위성기반 해빙 자료 수집 및 DB 구축</li> <li>- 해역별/시기별 해빙의 시/공간적 특성 파악을 위한 위성 및 재분석 자료 분석</li> <li>- 북극해 해빙 변화 주제도 제작 및 추적 입자 모델 개선</li> </ul> <p>○ 위성기반 해빙 이동 추출 기술 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 위성자료 기반 고해상도/저해상도 해빙 이동장 구축</li> <li>- 위성자료 기반 해빙 시/공간 변화 추출 기술 개발</li> <li>- 위성자료 기반 해빙 이동 경로 추적 프로그램 개발</li> </ul> <p>○ 북극해에서 지구 온난화에 따른 해빙 이동 변화 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 위성기반 북극해 장비 해빙 이동장 구축</li> <li>- 다중위성 및 현장관측 자료를 이용한 북극해 해빙 이동 변화에 연관된 환경 요인 분석</li> <li>- 북극해 해빙 이동 변화에 영향을 미치는 요인 분석 및 원인 규명</li> </ul>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극해, 해빙, 고해상도 해빙 영상, 원격탐사, 해양환경변화			
	영 어	Arctic Ocean, sea ice, high resolution sea ice image, remote sensing, ocean environment change			

# 요 약 문

## I. 제 목

- 위성기반 해빙 이동 추적 기술 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 북극해 해빙/유빙의 분포와 해양환경변화의 학술적 이해 증대
- 북극 해빙의 급격한 감소와 그에 따른 예기치 못한 해빙의 분포, 해빙/유빙의 이동성 증가 로 해빙/유빙의 이동경로에 대한 분석 및 연구 요구

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 위성기반 해빙 시/공간적 변화 분석
- 위성기반 해빙 이동 추출 기술 개발
- 북극해에서 지구 온난화에 따른 해빙 이동 변화 분석

## IV. 연구개발결과

- 북극해에서 지구온난화에 따른 해빙 변화를 이해하기 위해 현장관측 자료와 위성 자료를 이용하여 해빙 이동 속도 증가 현상 분석
- 북극해에서 위성을 활용하여 해빙 이동을 추적하기 위해 저해상도 위성이 가지는 문제점을 극복하기 위해 고해상도 위성을 활용한 해빙 추출 기술 개발

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 위성기반 북극해 고해상도 해빙장 추출 기술 개발
- 해빙농도의 급격한 변화에 의한 해빙/유빙 이동경로에 미치는 영향력 파악
- 북극해양 환경변화에 대한 지속적 분석 및 이해

# S U M M A R Y

## I. Title

- Tracing the sea ice movement using satellite data

## II. Purpose and Necessity of R&D

- Increased academic understanding of the distribution of Arctic sea ice / drift ice and changes in the marine environment
- Rapid decrease of Arctic sea ice, unexpected distribution of sea ice, and increased fluidity of sea ice / drift ice require deep analysis and research on the movement route of sea ice / drift ice

## III. Contents and Extent of R&D

- Analysis for temporal and spatial variations of sea ice based on satellite data
- Development for tracing sea ice movement based on satellite data
- Understanding the sea ice movement change due to climate change in Arctic Ocean

## IV. R&D Results

- Analysis of the increase in sea ice movement speed using in-situ observation data and satellite data to understand sea ice speed changes caused by global warming in the Arctic Ocean

- Development for tracing sea ice movement using high-resolution satellites to overcome the problems of low-resolution satellites to track sea ice movement in the Arctic Ocean.

#### V. Application Plans of R&D Results

- Development of high resolution sea ice movement in Arctic Ocean based on satellite data
- Investigate the impact on the sea ice / drift ice path by rapid change in sea ice concentration
- Continuous analysis and understanding of environmental changes in the Arctic Ocean



# 목 차

제 1 장 서론 .....	1
제 1 절 연구개발의 필요성 .....	1
제 2 절 연구개발의 내용 및 범위 .....	4
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	5
제 1 절 국내 기술개발 현황 .....	5
1. 북극해 현장-위성-모델 연계 해양환경 및 해빙 변화 연구 .....	5
제 2 절 국외 기술개발 현황 .....	9
1. 북극해 현장-위성-모델 연계 해양환경 및 해빙 변화 연구 .....	9
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과 .....	24
제 1 절 북극해 현장-다중위성 자료 수집 .....	24
1. 북극해 현장 관측 자료 .....	24
2. 북극해 위성 관측 자료 .....	27
제 2 절 북극해 장기 해빙 유동장 구축 .....	32
1. 북극해 해빙 유동장 변화 분석 .....	32
2. 북극해 해빙 유동장 정확도 분석 .....	37
3. 북극해 해빙 유동장 변화 요인 분석 .....	43
제 3 절 북극해 고해상도 추출 기술 개발 .....	49
1. 고해상도 영상 자료 처리 .....	49
2. 지역해 최적화 MCC 알고리즘 개발 .....	55
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....	67
제 1 절 연구개발목표 달성도 .....	67
제 2 절 대외기여도 .....	71
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	72
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	73
제 7 장 참고문헌 .....	74

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구개발의 필요성

- 북극해는 외해의 해수가 유입되는 열린 환경에 표층의 해수가 결빙되는 국지적 특징을 가지는 해역이지만, 전 지구적 현상인 기후변화는 북극해에서 수온 및 해수면 상승을 유발하고 있어 북극해를 덮고 있는 해빙의 변화 및 감소에 대한 과학적 분석이 진행되고 있음.
- 특히 기상청 한국 기후변화 평가보고서 (2020)에서 빙권 변화 중에서 북극 지역은 급격한 온도 상승 그리고 해빙 면적 및 두께는 최근에 뚜렷이 감소하는 현상에 대해서 견고한 동의로 발표.
- 북극 해빙의 확장 규모는 감소하고 있으며 해빙의 생성은 다년생보다 초년생이 증가하고 두께는 점점 얇아지고 있으며, 특히 해빙의 움직임은 지속적으로 빨라지고 있음.
- 북극해에서 해빙의 변화 중에서 심각하게 진행되고 있는 것 중에 하나인 다년생 해빙의 면적은 감소하고 초년생 해빙의 면적은 상대적으로 증가하면서(Serreze et al., 2007), 뷰포트해와 척치해는 25% 이상의 해빙의 감소 발생(Simadad et al., 2006).
- 지난 30년 간 북극의 하계 해빙 면적은 6,000,000 km<sup>2</sup> 이상에서 4,000,000 km<sup>2</sup> 이하로 감소했으며 Fram Strait를 통해 대서양으로 유출되는 해빙의 양이 증가하는 등 과거에서 현재로 갈수록 북극해 해빙이 감소하는 경향이 증가하고 있음(Comiso, 2012, Smedsrud et al., 2017).
- 해빙의 감소 및 이동속도 증가는 북극해 환경 변화의 지표로, 1950년대부터 현장관측자료를 통한 북극해의 해빙 이동속도 변화는 지속적으로 증가하는 경향을

나타냈으며, 1990년대 이후에 더욱 심화되는 양상을 보였으며(Hakkinen et al., 2008, Kay et al., 2008, Parkinson and Comiso, 2013), 1979년부터 2007년까지 동계와 하계의 해빙 이동속도는 각각 +17%/decade, +8.5%/decade의 이동속도 증가율을 보였음(Muckenhuber and Sandven, 2017).

- 북극해의 대기과 해양의 경계에 존재하며 두 영역 사이의 에너지와 물질의 교환에 영향을 미치는 북극 해빙이 나타내는 이동 특성 변화는 북극해의 환경 변화를 나타내는 지시자로서 활용될 수 있기 때문에(Thomas et al., 2021), 북극 해빙의 이동 경향을 보다 세밀히 연구 필요.
- 북극해 해빙 유동과 관련된 현장관측 자료인 IABP 등에서 설치하는 해빙관측부이는 부이를 투하, 설치한 해역에서만 관측이 가능한 공간적인 제약을 가지고 있고, 기존에 제공되는 위성관측자료 기반 해빙 이동장 또한 공간해상도가 수십 킬로미터에 달하므로 급격히 변화하는 북극해 환경에 의해 보다 크기가 작아진 해빙/유빙의 세부적인 이동 경향을 분석하기에는 제한적 요소로 작용하기 때문에 해류 및 바람장 자료와는 다르게, 해빙 이동장은 앞선 두 자료보다 공간에 따른 이동경향 차이가 크며, 이 때문에 더 높은 해상도 및 정확성을 가진 해빙 이동장 개발이 필요함.
- 유럽 우주국의 Sentinel-1 A와 B를 통해 관측되는 40m 급의 고해상도 SAR 영상 자료 set는 일별로 북극해를 커버할 수 있으며, 북극해를 관측하는 대량의 고해상도 영상 자료를 사용하면 보다 세밀하고 정확한 해빙 이동장을 구성할 수 있기 때문에 고해상도 SAR 영상을 활용한 MCC 방법을 통해 구성된 해빙 이동 벡터를 실측자료를 통해 검증하고, 이를 토대로 해빙 이동장 구성의 효율성에 대해 고찰이 필요함.
- 이처럼 북극 해양의 물리적 환경변화가 생태학적으로 매우 밀접한 연관이 있으며 정확한 규명이 필요하기 때문에 동시다발적으로 광역의 해역에서 연구를 수행하기 위해 해색위성의 활용 필요.

- 북극해에서 유빙의 분포 및 이동경향에 대한 기존의 연구들은 제한된 현장자료를 이용하여 단기적으로는 이동 경향 분석 연구와 장기적으로는 기후변화에 따른 해빙농도 변화와 같은 다양한 연구들이 수행되어 왔지만 북극해에서 해빙의 변화를 이해하기 위한 고해상도 해빙 추적 기술 개발 필요.
- 북극 해빙의 급격한 감소와 그에 따른 예기치 못한 해빙의 분포, 해빙/유빙의 이동성 증가로 해빙/유빙의 이동경로에 대한 깊은 분석 및 연구가 필요함.
- 북극해는 러시아, 미국, 캐나다, 덴마크, 노르웨이 등 연안국에 의해 배타적 경제 수역이 존재하며, 비 북극권 국가들 사이에서는 북극해 연안국의 경제적 배타 수역을 벗어난 공해에서 쇄빙연구선을 이용한 현장 조사와 위성 및 모델을 이용한 지속 가능한 극지 연구 노력 필요.

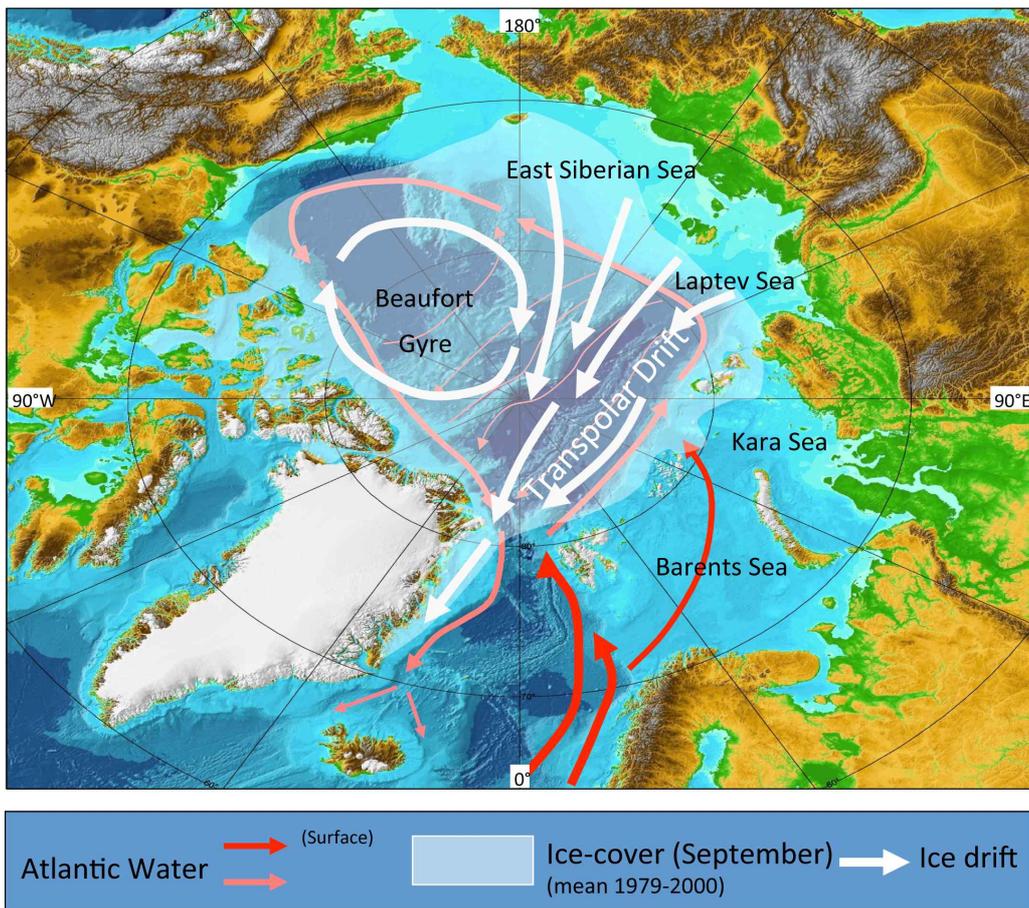


그림 1-1-1. 북극해 해류순환 및 해저 지형

(<https://www.transdrift.info/transdrift-project>).

## 제 2 절 연구개발의 내용 및 범위

### ○ 1차년도: 위성기반 해빙 시/공간 변화 분석

- 북극해의 해빙 이동과 관련된 현장-위성-재분석 및 문헌자료 수집 및 분석
- 현장관측자료(ITP, IABP), 위성자료(NSIDC, OSISAF), 해빙농도(ECMWF) 등 해빙 이동과 관련된 최신 자료를 수집하여 DB 구축하여 연도별 해빙 이동 변화 주제도 제작을 위한 분석 방법 개발
- 현장-위성-재분석 자료를 이용하여 북극해에서 해빙의 이동과 관련된 물리적/환경적 요인에 영향을 주는 환경 자료 수집
- 기존 입자 추적 모델을 이용하여 현장-위성자료를 검증자료로 이용하여 북극해에 최적화된 해빙 이동 모델로 개선/검증 연구 수행

### ○ 2차년도: 위성기반 해빙 이동 추출 기술 개발

- 북극권 해빙의 이동경로 변화를 추적하기 위해 위성 자료를 이용하여 입자추적 모델을 이용하여 시/공간적 변화를 추적하고 이동 경로를 추출 할 수 있는 기술 개발
- 위성자료 입력시 해빙 이동장을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하여 제공
- 개선된 해빙 이동 추출 모델을 이용하여 북극해 해빙 이동 변화를 파악하여 장기 해빙 이동 주제도 작성 및 관련 자료 DB 구축
- 북극해 해빙 이동장은 해빙의 시/공간 변화를 반영된 모델장 구축

### ○ 3차년도: 지구온난화에 따른 해빙 이동 변화 분석

- 위성자료를 이용하여 북극해 최신 해빙 이동장을 구축하여 연도별 변화를 이해하고 원인에 대한 규명 연구 수행
- 시나리오별 해빙의 이동경향 분석으로 이동 경향 분석
- 북극해 해빙의 시계열 자료를 이용하여 해빙의 다양한 이동경로 분석과 원인에 영향을 줄 수 있는 환경 요인에 대해서 원인 파악
- 최종적으로 북극해 해빙의 유동 변화를 유발하는 환경적 요인과 상호관계를 분석 결과 산출

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내 기술개발 현황

#### 1. 북극해 현장-위성-모델 연계 해양환경 및 해빙 변화 연구

- 북극해 국내 원격탐사 연구는 광학 및 해색원격탐사 연구를 시작으로 현재 SAR 을 이용한 극지 연구가 극지연구소를 중심으로 활발히 진행되고 있으며, 국내 기술을 향상시키기 위한 인식 전환으로 인력과 장기적 투자를 위한 노력 진행.
- 김 등(2017)은 북극해에서 해양환경의 장기 변화를 전체적으로 분석함과 동시에 객관적으로 분류된 해역별 환경특성 및 변화 양상을 파악하였고, 주요 환경인자 간 상호관계를 분석을 통하여 북극의 생산성 변화와 연관된 클로로필의 장기 변화를 이해하고 결과적으로 증가하는 양상을 분석했고, 북극의 물리적 해양환경 변화와 어떤 상호관계를 가지고 있는지 분석을 통하여 생산성에 영향을 주는 요인으로 표층수온 및 해빙농도의 변화를 분석했고, 특히 북극해의 해빙농도는 평균 39.25%이고, 이 중에서 동시베리아 해와 보퍼트 해(Beaufort Sea)에서 가장 높고, 넓은 면적을 차지하고 있는 것으로 보고함(그림 2-2-1).

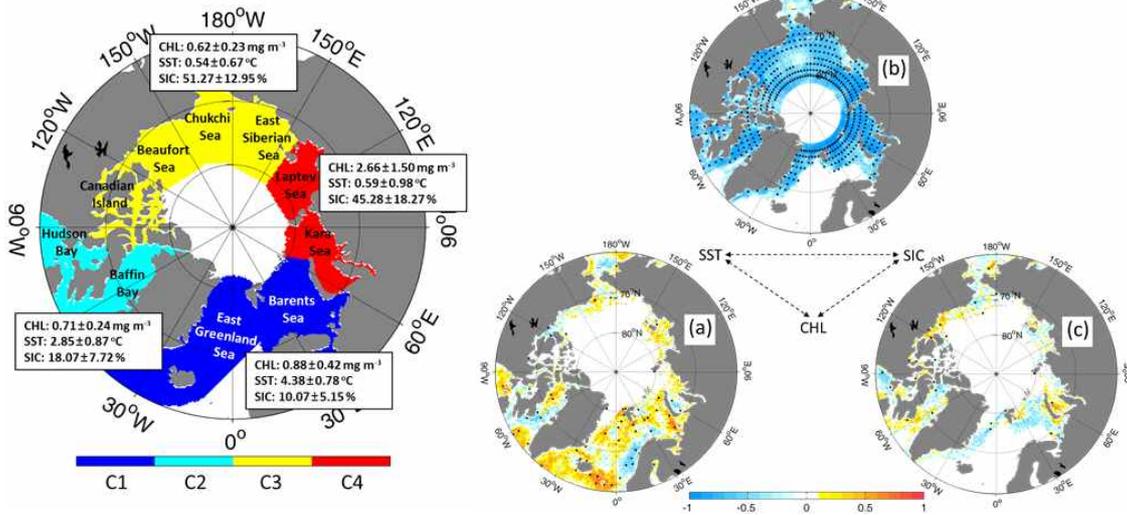


그림 2-1-1. 북극해에서 K-mean clustering 방법을 이용하여 지역을 구분하고 클로로로필 농도, 표층수온, 해빙농도에 대한 평균값과 주요 요인간 상호관계 분석 (김 등, 2017).

- 박 등(2018)은 북극해에 분포하는 유빙의 움직임을 이해하기 위해 현장관측 자료와 위성자료를 기반으로 입자 추적 모델을 사용하여 북극해 유빙의 분포 및 이동경향을 분석하였고, 지구온난화에 따른 해양-대기 상호작용의 변화에 의해 북극해 유빙의 이동경향이 변화는 것을 재현함(그림 2-1-2).

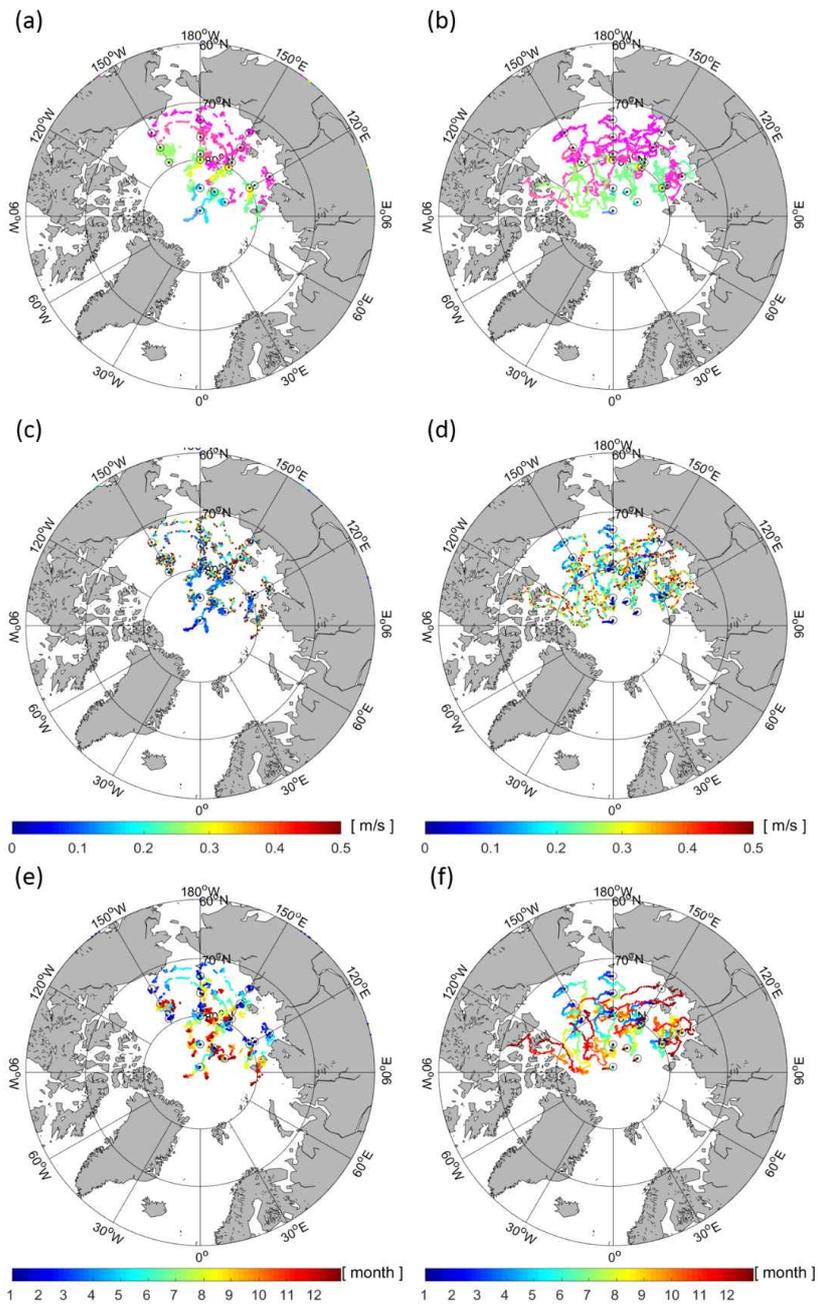


그림 2-1-2. 현장관측 자료를 입력 자료를 이용하여 북극해 해류와 바람을 이용하여 입자추적 모델 수행 결과(박 등, 2018).

- “인공위성을 활용한 극지기후시스템간 상호 작용 연구(2008-2010)”가 북극 스발바드를 중심으로 기초기술이사회 지원에 의해 수행됨.
- 한국의 극지연구소는 INTAROS(International Arctic Observing System)의 국제 공동연구파트너로 활동. 2017년도부터 1단계로 3년간 “북극 해빙 위성관측을 위

한 분석 기술 개발” 연구 시작. 이 연구는 국제 공동 위성 관측 정보 공유 체계 구축을 통한 북극권 전역의 빙권 정보 확보와 함께 한국의 아리랑 위성을 활용한 북극 해빙 분석/처리 기술을 확보함으로써 북극권 빙권 정보 수요에 대한 한계 극복을 목표로 함.

○ 북극해에서 에너지 수지를 고려하여 해빙의 공간변동 상호 연관 파악 연구 수행 (오와 김, 2018).

○ 한국해양과학기술원의 북극항로 해빙 예측 시스템 개발 연구 수행.

- 위성자료로 관측한 해빙농도 자료를 종합적으로 분석하여 일 5~6회 제공
- 1주일의 해류, 기상, 해빙, 파랑 등의 예측자료를 토대로 융합하여 산출한 해빙 공간분포 의 1개월 예측자료를 그림파일(PNG 포맷)로 제공함

○ 극지해빙예측사업단의 해빙탐지 기술 개발.

- 북극해에서 연구 접목가능 연구 개발 진행
- 해빙추적연구는 아직 미미한 상태이고, 단기 예보에 목적

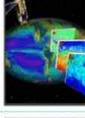
○ 2010년 쇄빙연구선 아라온 호의 취향으로 기존 남극해에 치우쳐 있던 극지연구가 북극으로도 폭넓게 확대됨.

- 다양한 관측장비(ITP 부이, UpTempO, AWS, SIESTA 등)를 해빙에 설치하여 관측
- Ice coring 및 다수 정점에 대한 현장 관측.

## 제 2 절 국외 기술개발 현황

### 1. 북극해 현장-위성-모델 연계 해양환경 및 해빙 변화 연구

- 북극해에 대한 원격탐사 연구는 미국 NASA, 오하이오주립대학의 Byrd Polar Research Center, 스크립스해양연구소, European Space Center(ESA) 및 영국과 미국의 극지연구소 등이 중심이 되어 연구 진행.
- IPY(International Polar Year)는 2007년 3월 극지역에 대한 세계적 규모의 국제 공동 연구를 위하여 창설 됨.
- APL/PSC에서 개발한 Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System(PIOMAS, Zhang and Rothrock, 2003)으로 1979년부터 최근까지 북극해 빙 체적 월 변화를 분석 수행.
- 1990년대부터 위성을 통한 북극의 관측이 수행되고 원격탐사 기술이 향상되면서 해빙 관측에 대한 시공간적인 제약이 많이 개선되면서, 많은 위성이 북극을 관측하며 북극 해빙에 대한 정보를 수집하고 있으며, 위성관측자료를 활용하여 해빙 이동장을 구성하기 위해 많은 선행 연구들이 수행되고 있음.
- 1997년 이래 Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor(SeaWiFS)의 운용으로 해색관측분야의 새로운 시대가 열리게 되었다. 해색위성 자료는 북극해양환경을 물리적인 관점으로 분석하는데 많은 활용이 있었던 SSMR, SAR, SSM/I, THIR 등의 센서와 나란히 장기간의 생태학적 변화를 분석할 수 있는 가능성을 제시했다(Arrigo and van Dijken, 2004; Pabi et al., 2008; Arrigo and van Dijken, 2015). SeaWiFS와 더불어 2002년부터 운용되고 있는 MODerate resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 해색위성과 연계하여 연속적인 클로로필 자료를 획득 가능(그림 2-2-1, 2-2-2).

위성	모습	운영기관	파장	해상도	촬영범위	촬영방식	촬영간격	표준산출물	운영기간	본 연구팀 확보방안
GOCI		해양과학기술수원, 해양 위성센터	8개밴드 (가시광선)	500m	한반도 (2,500km)	Frame Capture	8회/1일	클로로필, 부유물질, 용존유기물 파장별 반사도	2010.07 ~ 현재	무료 배포 ( <a href="http://kosc.kordi.re.kr">http://kosc.kordi.re.kr</a> )
MODIS		NASA	16밴드 (가시광선~ 적외선)	250m~1km	전지구 (2,330km)	Linear & Area Array	1회~2회 /1일	클로로필, 부유물질, 용존유기물 파장별 반사도	2002.07 ~ 현재	무료 배포 ( <a href="http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/">http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/</a> )
SeaWiFS		NASA	8밴드 (가시광선)	1.1km	전지구 (2,800km)	Linear & Area Array	1회/1일	클로로필, 부유물질, 용존유기물 파장별 반사도	1998.09 ~ 2010.12	무료 배포 ( <a href="http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/">http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/</a> )
AVHRR		NOAA	6개밴드 (가시광선~ 적외선)	1.1km	전지구 (2,800km)	Discrete Detector & Scanning Mirror	1회 이상 /1일	표층수온	1985.01 ~ 현재	무료 배포 ( <a href="http://podaac.jpl.nasa.gov">http://podaac.jpl.nasa.gov</a> )
Landsat7		USGS	7개밴드 (가시광선~ 적외선)	30~120m	전지구 (185km)	Discrete Detector & Scanning Mirror	16일	RGB 영상 표층수온	1999.01 ~ 현재	무료 배포 ( <a href="http://landsat.usgs.gov">http://landsat.usgs.gov</a> )

위성	모습	운영기관	사용 주파수	해상도	촬영범위	운영모드	촬영간격	편광특성	운영기간	본 연구팀 참여과제번호
ERS-1		ESA	C-band (5.3GHz)	25m	80 x 80km	Image Wave	35일	VV	1991.07 ~ 2000.05	CIP_8440
ERS-2		ESA	C-band (5.3GHz)	25m	80 x 80km	Image Wave	35일	VV	1995.04 ~ 2011.07	CIP_8440
ENVISAT		ESA	C-band (5.3GHz)	400m	5 x 5km	Image Wave	35일	HH,VV	2002.03 ~ 2012.04	CIP_8440
				1km	405km	ScanSAR				
ALOS		JAXA	L-band (1.27GHz)	7-44m	40-70km	Fine Mode	46일	HH,VV, HV,VH	2006.01 ~ 2011.04	RA_605, RA_1407
				14-88m	250-350km	ScanSAR				
TerraSAR-X TanDEM-X		DLR	X-band (9.65GHz)	1m	10 x 5 km	SpotLight	11일	HH,VV, HV,VH	2007.07 ~	COA_1038, ATL_OCEA0391
				3m	30 x 50km	StripMap				
KOMPSAT-5		KARI	X-band (9.66GHz)	1m	5 x 5 km	High resolution	28일	HH, VV, HV, VH	2013.08 ~	국내 SAR 위성 (배포정책)
				3m	30 x 30km	Standard				
				20m	100 x 100km	Wideswath				

그림 2-2-1. 다중 위성 센서 및 제원.

발사 날짜	Sentinel-1A: 2014년 4월 3일 Sentinel-1B: 2016년 4월 25일		발사 날짜	Sentinel-2A: 2015년 6월 23일 Sentinel-2B: 2017년 3월 7일		발사 날짜	Sentinel-3A: 2016년 2월 16일 Sentinel-3B: 2018년 4월 25일	
설계 수명	7년		설계 수명	7년		설계 수명	7.5년	
궤도	극궤도		궤도	극궤도		궤도	극궤도	
고도	693 km		고도	786 km		고도	814 km	
공간 해상도	10m X 10m(고해상도) <b>40m X 40m(중해상도)</b>		재방문 주기	10일		재방문 주기	4일	
재방문 주기	12일		센서	MSI (Multi-spectral instrument)		센서	SLSTR, OLCI, SRAL, DORIS, MWRR, LRR, GNSS	
센서	C-SAR (C-band Synthetic Aperture Radar)		MSI band	Sentinel-2A	Sentinel-2B	Spatial resolution	OLCI band	
편극 (Polarization)	Single Polarization : HH, HV, VV, VH Dual Polarization : HH + HV, VV + VH		Central wavelength (nm)	Central wavelength (nm)	Central wavelength (nm)	(m)	Central wavelength (nm)	Spatial resolution (m)
Beam Mode	SM(StripMap) IW(Interferometric Wide swath) <b>EW(Extra Wide swath)</b> WV(Wave)		1	442.7	442.2	60	1	400
자료 종류 (Product Type)	Level0 : Raw Level1 : SLC (Single Look Complex) <b>GRD (Ground Range Detected)</b> Level2 : OCN (Ocean)		2	492.4	492.1	10	2	412.5
			3	559.8	559.0	10	3	442.5
			4	664.6	664.9	10	4	490
			5	704.1	703.8	20	5	510
			6	740.5	739.1	20	6	560
			7	782.8	779.7	20	7	620
			8	832.8	832.9	10	8	665
			8A	864.7	864.0	20	9	673.75
			9	945.1	943.2	60	10	681.25
			10	1373.5	1376.9	60	11	708.75
			11	1613.7	1610.4	20	12	753.75
			12	2202.4	2185.7	20	13	761.25
							14	764.375
							15	767.5
							16	778.75
							17	865
							18	885
							19	900
							20	940
							21	1020

그림 2-2-2. ESA Sentinel-1, 2, 3 센서 및 제원.

- 유럽 연합은 INTAROS는 국제공동북극관측시스템을 만들어 유럽항공우주국의 Sentinel 위성 시리즈 활용과 현장 관측을 포함하는 유럽연합의 지구관측 프로그램인 코페르니쿠스 프로그램과 연계하고 있음(그림 2-2-2).
- 북극해의 해빙 이동을 분석하기 위해 지금까지 다양한 관측이 수행되고 있으며, 이 중에서 IABP에서 지속적으로 연간 수십 개의 부이를 북극에 투하하여 북극해의 해류 및 해빙의 움직임을 관측하고 있고(Rampal et al., 2009b; Cheng et al., 2020, 그림 2-2-3), 미 우즈홀 연구소 또한 ITP를 통해 해빙에 장비를 설치하여 대기 및 해수 물성과 해빙의 이동을 추적하고 북극 해빙에 나타나는 변화에 대해 지속적으로 조사 연구 수행(Timmermans et al., 2008; Lei et al., 2019).
- passive microwave, scatterometer 자료 등을 활용한 Cross-Correlation, Optical Flow 등의 해빙 이동장 도출 방법이 사용(Thomas et al., 2008; Lavergne et al. 2010; Girard-Ardhuin et al., 2012; Muckenhuber et al., 2016, 그림 2-2-4).

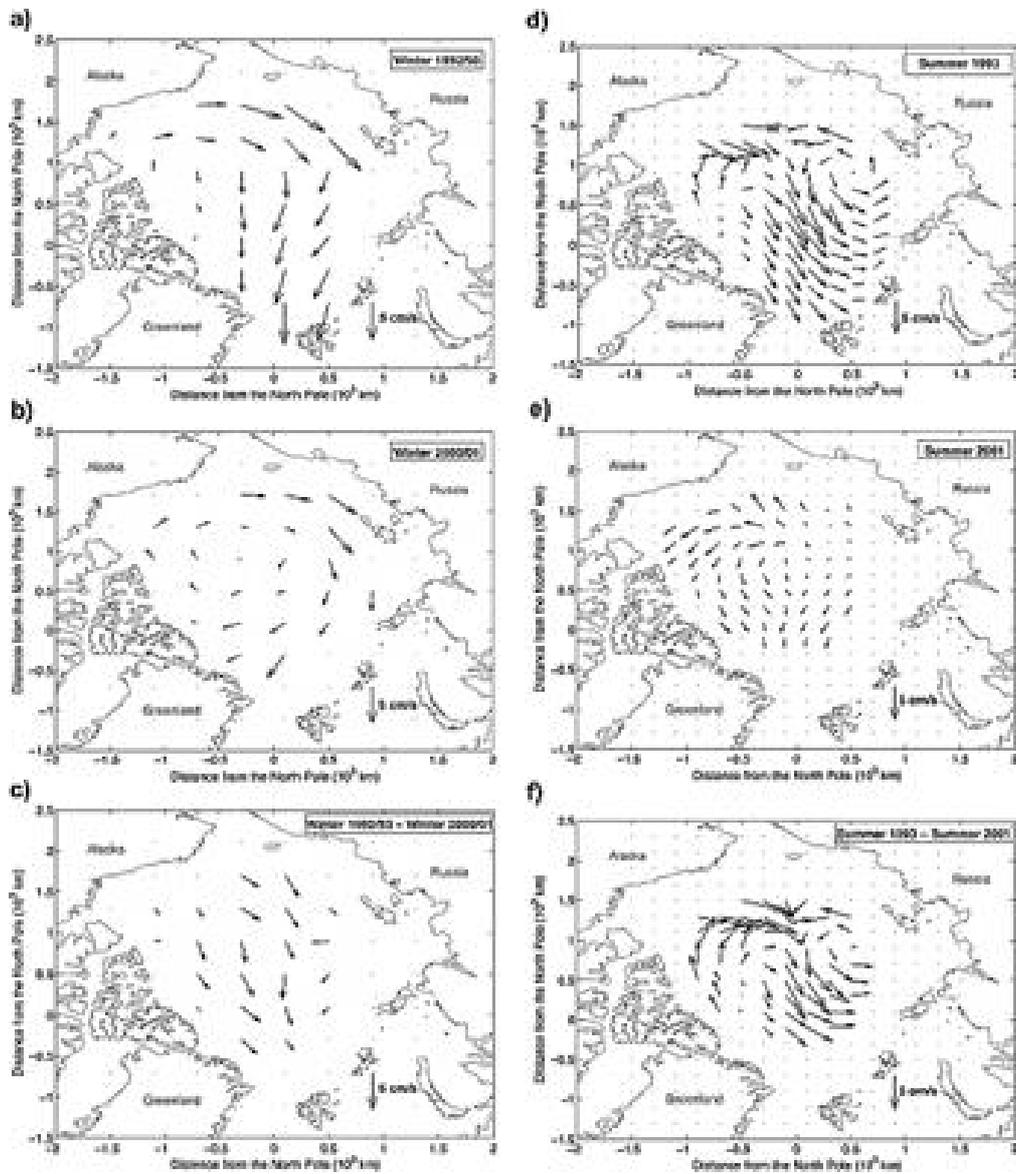


그림 2-2-3. (a) 1992-1993년 겨울, (b) 2000-2001년 겨울, (c) 두 겨울, (d) 1993년 여름, (e) 2001년 여름, (f) 두 여름의 차이에 대한 보간 평균 속도장 (Rampal et al., 2009).

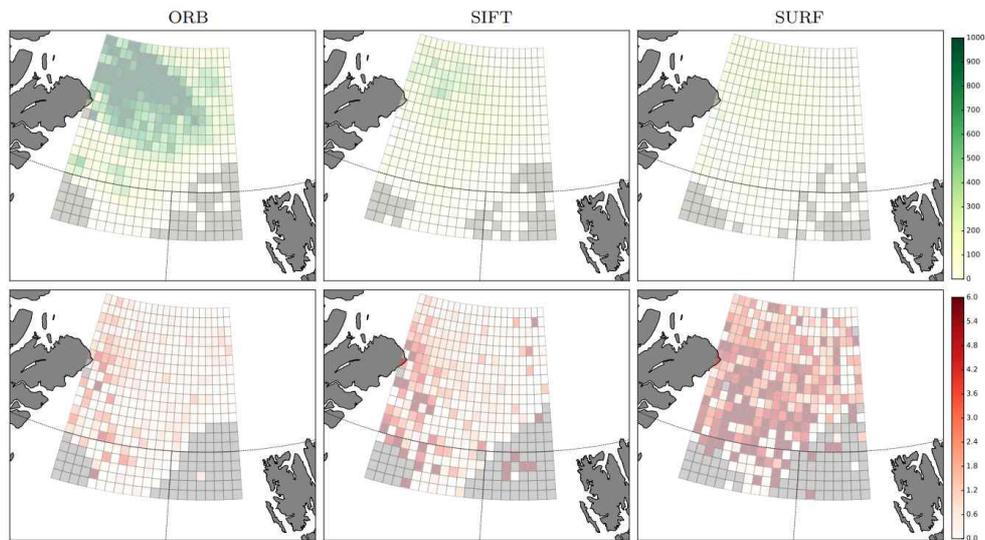


그림 2-2-4. 해빙 움직임은 HH와 HV 채널과 ORB(첫 번째 열, 177513 벡터), SIFT(두 번째 열, 43260 벡터) 및 SURF(세 번째 열, 25113 벡터) 알고리즘을 모두 사용하여 43개의 Sentinel-1 영상 페어에서 도출(Muckenhuber et al., 2016).

○ Rampal et al.(2009a, 그림 2-2-5)은 북극해에서 부이에서 관측된 해빙 이동속도의 계절변화에서 하계가 동계보다 이동속도가 증가된 것으로 분석된 반면, Spreen et al.(2011)은 위성관측자료(SSM/I)를 활용하여 관측된 자료에서는 동계(10월-5월)의 이동속도가 증가 경향을 보이고 최근에 이동속도가 증가하는 것으로 분석(그림 2-2-6).

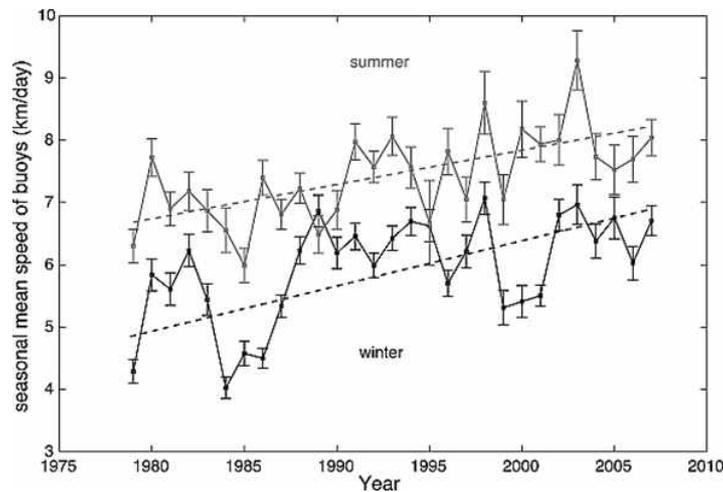


그림 2-2-5. 북극해 부이에서 관측된 여름과 겨울 평균 속도(Rampal et al., 2009a).

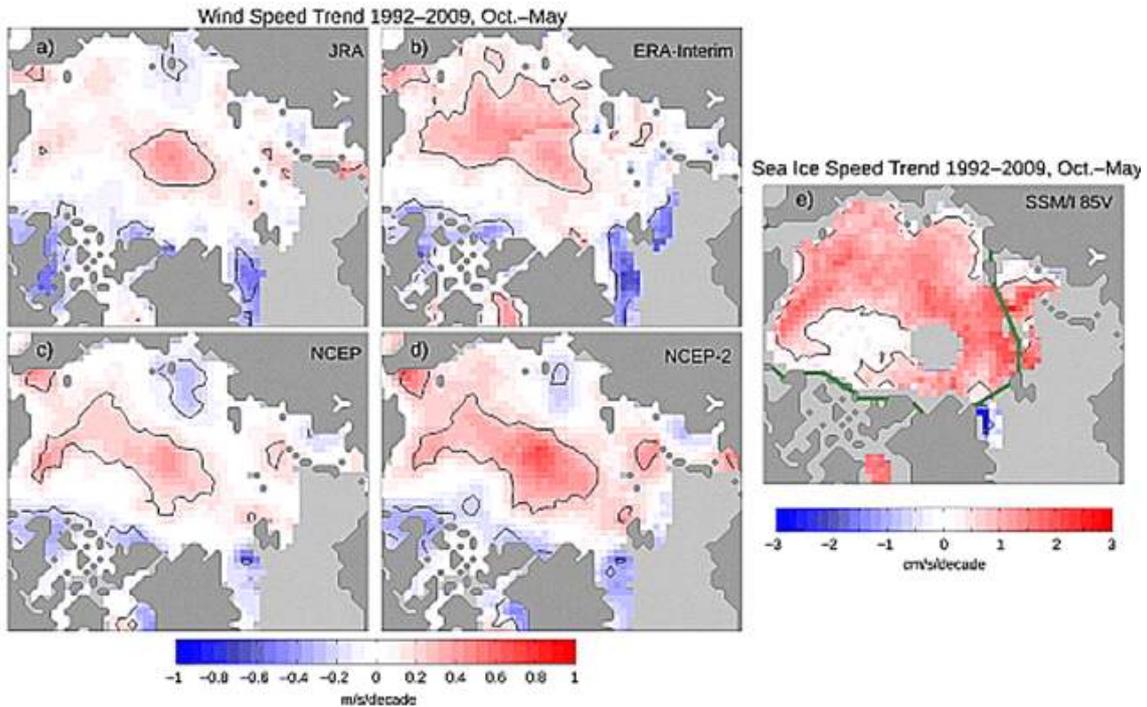


그림 2-2-6. 겨울(10월-5월)에서 2008/2009년까지(연간 바람 동향은 그림 S3 참조) 바람과 해빙 이동 속도의 공간 경향(Spreen et al., 2011).

- 북극해에서 해빙 및 유빙 추적 관련 연구 중에서 Lavergne et al.(2010)은 유빙의 추적을 위해 다중 위성영상을 이용하여 motion tracking 방법으로 움직임을 추적하는 방법을 사용했고, 그리고 최근에는 30년 간의 모델 및 위성 자료를 사용하여 유빙의 순환과 이동 경향 분석 결과에서 북극해에서 유빙의 분포밀도는 이들의 이동속도와는 반대 경향을 나타내고, 그리고 북극진동의 10년 주기 순환 패턴 변화는 보퍼트 환류에 존재하는 유빙의 움직임에 영향을 미친다고 분석 (Kwok et al., 2013).
- Olason and Notz(2014)는 해빙의 이동속도 증가는 해빙의 재생성 감소 및 fracture 증가와 연관성이 있는 것으로 분석했으며(그림 20207), Hongwei et al.(2020) 또한 표류부이 관측자료를 사용하여 표면온도(skin temperature)의 상승이 해빙의 이동속도 증가와 상관성이 있다고 분석하는 연구 수행.

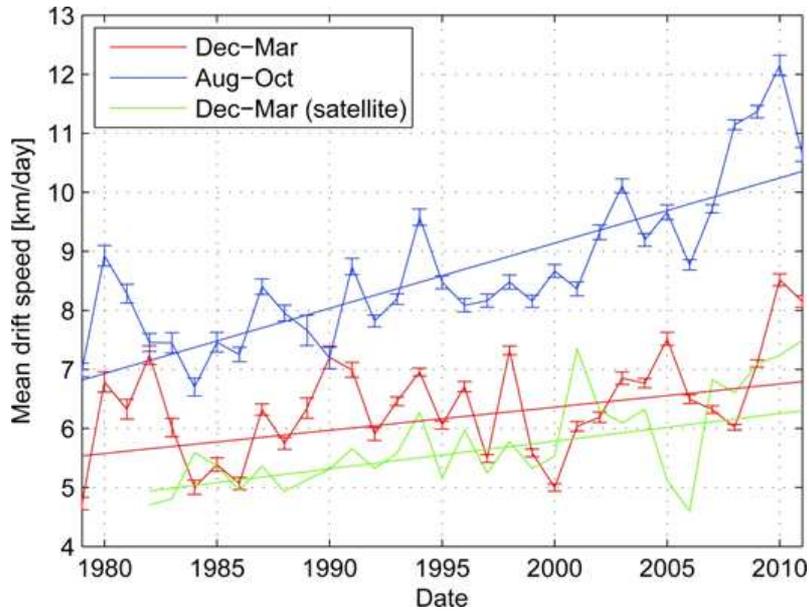


그림 2-2-7. 장기 평균 해빙 이동속도 변화(Olason and Notz 2014).

- Lei et al.(2019) 또한 북극진동지수와 해빙 이동속도 변화의 관계를 통해 북극해에서의 해면기압이 해빙의 이동속도를 변화시키는 요인 중 하나로 분석됨(그림 2-2-8).

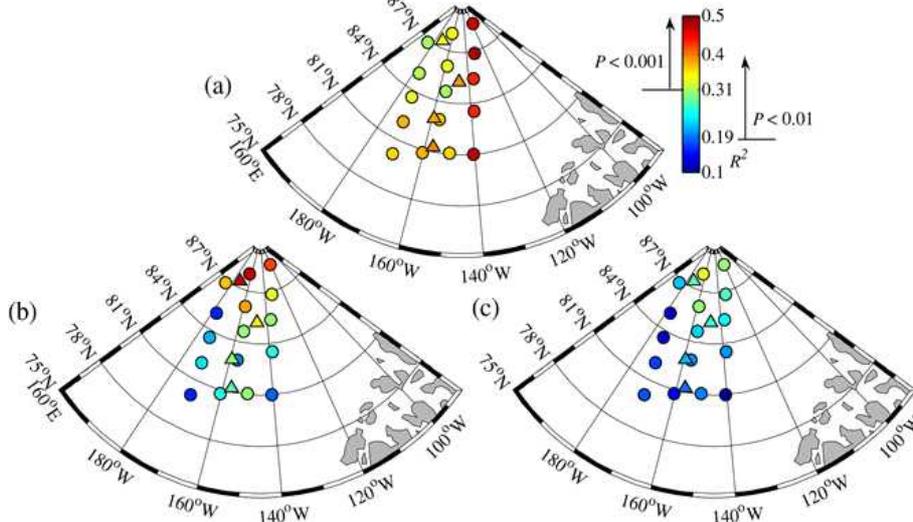


그림 2-2-8. 재구성된 후방 궤적의 원래 위치에서 말단 위치까지의 위도 차이(a)와 연간 평균 CAI 사이의 제곱 상관 계수(b) 재구성된 전방 궤적의 원래 위치에서 말단 위치까지의 경도 차이(b)와 연간 평균(av)CAI, 그리고 (c) 재구성된 전방 궤적의 원래 위치에서 말단 위치까지의 경도 차이와 겨울 BH 이상(Lei et al., 2019).

- NSIDC 등의 위성관측자료 기반 해빙 이동장에서 지난 수십 년간 북극해 전 해역에 걸쳐 해빙 이동속도가 증가하는 경향을 보이며(+0.6846 cm/s/decade), 특히 보퍼트 해에서 가장 높은 상승세를 보이는 것으로 분석되는 등 위성관측자료를 통한 북극 해빙의 이동 또한 조사 연구 수행(Karvonen., 2012; Heerton et al., 2019).
- 북극해에서 유빙의 이동 및 표층 해류의 유동에 관한 연구는 장/단기 현장관측, 위성, 재분석 및 모델 자료를 활용한 연구들이 수행됨.
- Emery et al.(1997)은 해빙의 이동을 계산하기 위해 위성자료(SSM/I)와 부이 자료를 이용하여 이동속도와 방향을 계산했고, 상대적으로 해빙의 움직임이 작은 동계에 높은 정확도를 나타내는 것으로 분석함.
- 북극해에서 해빙과 유빙 유동과 관련된 현장관측 연구 중에서 Plueddemann et al.(1998)는 보퍼트 환류(Beaufort Gyre)의 표층 유속 구조를 파악하기 위해 장기 표류 부이에 탑재된 ADCP의 자료를 분석하여 지름 20 km 정도의 와류(eddy)에서 평균 0.05-0.1 m/s의 해류 속도를 관측함.
- Timmermans et al.(2008)는 유빙에 설치된 ITP(Ice-Tethered Profiler) 자료를 이용하여 보퍼트 환류에서 이동하는 유빙의 움직임을 분석하여 와류가 형성되는 해역의 특성과 형성 요인에 대해서 분석(그림 2-2-9).

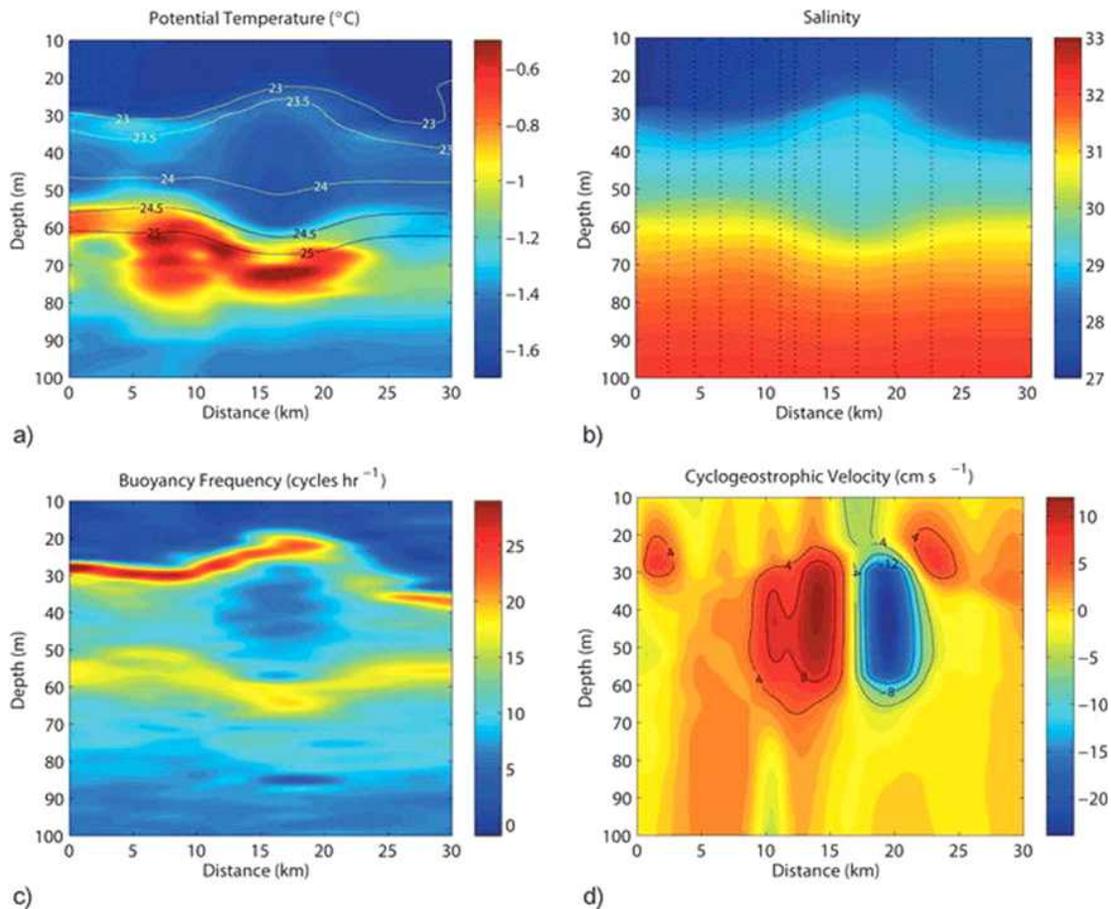


그림 2-2-9. (a) 수온, (b) 염분, (c) 부력 주파수 및 (d) 속도를 통한 사이클로 지오스트로피 속도의 섹션(ITP3, 499, Timmermans et al., 2008).

- Kwok et al.(2013)은 1982년부터 2009년까지 약 28년간의 장기 자료를 이용한 해빙 운동의 핵심적인 특징을 분석함. 지구물리학적 관점에서 ice circulation, drift speed, ice motion, geostrophic wind, ocean current 자료로부터 decadal trend의 변화 분석.
- Sumata et al.(2014)은 북극해에서 해빙 이동 변화 현장관측 자료를 이용하여 위성에서 추정된 자료의 불확실성을 검증하였고, 현장관측 자료 대비 에러를 가지고 있지만 모델 연구 수행에 사용 가능한 것으로 분석(그림 2-2-10).

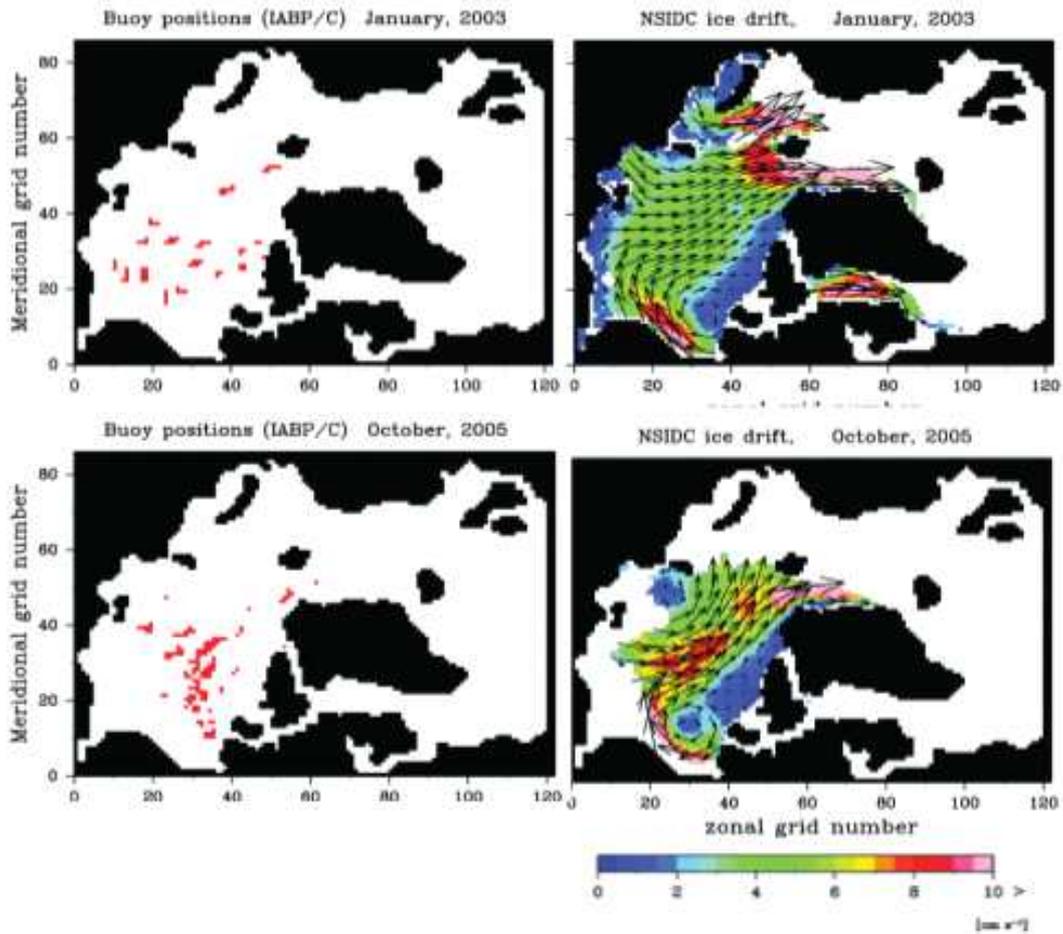


그림 2-2-10. 북극해에서 해빙 이동속도 현장관측 자료와 위성관측 자료간 정확도 검증(Sumata et al., 2014).

- 북극은 기후 변화 등의 전 지구적인 변화에 가장 민감하게 반응하는 지역 중 하나이며, 북극해의 환경은 대기와 해양의 복합적인 요인에 의해 변화되는 것으로 분석(Screen et al., 2012; Howell et al., 2019; Li et al., 2019, 그림 2-2-11).
- 해빙 감소의 주된 요인은 해빙의 용해로 넓어진 개빙 해역으로부터의 수증기 방출 증가와 이로 인한 하향장파복사의 증가라는 원인파(Wang and Key, 2005; Zuidema et al., 2005; Francis and Hunter, 2006, 그림 2-2-12), 전 지구적인 기후 변화에 비롯한 표층수온의 증가를 그 원인으로 분석(Shimada et al., 2006; Woodgate et al., 2006).

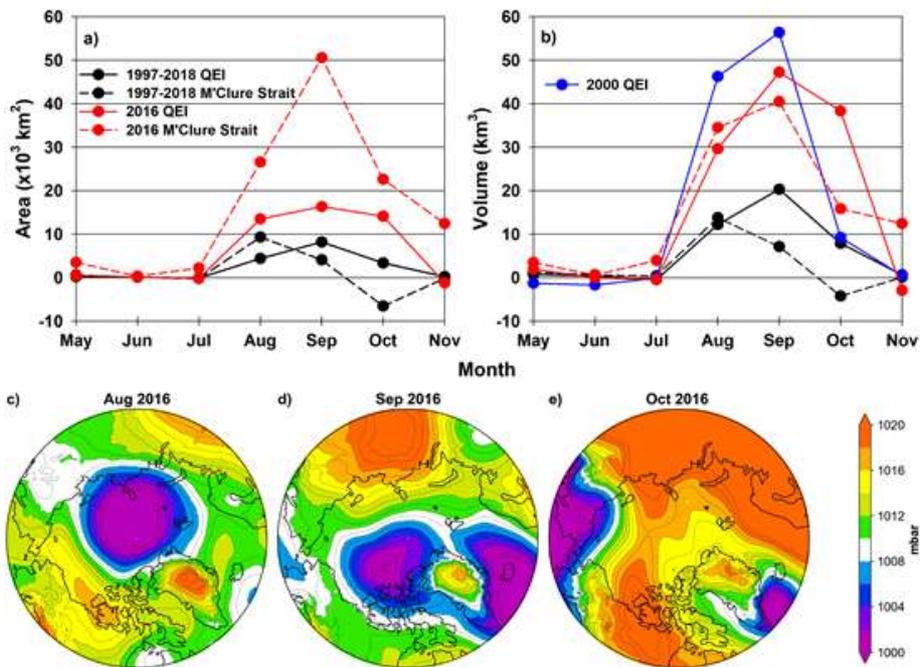


그림 2-2-11. 2016년과 1997-2018년 평균 캐나다 북극 군도-북극해 교환 관문의 월 해빙 (a) 면적과 (b) 부피 변화 자료(Howell et al., 2019).

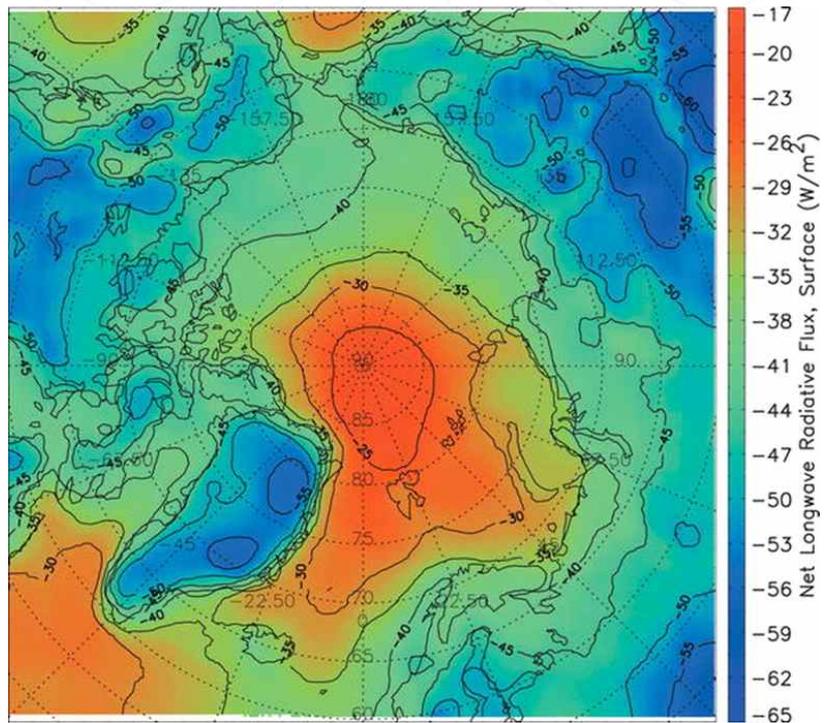


그림 2-2-12. 표면에서의 연간 평균 순 장파 복사 플럭스(Wang and Key, 2005).

- 최근 Boé et al.(2009)은 캐나다 분지에 염분 약층을 형성하는 여름철 태평양 수괴가 온난화로 인해 수온이 증가하고, 따뜻한 수괴가 베링해로 유입되면서 해빙 유동 및 열 교환을 증가시켜 해빙생성을 방해한 것으로 1990년 말의 해빙 감소를 규명한 바 있음.
- 수온 증가 및 해빙 감소로 인한 개빙 면적의 증가(Comiso, 2003, 그림 2-2-13)와 그에 따른 증발량의 증가(Belchansky et al., 2004), 저위도에서 비롯된 수분 이동(moisture transport)의 증가(Groves and Francis, 2002), 앞당겨진 융해 시기와 같은 요인이 복합적으로 작용하여, 북극의 온난화 현상이 가속화된 것으로 조사되었고, 해양-대기 인자 간 양의 피드백 작용을 하며 매년 기록을 갱신하는 북극 온난화(Arctic warming) 현상은 해양 환경을 급격하게 변화시키고 해양생태계의 변화를 야기하고 있음(Post et al., 2009; Doney et al., 2012).

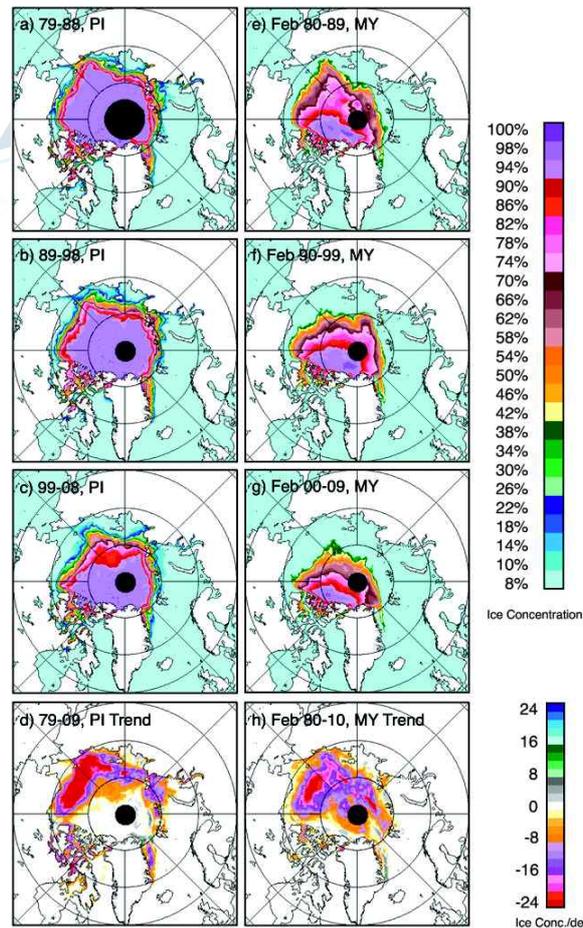


그림 2-2-13. (a) - (c) 다년생 얼음과 (e) - (g) 다년생 얼음의 10년 평균 및 (d)

1979년부터 2009년까지 그리고 (h) 1980년부터 2010년까지 다년생 얼음의 추세 (Comiso, 2003).

- 기후변화로 인해 북극해로 유입되는 담수가 증가하고(Peterson, 2002), 해빙의 이동경로에 변화가 생기며(Serreze et al., 2007, 그림 2-2-14), 내부파에 의해 염분 약층이 붕괴(Rainville and Woodgate, 2009)하는 등, 북극의 일차 생산성을 조절하는 인자들이 급속도로 변화되고 됨을 제시.

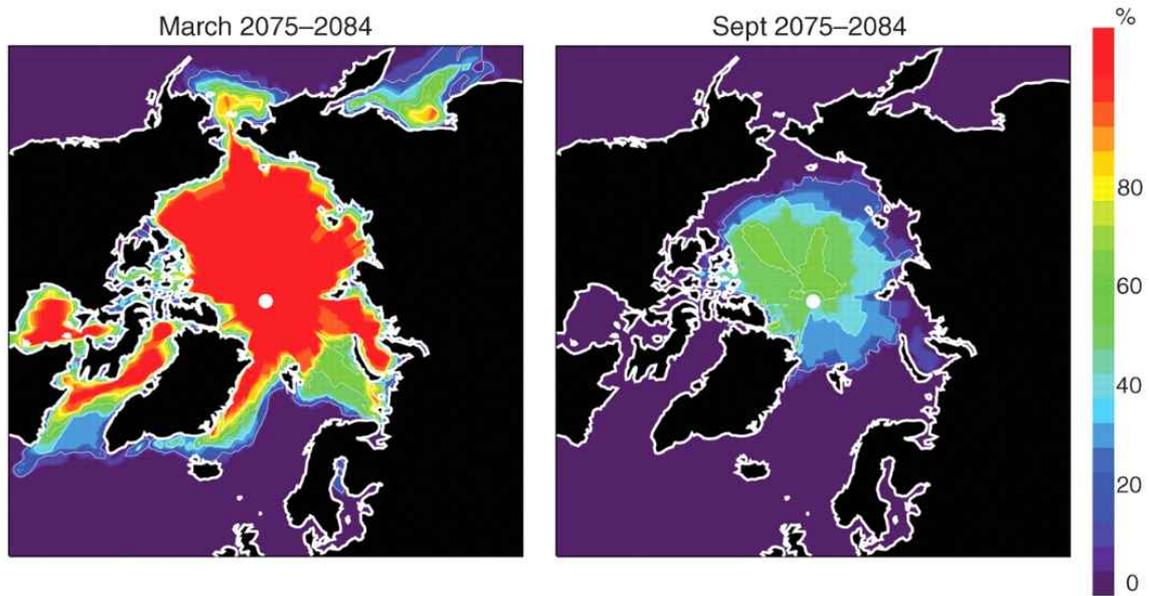


그림 2-2-14. 3월(왼쪽)과 9월(오른쪽)에 대해 얼음 농도가 최소 15%인 IPCC AR4 모델 시뮬레이션(SRESA1B 시나리오)의 공간 패턴은 2075년부터 2084년까지 평균(Serreze et al., 2007).

- 북극해에서 1998-2009년 동안 북극해 일차생산량이 전체적으로 증가했고, 근해 혹은 염분약층 상쇄에 의한 북극표층해수로의 잠재적인 영양염의 유입 가능성과 개빙기간의 증가의 영향으로 추측함(Arrigo and van Dijken, 2011, 그림 2-2-15).

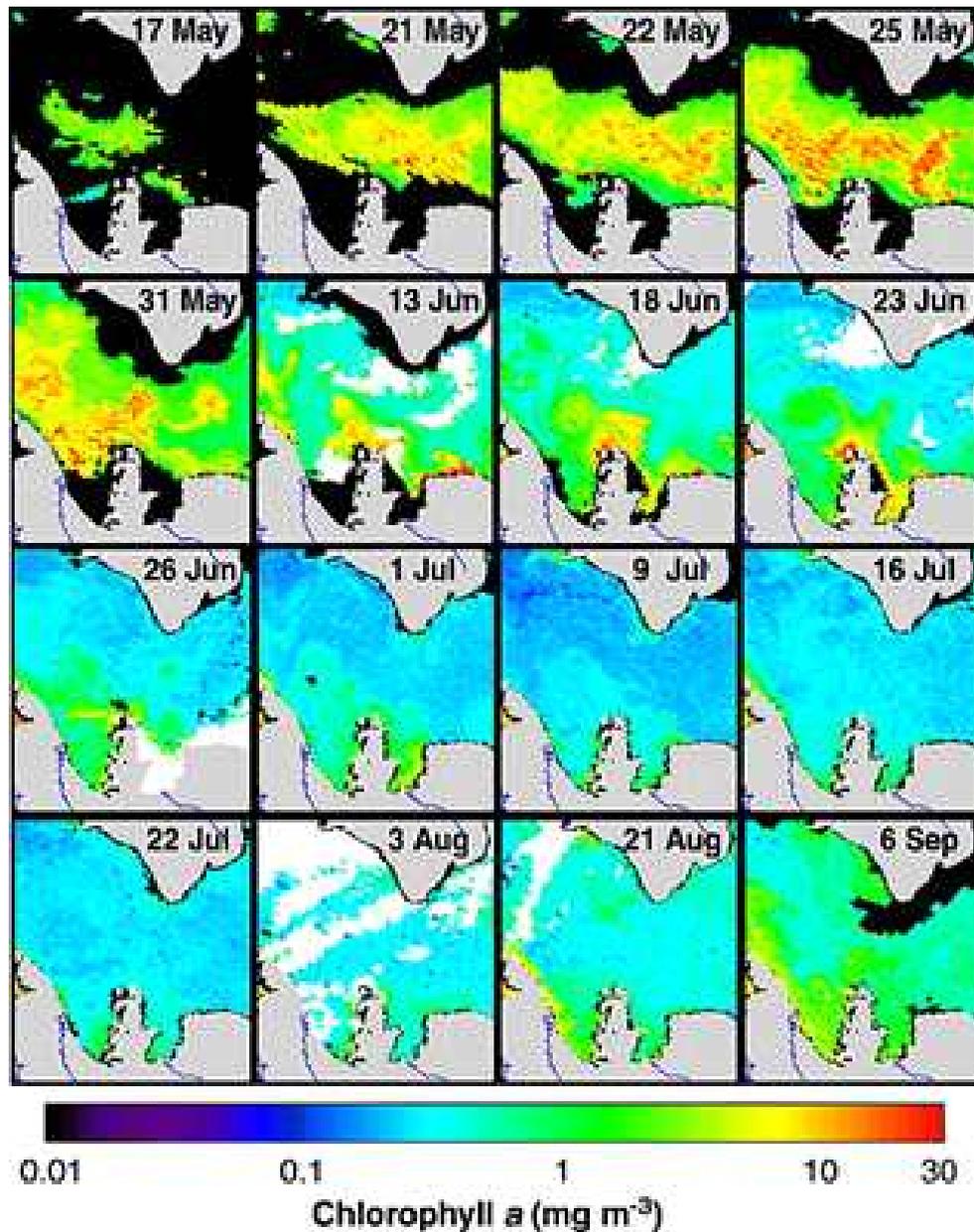


그림 2-2-15. 케이프 배서스트 폴리냐 지역에서 1998년 식물 플랑크톤 꽃의 SeaWiFS 시계열 영상(Arrigo and van Dijken, 2011).

- 북극 온난화 현상을 조절하는 세 가지 주요인(해빙농도, 표층수온, DRF; direct radiative forcing)을 연구한 결과 북극의 해빙농도, 표층수온은 근표면 온난화(near-surface warming)의 대부분을 설명하였고, 원거리의 표층수온은 고층 온난화(warming aloft)에, DRF는 북극 대류권 온난화(Arctic tropospheric warming)에 관여하는 것으로 분석됨(Screen et al., 2012).

- Ding et al.(2014)는 대기대순환모델(ECHAM 4.6)을 이용한 수치모의실험 결과를 통해 열대해역의 표층수온 증가가 extra-tropical Rossby wave train의 주요 인자로 작용하여, 최근 몇 십 년간 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation)의 negative trend를 야기하고 북동 캐나다와 그린란드 지역을 온난하게 한다는 가설을 세운 바 있음(그림 2-2-16).

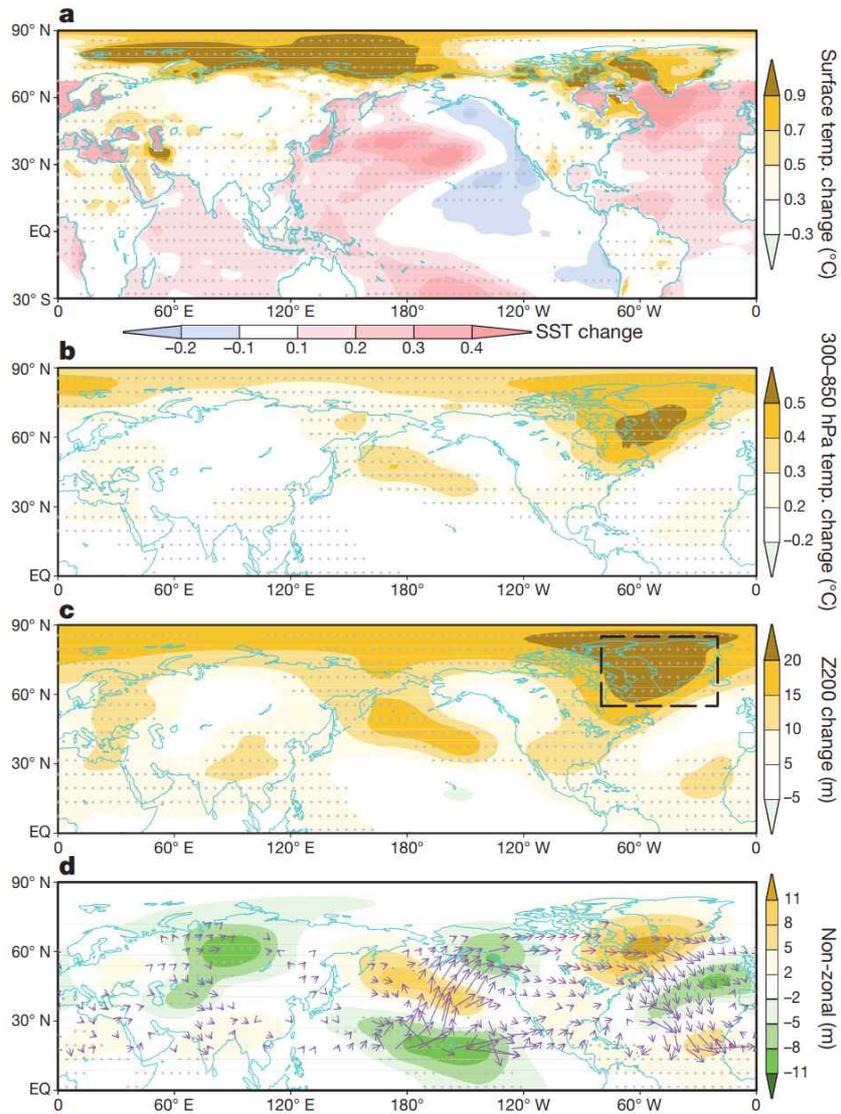


그림 2-2-16. 1979-2012년 연간 평균 필드의 관측된 추세 경향(Ding et al., 2014).

## 제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

### 제 1 절 북극해 현장-다중위성 자료 수집

#### 1. 북극해 현장관측 자료

##### ○ ITP(Ice Tethered Profilers)

- ITP(<ftp://ftp.whoi.edu/>)는 대기-해빙-해양 간의 상호작용을 연구하기 위해 해빙을 뚫고 해빙 아래 해양으로 연결되는 와이어를 통해 연직 방향으로 수층내 해양환경을 관측하는 장비로 개발(그림 3-1-1)
- ITP는 1시간 간격으로 시간에 따른 해빙의 위치와 현장자료를 제공(그림 3-1-2)
- 본 연구에서는 북극해에서 시/공간적으로 변화는 유빙의 유동을 이해하고, 해빙의 장기 속도 변화를 분석을 위하여 미국 Woods Hole 해양연구소에서 제공하는 ITP의 시간별 위치 자료를 사용
- 문헌자료 기반 북극해 이동속도 변화 분석(동계 북극해 이동속도 증가 경향)
- 장기 시계열 자료 중 에러 자료 제거하여 시계열 자료 생산



그림 3-1-1. ITP의 모식도와 현장에 설치된 모습  
(<http://www.whoi.edu/page.do?pid=20756>).

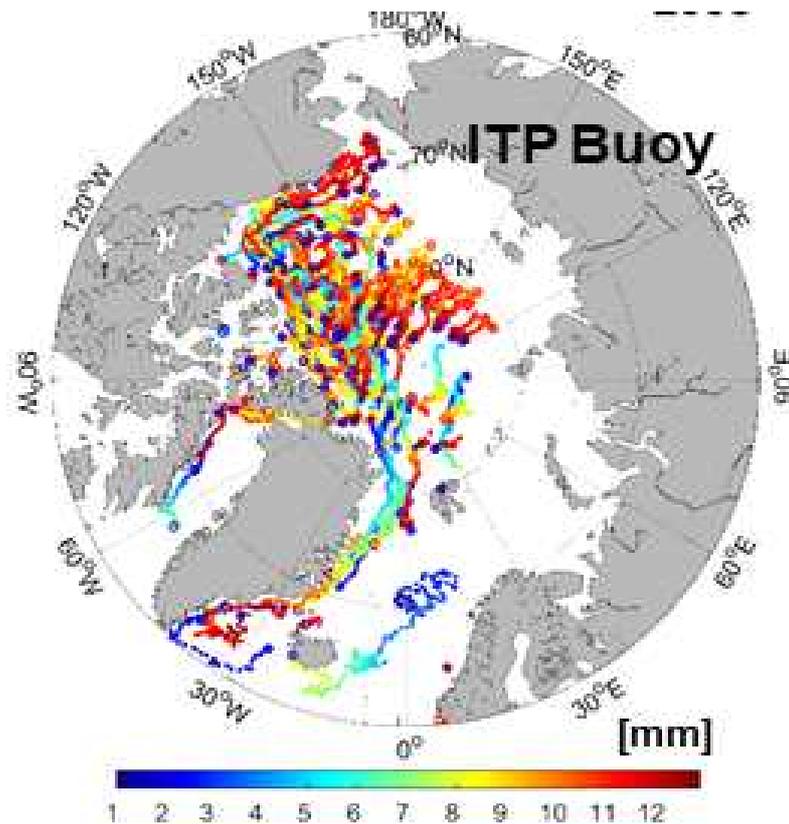


그림 3-1-2. 그림 북극해 ITP 부이 투하 지역 및 이동 궤적.

○ IABP(International Arctic Buoy Program)

- IABP에서는 1979년부터 현재까지 북극해에 표류부이를 투하하고 있으며(그림 3-1-3), 부이에 탑재된 관측장비를 통해 해빙의 움직임을 관측하고 있음 ([https://iabp.apl.uw.edu/Data\\_Products/BUOY\\_DATA](https://iabp.apl.uw.edu/Data_Products/BUOY_DATA))
- IABP 자료는 ITP 자료와 병합하여 장기 해빙 속도 변화를 분석에 사용
- IABP 자료 중에서 2018년부터 2020년까지 총 497개의 부이를 대상으로 745개의 자료는 고해상도 해빙 추출 방법 개발에 검증 자료 사용(그림 3-1-4)
- 위성영상의 시공간적 범위에 포함된 부이 자료를 사용하였으며, 위성관측 영상의 영역에 포함되지 않더라도 1 km 이내의 범위에 있는 부이의 관측자료를 사용(Zhang et al., 2020)
- 해빙관측부이들은 시간이 경과함에 따른 해빙의 융해에 의해 open sea로 유입

되어 해빙의 이동을 검증하기 위한 용도로 사용 불가능한 것이 있으므로 해빙 위에 있는 부이만 유효한 것으로 간주하여 사용(Korosov and Rampal, 2017)  
 - 또한 자료의 품질을 위해 부이의 이동속도를 계산하고 outlier 제거



그림 3-1-3. IABP 모식도 및 현장 설치된 모습 및 투하 해역.

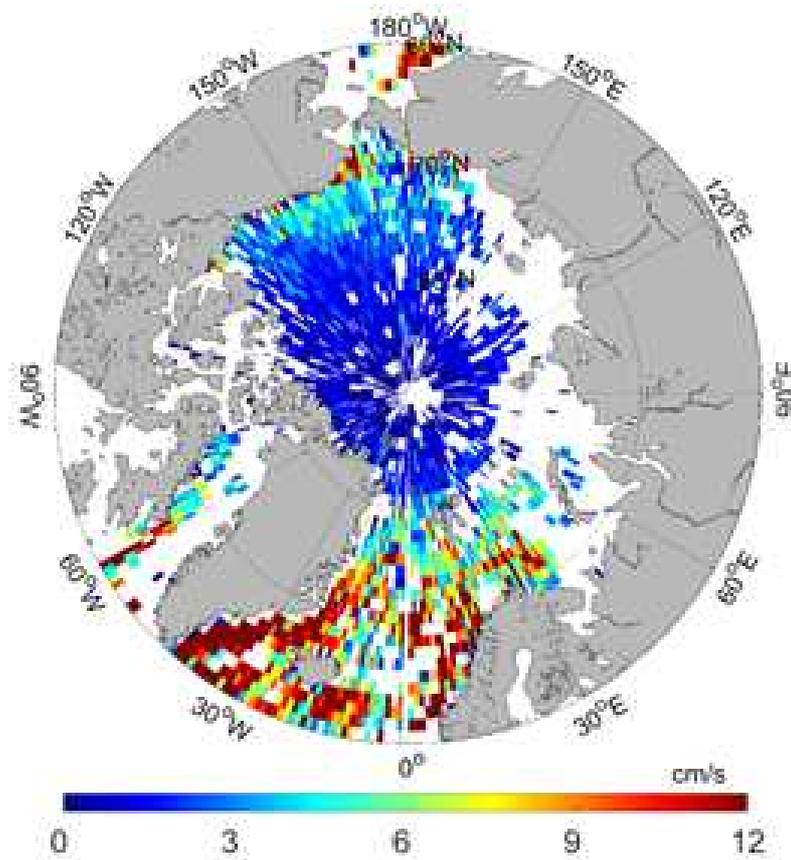


그림 3-1-4. 북극해 IABP 자료를 이용한 전체 평균 속도(6,723 이동궤적, 1° × 1° 공간해상도).

## 2. 북극해 위성관측 자료

- 해빙농도 (Sea ice concentration, SIC)
  - 해빙의 변화는 European Center for Medium range Weather Forecasting (ECMWF)의 ERA-Interim 재분석자료인 해빙농도 자료를 이용 (<http://apps.ecmwf.int>)
  - ERA-Interim의 해빙농도 자료는 직접적인 관측을 수행하지 않고 부분적으로 산출된 해빙을 병합하여 산출
  - 기간에 따라 ERA-Interim의 이전 버전인 ERA-40, National Centers for Environmental Prediction (NCEP)의 Real-Time Global SST (RTG), Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA)를 입력 자료로 사용하며, 하루 1회 갱신되는 배경장에서 4차원 변분법 기반의 자료동화를 통해 해빙농도가 계산(Dee et al., 2011)
  - 자료는 1979년 이후로 현재까지 제공되고 있으며 단위 픽셀 영역 내에 해빙이 차지하는 면적의 비로써 0에서 1사이(0~100%)의 값을 가짐(그림 3-1-5)
  - 0.125 degree 해상도와 일별 시간해상도 자료에서 해빙농도가 15% 이상인 해역의 총 면적을 합산하여 해빙면적(sea ice extent)을 계산(Jay et al., 2002)

극지연구소

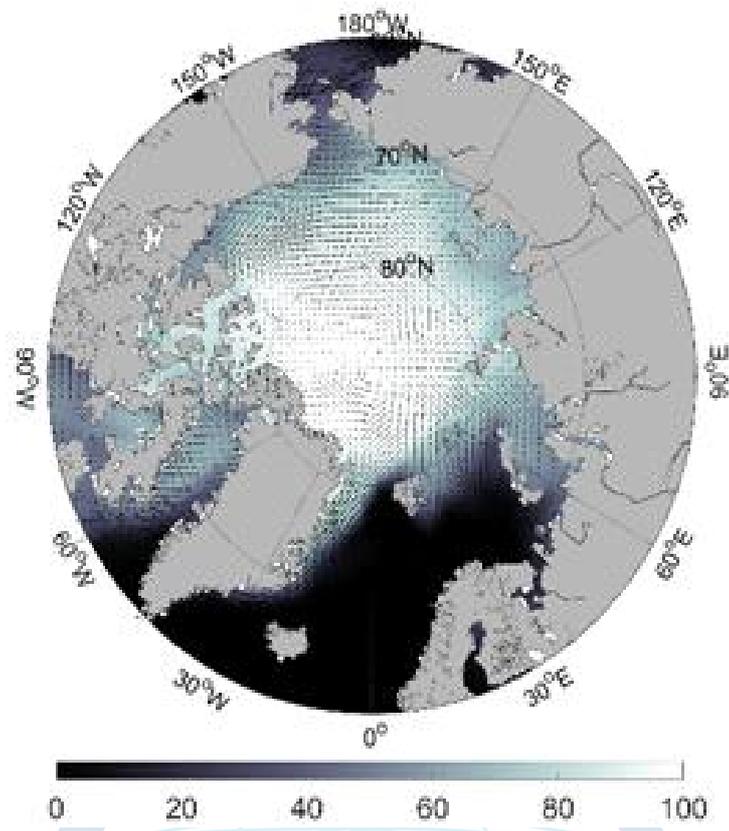


그림 3-1-5. 북극해 해빙농도 평균자료(%).

○ NSIDC(National Snow and Ice Data Center)

- NSIDC(<https://nsidc.org/home>) 위성자료는 1980년부터 현재까지 일일 해빙이동 자료 수집(그림 3-1-6)
- 위성자료와 현장관측 자료와 비교하여 장기 해빙 속도 변화를 분석하기 위해 사용
- 공간해상도 25 km를 이용하여 북극해 전해역에 대한 월평균 자료를 이용하여 부이에서 관측된 일일 자료를 월평균하여 북극해 해빙 속도 변화 분석
- 지역별 북극주변해 환경변화를 살펴보기 위해서 National Snow & Ice Data Center에서 제공하는 해역 지도를 사용하였으며 NetCDF형식으로 제공됨 (<https://www.arcus.org/sipn/sea-ice-outlook/2016/august/call>).

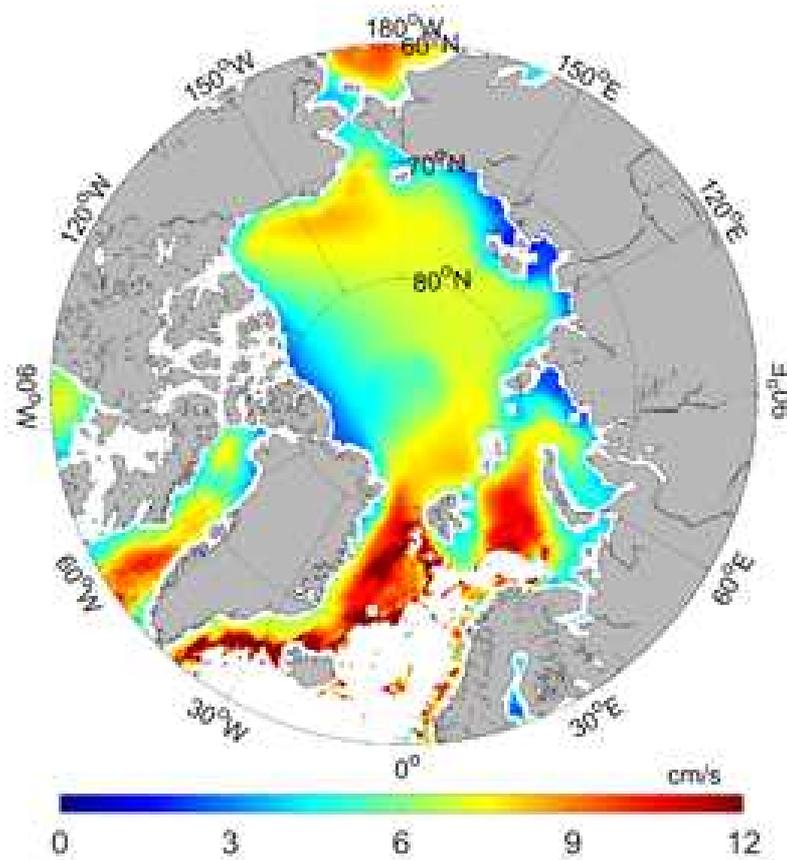


그림 3-1-6. 북극해 NSIDC 위성자료 평균 해빙 이동 속도.

○ Sentinel-1

- Sentinel mission 은 European Commission 와 European Space Agency(ESA) 가 공동으로 주관하며, 환경이나 보안 등에 관련하여 전 지구를 모니터링하기 위한 유럽의 Copernicus 프로그램(그림 2-2-2)
- Sentinel-1은 두 개의 위성으로 관측을 수행하고 있으며, Sentinel-1A은 2014년부터, Sentinel-1B는 2016년부터 현재까지 관측을 수행하고 있음
- 극궤도 위성으로서 북극에서의 re-visit time은 채 하루가 되지 않고 2-3일이면 북극 전역에 대한 관측이 가능함(ESA, 2012)
- 해빙으로 덮인 지역에서 Sentinel-1의 주요 획득 모드는 Extra Wide mode Ground Range Detected Medium Resolution (EW GRDM)이며, SAR 영상의 관측영역은 400 km × 400 km, pixel spacing은 40 m × 40 m 로 제공됨
- Sentinel-1은 Dual-polarization을 제공하는 5.405 GHz의 single C-band radar

를 탑재하고 있음

- 편광관측을 통한 Sentinel-1 SAR 영상자료는 해빙 또는 해표면의 전도적인 특성과 표면 거칠기에 따라 Radar backscatter가 달라지며, 각 편광의 intensity 및 texture를 통해 관측영역의 표면 유형을 더 잘 구별할 수 있음
- Dual-polarization channel은 북극 해빙 관측에 있어 Single-polarization channel 보다 평균 4배 더 많은 특징을 나타내어 더 세밀한 해빙 이동 벡터를 구성할 수 있기 때문에(Muckenhuber et al., 2016), 본 연구에서 사용된 자료는 HH+HV polarization 영상 자료를 기반으로 수행됨
- 본 연구에 사용된 Sentinel-1 자료는 ESA 코페르니쿠스의 Open Access Hub를 통해 2018년부터 2020년까지 Beaufort Sea를 관측한 자료를 사용하였으며 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), radiometric calibration, geolocation 등을 포함한 모든 pre-processing은 ESA에서 제공하는 Sentinel 자료처리 프로그램인 SNAP을 통해 수행됨

○ 클로로필 농도(Chlorophyll-a concentration, CHL)

- SeaWiFS와 MODIS-Aqua의 반사도(remote-sensing reflectance) 자료를 이용하여 최신 알고리즘인 OC4v6와 OC3v6를 적용하여 클로로필 농도를 계산
- 두 자료를 연속적으로 사용하기 위해 SeaWiFS 자료는 1998-2008년, MODIS-Aqua 자료는 2003-2016년의 자료를 사용했고, 중복기간(2003-2008년)은 산술 평균
- 사용된 자료의 시간해상도는 8일이며 공간해상도는 9 km으로 북극권에서의 태양고도각은 겨울에 가장 낮아지며 북극점 주위에는 도달하지 않아 해석 센서의 관측은 계절적으로 제한되기 때문에, 본 연구에서는 최대한 넓은 영역을 조사하기 위해 태양고도각이 제일 높은 여름(6월, 7월, 8월)의 자료를 사용

○ 표층수온(Sea surface temperature, SST)

- 표층수온자료는 근적외선 밴드를 이용하여 관측하는 과정에서 구름 및 해빙에 의해 자료 손실이 발생하여, 장기 변동을 분석하기 어렵기에 본 연구에서는 NOAA에서 제공하는 다중 플랫폼(위성, 선박, 부이)으로부터 관측된 자료로 재구성된 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature(OISST,

https://www.ncdc.noaa.gov/oisst)를 사용

- 공간과 시간해상도는 각각 25 km와 일 자료이며, 클로로필 자료의 사용기간과 동일한 1998년-2016년 6월, 7월, 8월의 자료를 계절 평균하여 사용
- OISST는 크게 AVHRR-Only와 AVHRR+AMSR 두가지 성격의 자료를 제공하며 AVHRR-Only는 위성자료를 병합함에 있어서 AVHRR로부터 얻어진 표층수온 자료만을 사용한 것이고, AVHRR+AMSR는 AVHRR과 AMSR모두 존재하는 기간인 2002년부터 2011년까지의 표층수온 자료를 병합하기 때문에, 장기간의 분석을 요하는 본업을 위해 AVHRR-Only 자료를 사용함.

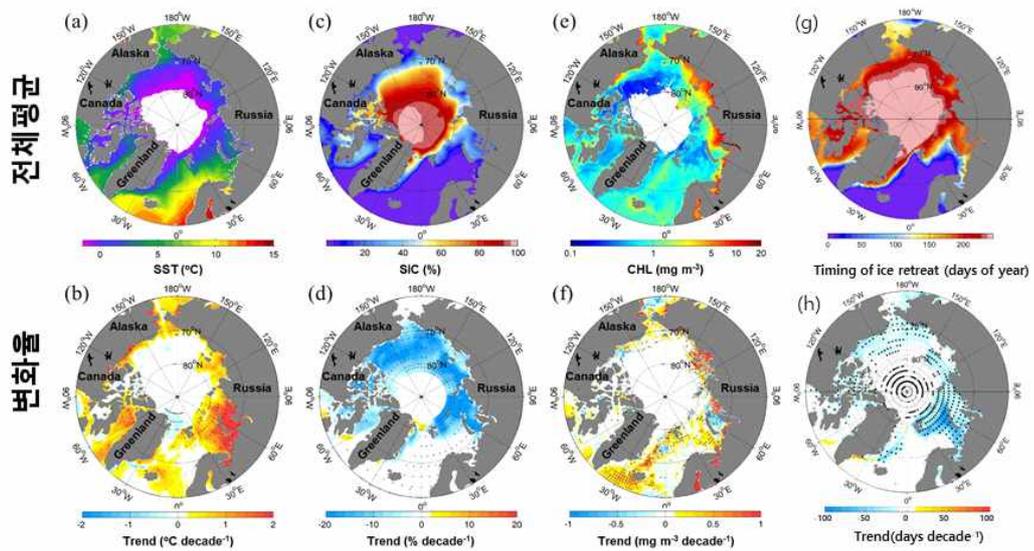


그림 3-1-7. 북극해 다중위성 전체평균 및 변화율 분석.

## 제 2 절 북극해 장기 해빙 유동장 구축

### 1. 북극해 해빙 유동장 변화 분석

- 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
  
- 북극해 해빙의 평균 이동속도 변화
  - 북극해의 해빙 이동 속도는 지속적으로 증가 경향을 나타내고, 특히 현장 부이 관측 자료에서 상대적으로 높게 나타남
  - 위성에서 관측된 해빙 월평균 자료에서 이동속도는 +0.41 cm/s/decade 이고, detrend한 자료에서 + 0.41 cm/s/decade로 유사한 결과(그림 3-2-1)
  - 현장관측 부이에서 관측된 해빙 월평균 자료에서 이동속도는 +0.62 cm/s/decade 이고, detrend한 자료에서 +0.59 cm/s/decade로 유사한 결과(그림 3-2-1)

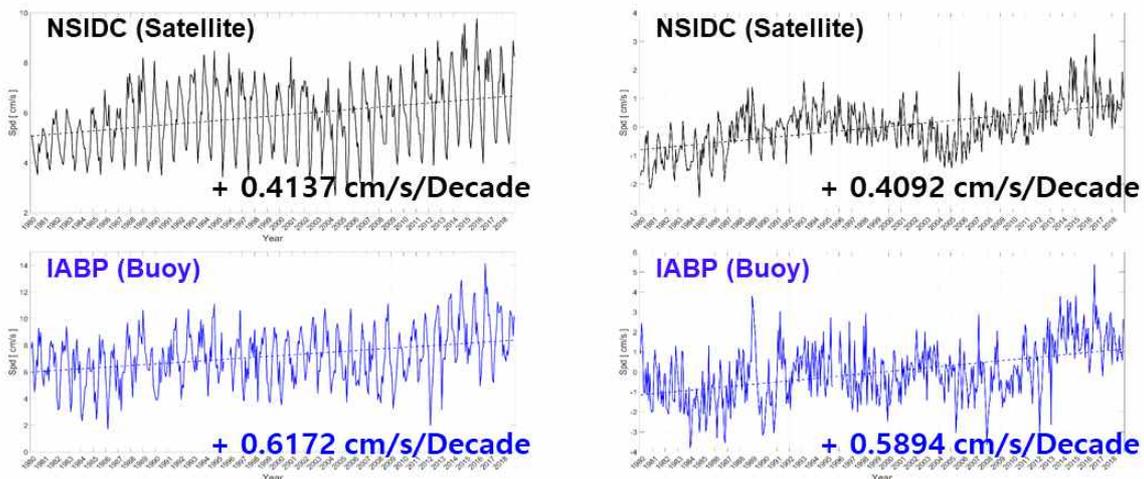
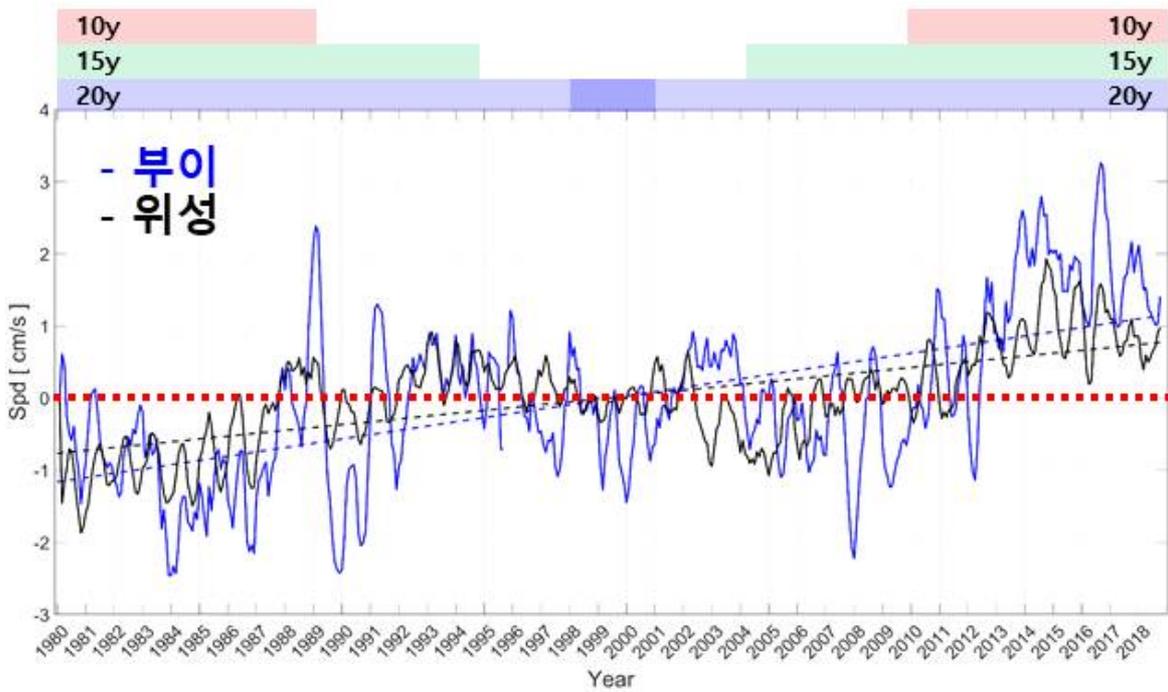


그림 3-2-1. 북극해 위성 및 현장자료의 유빙 이동속도 변화. (오른쪽) 선형경향 변화, (왼쪽) detrend한 자료의 경향 변화.

- 위성과 현장 관측 부이 자료에서 5개월 running-mean한 자료를 이용하여 20년, 15년 그리고 10년 전/후의 이동속도 변화 결과에서 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 증가하는 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(그림 3-2-2)
- 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(그림 3-2-2)
- 위성과 현장관측 자료 모두에서 연구기간 전반부보다는 후반부에서 해빙의 이동속도가 급격한 증가를 나타냄(그림 3-2-2)



Satellite	20y	15y	10y	Buoy	20y	15y	10y
전반부	+0.7581	+1.2087	+1.1850	전반부	+0.5772	+0.8897	+0.2518
후반부	+0.7575	+1.2540	+1.3707	후반부	+1.2626	+2.0401	+2.7648

그림 3-2-2. 위성과 현장 관측 부이 자료의 시계열 선형 경향 분석.

- 본 연구에서 분석된 위성과 현장 관측 자료의 해빙 이동 속도 차이가 발생하고 이런 문제점은 계절별 이동속도 차이가 발생하는 것으로 분석됨(그림 3-2-3, 3-2-4)
- 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 변화 분석(그림 3-2-3, 3-2-4)
- 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(그림 3-2-3)

- 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(그림 3-2-3)
- 결과적으로 하계의 해빙 이동 속도는 위성 자료가 부이 자료보다 평균이하로 감소되고 동계의 해빙 이동속도는 역시 부이 자료보다 높아짐(그림 3-2-3)
- 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(그림 3-2-4)
- 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(그림 3-2-4)
- 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 반면 위성에서 발견된 해빙의 이동 속도의 과소 추정은 하계의 문제로 추정됨(그림 3-2-3, 3-2-4)
- 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(그림 3-2-3, 3-2-4)
- 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(그림 3-2-4)
- 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

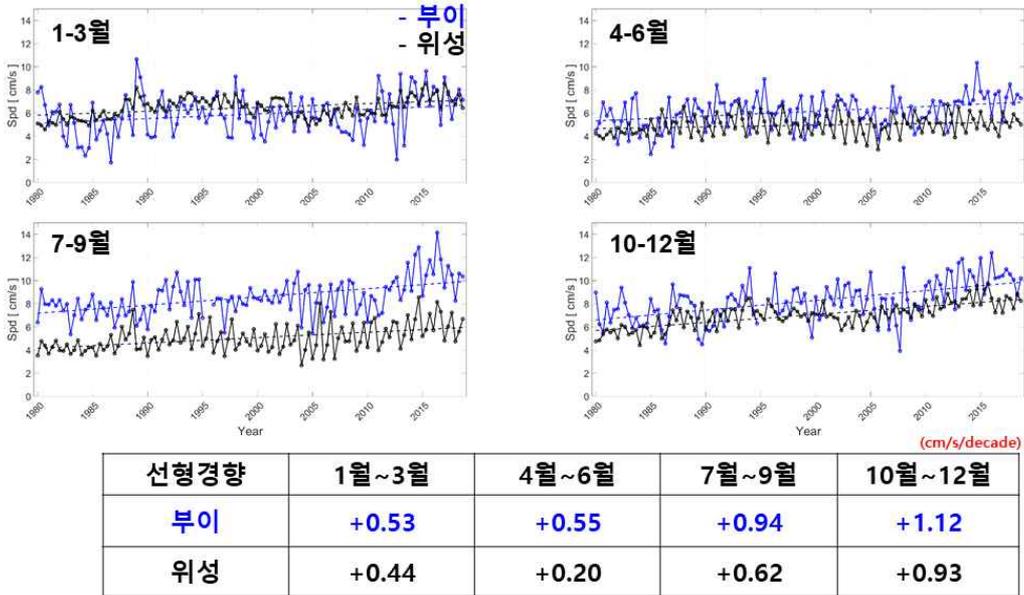


그림 3-2-3. 북극해에서 위성과 현장 관측 부이에서 관측된 해빙 이동 속도의 계절 변화 분석.

## 극지연구소

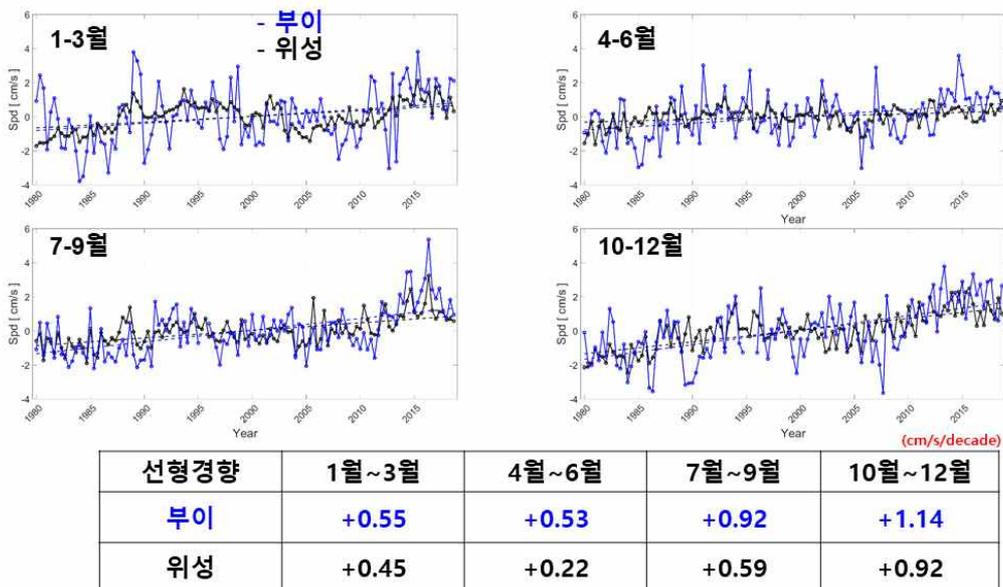


그림 3-2-4. 북극해에서 위성과 현장 관측 부이에서 관측된 해빙 이동 속도의 detrend한 계절 변화 분석.

## 2. 북극해 해빙 유동장 정확도 분석

### ○ 북극해 위성과 현장 관측 부이 간 이동 속도 차이 분석

- 위성과 현장 관측 부이 자료에서 이동 속도의 차이를 분석하기 위해 1980년부터 연구기간 동안 이동속도 차이를 구분하여 어떤 변화를 보이는지 분석
- 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 3-2-5)
- 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(그림 3-2-5)

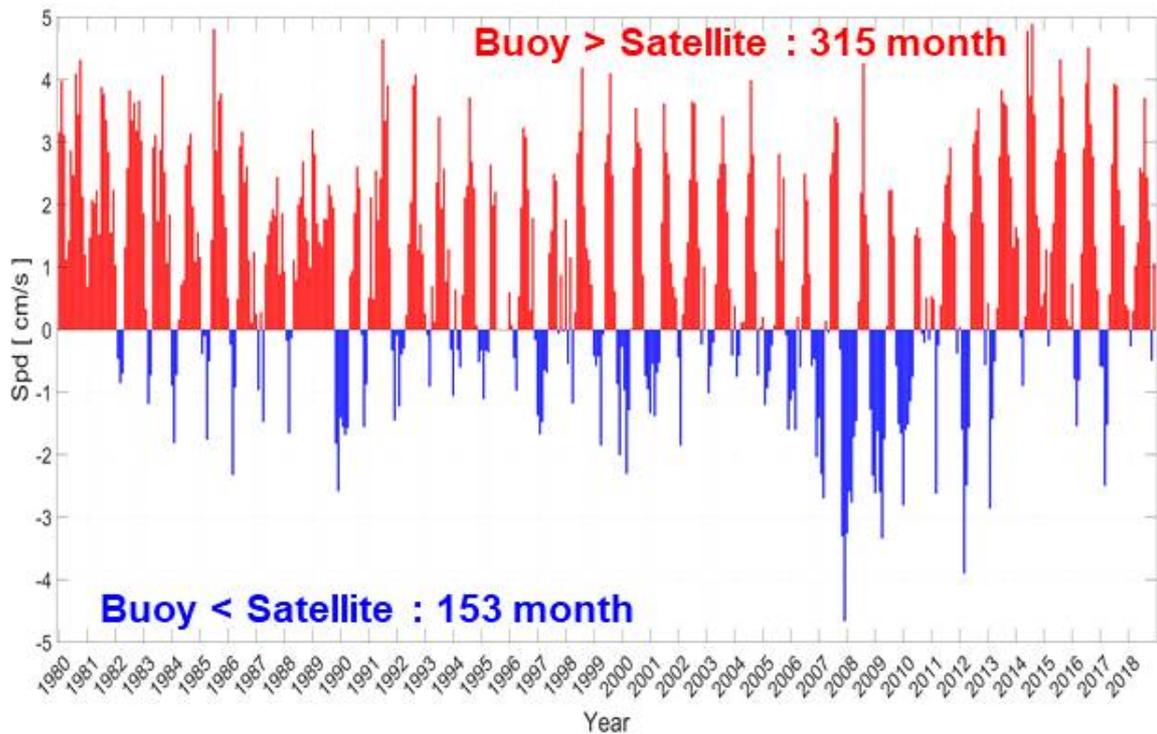


그림 3-2-5. 위성관측 자료와 현장 관측 부이 자료에서 상대적으로 높게 발생하는 시기 비교

- 위성과 현장 관측 부이 자료간 해빙 평균 이동 속도 차이가 발생하는 원인을 분석하기 위해 계절별 발생 차이를 분석

- 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 3-2-6)
- 이런 결과는 북극해에서 해빙농도가 감소되는 시기에 상대적으로 부이에서 관측된 해빙 이동속도는 증가되지만 위성에서 관측된 해빙 이동속도는 상대적으로 낮아지는 것으로 보임(그림 3-2-6)

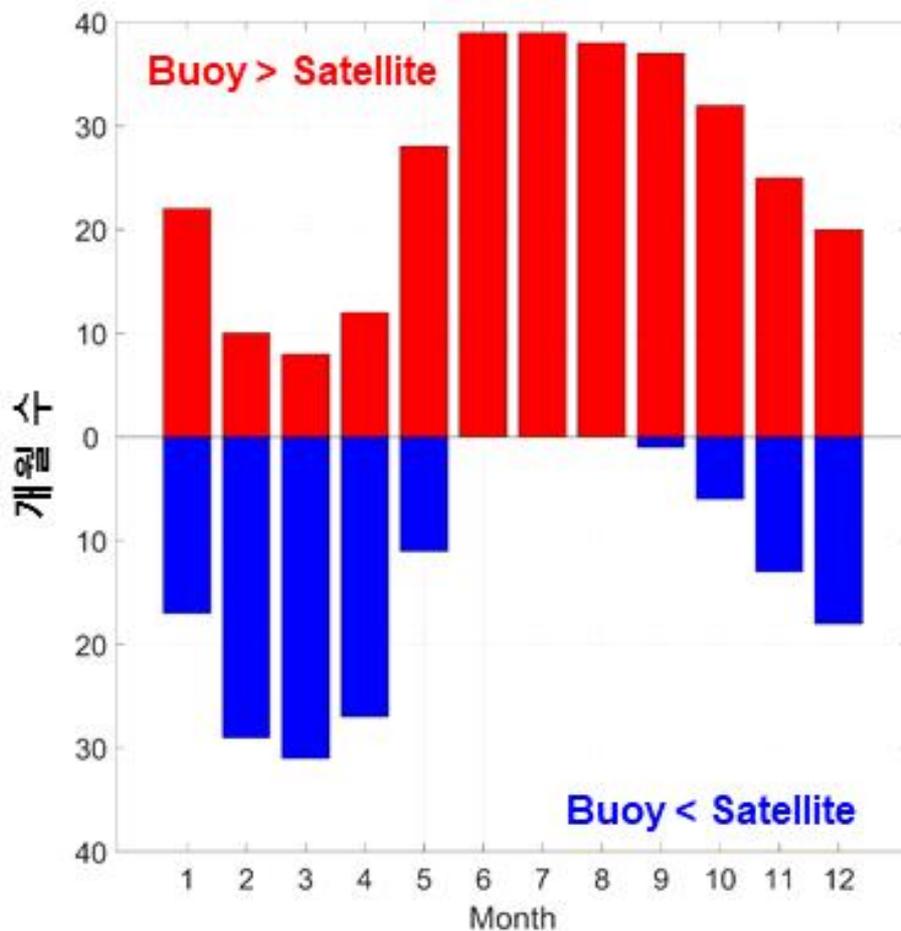


그림 3-2-6. 위성 자료와 현장 관측 부이 자료간 계절별 차이 발생 비교.

- 위성과 현장 관측 부이 자료간 문제점을 파악하기 위해 2017년부터 2018년까지 부이 관측 영역에서 두 위성(NSIDC, OSISAF)에서 관측된 해빙의 평균 이동 속도 비교(그림 3-2-7)
- NSIDC 위성은 25 km 공간해상도이고, OSISAF 자료는 62.5 km 공간해상도

를 가지는 자료이고, 부이 관측 자료는 2017년은 167개 자료와 2018년은 270개 자료 이용하여 뷰포트 해역을 대상으로 분석(그림 3-2-7)

- 위성과 현장 관측 부이 자료에서 해빙의 이동속도는 3월과 4월에 감소하고 하계 및 추계에 증가하는 경향을 나타냄(그림 3-2-7)
- 1월부터 4월 까지는 현장 관측 부이 자료가 NSIDC 위성 자료보다 상대적 감소하고, 4월 이후에는 현장 관측 부이의 이동 속도는 상대적으로 증가되어짐(그림 3-2-7)
- OSISAF 자료는 연구기간 전반에 걸쳐 현장 관측 부이나 NSIDC 자료보다 상대적으로 낮게 계산됨(그림 3-2-7)
- 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(그림 3-2-7)
- 특히 NSIDC 해빙 이동속도는 11월-12월 동안에 현장 관측 부이보다 빠른 해빙 이동속도를 나타냄(그림 3-2-7)



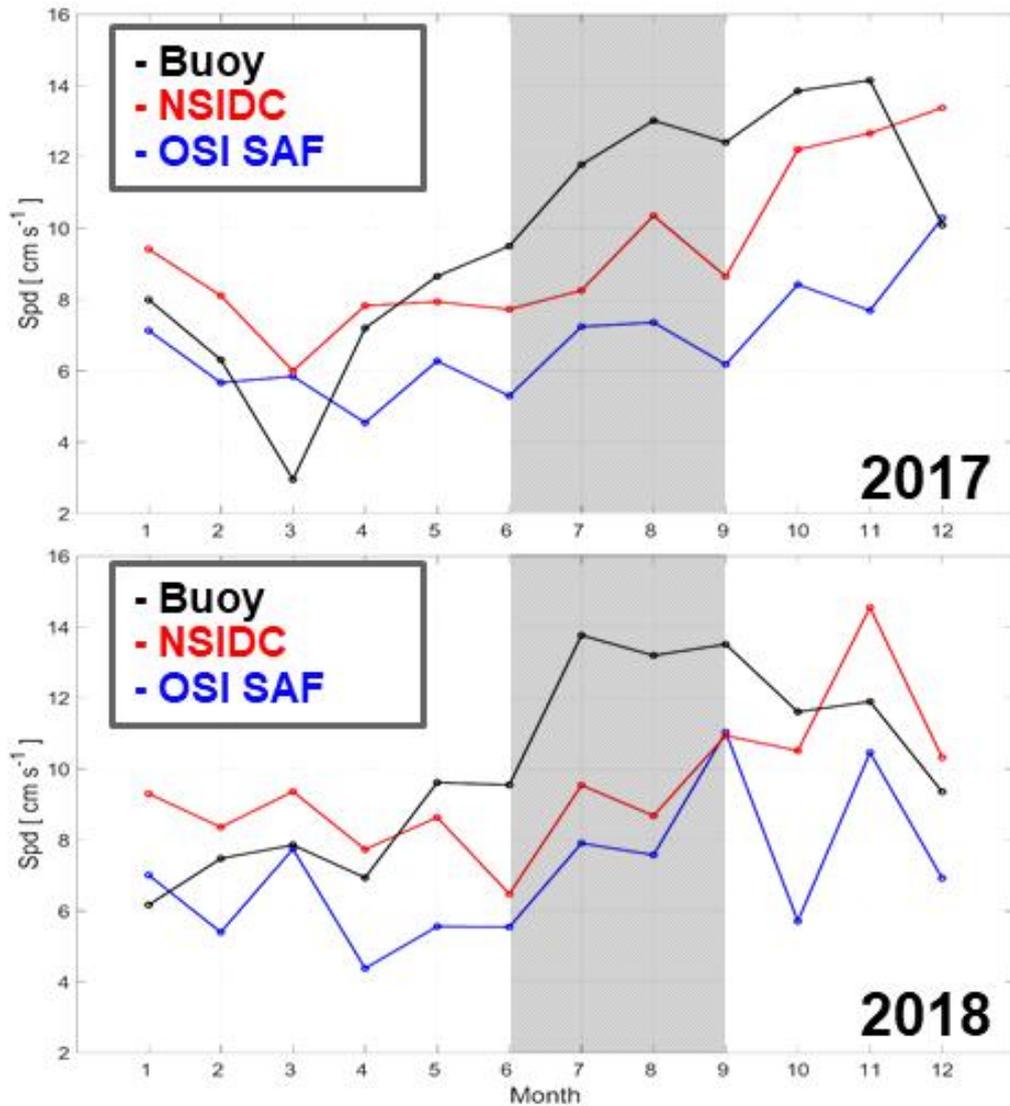


그림 3-2-7. 실측자료와 위성관측자료(NSIDC와 OSISAF)간 비교.

- 위성에서 관측된 해빙 이동 속도 변화 중에서 하계 위성에서 관측된 자료의 감소 현상을 분석하기 위해 부이, 위성 및 해빙농도 월평균 자료를 이용하여 변화 분석(그림 3-2-8)
- 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, 그림 3-2-8, 3-2-9)
- 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(그림 3-2-8)

- 특히 해빙농도가 낮아지는 시기에 위성과 현장 관측 부이간 해빙 이 동속도 차이는 크게 발생하고, 이런 차이는 해빙농도가 증가하면서 감소됨(그림 3-2-8)
- 이런 차이를 발생시키는 원인으로 현장 관측 자료의 경우 공간적 분포가 위성 자료보다 낮기 때문으로 예를 들면 2014년 경우 IABP 부이 관측 자료는 530 개 이지만 북극 전역을 대표하기는 힘들지만 위성 자료의 경우 2014년 전체 평균 결과는 북극 전체를 나타내고 있기 때문으로 사료됨
- 부이 관측 자료는 지해역 연구에 유용하지만 북극해 전해역에 대한 자료를 이용하기 한계가 있음(그림 3-2-8, 3-2-9)

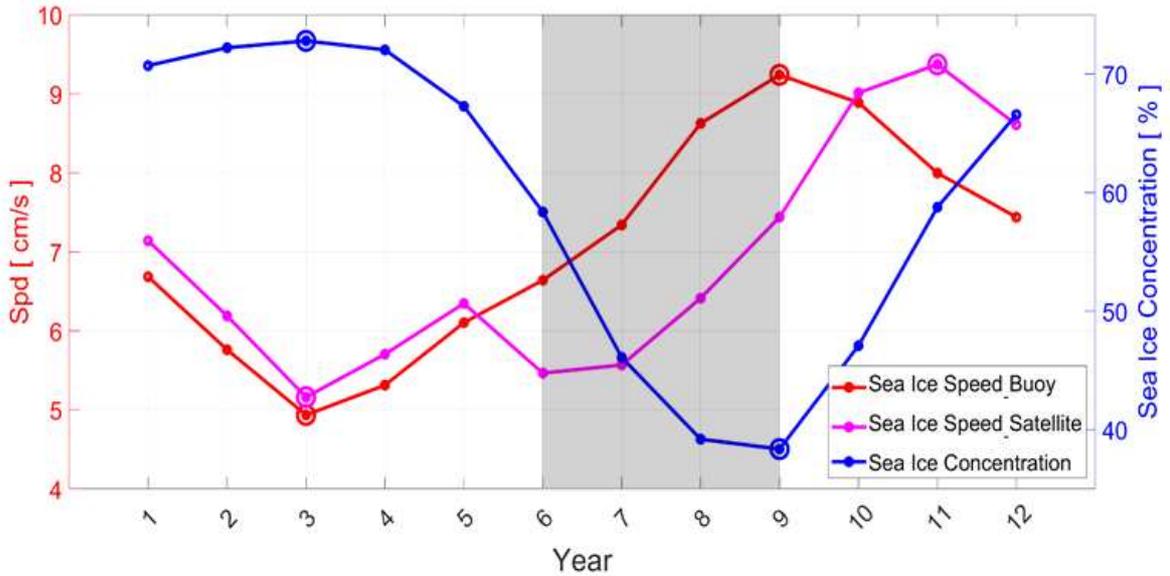
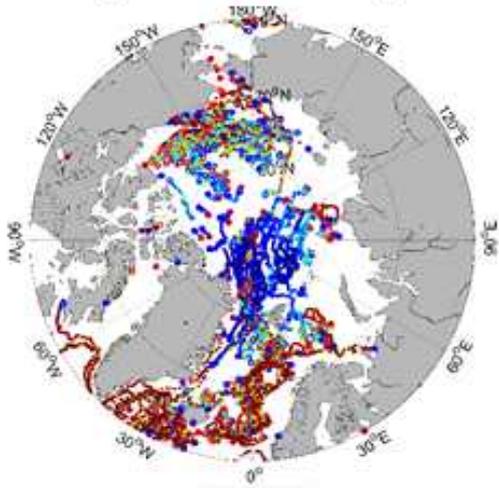


그림 3-2-8. 월별 위성, 현장 및 SIC 간의 관계(위성자료에서 하계 이동속도 감소 현상 발생).

**IABP 부이 연 분포  
(2014년: 530개)**



**NSIDC 연 평균 이동속도  
(2014년)**

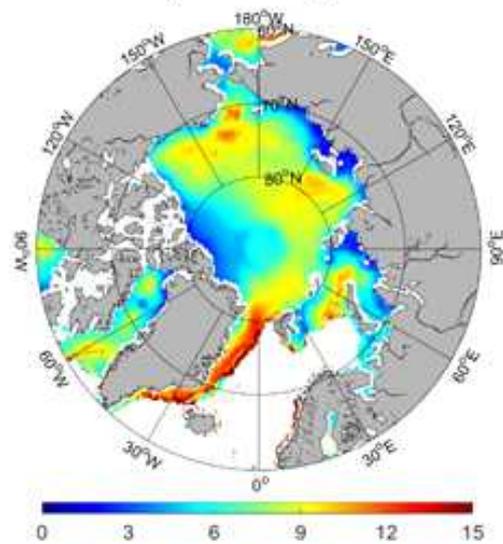


그림 3-2-9. 위성과 부이 관측 자료간 공간적 차이.

- 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

### 3. 북극해 해빙 유동장 변화 요인 분석

○ 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(그림 3-2-10)
- 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(그림 3-2-10)
- 북극해 해빙 이동 속도는 태평양과 대서양으로 유출되는 두 해역을 제외하면 gyre가 존재하는 보퍼트 해에서 상대적으로 높게 나타남(그림 3-2-10)
- 위성 관측 자료에서 해빙의 이동속도 변화는 3월에 최소가 되고, 11월에 최대를 나타냄(그림 3-2-10)

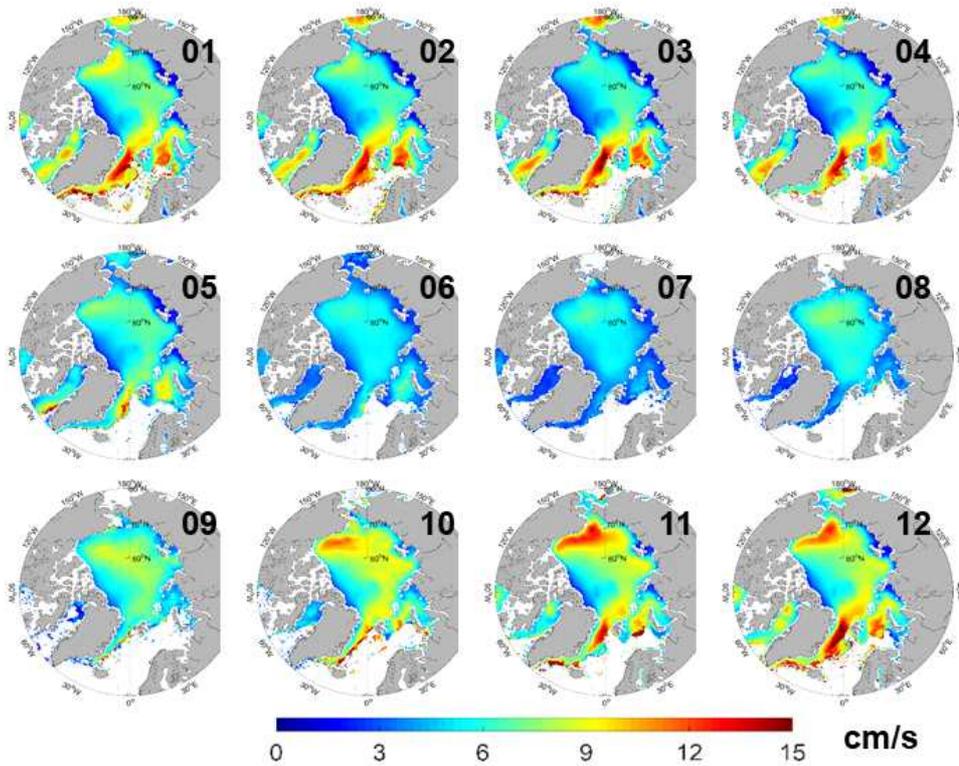


그림 3-2-10. 북극해 계절별 해빙 이동 속도 변화.

- 북극해 평균 해빙 이동 속도 변화 분석 결과 전반부보다 후반부로 갈수록 유빙 이동 증가 현상 발생(그림 3-2-11)
- 북극해 해빙 이동 속도 최대 증가 해역은 보퍼트 해, Fram Strait, Barents Sea로 나타남(그림 3-2-11)
- 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 3-2-10, 3-2-11, 3-2-12)

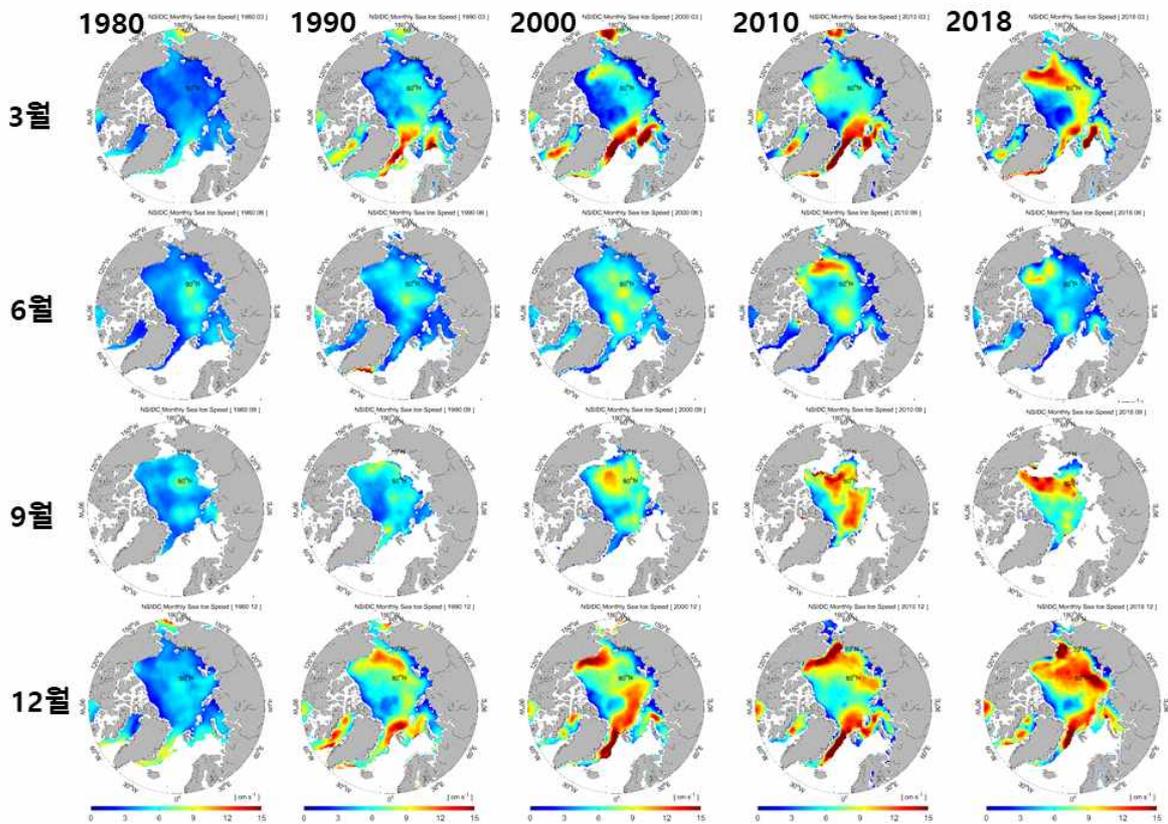


그림 3-2-11. 북극해 1980년부터 10년 단위 해빙 이동 속도 변화.

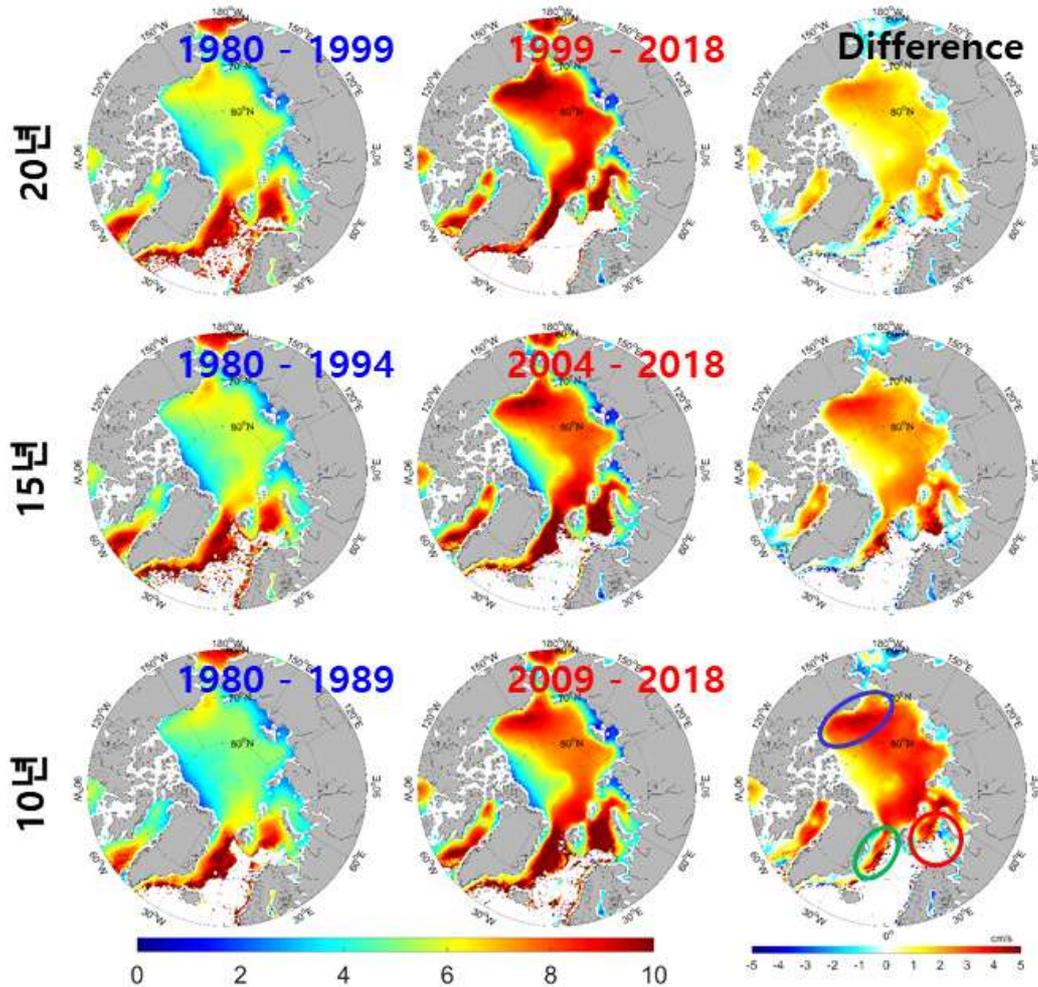


그림 3-2-12. 북극해 평균 해빙 이동속도 변화(20/15/10년 기준).

○ 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 km<sup>2</sup> 이상에서 4,000,000 km<sup>2</sup> 이하로 감소했으며, Fram Strait를 통해 대서양으로 유출되는 해빙의 양이 증가하는 등 과거에서 현재로 갈수록 북극해 해빙이 감소하는 경향이 증가되고 뚜렷한 변화를 보임
- 북극해의 해빙 이동 속도 변화에서 월평균 자료를 이용하여 선형경향을 계산한 결과에서 북극해은 전 해역에서 평균 +0.32 cm/s/Decade 증가 현상을 나타냈고, 80°N 이북의 해역보다 저위도인 연안역에서 해빙의 이동 속도가 증가되어 나타남(그림 3-2-13)

- 특히 보퍼트 해는 북극해 전역 중에서 가장 빠르게 증가한 해역 중 하나로 평균 +1.23 cm/s/Decade로 평균보다 4배 이상 증가됨

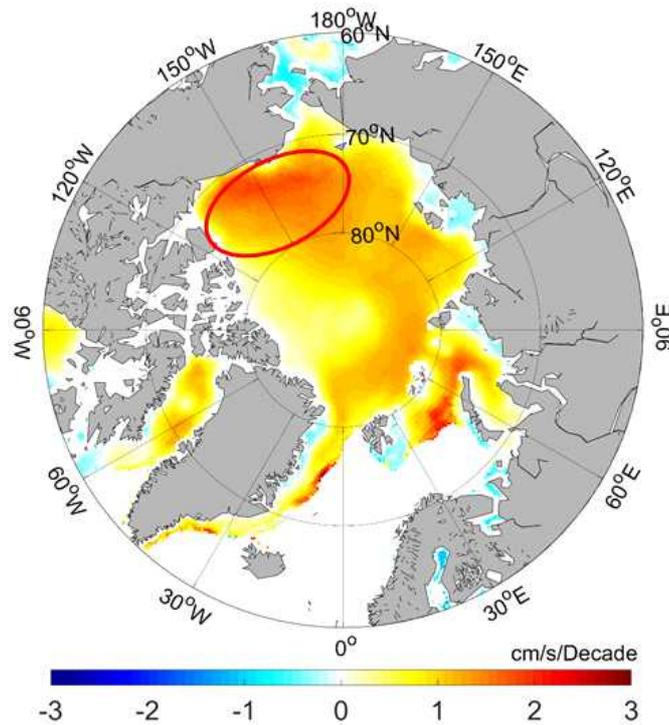


그림 3-2-13. 북극해 해빙 이동속도 선형경향 변화.

- 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 보였으며, 1979년부터 2007년까지 동계와 하계의 해빙 이동속도는 각각 +17%/decade, +8.5%/decade의 이동속도 증가율을 보인 것으로 조사됨
- 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 3-2-14)

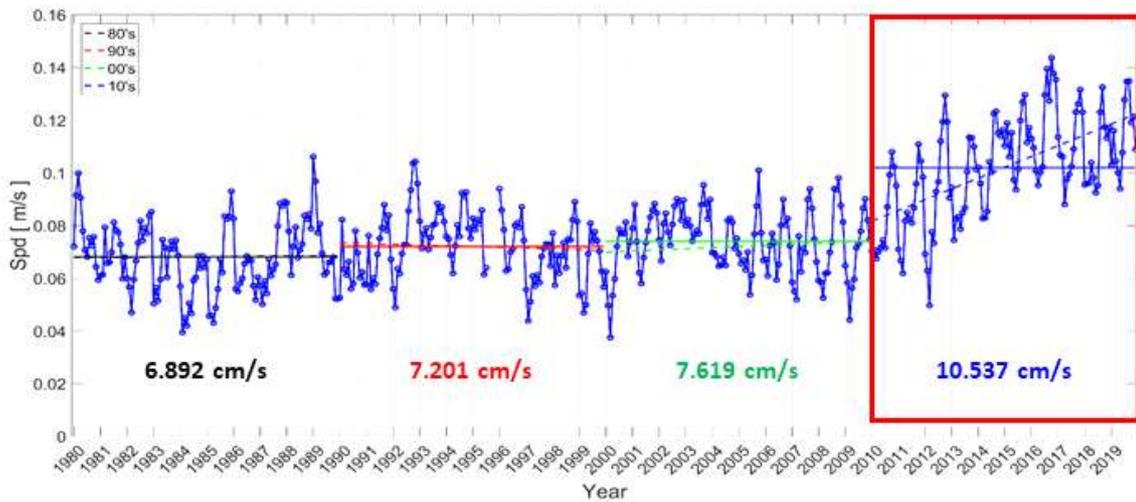


그림 3-2-14. 북극해 부이관측자료를 이용한 해빙 이동속도 변화 분석.

- 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 분석 됨
- 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, 2010년에서 2012년에는 북극해의 극점 인근 해역에서는 상관관계가 음의 값을 나타내지만, 이후에는 극점 인근 해역에서 양의 상관관계를 나타냄(그림 3-2-15)
- 북극해의 해빙이 존재하는 해역 중 연안에서의 상관관계가 높게 나타났고, 태

- 평양과의 통로인 척치해에서는 지속적으로 음의 상관관계를 나타냄
- 본 연구에서는 북극진동지수와 해빙 이동속도 변화의 관계를 통해 북극해에서의 해면기압이 해빙의 이동속도를 변화시키는 요인 중 하나로 분석됨(그림 3-2-15)

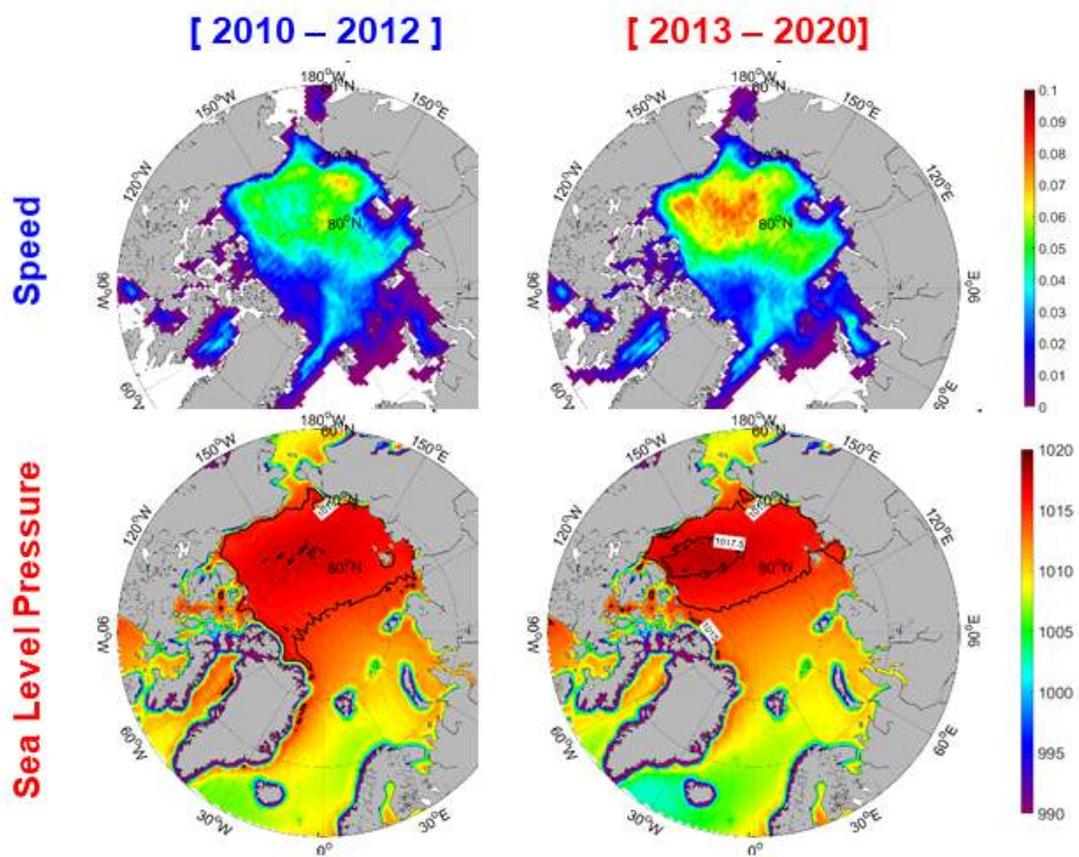


그림 3-2-15. 북극해 해빙 이동속도 변화와 SLP 상관관계 분석.

## 제 3 절 북극해 고해상도 해빙장 추출 기술 개발

### 1. 고해상도 영상 자료 처리

#### ○ 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
- 그림 3-3-1에 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

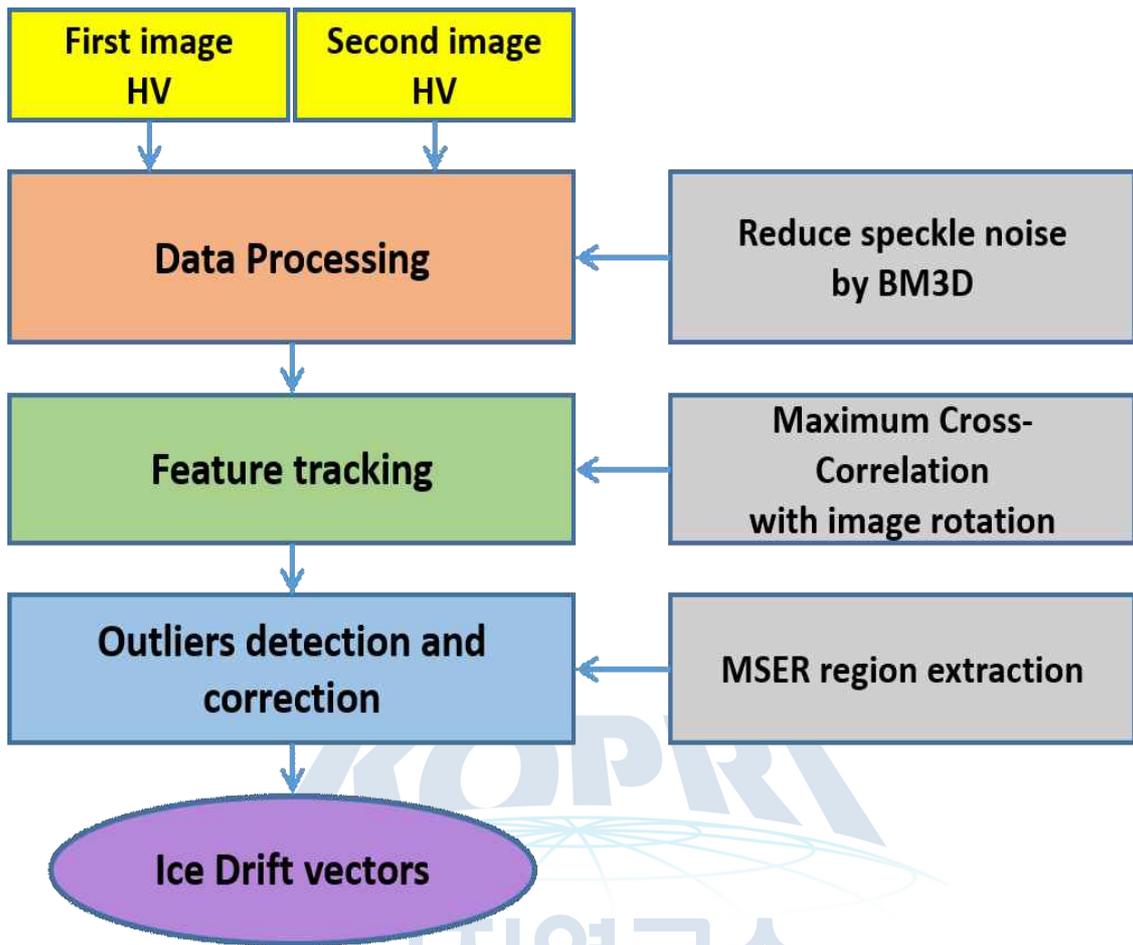


그림 3-3-1. 북극해 고해상도 해빙 이동 속도 산출 및 이동장 제작 방법 모식도.

○ 자료 처리

- 제 3장 1절에서 Sentinel-1 위성 제원 및 수집 과정 설명
- SNAP을 활용한 자료의 border noise, thermal noise 이후 calibration 과정 수행, 이후 기후보정위한 과정 수행
- 초기 자료 처리가 완료된 SAR 자료를 대상으로 speckle 제거를 위한 de-noising을 수행(그림 3-3-2)
- 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
- 그림 3-3-2는 원 영상과 원 영상에서 추출한 noise, 그리고 원 영상에서 noise

를 제거한 영상이며, 적색 선으로 표시된 영역에서의 back-scattering 자료의 변화를 나타냄

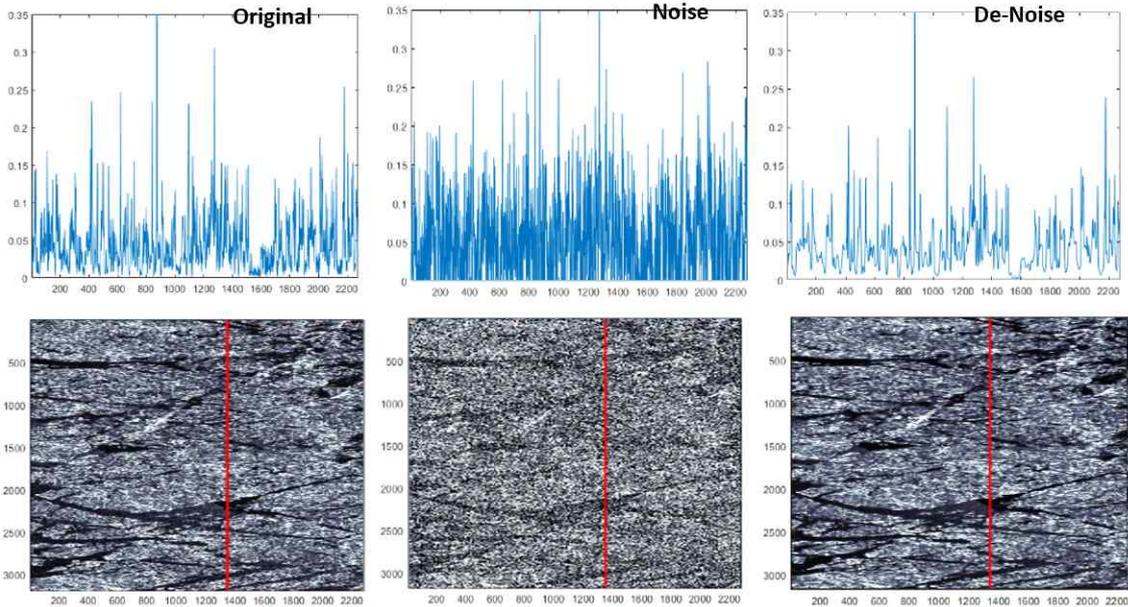


그림 3-3-2. BM3D 방법을 통한 SAR 영상의 de-noising.

- 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,
- MCC를 설명하는 간단한 그림 3-3-3에서 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
- 비교할 두 이미지에서 크기가 동일하고 같은 위경도 좌표를 공유하는 영역을 설정하여 (i, j)가 중심인 M×N 크기의 source template 가 first image 내에 포함되어있고, 마찬가지로 (i+k, j+l)가 중심인 M×N 크기의 target template 가 second image 내에 포함되어있을 때, source template와 target template 사이

의 상대적인 이동거리(k, l)와 상호상관계수 r(k, l)은 식(1)과 같이 나타냄

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

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

나타낼 수 있으며  $\bar{p}(i, j)$ 는 first image의 source template의 중앙인 (i, j)에서의 평균 확률,  $\bar{q}(i, j)$ 는 second image의 target template의 중앙인 (i+k, j+l)에서의 평균 확률로 나타낼 수 있음

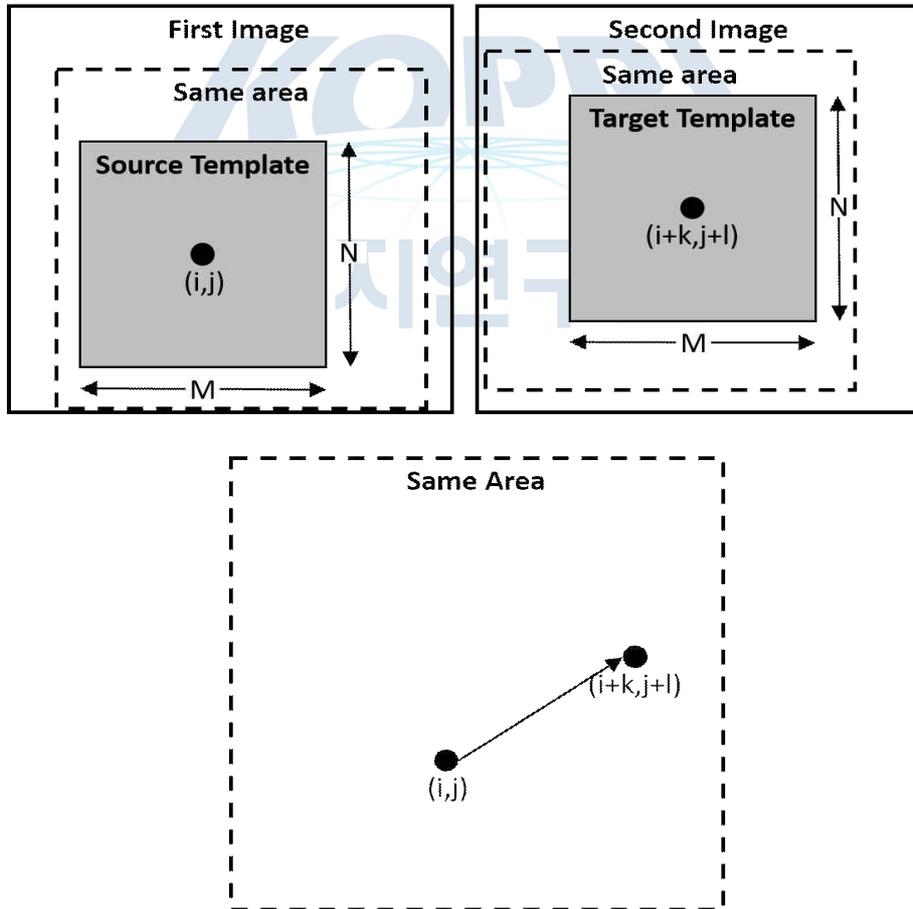


그림 3-3-3. MCC 자료 처리 방법.

- 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 SAR 자료의 rotation을 통해 가장 높은 상관계수를 보이는 회전된 자료에서의 해빙 이동벡터 추출을 수행(그림 3-3-4)

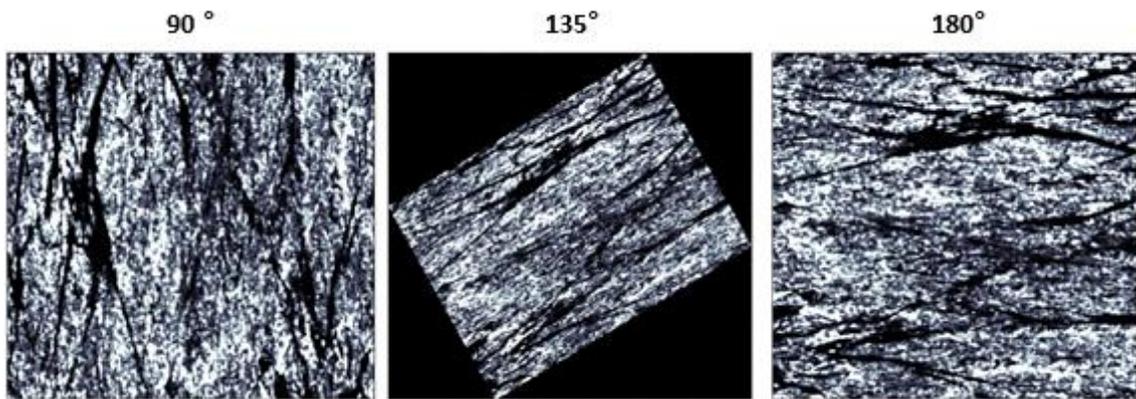


그림 3-3-4. de-noising된 SAR 영상 자료 처리.

- 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  $1 \times 1 \text{ km}$  ( $25 \times 25 \text{ pixel}$ ) 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
- 그림 3-3-5의 보정 이전의 해빙 이동벡터에서는 다른 곳에서 측정된 feature를 추적하여 주변의 해빙의 이동 경향과 다른 이동벡터를 나타냄
- 해당 영역에서 MSER를 사용하여 해빙 이동벡터를 추출했을 때, 보정된 해빙 이동벡터는 주변의 이동벡터와 거의 유사한 이동 특성을 보임

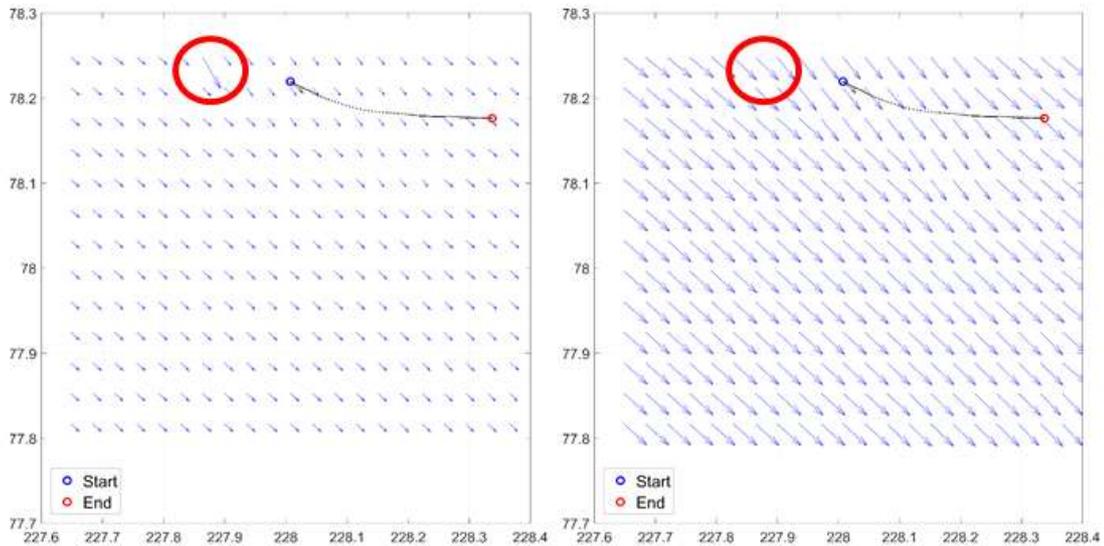


그림 3-3-5. 보정된 해빙 이동벡터의 변화 plot 및 주변 해빙이동벡터와의 관계.

## 2. 지역해 최적화 MCC 알고리즘 개발

### ○ 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 등의 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 특성 에 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, 위도 방향에 오차 발생(그림 3-3-6)

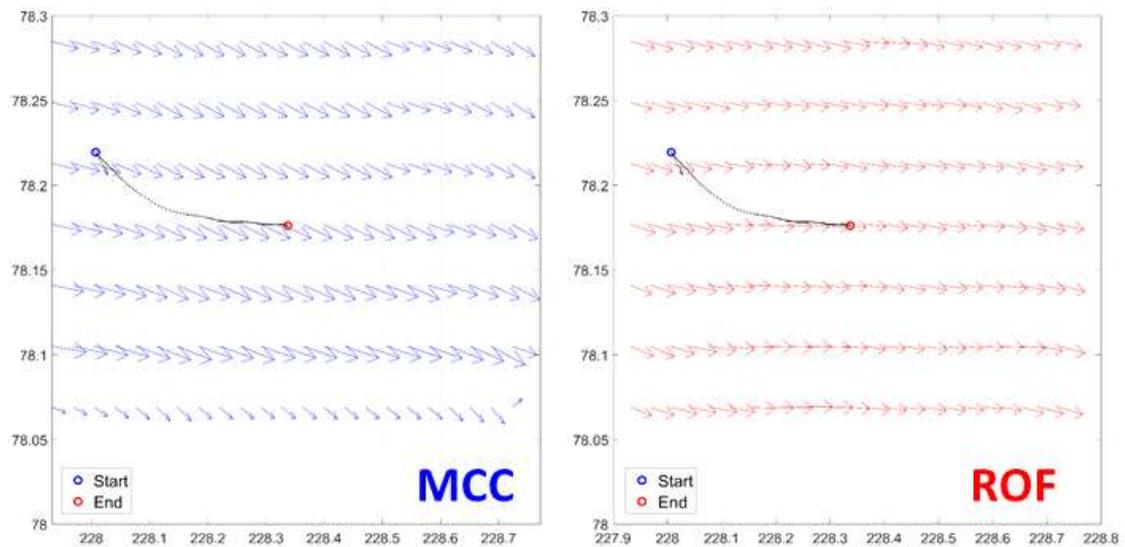
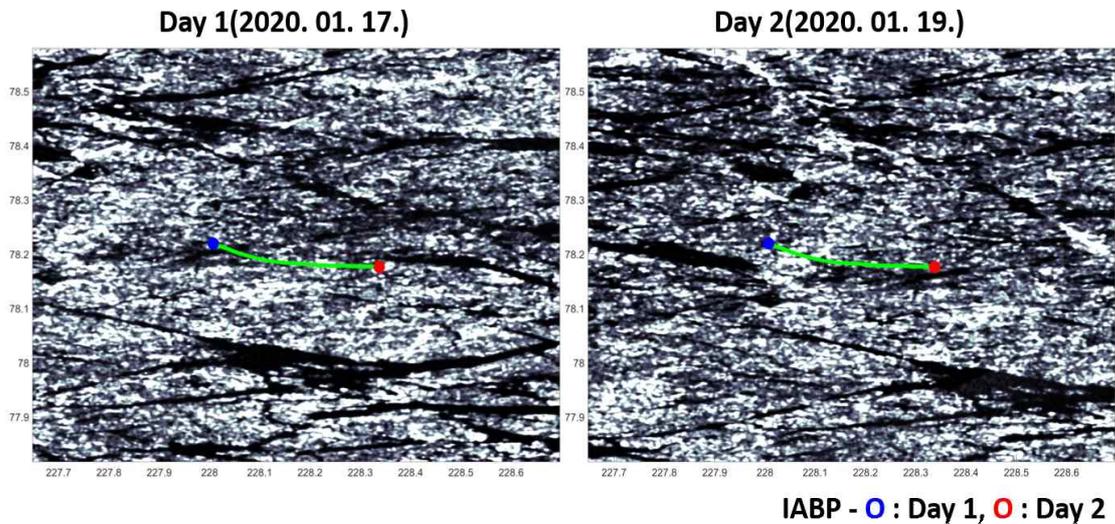
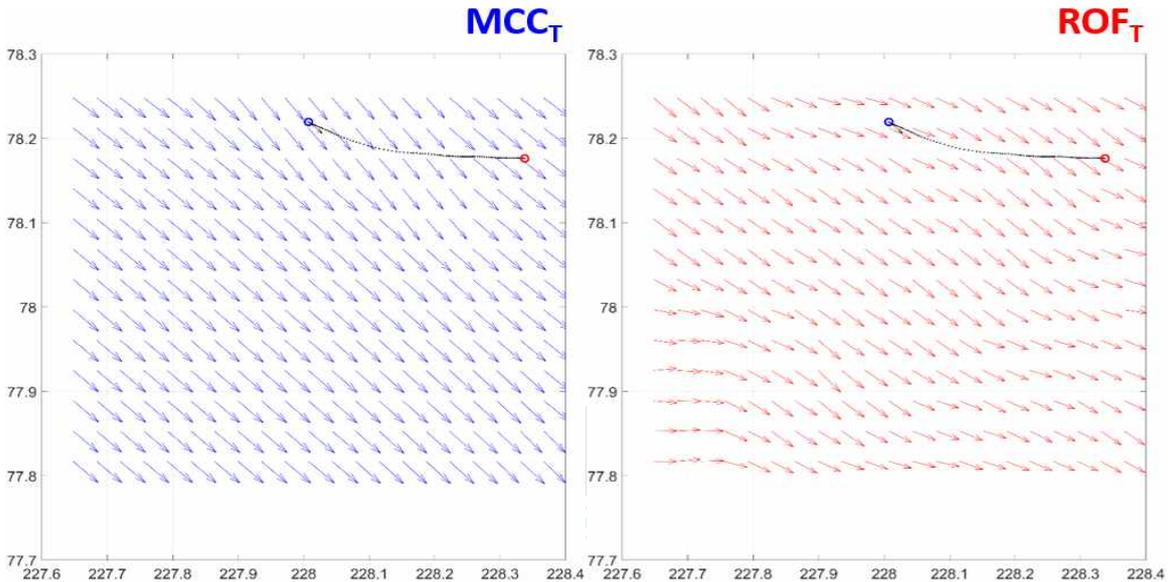


그림 3-3-6. 서로 다른 시기(Day 1,2)에 관측된 동일 영역의 SAR Image와 Day 1-2 동안 해빙관측부이의 이동 경로(녹색 궤적).

- 최종적으로 위와 같은 오차가 발생하기 때문에 그림 3-3-7 과 같은 방법을 통하여 오차 제거 과정을 통해 개선된 결과 산출
- 그림 3-3-7은 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
- 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.
- 그림 3-3-7은 개선 전 자료이고 아래 그림은 개선된 결과로 개선된 자료는 부이관측 자료와 유사한 경향을 나타냄



Using Data	X-Component [km]	Y-Component [km]	Distance [km]
Buoy	4.34	-2.79	5.16
MCC <sub>T</sub>	4.18	-2.82	5.04
ROF <sub>T</sub>	3.97	-1.55	4.26

그림 3-3-7. 개선된 MCC과 ROF 방법을 사용해 구축한 해빙 이동장(MCCT: 좌측 청색, ROFT: 우측 적색) 및 해빙관측부이(흑색 궤적)의 이동거리와의 비교.

- 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(그림 3-3-8)
  - 그림 3-3-8에서 이동거리 차이의 평균( $\mu_X$ : 경도방향,  $\mu_Y$ : 위도방향), 표준편차( $\sigma_X$ : 경도방향,  $\sigma_Y$ : 위도방향), RMSE, Bias, Mean Ratio 계산
  - 해빙관측부이와 이동거리 차이 비교 분석에서, 개선된 MCC가 ROF 보다 높은 정확도를 나타냄
  - 각 알고리즘에 의한 해빙이동속도와 해빙관측부이의 이동속도의 비교 분석한 결과, 개선된 MCC ROF 보다 해빙관측부이와 더 유사한 이동속도를 나타냄 (그림 3-3-9)

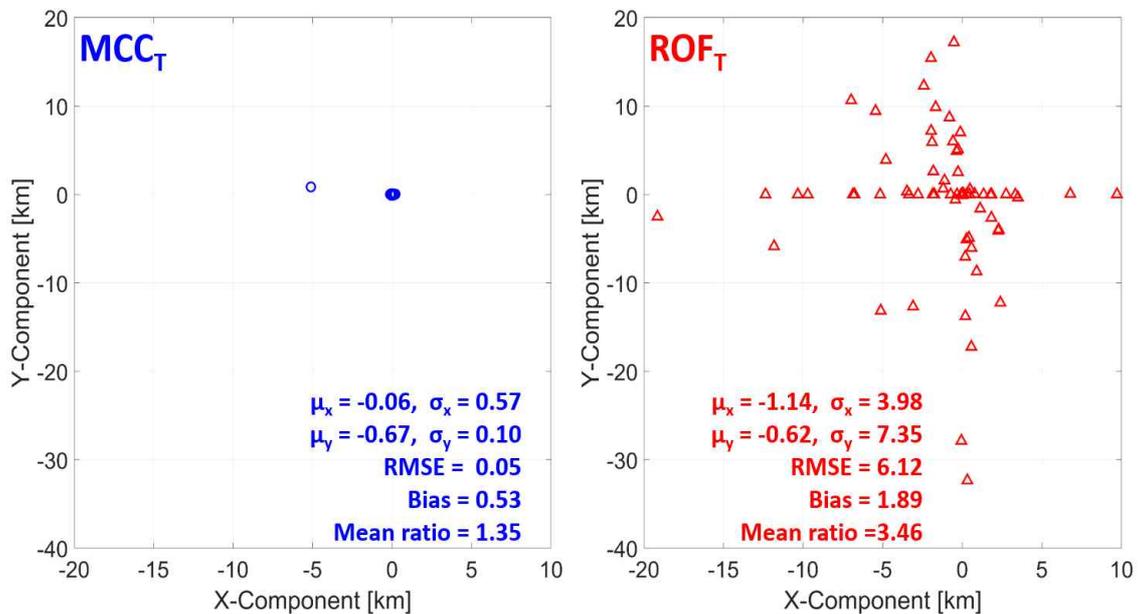


그림 3-3-8. 82개 경우를 대상으로 개선된 MCC 및 ROF 방법을 통한 해빙 이동거리와 해빙관측부이의 이동거리 비교.

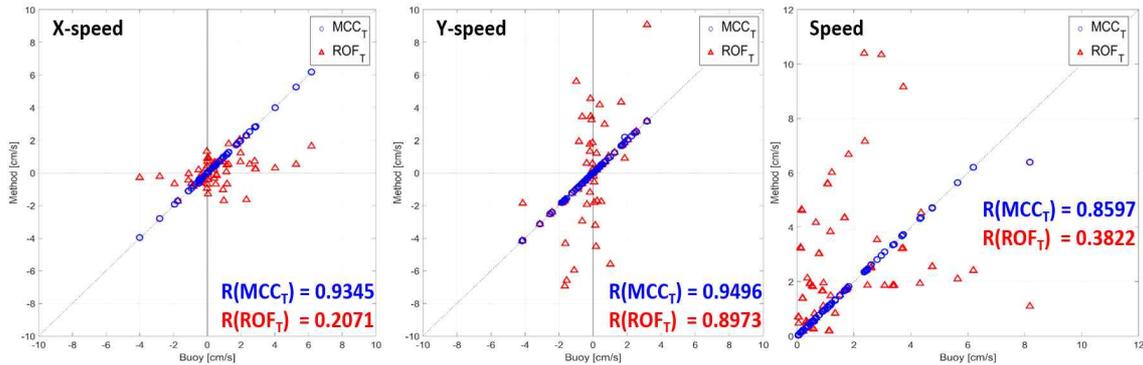


그림 3-3-9. 개선된 MCC 및 ROF 방법을 통한 해빙 이동속도와 해빙관측부이의 이동속도의 비교(좌측: 경도 방향 이동속도, 중앙: 위도 방향 이동속도, 우측: 총 이동속도).

○ 개선된 MCC 알고리즘을 통한 sea ice vector 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
- 그래서, 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
- 그림 3-3-10은 동일 영역의 SAR 자료 pair와 부이 자료의 움직임, 개선된 MCC 알고리즘에 의해 추출된 해빙 이동장
- 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 3-3-10a,b), MCC를 통해 SAR 자료 pair의 일부분에 대한 상관관계를 계산(그림 3-3-10c)
- 가장 높은 확률을 보인 위치까지의 이동거리를 산출하여 위치에 따른 해빙 이동장을 구성(그림 3-3-10d)
- 그림 3-3-11은 732개의 부이 자료를 통해 얻어지는 해빙의 실제 이동속도와 부이와 가장 근접한 위치에서의 해빙 이동장의 속도를 비교하여 나타냈다.

- 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 것으로 분석됨(그림 3-3-11)

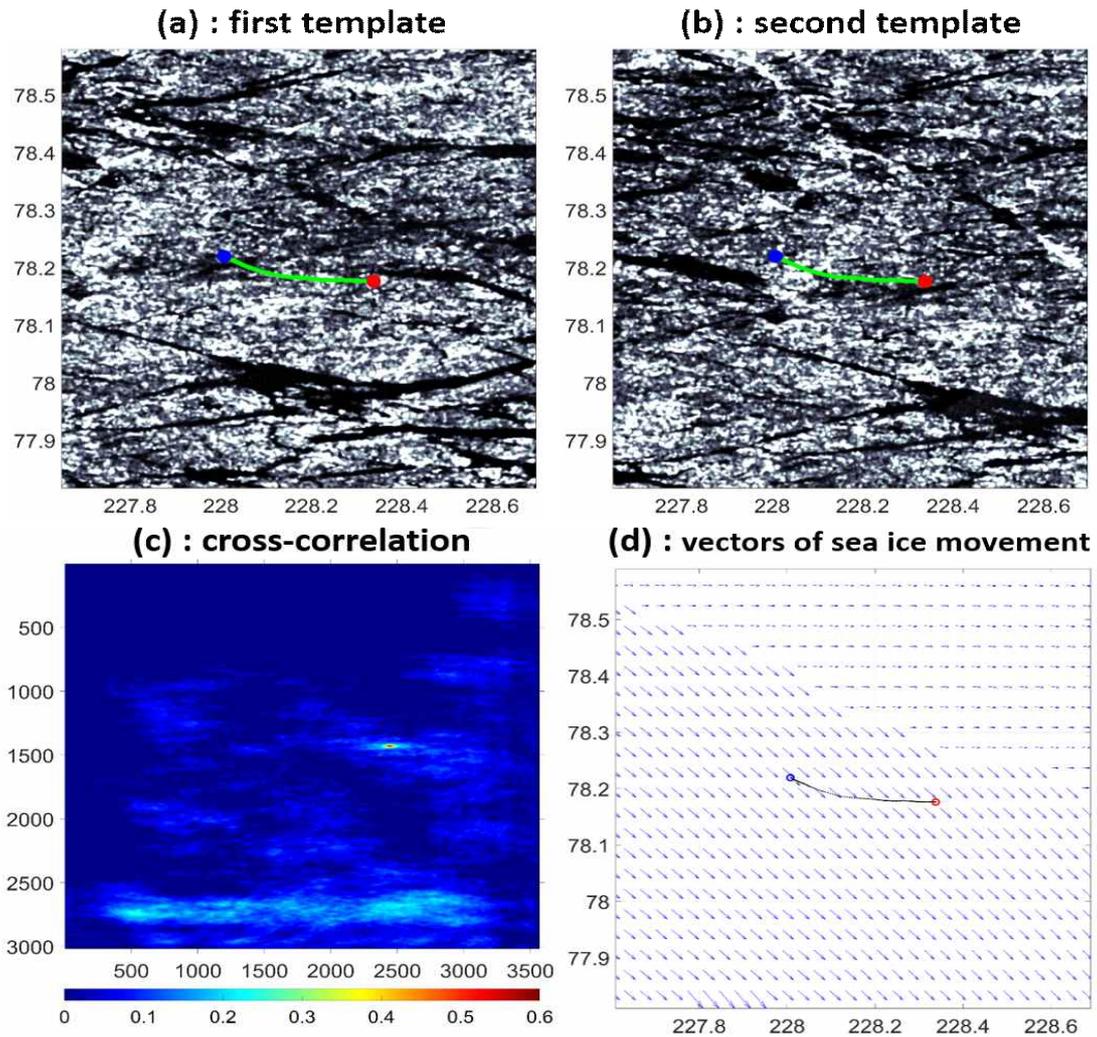


그림 3-3-10. sAR 이미지 쌍을 이용한 MCC 알고리즘에 의한 해빙 드리프트 벡터. (a)와 (b)는 동일한 영역을 갖는 제1 및 제2 SAR 이미지를 이용한 템플릿 쌍이며, 파란색과 빨간색 원은 각각의 SAR 이미지를 촬영할 때 부표 궤적의 위치이다. 교차 보정 결과(c)는 영상 쌍에서 계산됩니다. MCC(d)의 벡터는 해빙 이동으로 표시된다.

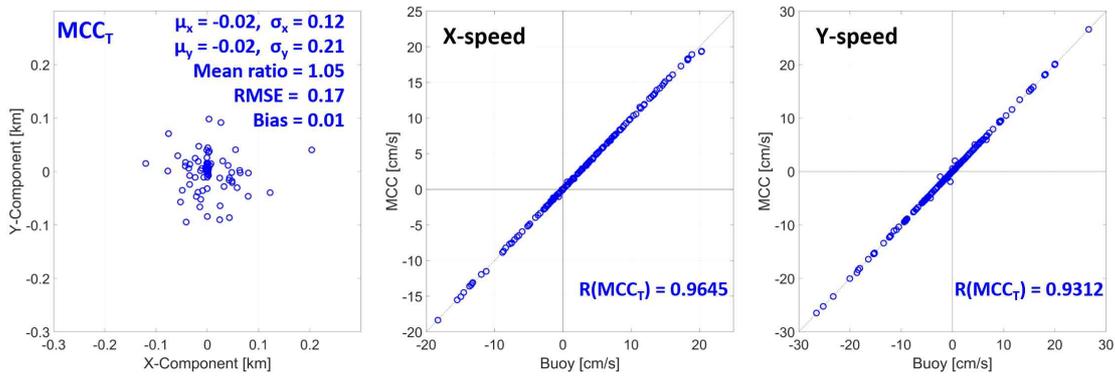


그림 3-3-11. 독립 매치업에 대한 유효성 검사 결과입니다. 산점도는 MCC와 부이(왼쪽), 부이와 MCC가 검출한 얼음 운동의 X-(중앙)와 Y-속도(오른쪽) 차이의 X-와 Y-성분을 비교.

○ NSIDC sea ice motion 자료와 비교

- 개선된 MCC 방법으로 제작된 고해상도 해빙 이동장 자료와 다른 공간해상도를 가진 자료와의 차이를 분석하기 위해 NSIDC에서 제공하는 sea ice motion 자료 비교(그림 3-3-12)
- 그림 3-3-12은 만들어진 고해상도 해빙 이동장 자료와 NSIDC 자료를 동시에 나타냈으며, NSIDC 자료를 기준으로 MCC algorithm이 빠른 이동속도(그림 3-3-12(upper), 8 cm/s 이상)와 느린 이동속도(그림 3-3-12(lower), 1 cm/s 근처) 모두 유사한 이동속도를 구현

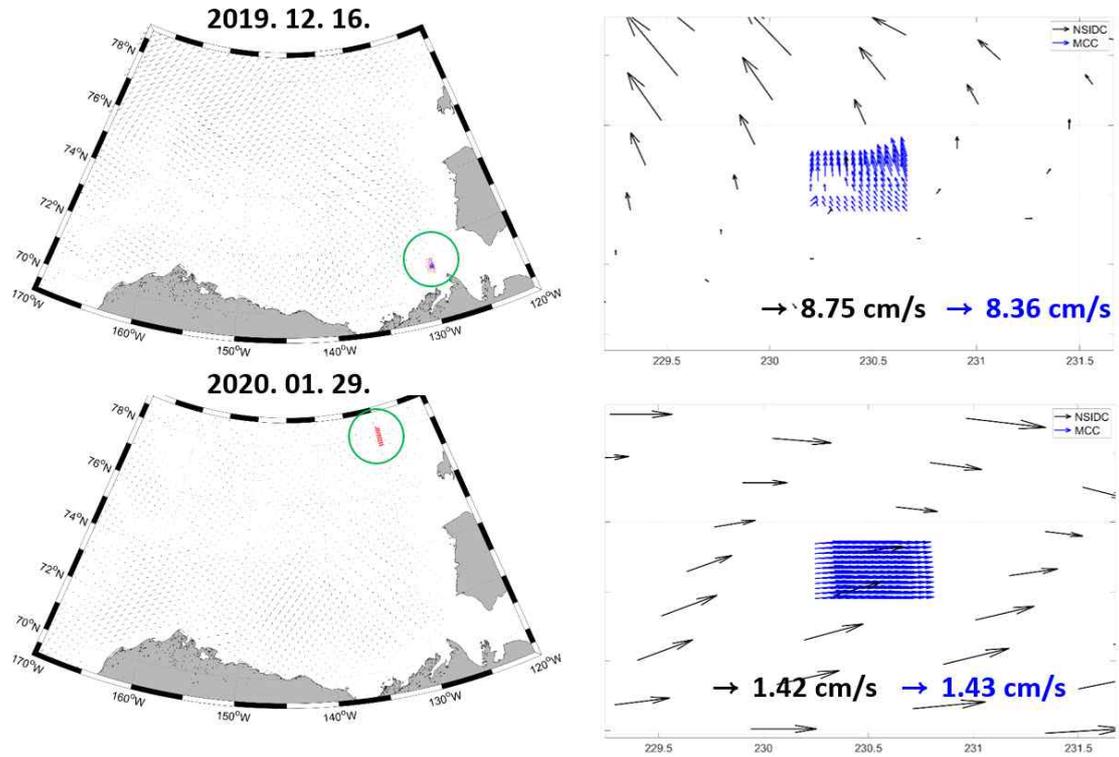


그림 3-3-12. NSIDC 및 MCC의 MCC 알고리즘 및 해빙 움직임 벡터에 의한 결과 위치.

- 부이 자료와 마찬가지로 NSIDC 자료를 가장 가까이 있는 MCC algorithm 결과와 비교 수행
- NSIDC 자료와의 비교 결과 또한 0.9 이상의 R-value을 나타냄(그림 3-3-13).
- 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

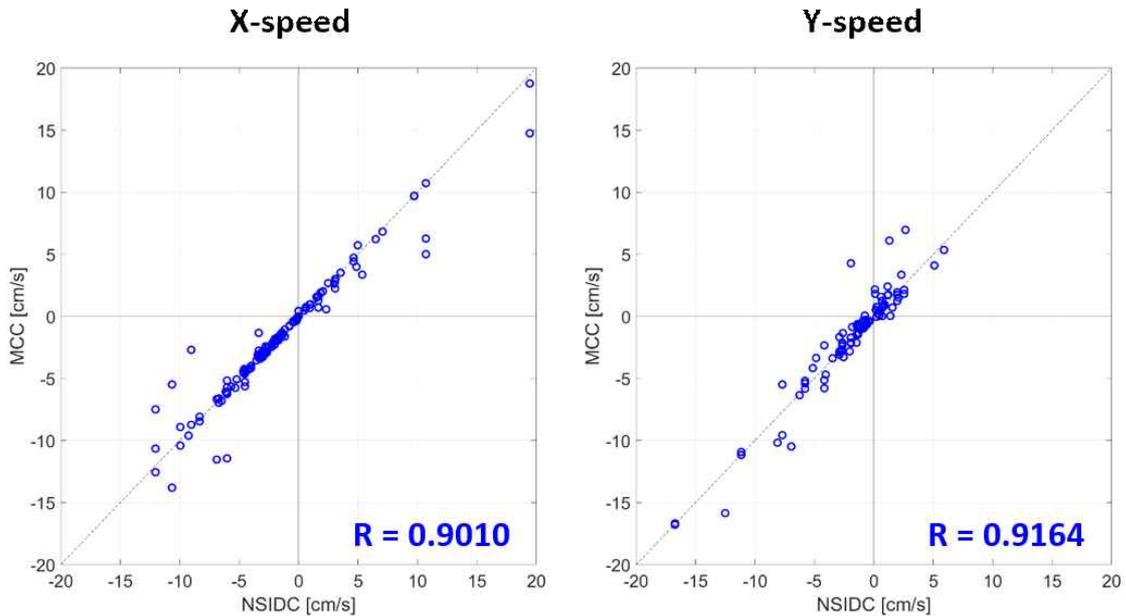


그림 3-3-13. scatterplot는 NSIDC와 MCC에서 검출한 해빙 유동의 X-(중심)와 Y-속도(오른쪽) 비교 결과.

- 개선된 MCC 방법은 기존 위성 NSIDC 위성 자료와 높은 상관관을 보이는 경우도 있지만 그림 3-3-14 경우에는 NSIDC 위성 자료와 정확도가 감소하는 경우로 정확도 낮은 경우도 발생
- 그림 3-3-14에서 포인트 1 지역은 개선된 MCC 방법에서는 상대적으로 이동 속도가 높은 지역이고, 포인트 2 지역은 상대적으로 해빙 이동속도가 낮은 지역이지만, NSIDC 위성자료는 반대의 결과 도출
- 포인트 1 지역의 NSIDC 위성자료는 0.30 cm/s(X component), -1.00 cm/s(Y component) 이지만, 개선된 MCC 방법은 -3.64 cm/s(X component), 4.45 cm/s(Y component)로 실제 영상에서도 빠르게 움직임 확인
- 포인트 2 지역의 NSIDC 위성자료는 0.20 cm/s(X component), 1.90 cm/s(Y component) 이지만, 개선된 MCC 방법은 0.06 cm/s(X component), 0.05 cm/s(Y component)로 실제 영상에서도 이 지역은 움직임이 없는 것으로 나타남

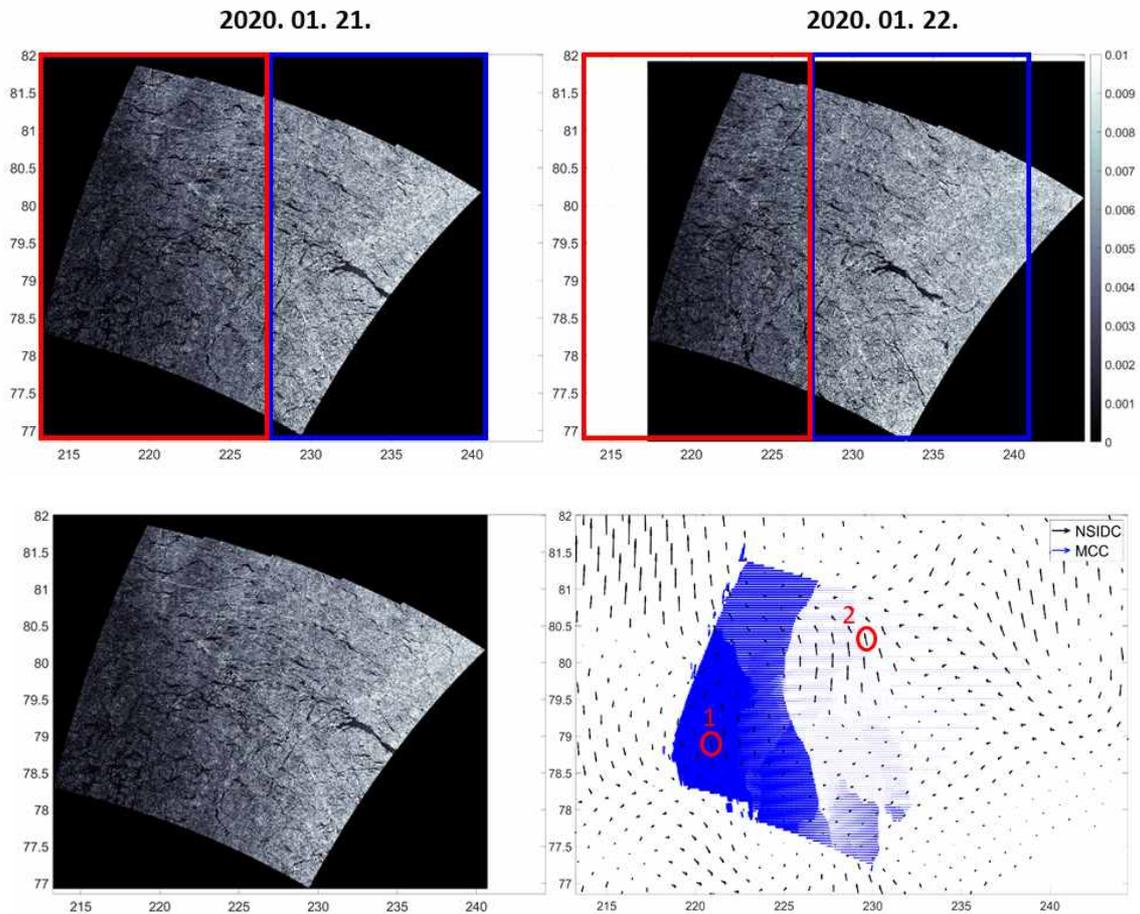


그림 3-3-14. NSIDC와 MCC에서 검출한 해빙 유동 결과 비교.

○ 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 이동장 제작
- 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 제작(그림 3-3-15).

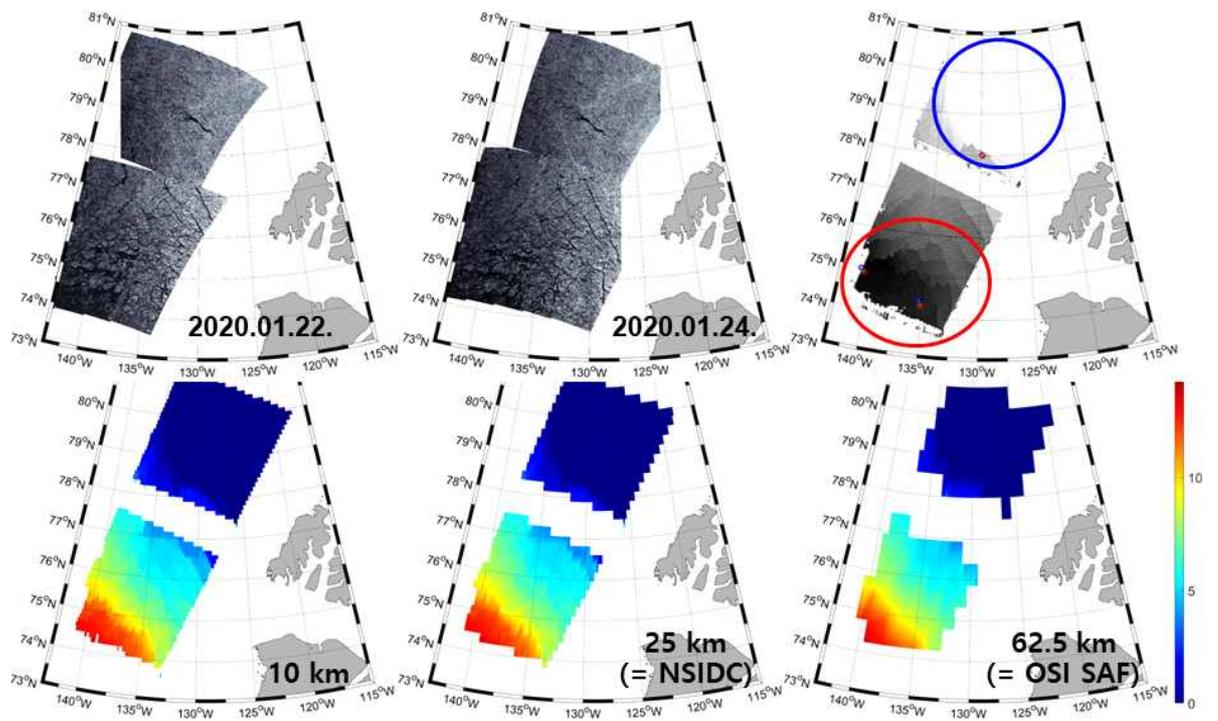
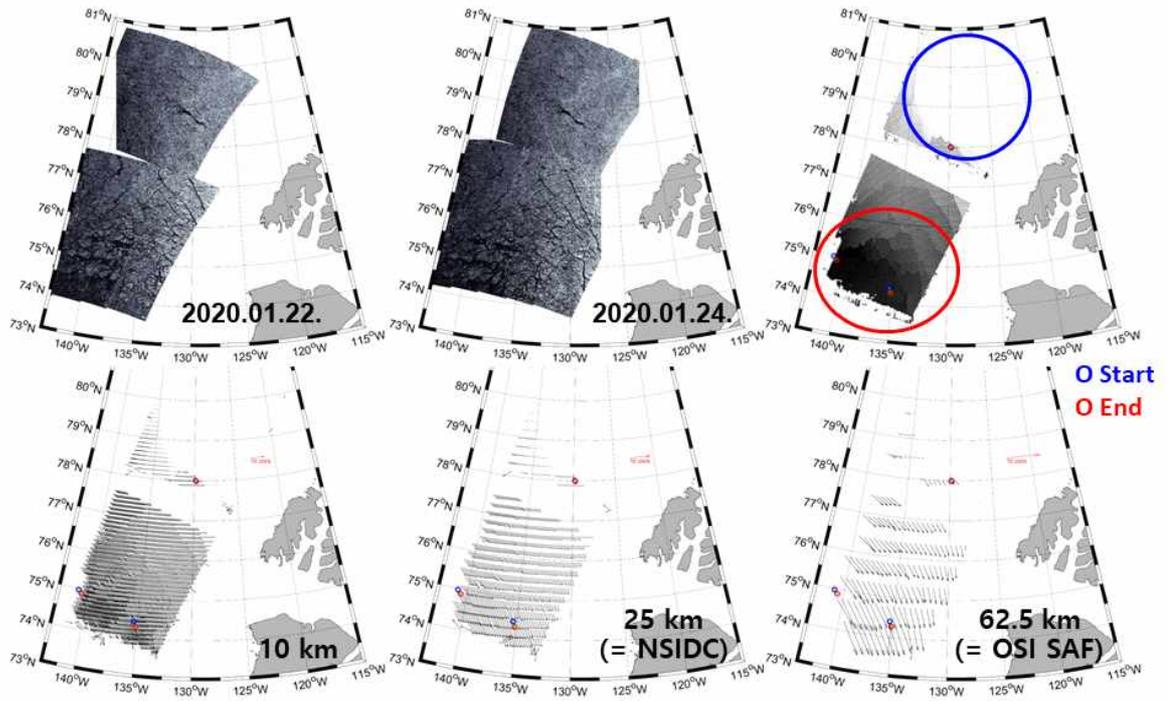


그림 3-3-15. Beaufort 해역에서 서로 다른 해상도 해빙 이동장 생산.

- 북극 해빙의 이동 특성은 북극의 환경 변화를 지시하는 중요한 요인 중 하나로 평가되고 있고, 이는 북극의 환경 변화뿐만 아니라 전 지구적인 기후 변화를 분석하는 데도 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 motion과 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

## 제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 제 1 절 연구개발목표 달성도

#### 연구 개발 최종 목표 :

- 위성기반 해빙의 유동자료를 이용하여 이동경로, 분포, 및 이동경향 추적 기술 개발
- 지구 온난화에 따른 북극해 해빙의 이동 변화 파악 및 원인 분석 연구

세부연구목표 및 연구 개발 내용	2020	2021	2022
<b>위성기반 해빙 시/공간 변화 분석</b> - 위성기반 해빙 자료 수집 및 분석 - 해역별/시기별 해빙의 시/공간적 특성 파악을 위한 위성 및 재분석 자료 분석 - 북극해 해빙 변화 주제도 제작 및 추적 입자 모델 개선	<b>1차년</b>		
<b>위성기반 해빙 이동 추출 기술 개발</b> - 위성자료 기반 고해상도/저해상도 해빙 이동장 구축 - 위성자료 기반 해빙 시공간 변화 추출 기술 개발 - 위성자료 기반 해빙 이동 경로 추적 프로그램 개발		<b>2차년</b>	
<b>지구 온난화에 따른 해빙 이동 변화 분석</b> - 위성기반 북극해 장기 해빙 이동장 구축 - 다중위성 및 현장관측 자료를 이용한 북극해 해빙 이동 변화와 연관된 환경 요인 분석 - 북극해 해빙 이동 변화에 영향을 미치는 요인 분석 및 원인 규명			<b>3차년</b>

극지연구소

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1차년도 (2020) 1. 위성기반 해빙 시/공간 변화 분석	1-1	- 위성기반 해빙 자료 수집 및 DB 구축	- 1980년부터 현재까지 일일 NSIDC 위성 기반 해빙 이동 자료 및 IABP 및 ITP 현장 부이 자료 수집 및 자료 분석 - 해빙 이동 자료 분석을 위한 Sentinel-1 위성자료 수집 및 분석	- 북극해 해빙 유동과 관련된 위성 및 현장관측 자료 수집 - 춘계 해양학회 발표 완료
	1-2	- 해역별/시기별 해빙의 시/공간적 특성 파악을 위한 위성 및 재분석 자료 분석	- 위성과 현장관측 자료에 대한 정확도 분석 - 위성과 현장관측간 에러 발생 원인 분석 - 위성 및 현장관측 자료를 이용한 북극 전 해역에 대한 장기 유빙 이동 속도 변화 분석	- 위성과 현장관측 시계열 자료 간 문제점 파악 및 원인 분석 완료 - 40년간 북극해 유빙이동 속도 변화 계산
	1-3	- 북극해 해빙 변화 주제도 제작 및 추적 입자 모델 개선	- 북극해 월별 및 시기별 해빙 이동 속도 변화 주제도 제작 - Sentinel-1 자료 기반 북극해 유빙 유동장 추출 방법 비교 (MCC, ROF 등)	- 고해상도 (~10 m) 북극해 유빙 이동 속도 추출 방법 개발 - 춘계 원격탐사학회 발표 완료

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
2차년도 (2021) 2. 해빙 시공간 변화 추출 기술 개발	2-1	위성자료 기반 고해상도/저해상 도 해빙 이동장 구축	북극해 고해상도 해빙이동벡터 추출 기술개발 - 개선된 Maximum Cross-Correlation(MCC) 방법을 통한 해빙이동벡터 산출 - 개선된 Robust Optical Flow(ROF) 방법을 통한 해빙이동벡터 산출 - 해빙관측부이(IABP, ITP), NSIDC 산출물과 비교 검증  고/저해상도 해빙 이동장 산출 - 고해상도 해빙 이동장 기반 저해상도 해빙 이동지도 제작 시계열/지역해별 고해상도 해빙 이동장 구축	- 유빙 이동장 추출 방법 기 반 고해상도 해빙 이동 벡터 산출 - 2021 ISPS 발 표 완료
	2-2	위성자료 기반 해빙 시공간 변 화 추출 기술 개 발	이동지도 제작 시계열/지역해별 고해상도 해빙 이동장 구축 - 2015년부터 2020년까지의 장기 자료 수집 및 지역해별 해빙 이동장 구축	- Beaufort sea 에서 해빙 이 동장 구축 - 해빙관측부이 와 비교
	2-3	위성자료 기반 해빙 이동 경로 추적 프로그램 개발	해빙 이동경로 추적 알고리즘 개발 - NSIDC 등의 sea ice motion 자료를 통한 해빙 이동경로 추적을 위한 자료 수집 및 분석 - 고해상도 유빙 이동장 구축을 자료 수집 - 해빙 추적 결과 검증 및 방법 검증	- 구성된 해빙 이동장을 통한 유해빙 이동 추적 방법 검 증 - 해빙관측부이 와 비교 검증

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
3차년도 (2022) 3. 지구 온난화에 따른 해빙 이동 변화 분석	3-1	위성기반 북극해 장기 해빙 이동장 구축	북극해 고해상/저해상도 해빙 이동장 제작 - 개선된 Maximum Cross-Correlation(MCC) 방법을 통한 해빙이동벡터 산출 - 개선된 Robust Optical Flow(ROF) 방법을 통한 해빙이동벡터 산출 - 해빙관측부이(IABP, ITP), NSIDC 산출물과 비교 검증  고/저해상도 해빙 유동장 산출 - 고해상도 해빙 유동장 기반 저해상도 해빙 이동지도 제작	- 유빙 이동장 추출 방법 기 반 고해상도 해빙 이동 벡터 산출 - 2022 추계 원 격 탐 사 학 회 , GeoAI 데이터 학회 발표 예 정 - 논문 투고 준 비중
	3-2	다중위성 기반 북극해 해빙 이동 변화 분석	해수면 온도, 해면기온 등 외부 요인 경향 분석 - 장기 위성 및 현장관측 자료 활용 북극해 해빙 이동 속도 변화 분석 - 북극해 유빙 이동와 관련 있는 외부 요인 자료 장기 변화 분석	- 위성 및 현장 관측자료 기반 장기 변화 분 석 - 2022 추계 원 격 탐 사 학 회 , GeoAI 데이터 학회 발표 예 정
	3-3	북극해 해빙 이동 변화에 영향을 미치는 요인 분석	해빙 유동 및 변화에 영향을 미치는 요인들에 대한 장기 변화 분석 - 북극해 유빙 장기 변화 자료와 유동관련 외부 요인과의 상관관계 분석 - SIC와 상관관계 및 SLP 와의 상관관계 분석	- 북극해 해빙 이동 경향 분 석 - 2022 추계 원 격 탐 사 학 회 , GeoAI 데이터 학회 발표 예 정

## 제 2 절 대외기여도

### ○ 학술적 파급효과

- 북극해 해빙/유빙의 분포와 해양환경변화의 학술적 이해 증대
- 종합적 관측망 운용으로 장기 자료 획득과 이를 통한 체계적 연구 기회 제공
- 다학제적 연구로 국내 북극권 위성 연구 수준의 국제화
- 위성과 모델을 연계한 융합 연구로 위성활용 연구 극대화
- 북극해에서 원격탐사 자료를 이용한 장기 변화 관측 자료 분석을 통한 변화 요인 이해
- 종합적 관측망 운용으로 장기 자료 획득과 이를 통한 체계적 연구 기회 제공

### ○ 경제적 파급효과

- 북극해 빙권의 종합적으로 체계적인 자료 제공으로 북극항로 개발 시 유용한 자료 제공
- 북극해 해양수산자원 변화 연구 및 개발에 활용 할 수 있는 자료 제공
- 위성자료 처리 기술 프로그램 개발을 통한 수입대체 효과
- 북극해 해양환경의 급속한 변화에 따른 대책마련을 위한 기초자료 및 기술 확보
- 북극항로 개발에 따른 해빙 변화 자료 제공을 통한 이동 항로 안정성 확보 및 이동경로 감소로 인한 경비 절감

### ○ 기술적 파급효과

- 원격탐사 분야 중 SAR 분야에서 선진 기술 확보
- 국내 개발 위성의 자료 처리 기술 구축 및 개발 방향성 제시로 통하여 기술의 활용 증대로 첨단 우주 기술 연구 기반 확보
- 북극해 환경변화에 대한 국내/외 연구자에게 개방함으로써 극지 관련 연구 분야의 기술 확보 및 국가 경쟁력 제고

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 과제에서 수행된 위성기반 해빙 이동 추적 기술 개발 결과는 다음과 같은 항목에 대하여 향후 활용이 가능할 것으로 기대됨.

- 북극해 해빙/유빙의 분포와 해양환경변화의 학술적 이해 증대.
- 종합적 관측망 운용으로 장기 자료 획득과 이를 통한 체계적 연구 기회 제공.
- 다학제적 연구로 국내 북극권 위성 연구 수준의 국제화.
- 위성과 모델을 연계한 융합 연구로 위성활용 연구 극대화.
- 북극해 빙권의 종합적이고 체계적인 자료 제공으로 북극항로 개발시 유용한 자료 제공.
- 북극해 해양수산자원 변화 연구 및 개발에 활용 할 수 있는 자료 제공.
- 북극해 장기 변화 관측 체계 구축 및 변화 예측을 위한 모델링 입력 자료 제공
- 북극해 자원개발 및 항로 개발 투자 시 선행 조사 자료 제공
- 인공위성 원격탐사와 연계되어 모델을 이용한 극지 연구는 인류의 접근이 어려운 환경에서 일어나는 현상을 연구하는데 효과적으로 사용됨
- 각 국에서는 북극권 변화를 이해하기 위한 다양한 과학적인 접근을 하고 있으며, 향후 북극권 활용이라는 경제적인 효과를 고려한 연구 및 활동 진행에 활용

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보



## 제 7 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 표층수 온, 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.
- 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): 2 - 5.
- Arrigo, K.R. and van Dijken, G. L. 2011. Secular trends in Arctic Ocean net primary production. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(9), 1 - 15.
- Arrigo, K.R. and van Dijken, G.L. 2015. Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progress in Oceanography*, 136: 60 - 70.
- 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): 67 - 80.
- 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): 341 - 343.
- Cheng, S., Aydoğdu, A., Rampal, P., Carassi, A. and Bertino, L. 2020. Probabilistic forecasts of Sea Ice Trajectories in the Arctic: Impact of uncertainties in surface wind and ice cohesion. *Oceans*, 1(4), 326 - 342.
- Comiso, J.C. 2003. Warming trends in the Arctic from clear sky satellite observations. *Journal of Climate*, 16(21): 3498 - 3510.
- Comiso, J.C. 2012. Large Decadal Decline of the Arctic multiyear ice cover. *Journal of Climate*, 25, 1176-1193.
- 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, 357–360.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B. Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N. and Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(666): 553 - 597.
- Ding, Q., Wallace, J. M., Battisti, D.S., Steig, E. J., Gallant, A. J. E., Kim, H.-J. and Geng, L. 2014. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and Greenland. Nature, 509(7499), 209 - 212.
- 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., Polovina, J., Rabalais, N.N., Sydeman, W.J. and Talley, L.D. 2012. Climate Change Impacts on Marine Ecosystems. Annual Review of Marine Science, 4: 11 - 37.
- Donoser, M., Riemenschneider, H. and Bischof, H. 2010. Shape guided Maximally Stable Extremal Region (MSER) tracking. IEEE Xplore, DOI 10.1109/ICPR.2010.444.
- 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: 897 - 900. doi:10.1029/97GL00755.
- ESA. 2012. Sentinel-1 ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services, ESA Communications, SP-1322/1, ESA, the Netherlands, 2012, 15 - 21.
- Francis, J.A. and Hunter, E. 2006. New insight into the disappearing Arctic sea ice. Eos, Transactions American Geophysical Union, 87(46): 509 - 511.
- Girard-Arduin, 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), 2639 - 2648.
- 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).
- Hakinen, S., Proshutinsky, A. and Ashik, I. 2008. Sea ice drift in the Arctic since the 1950s. *Geophysical Research Letter*, 35, L19704, doi:10.1029/2008GL034791.
- 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. *Advance in Polar Science*, 31(1): 26-35.
- Heorton, H.D.B.S., Tsamados, M., Cole, S.T., Ferreira, A.M.G., Berbellini, A., Fox, M. and Armitage, T.W.K. 2019. Retrieving sea ice drag coefficients and turning angles from in situ and satellite observations using an inverse modeling framework. *Journal of Geophysical Research Ocean*, 124, 6388 - 6413.
- Howell, S.E.L. and Brady, M. 2019. The dynamic response of sea ice to warming in the Canadian Arctic Archipelago. *Geophysical Research Letter*, 46, 13,119-13,125.
- Jay, Z.H., 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): 3041.
- Karvonen, R. 2012. Operational SAR-based sea ice drift monitoring over the Baltic Sea. *Ocean Science*, 8, 473 - 483.
- 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, 1 - 5. doi:10.1029/2008GL033451.
- 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), 258; doi:10.3390/rs9030258.
- 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, 2408 - 2425. doi:10.1002/jgrc.20191.
- 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, 115, C10032, doi:10.1029/2009JC005958, 2010.
- 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), 4372 - 4391.
- Li, Z., Zhang, W., Stuecker, M.F., Xu, H. and Jin, F.F. 2019. Different Effects of Two ENSO Types on Arctic Surface Temperature in Boreal Winter. Journal of Climate, 32, 4943-4961.
- Miller, P.A., Laxon, S.W., Feltham, D.L. and Gresswell, 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), 1089 - 1108.
- 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, 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, 1835 - 1850.
- Olason, E. and Notz, D. 2014. Drivers of variability in Arctic sea-ice drift speed. Journal of Geophysical Research Ocean, 119(9), 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): 1998 - 2006.
- 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, 1356 - 1361. doi:10.1002/grl.50349.
- Peterson, B.J. 2002. Increasing River Discharge to the Arctic Ocean. *Science*, 298(5601): 2171 - 2173.
- 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): 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., Ims, R.A., Jeppesen, E., Klein, D.R., Madsen, J., McGuire, A.D., Rysgaard, S., Schindler, D.E., Stirling, I., Tamstorf, M.P., Tyler, N.J.C., van der Wal, R., Welker, J., Wookey, P.A., Schmidt, N.M. and Aastrup, P. 2009. Ecological Dynamics Across the Arctic Associated with Recent Climate Change, *Science*, 325(5946): 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): 1 - 5.
- Rampal, P., Weiss, J. and Marsan, D. 2009a. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979 - 2007. *Journal of Geophysical Research*, 114, <https://doi.org/10.1029/2008JC005066>.
- Rampal, P., Weiss, J., Marsan, D. and Bourgoin, M. 2009b. Arctic sea ice velocity field: General circulation and turbulent-like fluctuations. *Journal of Geophysical Research*, 114, C10014, doi:10.1029/2008JC005227.
- Screen, J.A., Denser, C. and Simmonds, I. 2012. Local and remote controls on observed Arctic warming. *Geophysical Research. Letter*, 39, L10709, doi:10.1029/2012GL051598.
- Serreze, M.C., Holland, M.M. and Stroeve, J.C. 2007. Perspectives on the Arctic's Shrinking Sea-Ice Cover. *Science*, 315(5818): 1533 - 1536.
- Shimada, K., Kamoshida, T., Itoh, M., Nishino, S., Carmack, E., F. McLaughlin, 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): 3 - 6.
- 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, 65 - 79.
- Spren, G., Kwok, R. and Menemenlis D. 2011. Trends in Arctic sea ice drift and role of wind forcing: 1992-2009. *Geophysical Research Letter*, 38(19), <https://doi.org/10.1029/2011GL048970>.
- Sumata, H., Lavergne, T., Giard-Ardhuin, 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 : Ocean*, 119, 4887-4927.
- 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), 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 Tecnology*, 52(2), 207 - 223.
- 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 Phsyical Oceanography*, 38, 133-145.
- 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): 2575 - 2593.
- 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): 2 - 6.
- Zhang, J., Rothrock, D.A. and Steele, M., 2013. Projections of an Ice-Diminished Arctic Ocean-Retrospection and Future Projection. Polar Science Center,

Applied Physics Laboratory, University of Washington, <http://psc.apl.washington.edu/zhang/IDAO/index.html>, accessed, 30.

Zhang, M., An, J., Zhang, J., Yu, D., Wang, J. and Lu, X. 2020. Enhanced delaunay triangulation sea ice tracking algorithm with combining feature tracking and pattern matching. *Remote Sensing*, 12(3), 581; doi:10.3390/rs12030581.

Zuidema, P., Baker, B. and Han, Y. 2005. An Arctic springtime mixed-phase cloudy boundary layer observed during SHEBA. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(1): 160 - 176.



## 주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.