

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.



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

보고서 초록

위탁연구과제명	위성기반 해빙 이동 추적 기술 개발				
위탁연구책임자	손영백	해당단계 참여연구원수	총 : 6 명 내부 : 6 명 외부 : 0 명	해당단계 연구비	40,000,000
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 열대·아열대연구센터		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요 약				보고서면수	75
<p>○ 위성기반 해빙 이동장 지역해 최적화 방법 개선 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> - 위성자료 기반 해빙 이동 추적 방법 검증 - 해역별/시기별 해빙의 시/공간적 특성 변화에 따른 추적 방법 검증 - 위성 기반 지역해 최적화 해빙 이동장 자료 생산 <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  <p style="font-size: 2em; font-weight: bold; color: #0070C0;">KOPRI</p> <p style="font-size: 1.5em; font-weight: bold; color: #0070C0;">극지연구소</p> </div>					
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 유동성 증가 로 해빙/유빙의 이동경로에 대한 분석 및 연구 요구

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 위성기반 해빙 이동장 지역해 최적화 방법 개선 연구

IV. 연구개발결과

- 위성자료 기반 해빙 이동 추적 방법 검증
- 해역별/시기별 해빙의 시/공간적 특성 변화에 따른 추적 방법 검증
- 위성 기반 지역해 최적화 해빙 이동장 자료 생산

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

- A study on improvement of satellited-based sea-ice movement using regional optimization method

IV. R&D Results

- Verification of sea ice movement tracking method based on satellite data
- Verification of tracking methods according to changes in spatial and temporal variations of sea ice
- Satellite-based products based on regional optimized sea-ice movement data

V. Application Plans of R&D Results

- Development of high resolution sea ice meovement in Artic 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
제 2 절 국외 기술개발 현황	17
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	31
제 1 절 북극해 최적화 해빙 이동장 자료 생산	31
1. 북극해 해빙 수치모델 입력장	31
2. 북극해 해빙 수치모델 구축	36
3. 북극해 해빙 모델 기반 자료 생산	45
4. 요약	68
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	70
제 1 절 연구개발목표 달성도	70
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 6개월 이상의 백야가 지속되고 극한 기상으로 인하여 제한된 현장 관측이 수행되기 때문에 양질의 자료가 제공되지 않기 때문에 원격탐사를 활용한 광역의 해역 모니터링과 모델을 결합한 융합 연구가 필요함.
- 북극해 해역에서는 지구온난화로 인한 기온과 수온의 증가로 인하여 해빙 표면의 눈이 녹거나, 해빙 자체의 용융으로 인해 표면이 녹는 현상이 나타나는데, 이러한 해빙의 용융으로 인하여 해빙의 면적과 두께가 감소하면서 해수면 상승, 알베도 감소로 인한 태양복사 에너지양 증가 등 전 지구 기후에 영향을 미치고 있음.
- 북극해 해빙은 1979년 이래로 수행되었던 위성관측 기간중에서 2000년대 후반들어 면적이 감소하는 등 지구온난화에 의한 영향을 뚜렷하게 받고 있음.
 - 반면 남극의 해빙 면적은 최근 십수년간 큰 변화를 보이지 않았는데, 남극 주변해역의 대부분이 지배 기류의 증가와 강한 해양 연직혼합의 결과로 북쪽의 주요 온난화 해역으로부터 격리되는 영향을 받았기 때문으로 조사됨(Hunke et al., 2017).
 - 남극과 북극해 해빙의 이러한 차이는 지리적 요인으로부터 기인한 것으로, 북극해는 극지의 해양성 기후의 영향을 받는 한편 남극 해빙은 거대한 남극 빙상과 극지의 대륙성 기후의 영향을 크게 받음.
- 해빙의 하부 공동(cavity)에서는 주변 해역의 해류 순환 양상과 온난화의 영향을 받는 해수 유입과 열 수송에 의해 안정성에 큰 영향을 받음.
 - 그러나 빙붕 하부에서 일어나는 용융 기작에 대한 연구는 관측의 어려움으로 인하여 제한되어 있음.

- 해빙의 면적과 두께는 다양한 현장 관측, 항공기 및 위성을 활용한 원격 관측 등을 통하여 측정할 수 있지만, 관측 장비의 특성상 시·공간적으로 불연속적이며, 경년변동과 해빙의 유동을 탐지하기엔 한계가 있음.
- 해빙의 유실과 유동, 그리고 해빙 하부에서 일어나는 용융 기작을 이해하기 위해서는 해빙-대기의 상호작용과 해빙 하부의 용융 기작을 재현할 수 있는 포괄적이고 종합적인 해빙 모델링 연구의 필요성이 복잡한 해양 빙봉 시스템에 대한 포괄적이고 종합적인 해빙 수치모델링을 활용한 연구가 필요함.
- 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 확장과 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 km² 이상에서 4,000,000 km² 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 현

장관측자료를 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).

- 북극해 해빙 유동과 관련된 현장관측 자료인 ITP와 IABP은 설치한 해역에서만 관측이 가능하고, 기존의 위성관측자료 기반 해빙 이동장은 공간해상도가 수십 킬로미터에 급격히 변화하는 지역적 특성 반영하지 못하기 때문에 소규모의 해빙/유빙의 세부적인 이동 경향을 분석하기에는 제한적임
 - 관측, 위성, 재분석 자료 중에서 해류 및 바람의 자료는 공간 해상도가 낮아도 경향을 이해하는데 상대적으로 제약이 적지만, 해빙 이동장은 공간에 따른 이동 경향 차이가 크게 발생하기 때문에 고해상도의 정확성이 요구되고 개발이 필요함.
- 유럽 우주국(ESA)의 Sentinel 시리즈 위성 중에서 SAR 위성인 Sentinel-1 A와 B는 40m 급의 고해상도 자료를 일별로 북극해를 관측하고 있음.
 - 북극해를 관측하는 대량의 고해상도 영상 자료는 상대적으로 정밀한 해빙 이동장을 구성할 수 있음.
 - 고해상도 SAR 영상을 활용한 MCC 방법은 해빙 이동 벡터와 실측자료를 통해 검증하고, 이를 토대로 해빙 이동장을 생산할 수 있기 때문에 위성활용 기술 개발이 필요함.
- 위성과 모델을 연계한 융합 연구로 위성활용 연구 증대.
- 북극 해빙의 급격한 감소와 그에 따른 예기치 못한 해빙의 분포, 해빙/유빙의 유동성 증가로 해빙/유빙의 이동경로에 대한 깊은 분석 및 연구가 필요함.

제 2 절 연구개발의 내용 및 범위

- 1차년도: 위성기반 해빙 이동장 최적화 기술 개발
 - 북극해에서 해빙의 이동과 관련된 물리적/환경적 요인에 영향을 주는 환경 자료 수집 및 문헌자료 분석
 - 현장관측 자료와 비교하여 기존 위성 기반 해빙 이동장 방법간 비교 및 검증
 - 고해상도 및 저해상도 위성자료를 활용하여 다양한 시/공간적 특성 변화가 예측되는 해역에서 방법간 비교를 통한 최적화 기술 검증
 - 개선된 해빙 이동 추적 기술을 이용하여 북극해 최적화된 해빙 이동장 구축 기술 개선 및 검증 연구 수행



제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 기술개발 현황

○ 극지 해빙 위성관측을 위한 분석 기술 개발

- 극지연구소는 2017년부터 “북극해빙 위성관측을 위한 분석 기술 개발” 연구를 진행하며 국제 공동 위성 관측 정보공유체계 구축을 통한 북극권 전역의 빙권 정보 확보를 목표로 원격탐사 연구 수행<그림 2-1, 2> (Kim et al., 2018).
- 극지 위성자료의 수집 및 통합 모니터링 시스템(STAR Archiving System)을 개발·운영하며, 북극 해빙 및 위성센서 특성에 최적화된 원격탐사 자료처리 기술을 개발<그림 2-3>.
- 한국항공우주연구원과의 협동연구를 통해 한국 아리랑 위성을 활용한 북극 해빙 분석 및 처리 기술을 확보하여 북극권 빙권 정보 수요에 대한 한계 극복 목표로 북극 해빙의 정보를 위성 자료로부터 추출하기 위한 다양한 접근을 시도.
- 북극권 개발에 대비한 북극 빙권 종합 위성 관측망 구축과 국제 공동 연구 협력 계획, 북극권 활용 시대를 대비하기 위한 국내 극지 원격탐사 활성화를 위한 정보 공유 체계 구축<그림 2-4>.



<그림 2-1> 국내 극지 원격탐사 활성화를 위한 정보 공유 체계 모식도. 원격 위성을 활용한 북극 해빙 탐사는 기후변화, 북극 빙권 정보 확보, 북극권 활용 등 핵심적인 임무 수행(Kim et al., 2018).



<그림 2-4> 극지연구소의 북극 원격탐사 프로그램을 위한 국제 공동 연구 협업 (Kim et al., 2018).

- 다중 위성자료 융합 모델링을 통한 북극 해빙 변화 모니터링
 - ICESat과 CryoSat-2 위성 고도계 센서와 MODIS 자료를 활용하여 북극의 해빙 두께 모니터링
 - TerraSAR-X와 항공 SAR을 활용하여 여름철 해빙 표면에서 발생하는 melt pond의 공간적 분포 특성 분석
 - 레이더영상 자료를 활용한 극지 고유 해빙 변형 산출물 생산 기술 개발
 - 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 북극해역 현장관측 수행
 - 해빙트래커를 활용하여 해빙 이동 추적 및 위상 기반 해빙 이동 산출물 검증 활용
 - 한국항공우주연구원의 아리랑위성 (KOMPSAT, KARI)를 포함하여 Sentinel, Suomi-NPP, Landsat 위성자료 및 해빙농도 자료 수집
 - 극지 위성자료의 통합 수집 및 배포 등 극지 원격탐사 분야에서 활용성 증대
- 북극 해빙 모니터링 시스템(한국항공우주연구원, 기상청 국가위성센터)
 - 2017년부터 ‘북극해빙위성 관측을 위한 기술 개발’ 연구를 수행하며, 북극 해빙의 특성 정보를 위성자료로부터 추출하기 위한 다양한 접근법에 관한 연구

및 북극권 개발에 대비하여 ‘북극 빙권 종합 위성 관측망’ 구축에 필수적인 국제 공동 연구 협력을 진행함.

- 극지연구소 북극해빙예측사업단에서 극지역의 환경변화를 모니터링하기 위하여 극지 연구에 필요한 국내·외 위성영상을 자동으로 수집, 처리, 배포를 위한 ‘극지 위성자료 수집 및 모니터링 시스템(STAR Archive System)을 구축함 (Kim et al., 2018).
- 한국항공우주연구원의 아리랑 위성 시리즈 KOMPSAT (Korea Multi-Purpose Satellite)-2, 3, 3A, 5, KARI를 포함하여 Sentinel (ESA), Suomi-NPP (NASA), Landsat (USGS) 위성자료 및 해빙 농도자료를 수집하여 지구 표면, 환경, 특히 북극 해빙 모니터링에 활용함<그림 2-5>.
- 아리랑 5호 (KOMPSAT-5; Arirang-5)는 2013년 한국에서 발사한 KOMPSAT 아리랑 시리즈 중 하나로 해빙 모니터링 등 다양한 목적으로 활용되고 있음<그림 2-6>.
- GEO-KOMPSAT-1 (COMS1)과 GEO-KOMPSAT-2A(Cheonlian 2A)은 KOMPSAT 시리즈의 일원으로써 각각 2010년과 2018년에 발사되었음. 현재 한국 기상청 국가위성센터에서 해빙을 포함한 지구 환경 모니터링을 위해 다 목적으로 활용되고 있음<그림 2-7, 8>.

구분	아리랑위성(다목적실용위성)							
	1호	2호	3호	3A호	5호	6호	7호	7A호
개발 목적	지구관측 (광학)	지구정밀관측 (광학)	지구정밀관측 (광학)	지구정밀관측 (광학 +적외선)	전천후지구관측 (영상레이더)	전천후지구관측 (영상레이더)	지구정밀관측 (광학+적외선)	지구정밀관측 (광학 +적외선)
위성 형상								
사업 기간	'94.11 ~'00.1	'99.12 ~'06.11	'04.8~'12.8	'06.12 ~'15.12	'05.6~'15.6	'12.12 ~ '25.6	'16.8~'25.12	'20.2~'27.5
중량	470kg	800kg	980kg	1,100Kg 내외	1,400Kg 내외	-	-	-
임무 수명	3년	3년	4년	4년	5년	-	-	-
주요 성능 (해상도)	흑백 6.6m	흑백 1m 컬라 4m	흑백 0.7m 컬라 2.8m	흑백 0.55m 컬라 2.2m	레이더 영상 1m/3m/20m	-	-	-
발사체	Taurus (미)	Rockot (러)	H2-A(일)	Dnepr (러)	Dnepr (러)	-	-	-
발사장	반덴버그 (미)	Plesetsk (러)	다네가시마 (일)	Yasny(러)	Yasny(러)	-	-	-
발사일	'99.12.21	'06.7.28	'12.5.18	'15.3.26	'13.8.22	예정	예정	예정
운영 현황	임무종료 (07.12) 운영종료 ('08.2)	임무종료 ('15.10)	임무 수행중	임무 수행중	임무 수행중	개발중	개발중	개발중

<그림 2-5> 우리나라 독자적인 위성 개발 기술 확보와 공공 수요의 위성영상 확보를 목표로 개발된 다목적실용위성 아리랑 시리즈 현황. 아리랑 위성은 저궤도 지구관측위성으로 전자광학 및 적외선 카메라, 영상레이더 등을 탑재하여 다양한 관측 자료를 확보하고 있으며 기상, 해양 및 빙권 모니터링 등에 활용되고 있음. 한국항공우주연구원은 1999년 국내 최초 다목적실용위성 아리랑1호를 개발한 이후 2006년 해상도 1m 급의 아리랑위성 2호를 개발함.



<그림 2-6> 아리랑위성 5호(다목적실용위성)은 국내 최초의 영상레이더(SAR)를 탑재한 위성으로 한반도의 전천후 지상·해양 관측을 목표로 개발됨. 주·야간 및 악천후에도 지상관측이 가능하며, 주요 핵심 기술을 제외한 상당 부분을 국내 독자 기술로 개발함. 해상도 1m(관측 폭 3km×3km)의 개선 고해상도 모드, 0.85m(2.7km×2.7km)의 초고해상도 모드, 2.5m(30km)의 개선 표준 해상도 모드, 20m(100km)의 개선 광역 관측 모드 등 4가지 운영 모드를 추가하여 고품질 영상을 제공함.

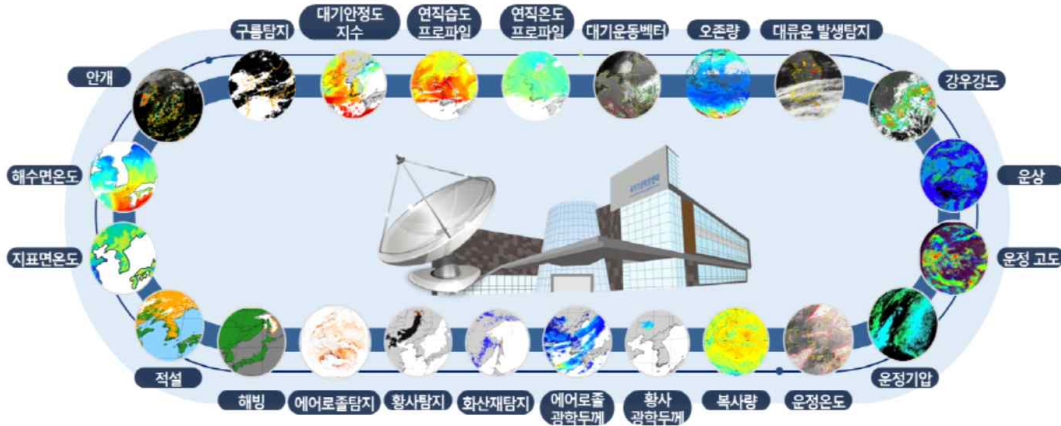
극지연구소



<그림 2-7> 국가위성센터의 천리안 2A호 위성의 대용량 실시간 자료 처리를 위한 고성능 시스템 체계 구축. 위성자체 방송기능을 통한 전 채널 원시해상도 자료, 천리안 기상위성과 동일한 채널 자료, 선박 대상 해양기상정보 자료를 동아시아 전 지역 사용자들에게 배포.

극지연구소

기본 산출물 23종



부가 산출물 29종

- 산불탐지
- 식생지수
- 식생물
- 지표면 방출율
- 지표면 반사도
- 적설 깊이
- 해류
- 운형
- 운량
- 구름광학두께
- 구름입자유효반경
- 구름수액경로
- 구름빙정경로
- 구름 층고도
- 강수확률
- 잠재강수량
- 에어로졸 입자크기
- 시정
- 상향단파복사대기상향
- 하향단파복사대기상향
- 흡수단파복사지표면
- 하향장파복사지표면
- 상향장파복사지표면
- 상향장파복사대기상향
- 적빙
- 성층권 침투 대류운 탐지
- 이산화황 탐지
- 가강수량
- 대류권계면 접힘 난류 탐지

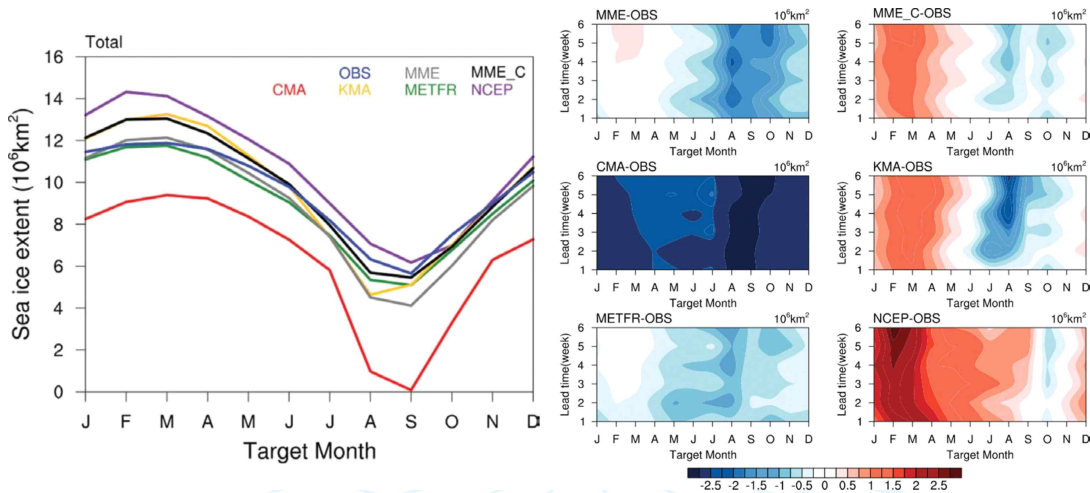
<그림 2-8> 국가기상위성센터가 천리안위성 2A호 위성을 활용하여 개발하고 있는 52종의 기상산출물은 기본 산출물 23종과 부가산출물 29종으로 나누어 개발하고 있으며, 각 산출물들의 상세 알고리즘 설명서를 배포하여 제공함.

○ 북극 해빙 면적 예측(국립기상과학원)

- S2S (Sub-seasonal to Seasonal) 데이터베이스 자료를 이용하여 현업 예측 모형들이 가지고 있는 북극 해빙 예측성을 분석, 현재의 해빙 예측 성능 제시 (Park et al., 2018).
- S2S 데이터베이스에 포함되어 있는 자료는 전세계 11개 기관, BoM (Bureau of Meteorology), CMA (China Meteorological Administration), CNR-ISAC (Institute of the Italian National Research Council-The Institute of Atmospheric Sciences and Climate), ECCC (Environment and Climate Change Canada), ECMWF (The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), HMCR (Hydrometcentre of Russia), JMA (Japan Meteorological Agency), KMA (Korea Meteorological Administration), Meteo France, NCEP (National Centers for Environmental Prediction, UK Met Office의 준실시간으로 제공되는 과거기후 재현자료들을 포함하고 있음

<그림 2-9>.

- S2S 규모에서의 북극 해빙 면적 예측전망을 관측과의 비교·검증 결과, 각 수치모델에서 재현된 북극의 해빙 면적은 계절에 따라 관측과의 차이가 있고, 일부 해역에서 예측 선행 시간에 따라 해빙 농도의 오차가 증가하는 경향이 있음을 제시함.
- 북극 해역의 전반적 해빙 면적 예측성은 6주 이상이며, 특히 여름철의 예측 가능성이 가장 높게 나타남을 제시함.



<그림 2-9> 전세계 11개 기관의 장기 월평균 해빙 면적 추산 결과(좌)와 선도기간별 관측과의 차이(우)

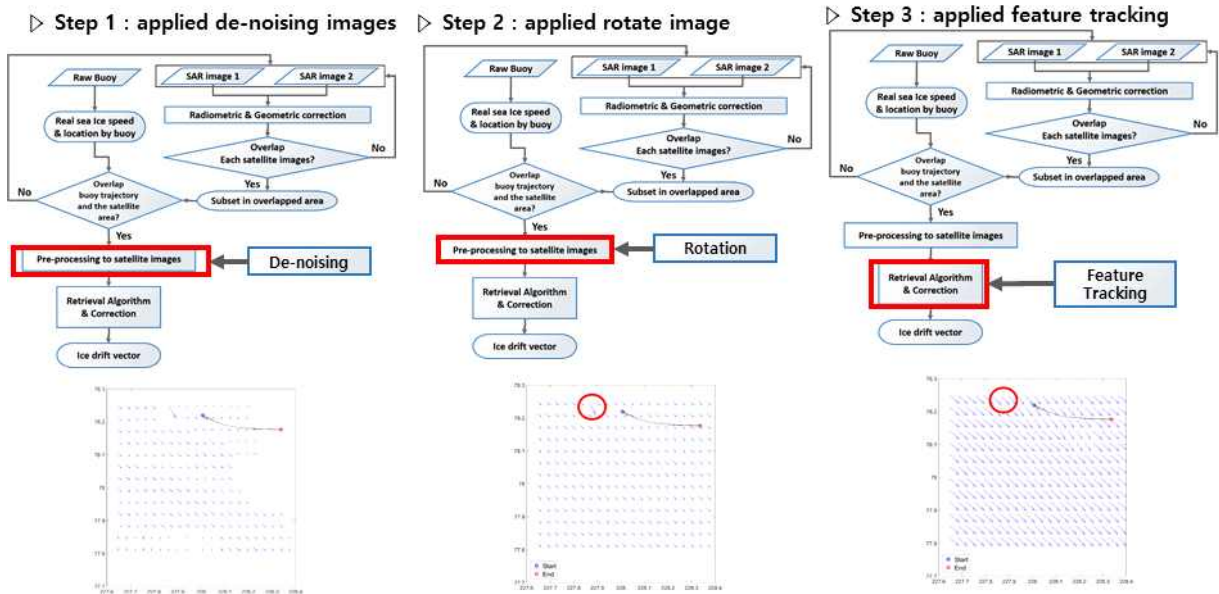
- 박 등(2018)은 북극해에 분포하는 유빙의 움직임을 이해하기 위해 현장관측 자료와 위성자료를 기반으로 입자 추적 모델을 사용하여 북극해 유빙의 분포 및 이동경향을 분석하였고, 지구온난화에 따른 해양-대기 상호작용의 변화에 의해 북극해 유빙의 이동경향이 변화는 것을 재현함.
- 김 등(2017)은 북극해에서 해양환경의 장기 변화를 전체적으로 분석함과 동시에 객관적으로 분류된 해역별 환경특성 및 변화 양상을 파악하였고, 주요 환경인자 간 상호관계를 분석을 통하여 북극의 생산성 변화와 연관된 클로로필의 장기 변화를 이해하고 결과적으로 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

○ 한국의 극지연구소는 INTAROS(International Arctic Observing System)의 국제 공동연구파트너로 활동. 2017년도부터 1단계로 3년간 “북극 해빙 위성관측을 위한 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.

○ 위성기반 해빙 이동장 지역해 최적화 방법 연구 수행

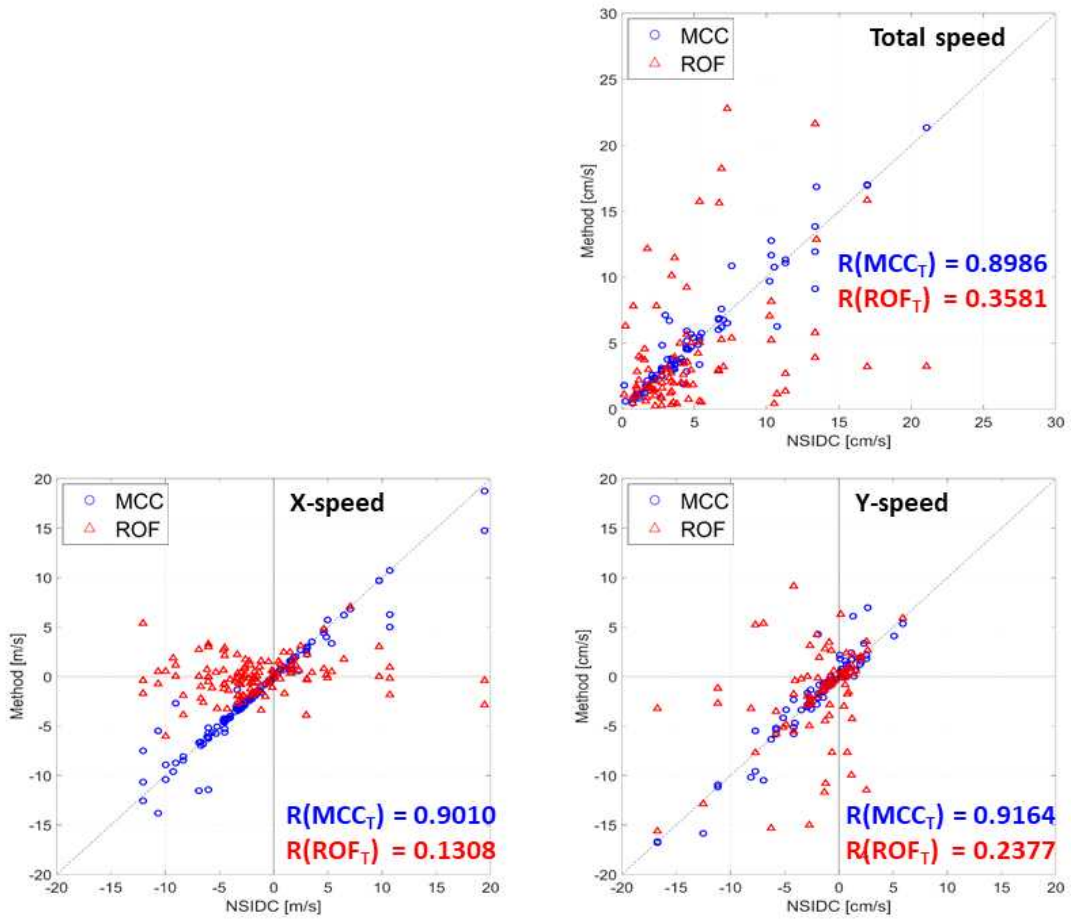
- 극지연구소 과제에서 개발된 MCC 기반 고해상도 해빙 추출 방법은 Dual-polarization SAR image를 사용하여 기존 방법에서 첫 번째 SAR 영상의 노이즈를 제거하는 de-noising 방법을 적용했고, 두 번째 두 위성간 매칭 자료에서 에러를 줄이기 위해 rotation 방법을 사용하여 두 영상간 매칭 자료 산출, 세 번째 feature tracing 방법을 이용하여 두 영상간 해빙 벡터 자료 추출 과정을 거쳐 북극 유빙 추적 방법을 개선함<그림 2-10>.



<그림 2-10>. Flowchart of the sea ice drift retrieval algorithm.

- 개발된 해빙 이동 추적 방법을 검증하기 위해 현장관측 자료와 기존 저해상도 위성에서 추출된 해빙 이동 자료와 비교 연구를 수행했다. 북극해 IABP 부이 자료는 총 732개 자료와 검증을 통해 mean ratio 1.05, RMSE 0.17, Bias 0.01로 상대적으로 높은 정확도를 현장관측 자료와 유사한 이동 경향과 이동 속도를 나타내는 것으로 분석됨.
- 본 연구를 통해서 개발된 고해상도 해빙 이동장 자료와 저해상도 공간해상도를 가지는 NSIDC에서 제공하는 sea ice motion 자료와 비교 연구를 수행했고, 총 121개 매칭 자료를 이용하여 total speed, u speed, v speed 자료에 대해서 비교를 수행했다. total speed는 두 자료간 R2 value 0.89, u speed는 두 자료간 R2 value 0.90, v speed 두 자료간 R2 value 0.92으로 유사한 경향을 나타냄<그림 2-11>.
- 그러나 일부 자료에서 NSIDC 자료는 본 연구에서 개발된 고해상도 유빙 이동 자료보다 상대적으로 빠르게 나타났고, 이것은 공간해상도 차이로 인하여 고해상도에서 인식 가능한 세밀한 움직임을 저해상도에서 추출하지 못한 것으로 사료됨





<그림 2-11>. NSIDC와 MCC에서 검출한 해빙 유동의 total speed, u speed, v speed 비교

제 2 절 국외 기술개발 현황

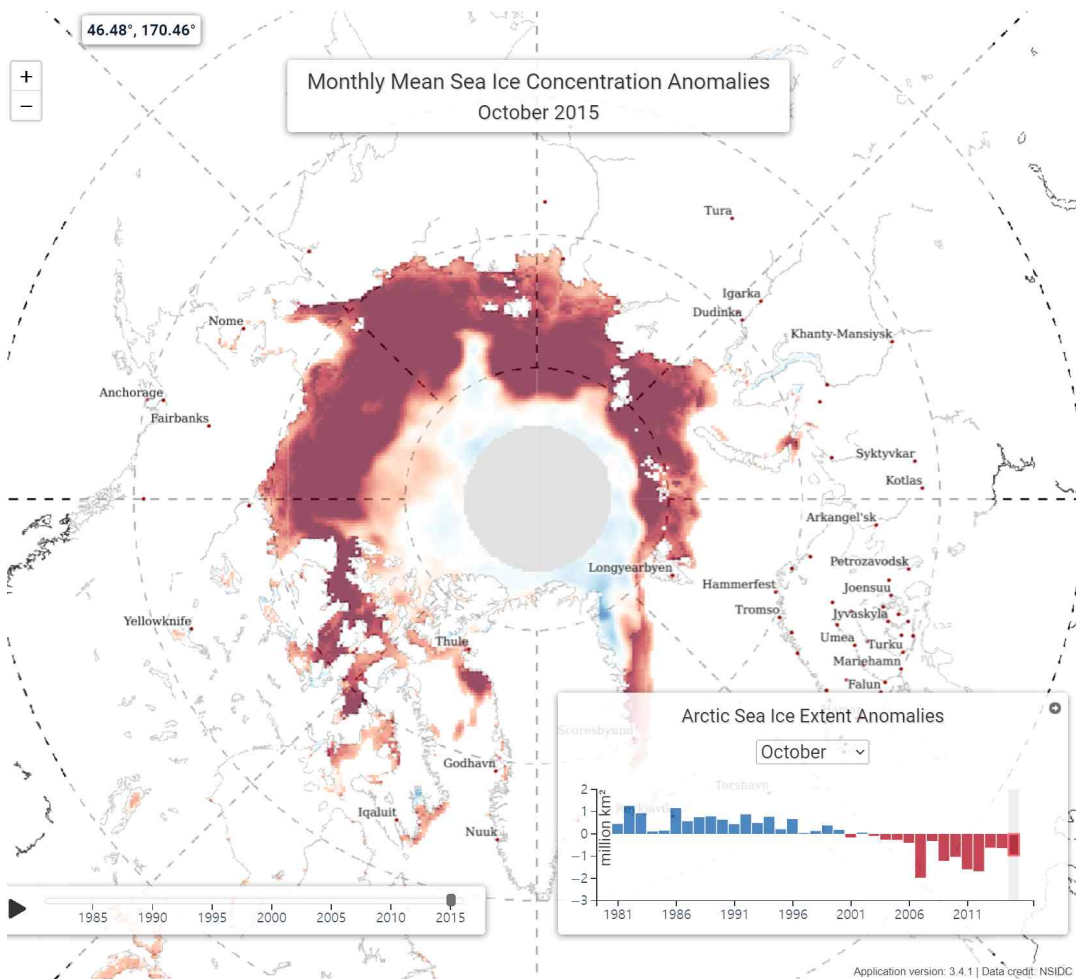
○ 미국 NSIDC(National Snow and Ice Data Center)

- NSIDC는 미국 항공우주국(NASA; National Aeronautics and Space Administration), 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration)과 협업을 통하여 한국의 아리랑 위성을 포함한 세계 각국의 빙권에 대한 위성 정보를 공급하는 대표 기관임<그림 2-12>.
- 주로 AMSRU (Advanced Microwave Scanning Radiometer Unified), AMSR2 (the Advanced Microwave Scanning Radiometer2), AMSR-E(the Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System Sensor), SSMI/SSMIE를 이용하여 북극과 남극의 해빙 분포 및 농도를 포함한 50종 이상의 정보를 제공하고 있으며, 빙권에 대한 다양한 연구 활동과 연계하여 전세계 빙권 정보의 중심 역할을 수행하고 있음<그림 2-13>.
- 그밖에 Nimbus-7 (SMMR 탑재), DMSP (SSM/I, SSMIS), NASA의 Aqua (AMSR-E), JAXA의 GCOM-W1 (AMSR2), ICESat-2 등의 위성 자료를 활용해 해빙 모니터링에 기여<그림 2-14>.

○ 미국 JPSS(The Joint Polar Satellite System)

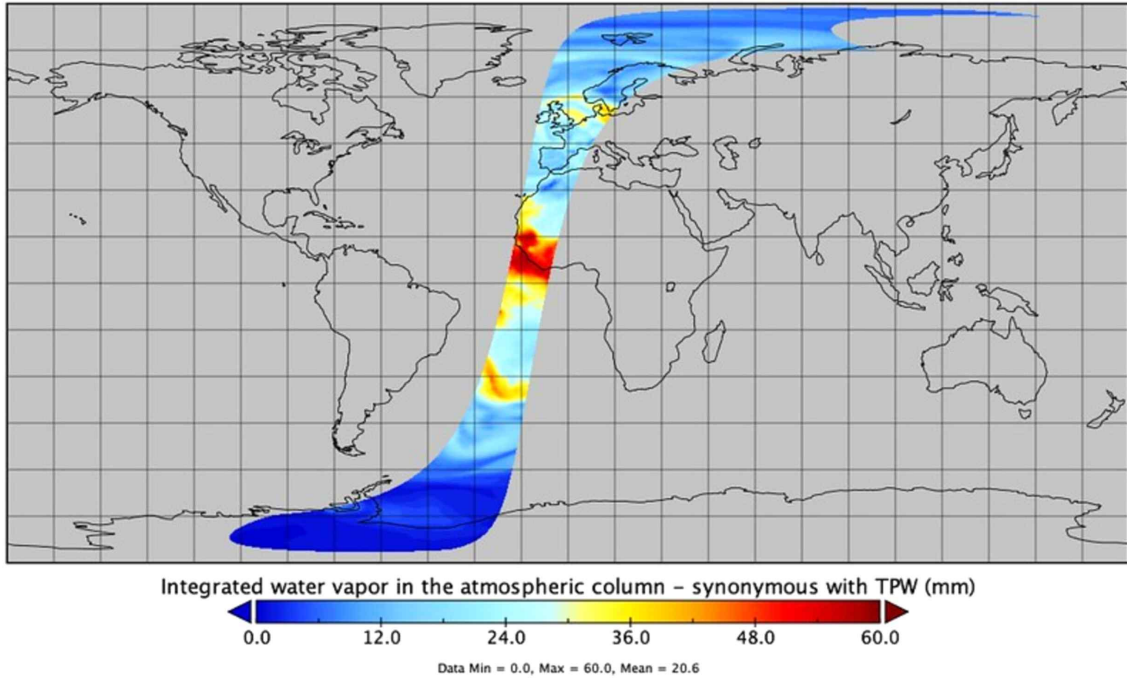
- 미국의 최신 극궤도(polar-orbiting), 비동기식(non-geosynchronous) 환경 감시 위성 시스템으로, 극지를 포함한 해빙 환경 데이터와 기후 모니터링에 활용되는 과학적 데이터를 제공함<그림 2-15>.
- 미국 해양대기청 NOAA (the National Oceanic and Atmospheric Administration)와 미국 항공우주국 NASA (the National Aeronautics and Space Administration)의 공동프로그램이며, 3-5개의 위성발사계획이 예정되어 있음.
- JPSS의 첫 번째 위성은 2011년 발사된 Suomi NPP 위성이며, 이어서 2017년에 발사된 위성이 JPSS-1이다. JPSS-1의 이름은 최종 궤도에 도달한 이후 NOAA-20으로 변경됨. 세 번째 위성은 2022년에 발사된 JPSS-2이며, 이어서 JPSS-3과 JPSS-4까지 후속 발사가 예정되어 2030년대까지 모니터링을 담당할 예정이다.
- JPSS 위성 시스템은 전지구 관측을 수행하며 빙권을 포함하여 태풍, 폭우, 폭설, 토네이도, 대형산불 등 여러 가지 위험 기상에 대한 예측을 위한 해·지면

관측 정보를 제공함.

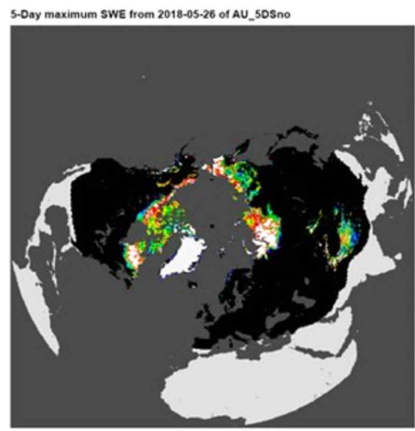
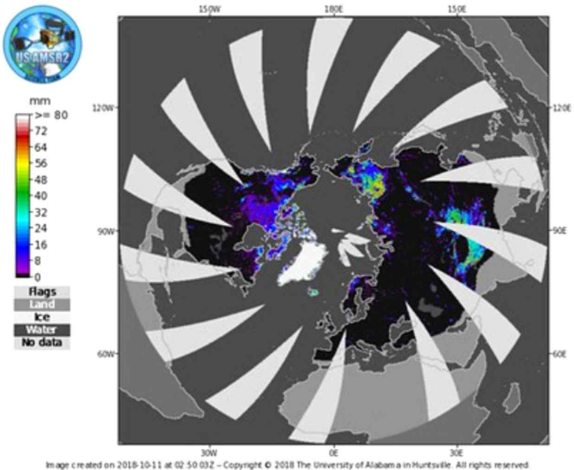


<그림 2-12> 미국 NASA의 NSIDC가 제공하는 북극 변화 위성 관측(SOAC; Satellite Observations of Arctic Change) 자료 예시. NSIDC는 위성 관측 시계열 자료를 대화형 지도로 변환하여 북극의 변화를 시각화하고 연구할 수 있도록 다양한 북극 빙권의 해빙 관련 물리량 정보를 제공하고 있음.

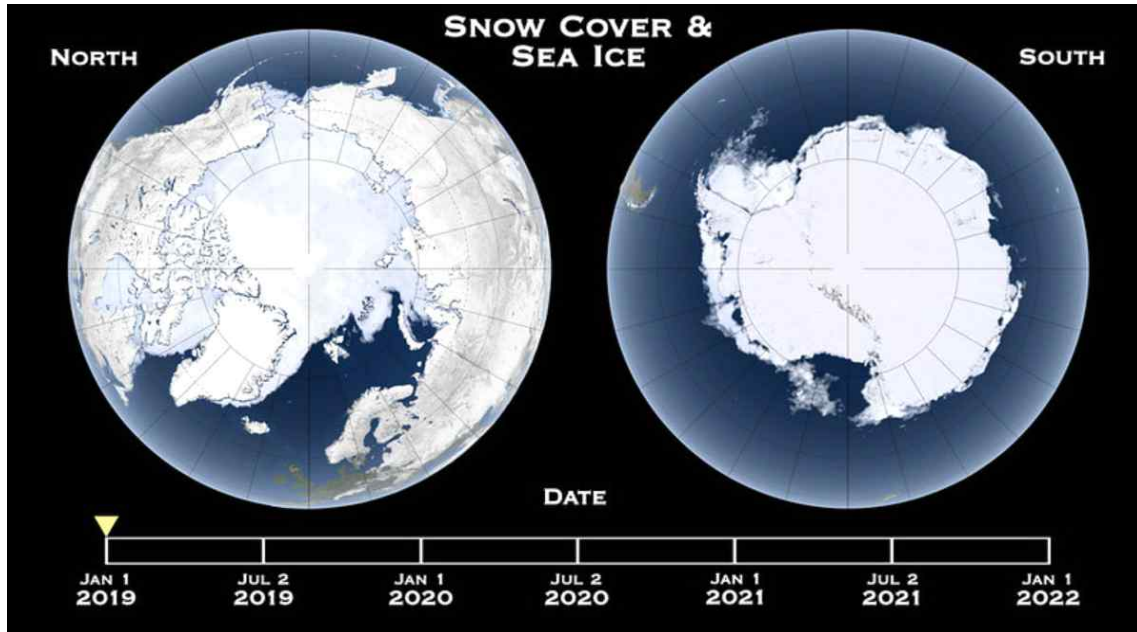
Integrated water vapor in the atmospheric column – synonymous with TPW



NASA GCOM-W1 AMSR2 - No. Hem. Snow Water Equivalent
 Desc. Passes - Daily
 Data from 2018-10-10 00:50:33Z to 2018-10-11 00:39:12Z



<그림 2-13> NSIDC의 DAAC (Distributed Active Archive Center)에서 제공하는 AMSRU (Advanced Microwave Scanning Radiometer Unified) 자료 중 위성 경로 상에서 누적하여 표시된 대기중 수증기 함량의 공간 분포 예시(위) 및 격자화된 극지의 토양 수분량 예시자료(아래).



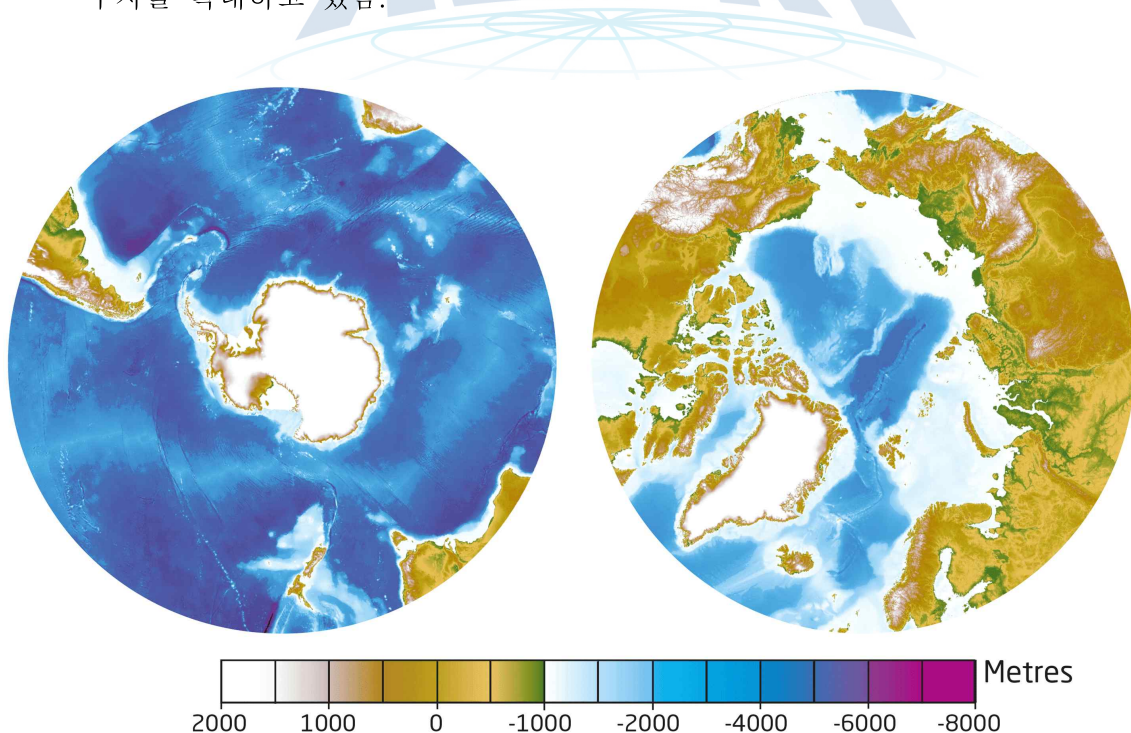
<그림 2-14> NASA의 ICESat-2 (Ice, Cloud and land ElevationSatellite-2) 위성으로부터 표시된 북극과 남극의 적설 범위와 해빙 면적 분포. NSIDC의 DAAC (Distributed Active Archive Center)를 통하여 확인할 수 있는 ICESat-2 위성 자료는 지구 표면의 경사와 높이를 해빙, 육상 얼음, 산림, 해수면 고도 등의 표면 자료를 제공함.

극지연구소

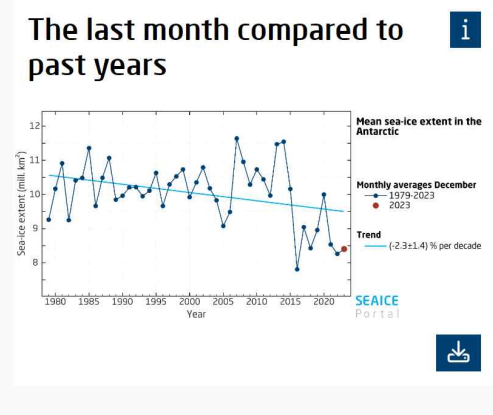
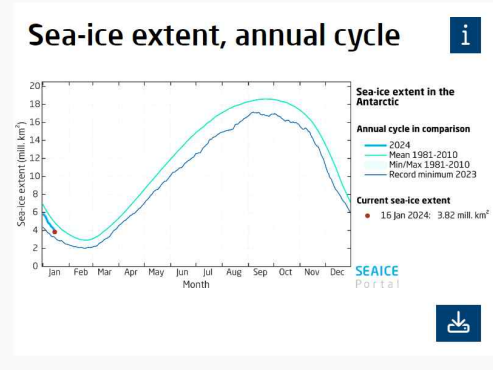
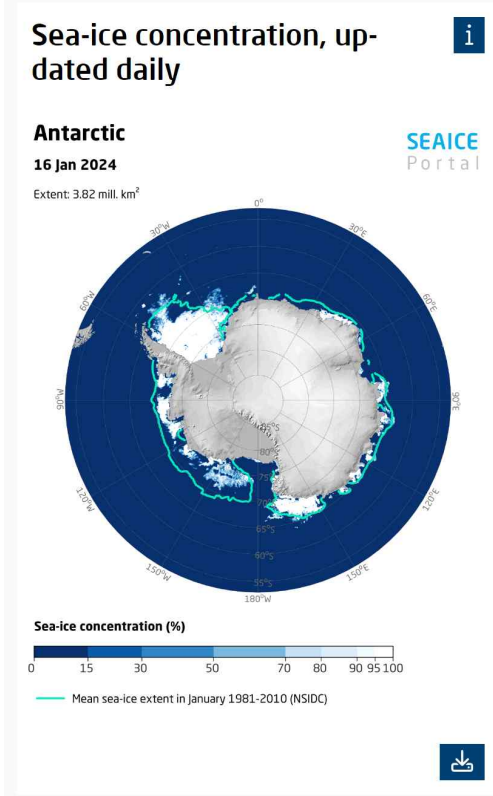
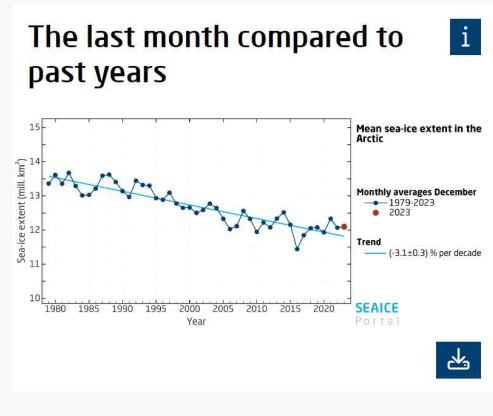
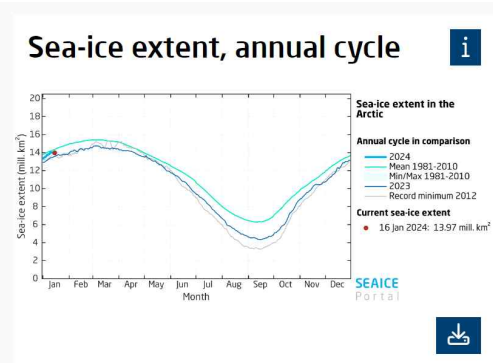
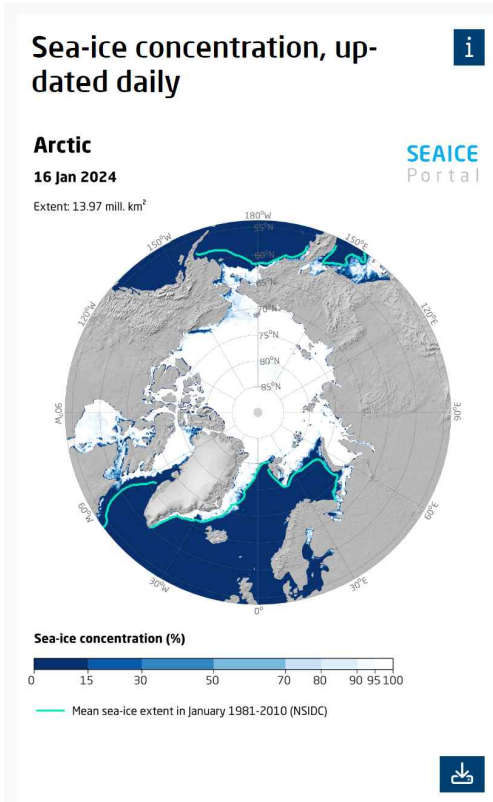


<그림 2-15> JPSS 위성 관측 시스템에 대한 정보개요도. JPSS는 미국의 최신 극궤도 비동기식 지면 관측 위성이며, 예보를 위한 기상 예측 수치모델에 사용되는 전 세계 환경 데이터와 기후모니터링에 사용되는 과학적 탐사 데이터를 제공함.

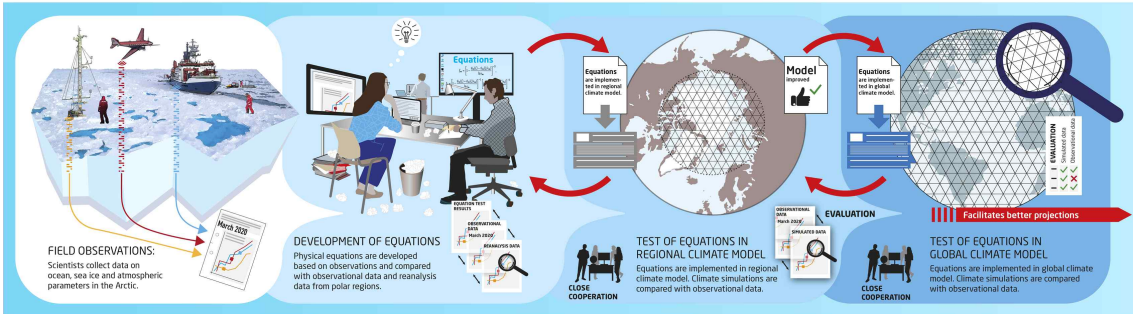
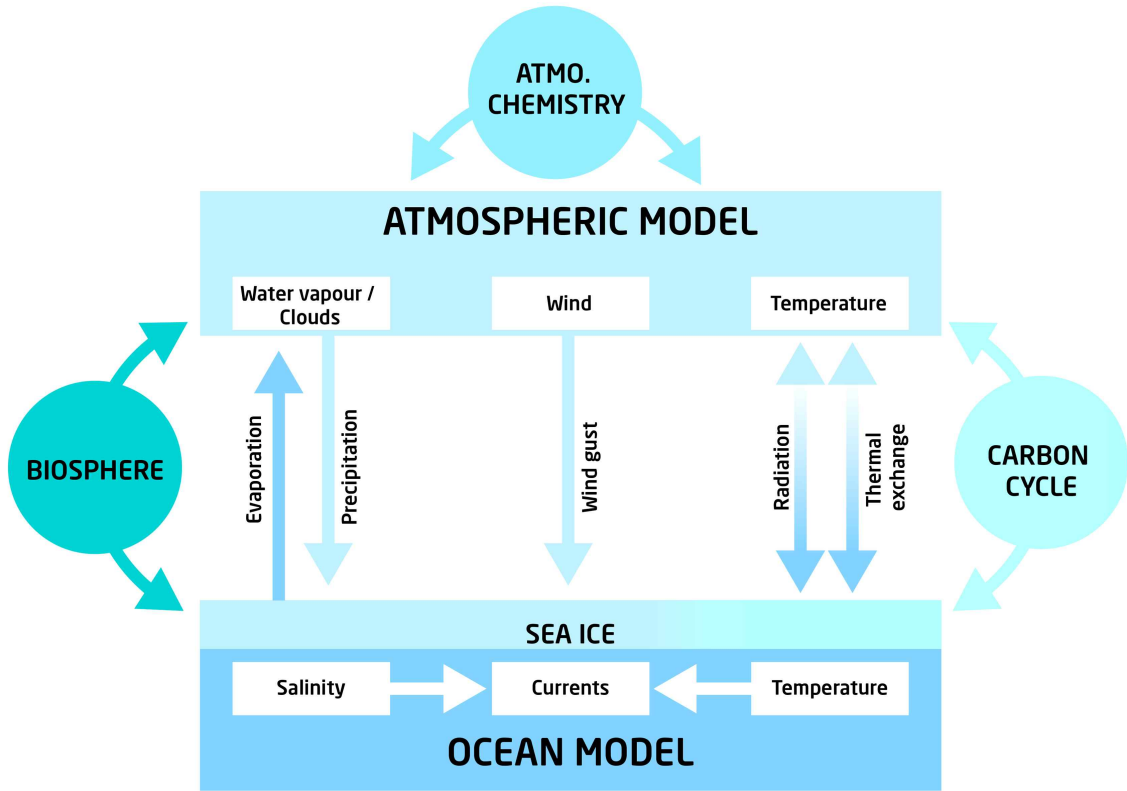
- 독일 AWI (Alfred-Wegener-Institute for Polar and Marine Research)
 - 독일의 극지 연구 담당기관으로써, AMSR2, AMSR-E, SSMIS, CryoSat-2, SMOS 자료 등을 이용한 극지역 위성 해빙 정보를 제공<그림 2-16>.
 - 웹기반 포탈 정보 시스템인 meereisportal.de를 통해 북극과 남극의 해빙정보를 공유하고 있음<그림 2-17, 18>.
 - AMSR2 (The Advanced Microwave Scanning Radiometer 2), AMSR-E, SSMIS 위성 관측 데이터를 활용하여 남·북극 위성 해빙 정보를 제공하며, CryoSat-2로부터 북극 해빙의 두께 정보를 제공하고, SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity)를 이용하여 남극과 북극의 해빙 두께 자료를 함께 제공함.
 - 헬름홀츠 연구소의 FRAM(FRontiers in Arctic marine Monitoring) 프로그램의 일환으로 해빙 관측을 위한 새로운 기술 개발 시도.
 - 새로운 무인 원격 탐사 장치, 해빙과 상층 해양의 다양한 물리 환경 및 생지화학적 특성을 지속적으로 모니터링하기 위한 자율 표류 부이 등을 포함.
 - 주도적인 극지 연구 활동을 수행하기 위해 지속적으로 환경 및 지구과학 연구 투자를 확대하고 있음.



<그림 2-16> 독일 AWI의 웹 기반 포탈 정보사이트(meereisportal.de)에서 제공하는 남극(좌)과 북극(우) 주변 해역의 해저 수심지형도.



<그림 2-17> 독일 AWI의 웹 기반 포털 정보사이트(meereisportal.de)에서 제공하는 북극(위)과 남극(아래)의 해빙 농도, 면적과 경년 변동성 시계열 예시자료.



<그림 2-18> 독일 AWI의 대기-해양-해빙 결합 기후모형(위)에서 다양한 현장 및 위성 관측 자료를 활용한 수치모형 최적화 개요도(아래).

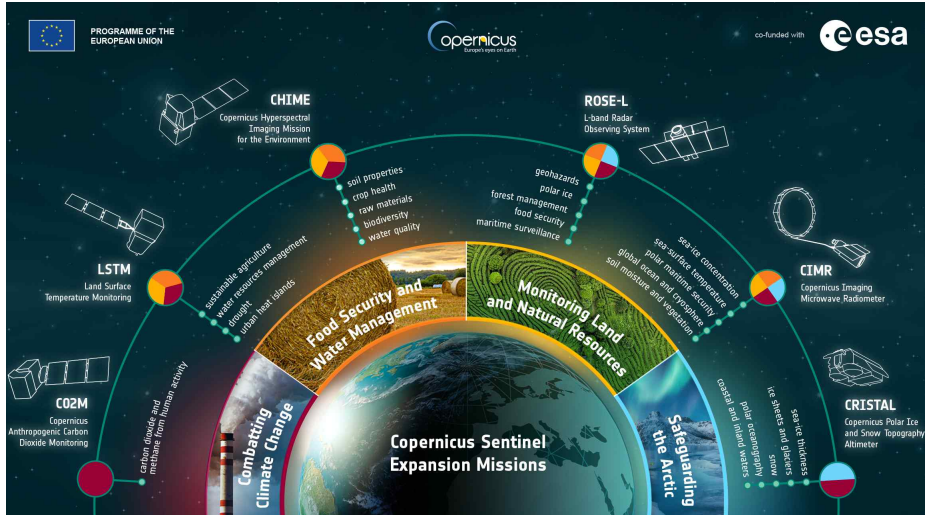
○ 유럽 연합

- INTAROS (International Arctic Observign System) 국제공동 북극관측시스템 창설. 유럽항공우주국(ESA; European Space Agency)의 Sentinel 위성시리즈 활용과 현장 관측을 포함하는 유럽연합의 지구관측 프로그램인 코페르니쿠스 프로그램과 연계하고 있으며, 한국의 극지연구소 원격탐사 연구팀도 참하며 INTAROS에서 국제 공동연구에 한국을 대표하여 파트너로서 역할을 수행하고 있음<그림 2-19>.
- 북극 지역의 기존 관측 시스템을 확장, 개선, 통합하여 통합 북극 관측 시스템 (iAOS; Integrated Arctic Observation System)을 개발
- 유럽항공우주국의 Sentinel 위성 시리즈 활용과 현장 관측을 포함하는 유럽연합의 지구관측 프로그램인 코페르니쿠스 프로그램과 연계<그림 2-20, 21, 22>
- 인공위성을 활용한 모니터링 과제에서 해빙 농도 및 기타 빙권 관련 물리량에 대한 검색 알고리즘을 개선하고 검증
- 고해상도의 해빙 농도 자료 제공과 얇은 해빙 두께에 대한 탐지 능력 개선, 해빙 유형에 대한 식별, 대규모 및 중규모 범위에서 해빙 유실 정보 제공.
- 유럽 연합은 그밖에 유럽우주국(The European Space Agency; ESA)에서 해빙 두께를 측정하기 위해 SIRAL (the Synthetic Aperture Interferometric Radar Altimeter)을 탑재한 CryoSat-2 위성을 활용하고 있음<그림 2-23, 24>.
- EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)은 해빙, 해면온도, 해상풍속을 모니터링 하는 Meteosat과 Metop 위성의 데이터를 제공. EUMETSAT은 전 세계 해양 데이터 제공을 위해 회원국 및 코페르니쿠스 해양환경 모니터링 서비스 (the Copernicus Marine Environment Monitoring Service; CMEMS)와 협력.
- 코페르니쿠스 해양환경 모니터링 서비스(CMEMS)는 유럽연합의 지속적인 극지 기후 모니터링 및 연구를 위해 설계된 프로그램으로써, CIMR (the Copernicus Imagin multi-frequency Microwave Radiometer)과 CRISTAL (the Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter)을 추가 발사할 예정이다

- 유럽의 공동연구 체제로 운영중인 Polar View (polarview.org)는 17개국 80개 이상의 파트너로 구성된 극지 위성관측 다국적 컨소시엄으로서, 유럽항공우주국 ESA와 캐나다 우주국 CSA (Canadian Space Agency)과의 공동연구를 통해 지구환경 모니터링 프로그램으로 출발하여 2011년 영국 polar View Earth Observation Ltd.로 공식 출범함.
- Polar View는 적설량과 해빙 면적, 해빙 두께, 그리고 빙상과 빙하 분포 등 극지의 빙권에서 일어나는 변화를 인공위성과 현장 관측을 모니터링하고, 사용자 각자의 요구 사항에 따라 쉽게 후처리하여 사용할 수 있도록 다양한 형태로 자료를 제공함.



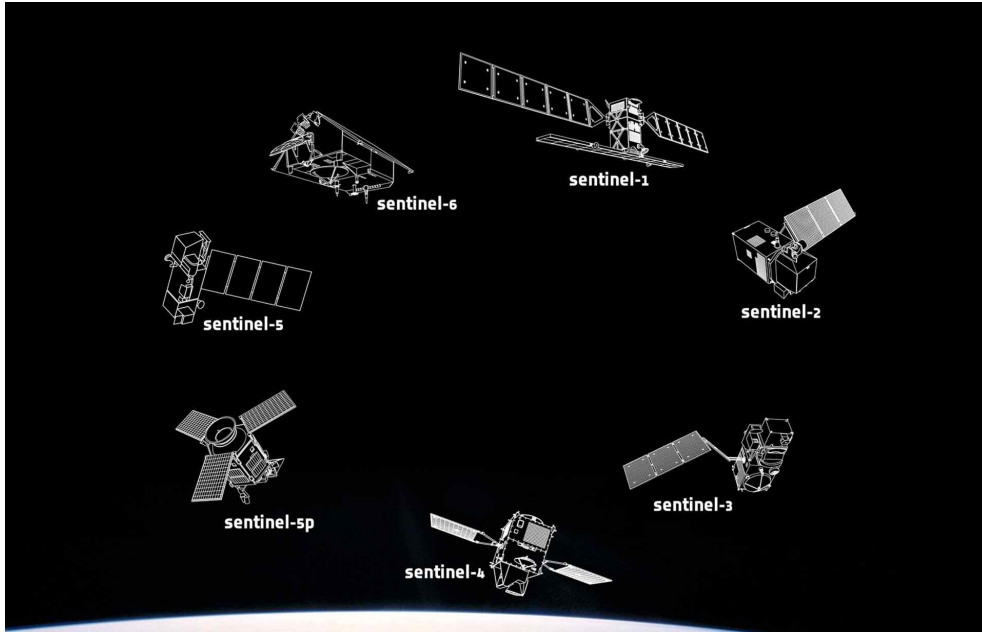
<그림 2-19> 통합북극관측시스템(INTAROS; International Arctic Observing System)의 주요 멤버. 한국 극지연구소는 2017년 이후 아시아의 주요 연구 협력 멤버로서 활동하고 있음.



<그림 2-20> 유럽 코페르니쿠스의 6가지 주요 확장 임무 개념도. CHIME(Copernicus Hyper-spectral Imaging Mission for the Environment), CIMR(Copernicus Imagine Microwave Radiometer), CO2M (Copernicus Anthropogenic CarbonDioxide Monitoring), CRISTAL(Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter), LSTM(Land Surface Temperature Monitoring), ROSE-L (L-Band Radar Observing System).



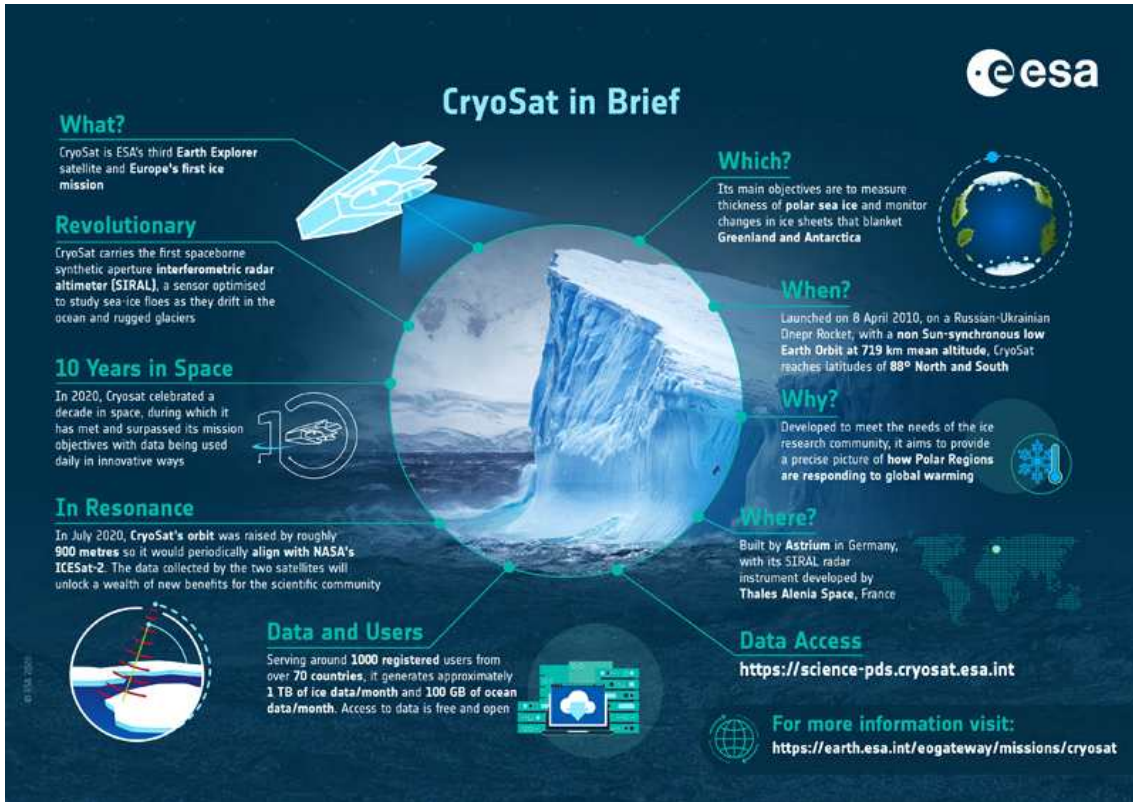
<그림 2-21> 유럽항공우주국 ESA에서 개발·운영중인 지구 관측 임무를 위한 위성탐사 체계. Sentinel 위성 시리즈는 코페르니쿠스의 기후변화, 지면과 해안 모니터링, 온도 변화, 산불, 농업, 재난재해 모니터링 등을 위한 현업 운용 체계를 위하여 개발됨.



<그림 2-22> Sentinel 위성 시리즈는 향후 수십 년 동안 현업운용을 통하여 다양한 관측 자료를 제공하는 데 중점을 두고 있으며, 다양한 최첨단 기술이 적용되어 유럽의 환경 모니터링 Copernicus 프로그램의 요구에 맞는 이미지와 상세 자료를 제공함.



<그림 2-23> CryoSat-2는 ESA의 여러 가지 지구 탐사 임무 중 하나로, 극지방 해빙의 변화를 모니터링함. 주요 기기는 SIRAL (SAR Interferometer Radar Altimeter)이라는 레이더 고도계로 지면과 해빙 빙상의 두께를 모니터링함.



<그림 2-24> 2020년 CryoSat 미션의 10주년 기념 제작된 CryoSat의 주요 임무와 성과에 대한 정보 개요도.

○ 원격탐사 기반 해빙 추적 연구 진행과 관련하여 해빙추적기술은 원격탐사자료와 부이, ITP 등을 활용한 연구가 진행되어 왔음.

- Emery *et al.* (1997)은 1988년부터 1994년까지의 평균적인 해빙이동을 계산하는 데에 일별 SSM/I 센서(12.5km 해상도)와 부이(0.5km 해상도) 자료를 활용하였으며, 비교적 해빙/유빙 움직임이 적은 겨울에 한해 높은 정확도를 보임.
- Plueddemann *et al.* (1998)는 보퍼트 환류의 표층 유속 구조를 파악하기 위해 장기 표류 붕이에 탑재된 ADCP의 자료를 분석하여 지름 20 km 정도의 와류(eddy)에서 평균 0.05-0.1 m/s의 해류 속도 관측.
- Timmernans *et al.* (2008)은 유빙에 설치된 ITP 자료를 이용하여 보퍼트 환류에서 이동하는 유빙의 움직임을 분석하여 와류가 형성되는 해역의 특성과 형성 요인에 대해서 분석.
- 해빙/유빙의 추적연구의 일환으로 Lavergne *et al.* (2010)이 제시한 motion tracking 방법은 Continuous Maximization of the Cross-Correlation (CMCC) 로, 다수의 위성영상에 적용되는 MCC방법으로부터 연속적으로 추적하는 방

법 제시.

- 위성영상으로 AMSR-E (37 GHz)와 SSMI (85 GHz), ASCAT (C 밴드 후방 산란)을 사용하였고 각 2006 - 2007, 2007 - 2008, 2008 - 2009년 10월에서 5월 사이의 기간에 대해 연구를 수행함. 후에 ITP에 부착된 GPS 센서의 관측 자료로 검증 시도.



제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 북극해 최적화 해빙 이동장 자료 생산

1. 북극해 해빙 수치모델 초기 입력장

○ 수치모델 구축 및 해빙 자료 수집

- 북극해빙 이동의 재현을 위하여 지역규모 해양순환 수치모델 Regional Ocean modeling System (ROMS)와 해빙 이동 수치모델 Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (CICE)이 결합된 수치모델을 이용하여 구축하였다<그림 3-1>.
- ROMS 해양순환 수치모델은 시·공간상의 해류 분포와 수온, 염분, 해수면 고도 등의 스칼라량에 대한 시간·공간 간격 사이의 변화량을 해석하며, 아래의 지배방정식, 이류-확산 방정식, 상태방정식, 그리고 연속방정식에 대한 수치해석을 수행한다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{v'w'} - \nu \frac{\partial u}{\partial z}) + F_u + D_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + fu = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z}(\overline{v'w'} - \nu \frac{\partial v}{\partial z}) + F_v + D_v \quad (2)$$

- 벡터량인 해류 분포와 달리 수온, 염분, 영양염 등 스칼라농도의 시간에 따른 변화를 결정짓는 힘의 균형은 운동량 균형에서 압력경사와 전향력을 제외하고 다음과 같이 표현한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = -\frac{\partial}{\partial z}(\overline{C\omega'} - \nu_\theta \frac{\partial C}{\partial z}) + F_C + D_C \quad (3)$$

- 해양순환모델에서 밀도와 역학고도는 산정된 수온, 염분, 압력을 이용하여 비선형 상태방정식을 계산함으로써 산정한다.

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (4)$$

- Boussinesq 근사를 적용할 때, 운동량 균형에서 수평 공간상 밀도 변화로 인한 외력은 제외되며, 정역학 균형(hydrostatic balance)를 적용하면 연직 방향의 압력 경사는 부력(buoyancy force)와 정확히 균형을 이룬다

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \quad (5)$$

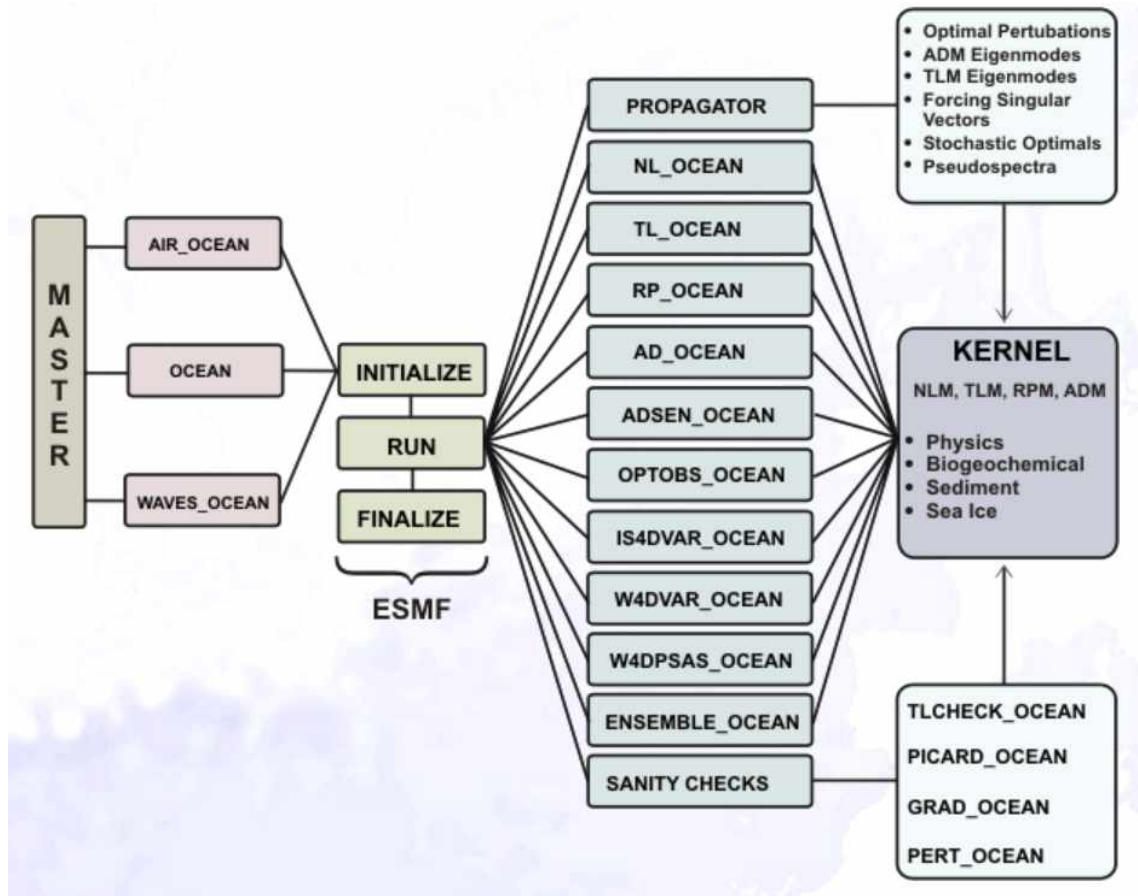
- 마지막으로 비압축성 유체의 가정을 통하여 수평 공간상의 해류 유입·유출은 수직 흐름을 통하여 완벽하게 보상된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

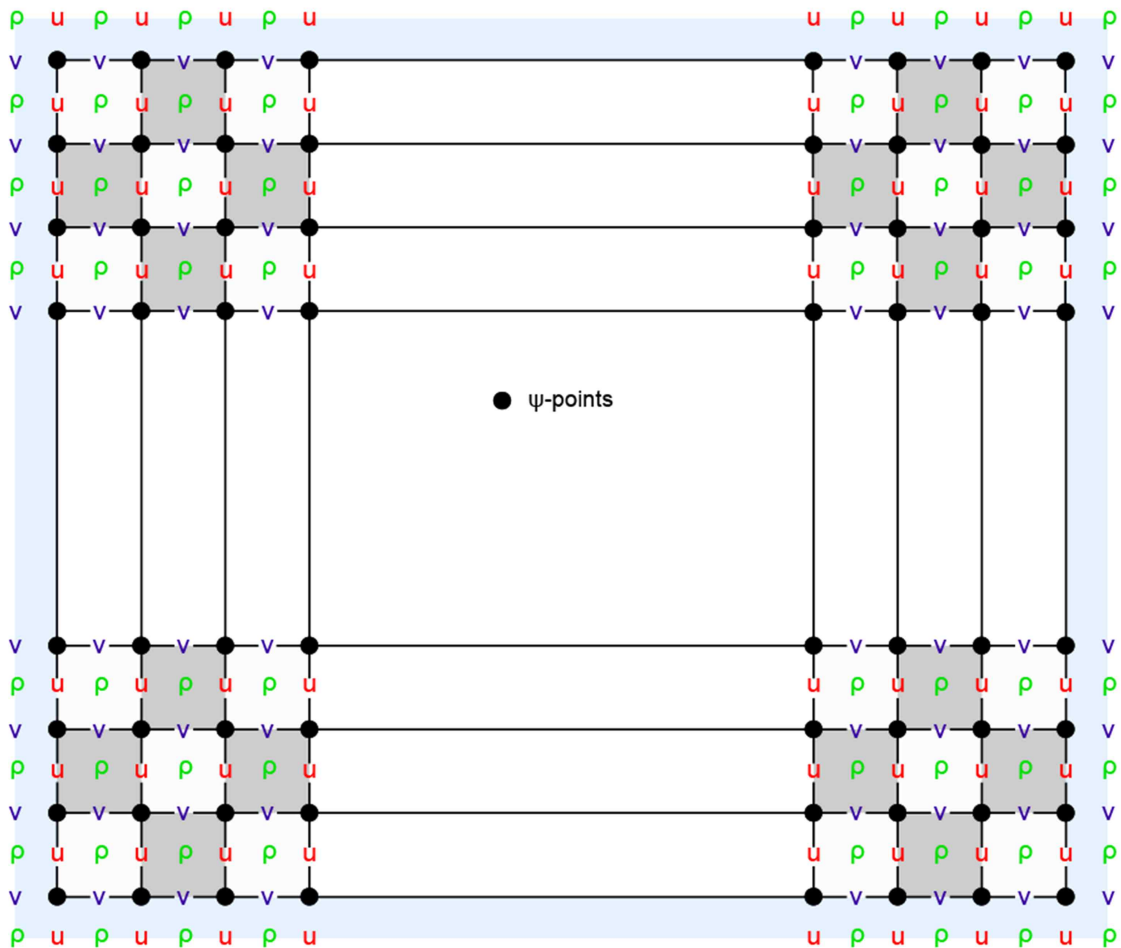
- 수식 (1)의 우항에 표시된 F 와 D 는 각각 외력과 확산·점성항을 나타낸다. ROMS 해양순환모델에서 사용되는 주요 변수에 대한 정보는 <표 3-1>에 제시하였다.

<표 3-1> ROMS 해양모델에 사용되는 변수 설명

변 수	설 명
$C(x, y, z, t)$	수온, 염분, 영양염 등 스칼라 량
D_u, D_v, D_C	수평 확산 및 점성항
F_u, F_v, F_C	외력항
$f(x, y)$	코리올리
g	중력 가속도
$h(x, y)$	평균 해수면으로부터 해저면까지의 깊이
$H_z(x, y, z)$	수직 격자간 거리 (수직 레이어의 두께)
ν, ν_θ	분자 점성 및 확산 계수
K_M, K_C	수직 와동 점성 및 확산 계수
P	압력 $P \approx -\rho_0 g z$
$\Phi(x, y, z, t)$	역학 압력 $\Phi = (P/\rho_0)$
$\rho_0 + \rho(x, y, z, t)$	현장 밀도
$S(x, y, z, t)$	염분
t	시간
$T(x, y, z, t)$	잠재 수온
u, v, w	유속 \vec{v} 의 (x, y, z) 성분
x, y	수평 격자
z	수직 격자
$\zeta(x, y, t)$	해수면 높이



<그림 3-1> Regional Ocean Modeling System (ROMS) 지역규모 해양수치모델 시스템의 구조도(<https://www.myroms.org/>)



<그림 3-2> ROMS의 수평 격자계 설정을 위해 채택하고 있는 Arakawa-C 격자계 모식도(myroms.org)

- ROMS는 해저면의 굴곡을 반영한 수직 표준 격자계를 사용하기 때문에, 지배 방정식의 좌표계 변환이 필요하다. 표준화된 연직층(σ)은 -1에서 0까지의 범위로 평활화한다. σ 가 0일 때, 표층 σ 가 -1인 경우에 바닥층에 해당하며 층 사이의 간격은 아래와 같이 정의한다.

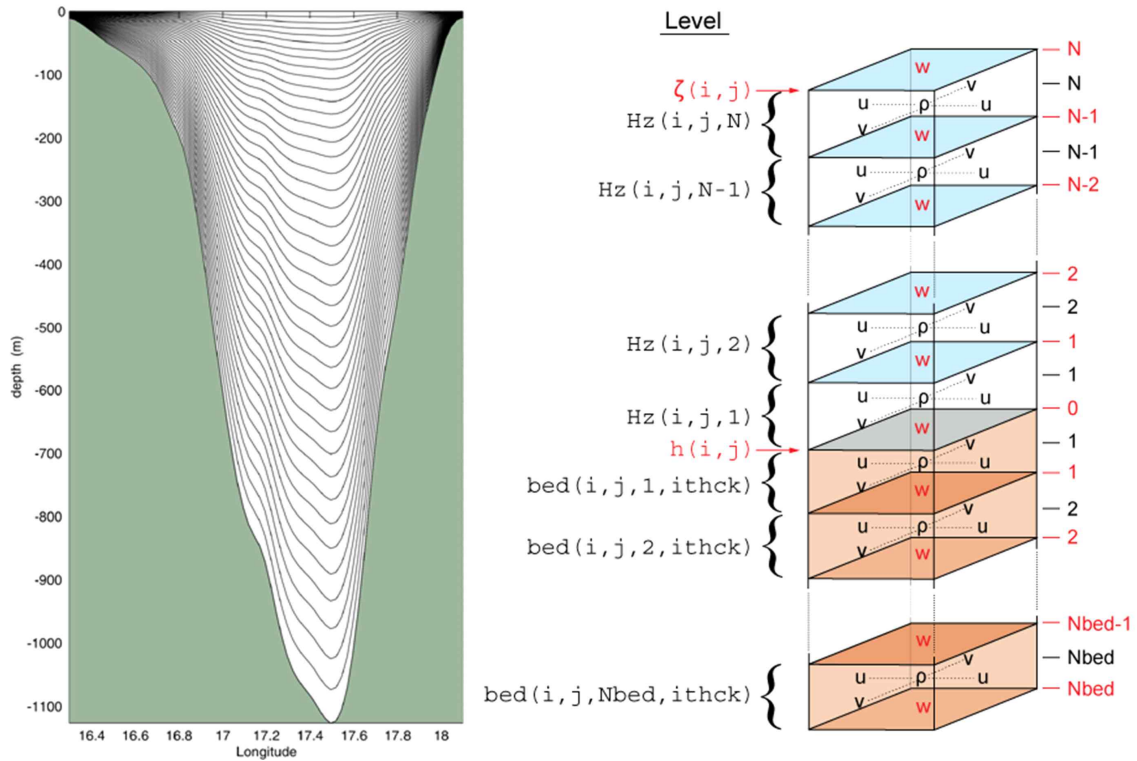
$$H_z \equiv \frac{\partial z}{\partial \sigma} \quad (7)$$

- ROMS는 지역규모 해양모델링에서 고려해야하는 복잡한 해안선과 수평 경계 인근의 소규모 변동성을 모의하기 위해서 선택적으로 수평 공간 해상도를 조절할 수 있는 격자계를 사용한다. 이러한 수평 가변 격자를 고려하기 위하여 m 과 n 의 조절자(scale factor)를 적용하여 수평 방향에 대한 스케일링을 적용한다. m 과 n 은 각각 Δx 와 Δy 의 역수에 해당한다. 수평 공간 스케일링을 적

용한 스칼라량의 이류-확산 방정식(식 (3))은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{H_z C}{mn} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u \overline{H_z^x C^x}}{\bar{n}} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v \overline{H_z^y C^y}}{\bar{m}} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{w \overline{H_z C^z}}{mn} \right) \\ = \frac{1}{mn} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K_m + \nu_\theta}{H_z} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \frac{H_z}{mn} (F_C + D_C) \end{aligned} \quad (8)$$

- 여기서 $u \overline{H_z^x C^x} / \bar{n}$ 는 인접 격자의 단면을 통하여 유입유출되는 flux에 해당하며, m 과 n 이 격자 간격의 역수에 해당하므로 H_z/mn 는 격자의 부피를 의미한다.



<그림 3-3> ROMS의 연직 격자계 설정을 위한 σ 좌표계 설정 예시. ROMS의 지배방정식은 수평 공간상에서 가변적인 해지면 수심지형의 굴곡을 반영하는 격자계를 채택함에 따라, 각 격자셀은 수심에 따라 두께와 부피가 달라질 수 있음 (mvroms.org).

2. 북극해 해빙 수치모델 구축

○ 해빙 수치모델 개요

- 북극해빙 이동의 재현을 위하여 해양순환 수치모델 ROMS에 결합된 해빙 이동 수치모델 Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (CICE)을 활용하였다.
- 해빙 수치모델의 운동량 방정식은 코리올리힘, 해면 경사, 표면 마찰력, 내부 마찰력 등에 의해 발생하는 해빙과 눈의 유속 변화를 설명한다. 여기서는 비선형 이류항과 내부 해빙 마찰력의 곡률 항 성분 등은 무시된다.

$$M \frac{\partial u}{\partial t} = Mfv - Mg \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \tau_a^x + \tau_w^x + F_x \quad (9)$$

$$M \frac{\partial v}{\partial t} = -Mfu - Mg \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \tau_a^y + \tau_w^y + F_y \quad (10)$$

- 해양-해빙 및 대기-해빙 경계면 마찰력 산정을 위해서 아래와 같은 비선형 방정식을 사용한다.

$$\vec{\tau}_a = \rho_a C_a \left| \vec{V}_{10} \right| \vec{V}_{10} \quad (11)$$

$$C_a = \frac{1}{2} C_d [1 - \cos(2\pi \min(h_i + 0.1, 0.5))] \quad (12)$$

$$\vec{\tau}_w = \rho_w C_w \left| \vec{v}_w - \vec{v} \right| (\vec{v}_w - \vec{v}) \quad (13)$$

- 해빙 내부 마찰력에 의한 힘은 마찰 장력 σ 의 발산(divergence)으로부터 산정한다.

$$\sigma_{ij} = 2\eta \epsilon_{ij} + (\zeta - \eta) \epsilon_{kk} \delta_{ij} - \frac{1}{2} P \delta_{ij} \quad (14)$$

$$\epsilon_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

$$P = P^* A h_i e^{-C(1-A)} \quad (16)$$

- 비선형 점성항 ζ 은 아래와 같이 산정한다.

$$\zeta = P/2[(\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{22}^2)(1 + 1/e^2) + 4e^{-2}\epsilon_{12}^2 + 2\epsilon_{11}\epsilon_{22}(1 - 1/e^2)]^{1/2} \quad (17)$$

$$\eta = \frac{\zeta}{e^2} \quad (18)$$

- 해빙의 유동 속도 성분이 산정되면, 해빙과 관련된 스칼라량의 이류항이 MPDATA 스킴을 바탕으로 산정된다. 해빙 스칼라량은 해빙 두께, 농도, 눈 두께, 해빙 내부 온도, 그리고 표면 용해 연못(melt pond) 등이 해당한다. 연속 방정식은 스칼라량의 발달 과정을 묘사하며, 열역학 항(S_h , S_s 그리고 S_A) 등을 포함한다.

$$\frac{\partial Ah_i}{\partial t} = -\frac{\partial(uAh_i)}{\partial x} - \frac{\partial(vAh_i)}{\partial y} + S_h + D_h \quad (19)$$

$$\frac{\partial Ah_s}{\partial t} = -\frac{\partial(uAh_s)}{\partial x} - \frac{\partial(vAh_s)}{\partial y} + S_s + D_s \quad (20)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{\partial(uA)}{\partial x} - \frac{\partial(vA)}{\partial y} + S_A + D_A, \quad 0 \leq A \leq 1 \quad (21)$$

- 식 (19-20)은 해빙과 눈의 보존을 나타내며, 식 (21)은 리징(ridging)과 같은 현상이 일어나지 않는 외해에서 얼음블록(ice blocks) 이류항을 나타낸다.

- 해빙 수치모델의 열역학 과정은 해표면, 해저면, 해빙 측면 등에서 얼마나 많은 해빙이 성장하고 용융하는 지를 산정하는 과정에 기반한다. 해빙 스칼라량의 이류항이 산정되면, 해빙의 농도와 두께가 아래 수식의 우항에 의거하여 시간에 따른 차분이 수행된다.

$$\frac{DAh_s}{Dt} = \frac{\rho_o}{\rho_i} [A(W_{io} - W_{ai}) + (1 - A)W_{ao} + W_{fr}] \quad (22)$$

$$\frac{DA}{Dt} = \frac{\rho_o A}{\rho_i h_i} [\Phi(1 - A)W_{ao} + (1 - A)W_{fr}], \quad 0 \leq A \leq 1 \quad (23)$$

- 열역학 수식의 항 Ah_i 은 유효 두께(effective thickness)로 해빙의 체적을 측정할 수 있다. 이 항의 성장과 관련된 방정식은 간략하게 해빙의 양의 변화를 정량화하여 나타낸다.

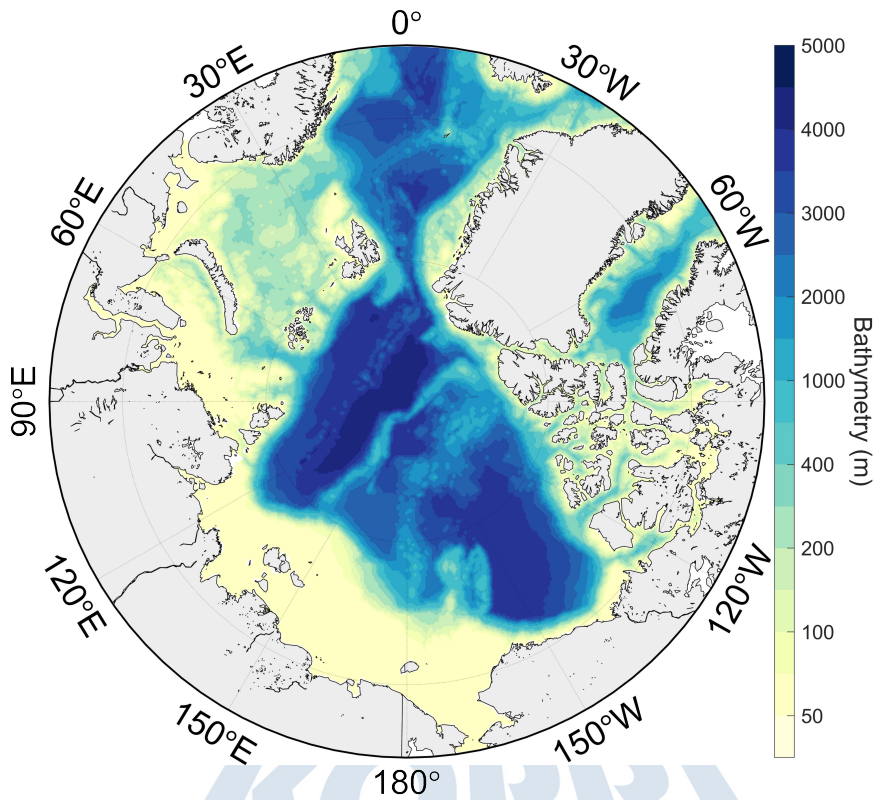
-

<표 3-2> CICE 해빙모델에 사용되는 변수 설명

변 수	설 명
$A(x, y, t)$	해빙 농도
$\alpha(A)$	ridging 함수
C_a	비선형 대기 끌림 계수
C_d	대기 끌림 계수
C_w	해수 끌림 계수
D_h, D_s, D_A	확산항
δ_{ij}	크로네커 델타 함수
g	중력 가속도
e	수익률 곡선의 이심률
$h_i(x, y, t)$	해빙 두께
$h_s(x, y, t)$	눈 두께
$M(x, y, t)$	해빙 질량 (밀도와 두께의 곱)
$P(x, y, t)$	해빙 압력 혹은 상당의 힘
S_h, S_s, S_A	열역학 항
$\sigma_{ij}(x, y, t)$	마찰 장력
$\vec{\tau}_a$	대기 마찰력
$\vec{\tau}_w$	해수 마찰력
\vec{V}_{10}	10m 고도 풍속
\vec{v}_w	표층 해수 유속
ρ_a	공기 밀도
ρ_w	해수 밀도
$S(x, y, z, t)$	염분
$\zeta(x, y, t)$	비선형 점성항
$\zeta_w(x, y, t)$	해표면의 높이

○ 수치모델 격자 구성 및 상세 설정

- 수치모델의 격자의 해상도는 수평적으로 약 20km 간격으로 300×300개 격자로 구성하였으며 수직적으로 20개 층으로 구성하였다 <그림 3-4, 표 3-3>. 모델 구축에 사용된 수심자료는 General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)에서 제공하는 수평해상도 15초 격자형 수심 자료를 이용하였다 (<https://www.gebco.net/>) <그림 3-5, 6>.
- 2020년 북극의 해빙 이동 예측자료 생산을 위한 수온, 염분, 해류, 해수면 높이 등 초기조건과 개방경계조건은 the global ocean eddy-resolving reanalysis (GLORYS12) 자료를 내삽하여 적용하였으며, 2020년 1월 1일부터 12월 31일까지의 월평균 자료를 이용하였다 (<https://www.mercator-ocean.eu/en/ocean-science/glorys/>).
- 해빙 수치모델의 초기조건인 Ice fraction, Ice thickness, Ice velocity 등 GLORYS12 자료를 이용하였다<그림 3-7, 8>.
- 수치모델 개방경계에서 조석은 TPXO Global Tidal Models로부터 얻은 M2, S2, O1, K1 N2, K2, P1, Q1, Mf, Mm 10개 분조의 조위와 조류 자료를 이용하였다<그림 3-9> (<https://www.tpxo.net/home>).
- 수치모델에서 표면경계조건으로 적용되는 기상외력자료(기온, 기압, 상대습도, 바람 등)는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF; <https://cds.climate.copernicus.eu/>)에서 제공하는 ERA5의 월평균 자료를 이용하였다<그림 3-10>.
- ERA5는 ECMWF에서 제작한 가장 최신의 기후규모 재분석 결과이며, 대기, 토양-해양, 해표면 정보 등을 불확실성 정량 평가 결과와 함께 시간 간격으로 제공한다.
- ERA5는 위·경도 모두 정간격으로 약 1/4° 해상도의 격자로 제공되며, 1940년의 정보부터 계속해서 업데이트하고 있으며 실제시간의 5일 전 정보까지 제공하고 있다(<https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>).
- 수치모델을 활용한 북극 해빙 이동 재현 실험을 위하여 2020년 한 해를 대상으로 모의하였고, 수치모델의 안정화 및 적용을 위하여 30년 기후 평균값을 활용하여 Spin-up을 2년간 진행하였다.



<그림 3-4> 북극 해역 수치모델 도메인과 해저지형도

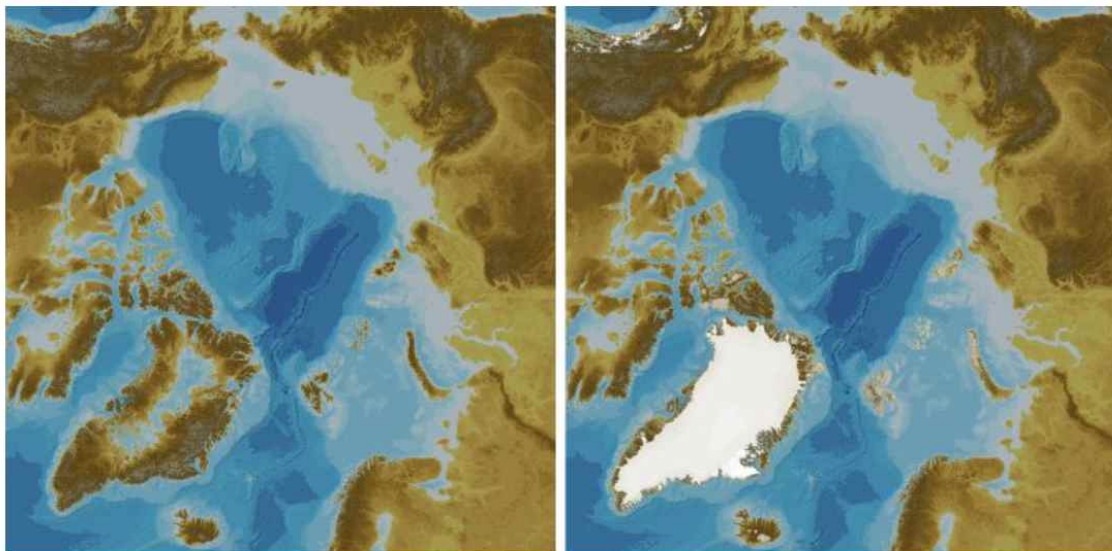
<표 3-3> 북극 수치모델 구축 방법

수치모델 도메인	
범위	경도 0° - 360°, 위도 65° - 90°
해상도	13 - 21 km
격자 개수	300 × 300, 20 Layer
차분 간격(s)	180 s
물리 계수(Parameter)	
수평 혼합	Harmonic (20.0 m ² /s)
해저층 마찰력	Quadratic bottom drag (2.5×10 ⁻³)
연직 혼합 모수화	KPP (LMD) mixing
수괴 타입	1 (Open Ocean)
초기 및 수평 경계조건	
초기 조건	GLORYS12 (the global ocean eddy-resolving reanalysis)
수평 경계 조건	GLORYS12 (the global ocean eddy-resolving reanalysis)
조석	TPXO 7 Atlas (M ₂ , S ₂ , K ₁ , O ₁ 등 10분조)
표면 대기외력장	
대기 외력	ECMWF ERA5 (Monthly data in 2020)
수치 실험 기간	
안정화(Spin-up)	30년 기후평균값, 2년 수행
실험기간	2020/01/01 - 2020/12/31

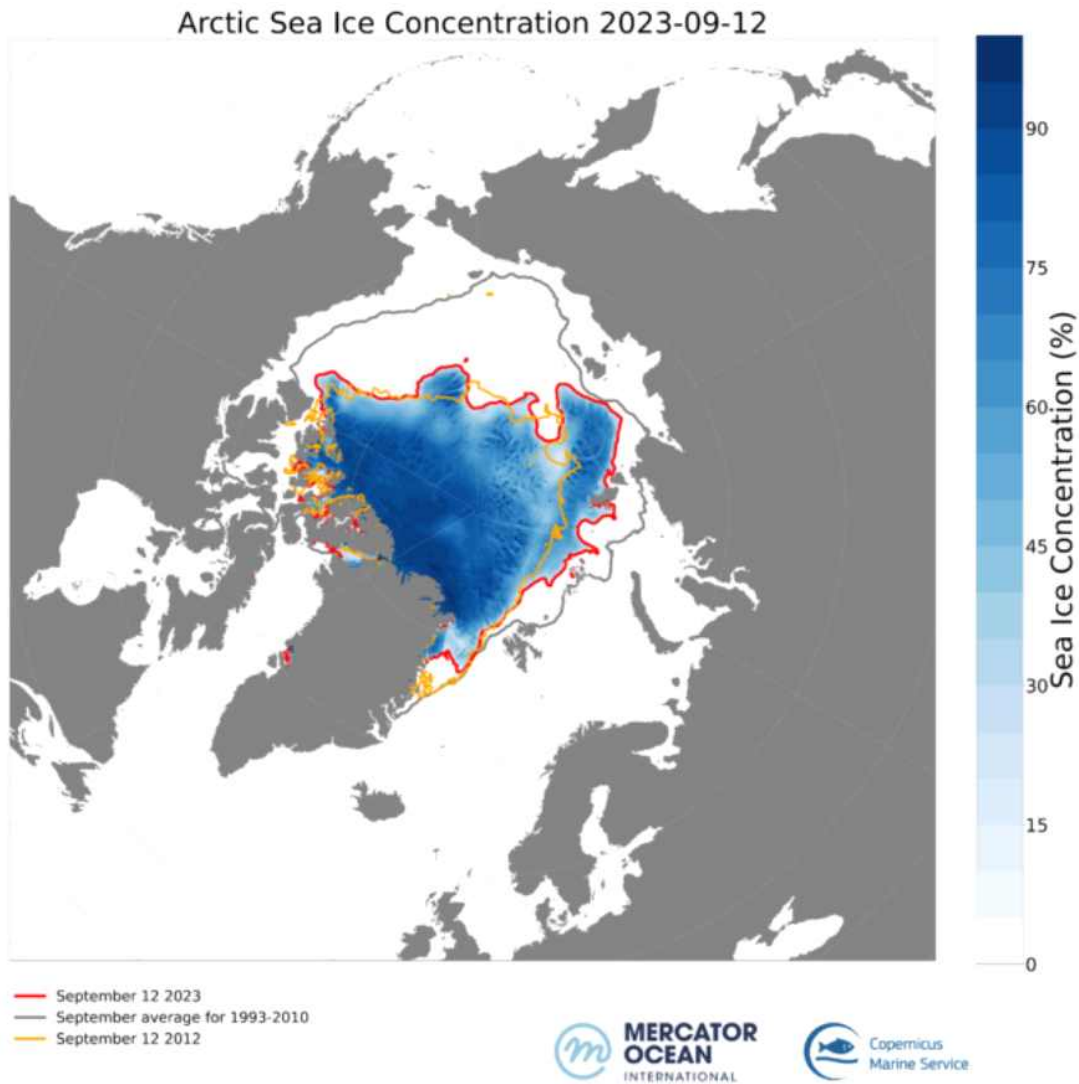


<그림 3-5> GEBCO 전지구 수심자료 배포 웹페이지

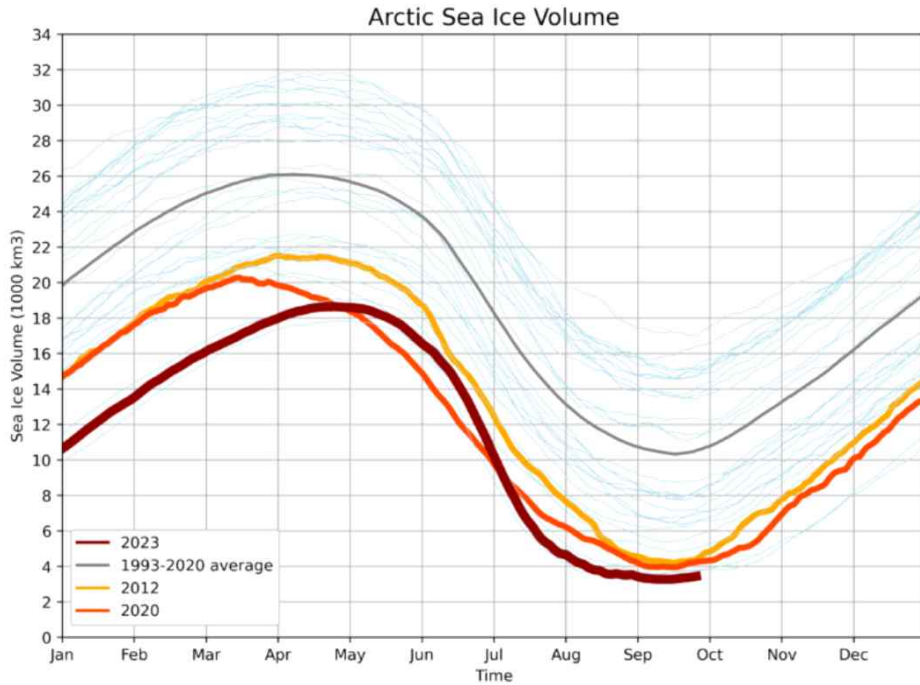
International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO)



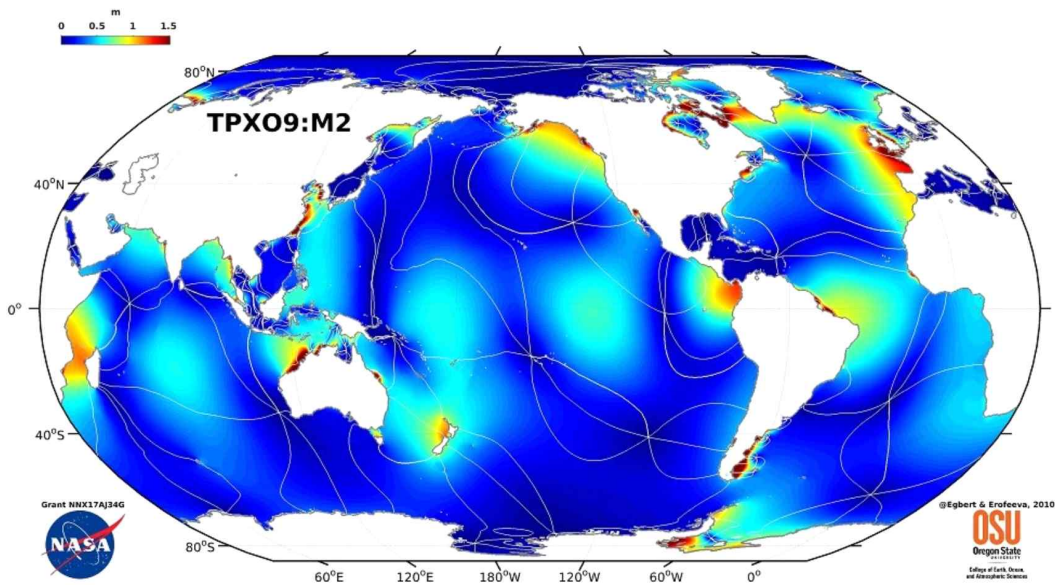
<그림 3-6> GEBCO에서 제공하는 북위 64° 이상의 수심 디지털 자료 예시도



<그림 3-7> GLORYS12의 재분석과 예측장을 바탕으로 표현한 해빙 농도
 예시자료. 붉은 실선은 2023년 9월 12일의 북극 해빙 농도, 주황색은 2020년
 그리고 회색은 1993-2010년 기간동안의 장기 평균치를
 나타냄([https://www.mercator-ocean.eu/en/news/arctic-sea-ice-minimum-septem-
 ber-2023/](https://www.mercator-ocean.eu/en/news/arctic-sea-ice-minimum-september-2023/)).

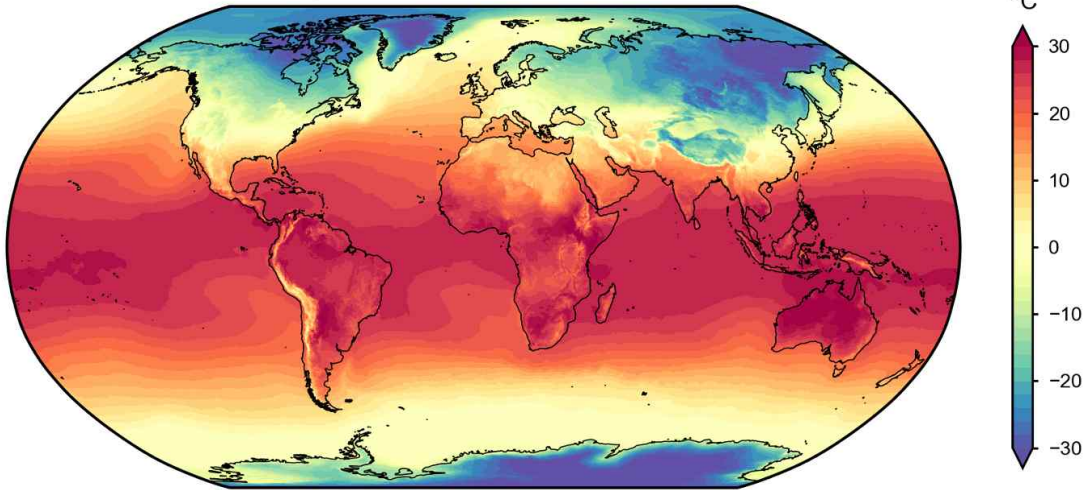


<그림 3-8> GLORYS12의 재분석과 예측장을 바탕으로 산정한 1993-2023년 기간동안 북극 해빙 부피의 변화 (<https://www.mercator-ocean.eu/en/news/arctic-sea-ice-minimum-september-2023/>).

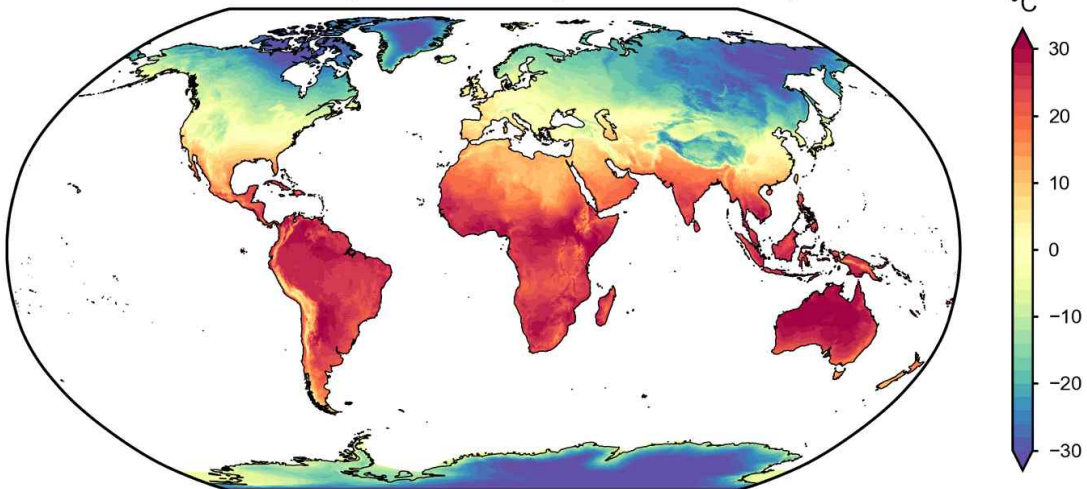


<그림 3-9> TPXO의 전지구 M2 분조의 등조차선 및 조차 분포 예시.

ERA5 monthly mean 2m temperature - January 2016



ERA5-Land monthly mean 2m temperature - January 2016

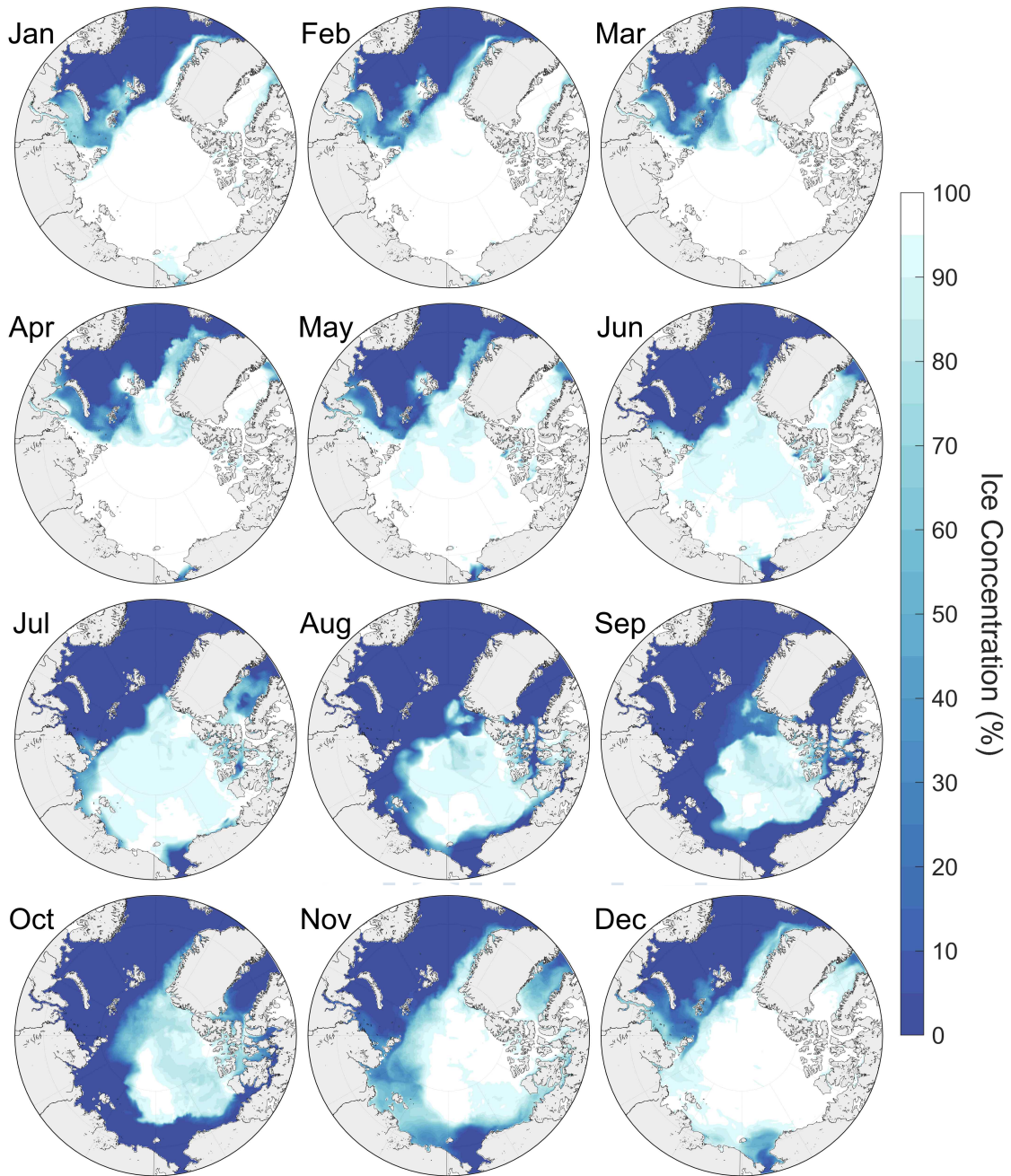


<그림 3-10> ERA5의 2016년 1월 전지구 2m 고도 기온과 지상 자료의 2m 기온 정보 예시 (<https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>). ERA5-Land 전지구 지면 정보 자료는 9km의 해상도를 가지며, 대기 정보와 상응하게 1950년부터 계속해서 재분석이 진행되고 있다.

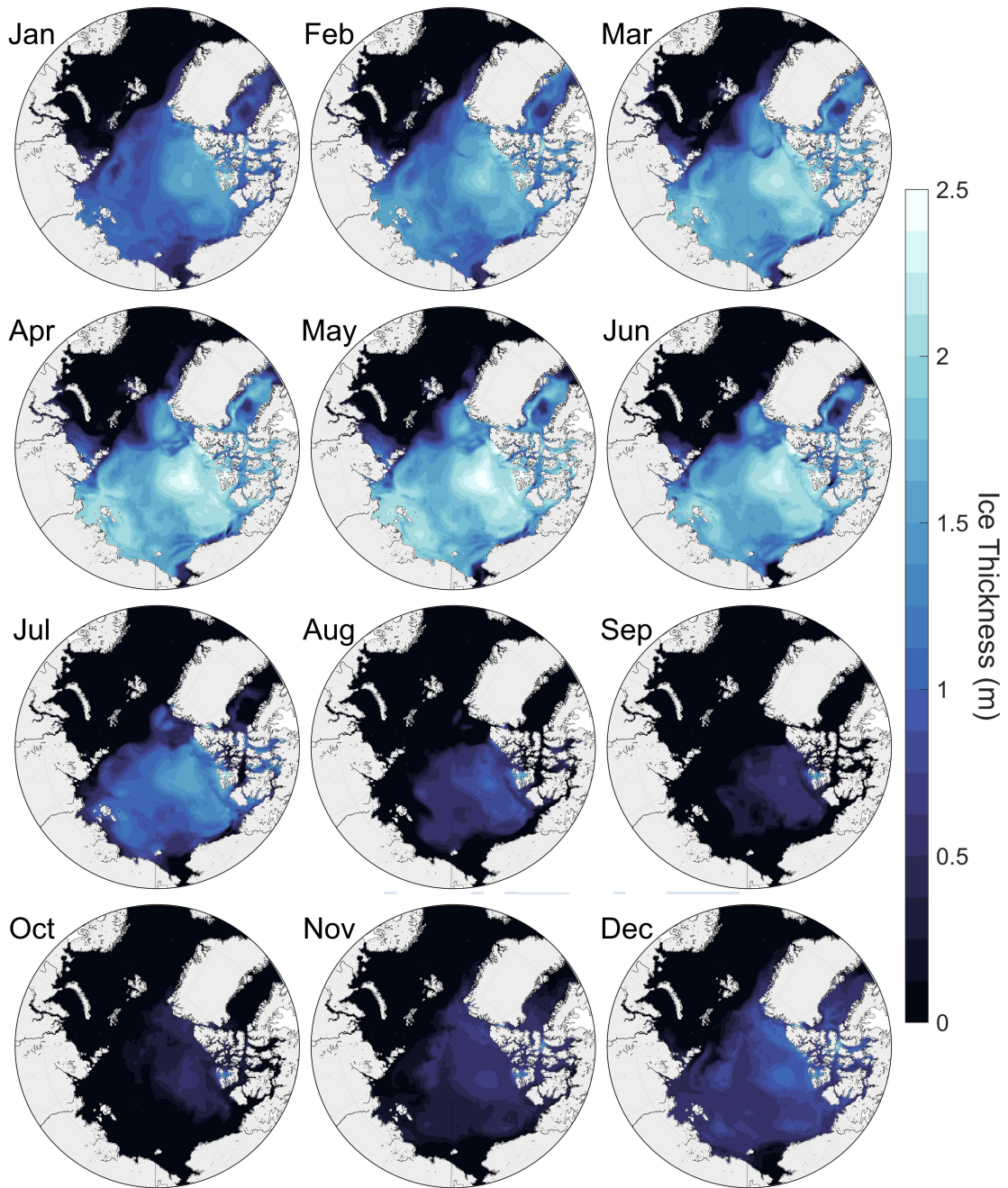
3. 북극해 해빙 모델 기반 자료 생산

○ 북극 해역의 월별 해빙 분포 재현 결과

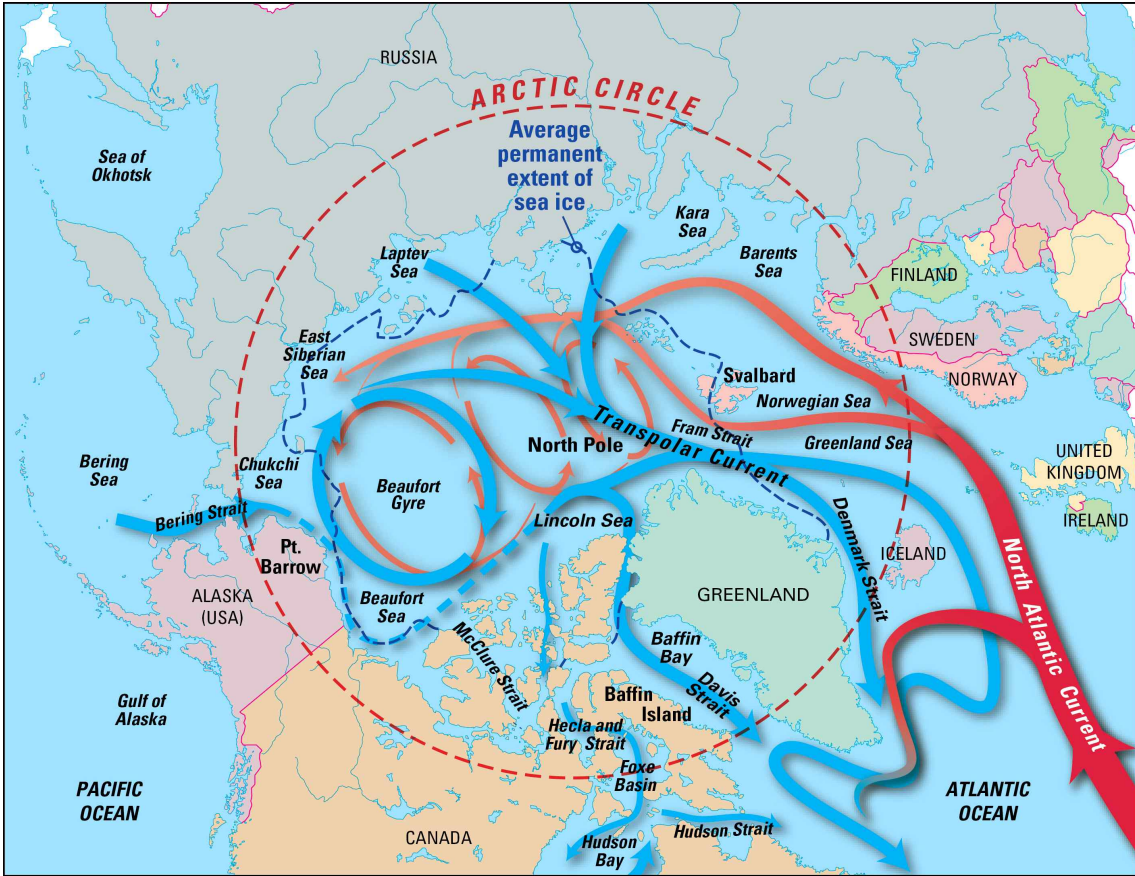
- 2020년 해양과 대기의 재분석 자료를 활용하여 해양순환과 해빙 역학을 고려한 북극 해역 수치모델의 시험 결과를 제시하고자 한다. <그림 3-11>는 북극에서 재현된 월별 해빙 분포(ice fraction)를 백분율(%)로 환산하여 나타낸 농도(Concentration)이며, <그림 3-12>은 해빙의 두께를 나타낸다.
- 북극의 해빙 면적은 늦은 겨울철에 약 $1.5 \times 10^7 \text{ km}^2$ 로 추산되며 연중 최대치를 나타낸다. 여름철 이후 9월경에 해빙 면적은 $7.0 \times 10^6 \text{ km}^2$ 로 추산되며 연중 최소치를 나타낸다.
- 그린란드해, 노르웨이해를 포함한 그린란드 동부 해역과, 바렌츠해 인근의 북유럽 북부 해역에서는 계절에 상관없이 연중 해빙 농도가 매우 낮은 수준으로 유지된다. 이는 저위도에서 서안경계류(걸프해류)에 의해 북상하는 온난해수가 고위도까지 북상하며 형성되는 북대서양 해류와 밀접한 연관이 있는 것으로 알려져 있으며, 북태평양에서 척치해로부터 북상하는 해류와 규모 면에서 큰 차이를 보인다.
- 북극의 해빙은 10월부터 본격적으로 형성되기 시작하며, 특히 북극해 중심과 그린란드 서부해역(배핀만), 알래스카 북부 해역(보퍼트해), 러시아 북동부(랍테프해, 카라해)를 중심으로 생성된다<그림 3-11>. 생성된 해빙의 두께는 대략 11월부터 두꺼워지기 시작하며, 이후 대략 5월까지 유지된다<그림 3-12>.
- 북극 해빙의 용융은 생성과 반대로 5월부터 북극해 중심부터 본격적으로 녹기 시작하며, 러시아와 알래스카 북부 연안의 순서대로 용융된다<그림 3-11>. 해빙의 두께는 면적이 먼저 감소하기 시작하고 6, 7월에 해빙의 두께가 급격히 감소하여 9월부터 10월에 평균 약 50cm 내외로 연중 최저치를 나타낸다 <그림 3-11, 5>.



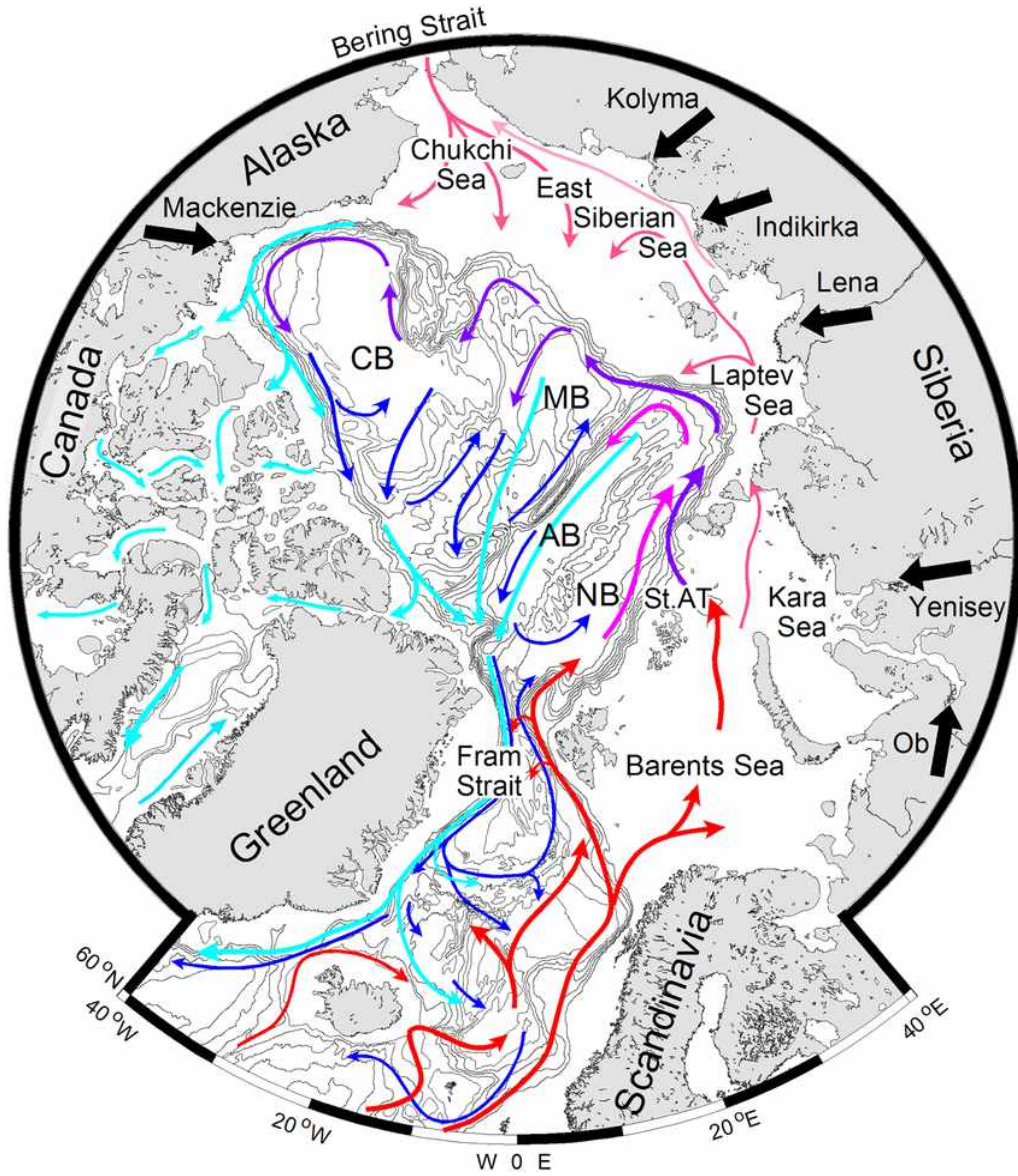
<그림 3-11> 2020년 월별 평균 해빙 농도 수평 분포



<그림 3-12> 2020년 월별 평균 해빙 두께 수평 분포

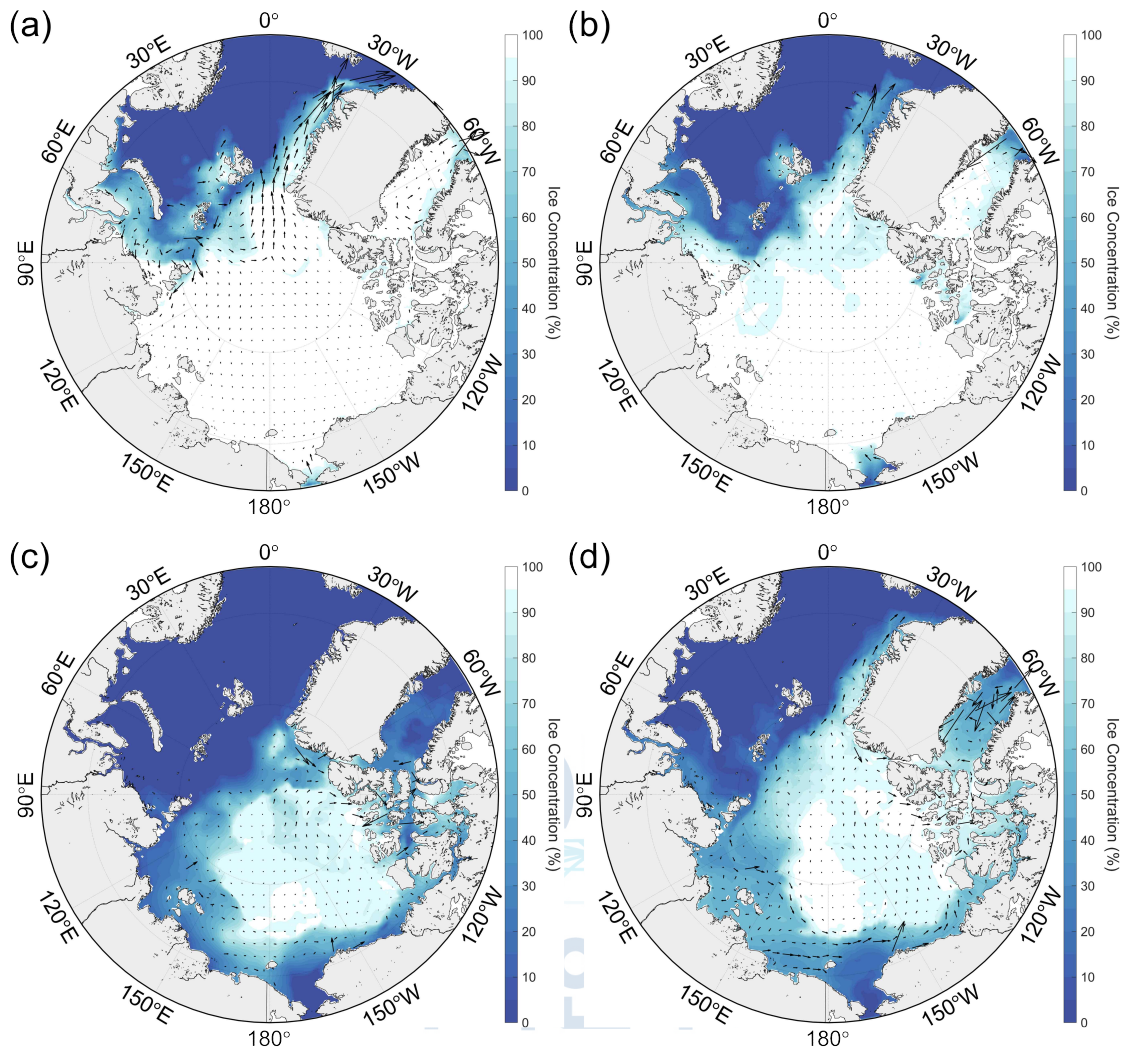


<그림 3-13> 북극해 주요 해류 분포 (Woods Hole Oceanographic Institution, J. Cook. <https://www.usgs.gov/media/images/arctic-region-currents>). 파란색 벡터는 저온의 상대적으로 염분이 낮은 수괴의 흐름, 붉은색 벡터는 고온·고염의 수괴 흐름을 나타냄.



<그림 3-14> 북극해 주변에서의 지배적인 해류 분포(Anderson and MacDonald, 2015). 붉은선은 고온의 표층 온난 해류, 시안선은 저온 해류를 나타내며, 진홍색과 암청색은 각각 중층과 저층의 해류를 나타냄.

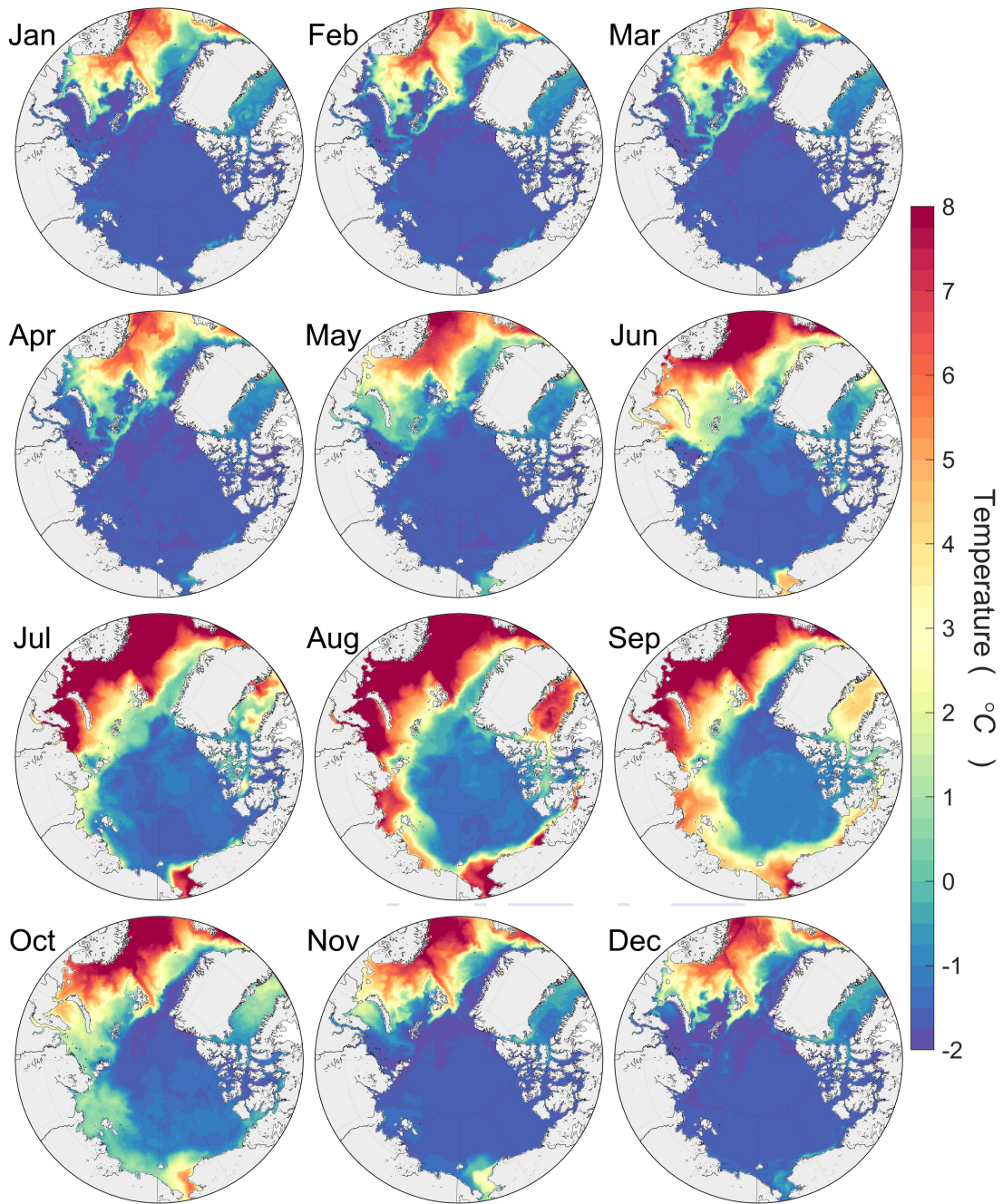
- 북극 해빙의 유동 분포를 추정하기 위하여 1-3월, 4-6월, 7-10월, 11-12월의 3개월간 해빙 농도와 해빙 유속을 평균하여 <그림 3-15>에 표시하였다.
- 연중 해빙 농도의 최대치를 보이는 겨울철(1월-3월)의 해빙 유동 분포를 보면, 북극해의 중심에서부터 그린란드 동부 연안을 따라 저위도를 향하여 남하하는 분포를 보여주고 있다 <그림 3-8a>. 러시아 북부 카라해로부터 동쪽 해안선을 따라 이동하는 해빙 유동이 재현되어 있으며, 겨울철에는 러시아 북쪽 연안을 따라 해빙이 쌓이고, 그린란드 동부 연안을 따라 저위도 방향으로 확장하는 양상으로 재현됨을 알 수 있다.
- 해빙이 감소하기 시작하는 봄철(4월-6월)에는 전반적으로 해빙의 이동 분포가 겨울철에 비하여 매우 약화되며, 그린란드 동부와 아이슬란드 북부에서 저위도를 향하여 남하하는 움직임만 남아있는 것으로 확인된다.
- 해빙이 연중 최소치가 되는 여름철(7월-9월)에는 북극해의 잔존해있는 해빙 중에서 캐나다 북극 제도 인근에 위치한 해빙들이 그린란드 인근해로부터 유입되는 양상을 나타낸다. 러시아 북부 랍테프 해와 동시베리아 해에서는 북극해 중심의 해빙을 향하여 모여드는 흐름이 생겨나기 시작한다.
- 해빙 면적이 다시 증가하기 시작하는 가을철(10월-12월)에는 그린란드 동부해역까지 해빙이 확장하기 시작하며, 러시아 북부의 랍테프 해와 동시베리아해 인근에서 해빙 면적이 증가하기 시작한다. 북극해 중심의 해빙을 중심으로 반시계 방향의 해빙 유동이 재현되고 있으며, 북미 대륙 북부의 보퍼트해와 그린란드 동부 해역 그리고 러시아 북동부 연안 인근에서 해빙이 확장되는 양상이 재현된다. 반면, 카라해, 바렌츠해, 노르웨이해 등 대서양 인근에서는 연중 해빙이 거의 형성되지 않는다.



<그림 3-15> 2020년 3개월 평균 해빙 농도와 해빙 유속 수평 분포. (a) 1월-3월, (b) 4월-6월, (c) 7월-9월, (d) 10월-12월의 결과를 나타냄.

○ 북극 해역의 계절별 해면온도 분포 재현 결과

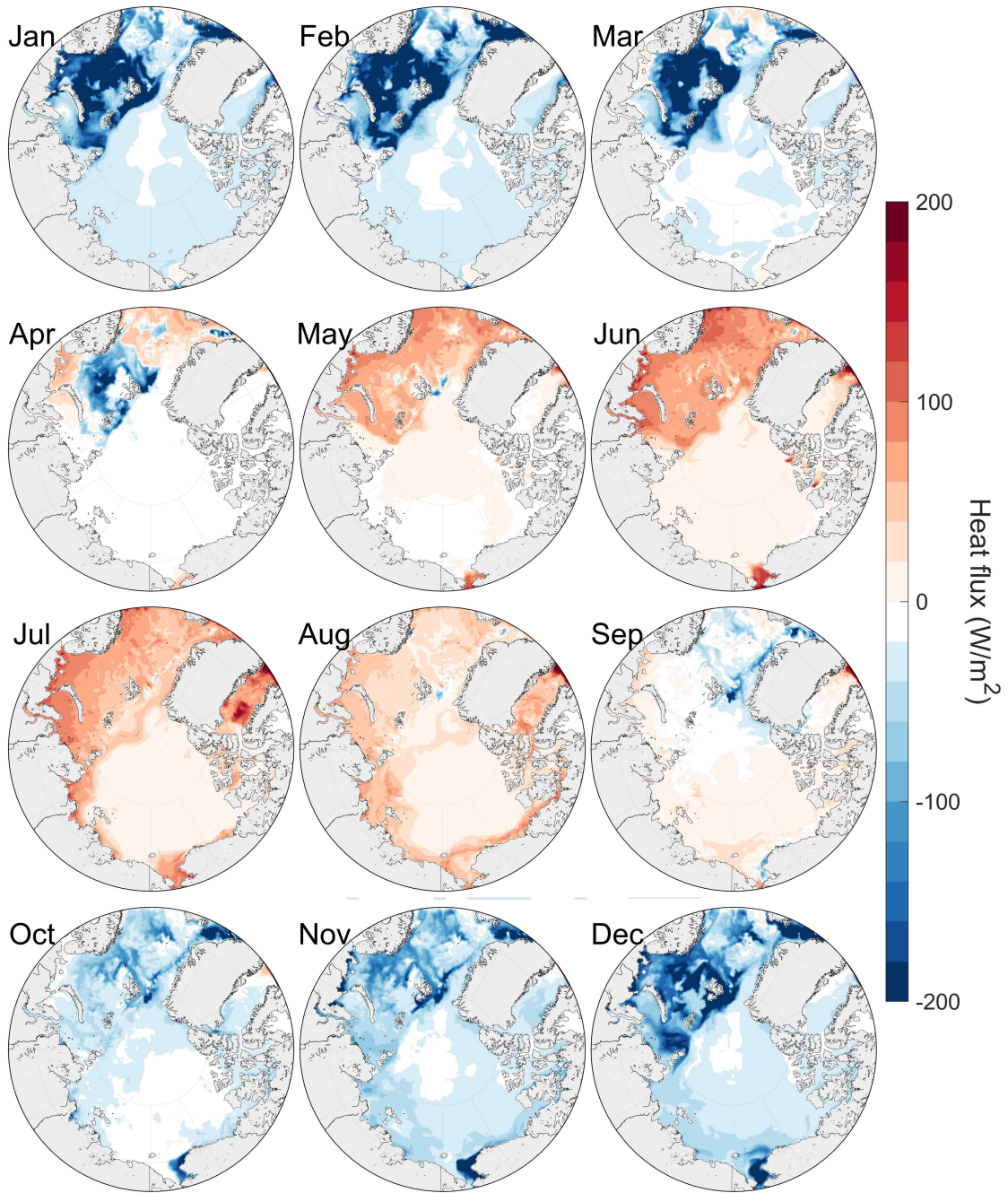
- <그림 3-16>는 북극에서 재현된 해면수온의 월평균 분포를 나타낸다.
- 북극에서 해빙의 면적과 두께가 가장 많이 발달하는 1월부터 4월까지는 북극해, 카라해, 랍테프해, 동시베리아해, 보퍼트해, 그린란드 동부 해역에서 영하의 해면수온 분포가 재현되고 있다.
- 북유럽의 노르웨이해와 바렌츠해 인근에서는 북유럽에서 동편의 겨울철에도 4℃ 이상의 따뜻한 해면수온이 분포하여 있으며, 노르웨이 스발바르 제도 인근까지 난류수의 영향을 받게 된다.
- <그림 3-11, 5>에 나타난 겨울철 해빙의 면적과 두께 분포와 해면 수온 분포는 상당 부분 일치하며, 고온 해수의 영향을 받는 해역에서는 해빙이 거의 발달하지 않고, 수온이 -1℃ 이하로 떨어지는 북극해 중심과 랍테프해, 동시베리아해, 보퍼트해 등지에서는 해빙이 넓게 발달하고 있다.
- 그린란드해, 노르웨이해를 포함한 그린란드 동부 해역과, 바렌츠해 인근의 북유럽 북부 해역에서 북대서양 해류에 의해 북상하는 상대적으로 따뜻한 온난해수가 공급되는 분포가 뚜렷하게 나타난다 <그림 3-16>.
- 6월부터 11월까지 러시아 동부와 알래스카 사이의 베링 해협으로부터 척치해 내부로 북태평양으로부터의 고온 해수가 유입되는 양상이 재현되는데, 이는 <그림 3-13, 14>의 선행 연구에서 제시하고 있는 고온 해류 유입 양상과 잘 일치하고 있다.
- 노르웨이해와 바렌츠해 등 북대서양에서 북상한 난류의 영향을 받는 해역에서는 해면수온이 8℃ 이상으로 높아지며, 겨울철 많은 해빙이 생성되었던 배핀만, 랍테프해, 동시베리아해, 척치해 인근에서도 수온이 8℃ 이상으로 증가하며 대다수의 해빙이 용융되어 소실된다.



<그림 3-16> 2020년 월별 평균 표층 수온 수평 분포.

○ 북극 해역의 계절별 표면 열속 강제력 분석 결과

- <그림 3-17>는 북극해에서 표면에 강제되는 대기로부터의 월별 열속 강제력을 나타낸다.
- 대기로부터의 열속 강제력은 양(+)의 값을 나타낼 때 북극해 해양 표면의 수온 상승에 기여하며, 반대로 음(-)의 값을 나타낼 때 수온 냉각에 기여하게 된다.
- 북극해에서는 5월부터 8월까지의 여름철에 거의 전해역에 걸쳐 양의 열속 분포가 나타나며 해면수온이 증가하고 해빙의 면적과 두께가 감소하게 되는 효과를 보이고 있다. 특히 노르웨이해, 바렌츠해, 카라해에서의 열속이 높으며 7월과 8월에는 랍테프해, 동시베리아해, 보퍼트해의 연안까지 100 W/m^2 내외의 열속이 보이며 연안부 해빙 용융에 기여하는 양상을 보이고 있다.
- 9월에는 북극해 열속 강제력이 본격적으로 반전되기 시작하며 특히 그린란드 주변해역에서부터 음(-)의 값으로 변화하며 이러한 그린란드 연안의 열속변화는 <그림 3-16>에 나타나는 해면수온의 냉각에 기여하게 된다. 10월부터 3월까지 북극해 전해역에 걸쳐 해면냉각을 유도하는 음의 열속 분포가 지배하며 특히 노르웨이해와 바렌츠해에서 강하다. 북대서양에서부터 북상하는 난류가 겨울철 차가워진 대기하부층으로 급격하게 열을 빼앗기는 양상이 재현되는 것으로 확인할 수 있다.



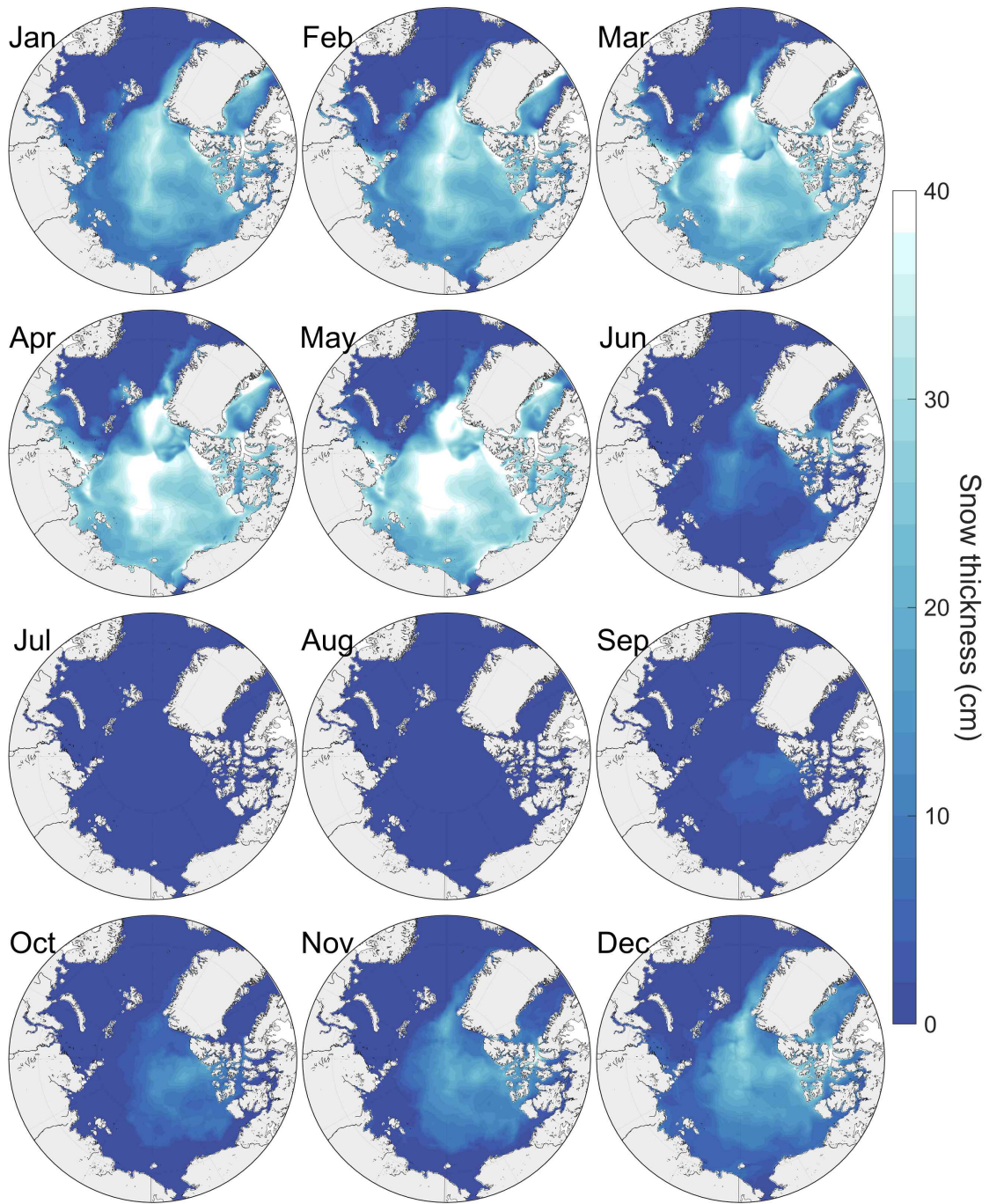
<그림 3-17> 2020년 월별 평균 표층 열속(net heat flux) 수평 분포.

○ 북극 해역의 월별 적설 재현 결과

- <그림 3-18>는 북극에서 재현된 월별 적설 두께 분포(snow thickness)를 나타낸다.
- 북극의 적설량은 겨울철에서 봄철 사이(12월-5월)에 연중 최대치를 나타낸다. 해양 표면의 열속이 강해지는 5월 이후 하계가 되면 적설 두께가 연중 최소치 분포를 나타내며 9월까지 유지된다.
- 그린란드해, 노르웨이해를 포함한 그린란드 동부 해역과, 바렌츠해 인근의 북유럽 북부 해역에서는 계절에 상관없이 연중 적설 두께가 매우 낮은 수준으로 유지된다.
- 북극의 적설 두께는 10월 이후부터 본격적으로 두꺼워지기 시작하며, 특히 북극해 중심과 그린란드 서부해역(배핀만), 알래스카 북부 해역(보퍼트해), 러시아 북동부(랍테프해, 카라해)를 중심으로 생성된다. 생성된 적설의 두께는 대략 11월부터 본격적으로 두꺼워지기 시작하며, 이후 대략 5월까지 유지된다.
- 북극 적설 분포는 6월부터 본격적으로 녹기 시작하며, 북극해 중심을 제외하고 북극 주변 해역 전역에서 급격하게 녹는다.



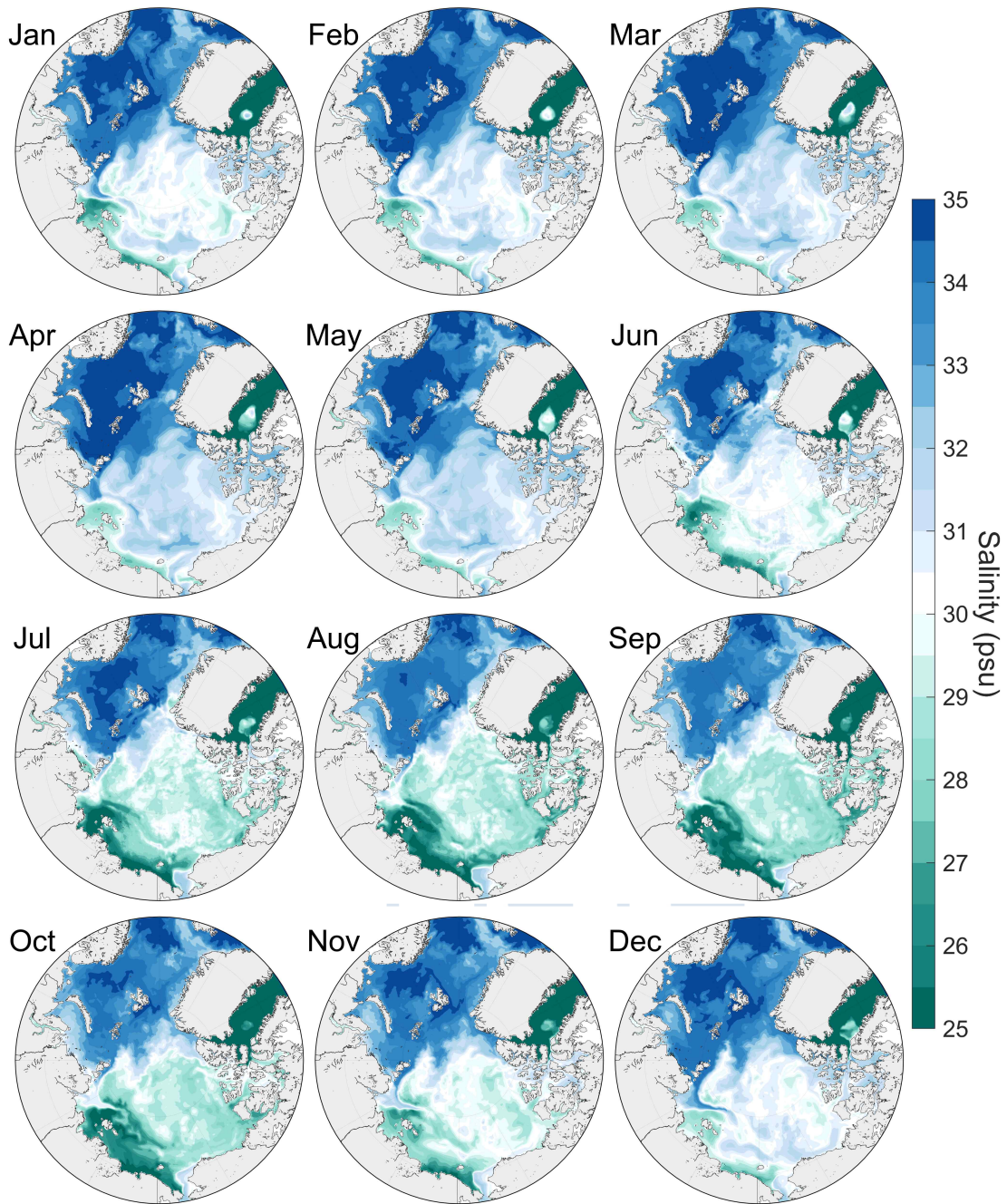
KOPRI
극지연구소



<그림 3-18> 2020년 월별 평균 적설 두께 수평 분포.

○ 북극 해역의 계절별 해면염분 분포 재현 결과

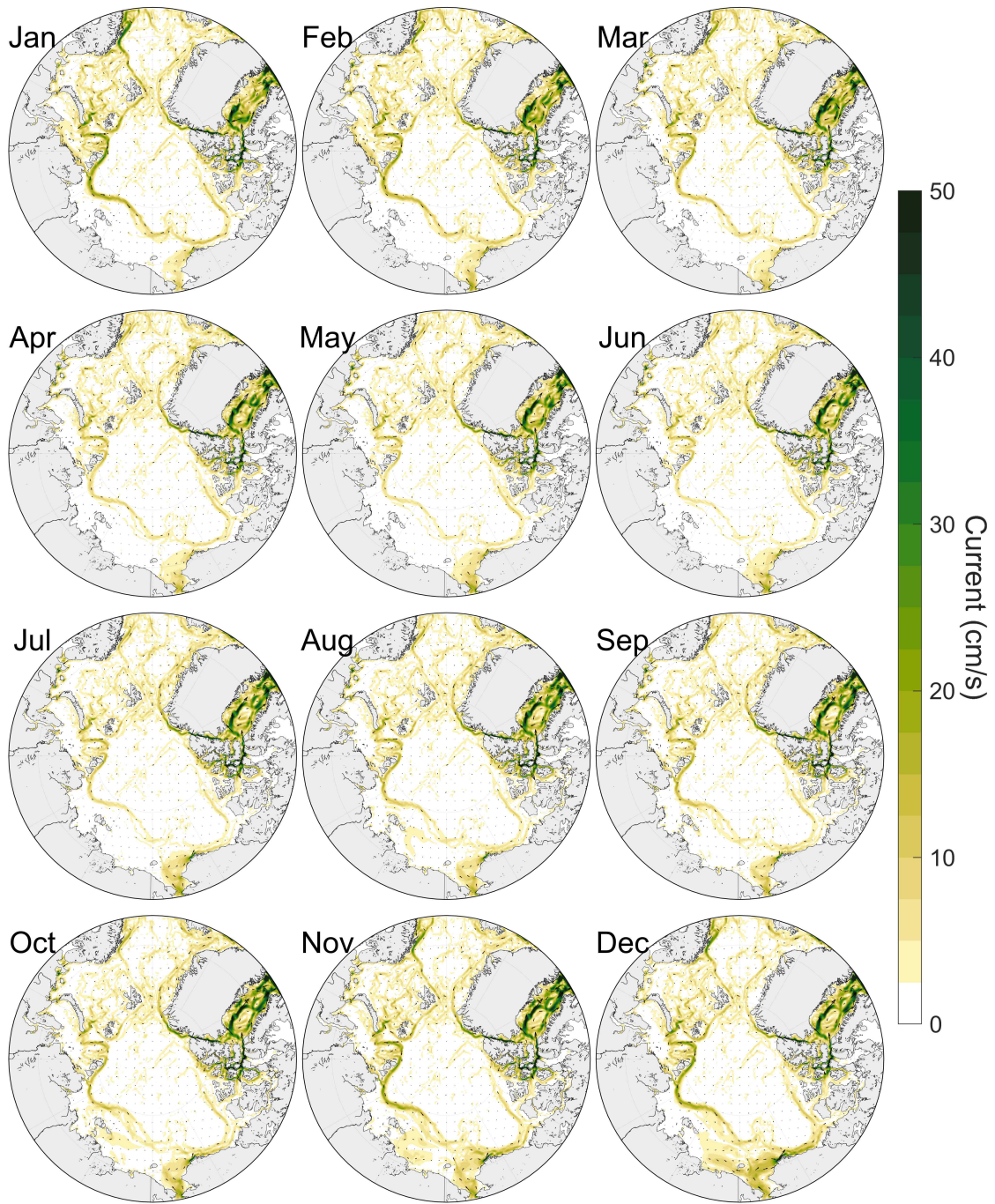
- <그림 3-19>는 북극해의 월별 해면 염분을 나타낸다. 해면 염분 수평 분포에서 북대서양에서 고온, 고염의 해수가 유입되어 분포하며, 겨울철 해빙이 위치하고있는 북극해 중심에서는 북대서양 해역에 비해 상대적으로 낮은 염분이 분포하는 특징이 나타난다.
- 계절적으로 나타나는 해면 염분의 변화를 보면, 해빙이 생성되는 겨울철에는 북극해 전반적으로 염분이 증가하며, 해빙이 용융되는 여름철에는 반대로 염분이 감소한다. 이러한 결과는 익히 알려져 있는 해빙 생성시 해수가 얼면서 염분이 빠져나오는 현상(brine rejection)과 해빙이 용융되면서 담수가 공급되는 현상을 잘 반영하는 결과로 판단된다.
- 해면 염분의 월별 변동성은 <그림 3-12>의 해빙 두께의 월변화와 상당 부분 일치하는 결과를 보인다. 해빙의 두께가 급격하게 얇아지기 시작하는 7월부터 북극해 중심과, 랍테프해, 동시베리아해, 보퍼트해를 중심으로 염분이 급격하게 낮아지는데, 이는 해빙이 녹아 담수가 해면으로 공급되면서 나타나는 변화로 해석할 수 있다.
- 해빙이 다시 두텁게 얼기 시작하는 12월부터는 북극해 중심과 보퍼트해 등을 중심으로 다시 염분이 상승하기 시작하는데, 해수표면에서 해빙이 얼면서 염을 방출함에 따라 염분이 증가하는 현상이 잘 재현되고 있다.



<그림 3-19> 2020년 월별 평균 표층 염분 수평 분포.

○ 북극 해역의 월별 해수 유동 분포 재현 결과

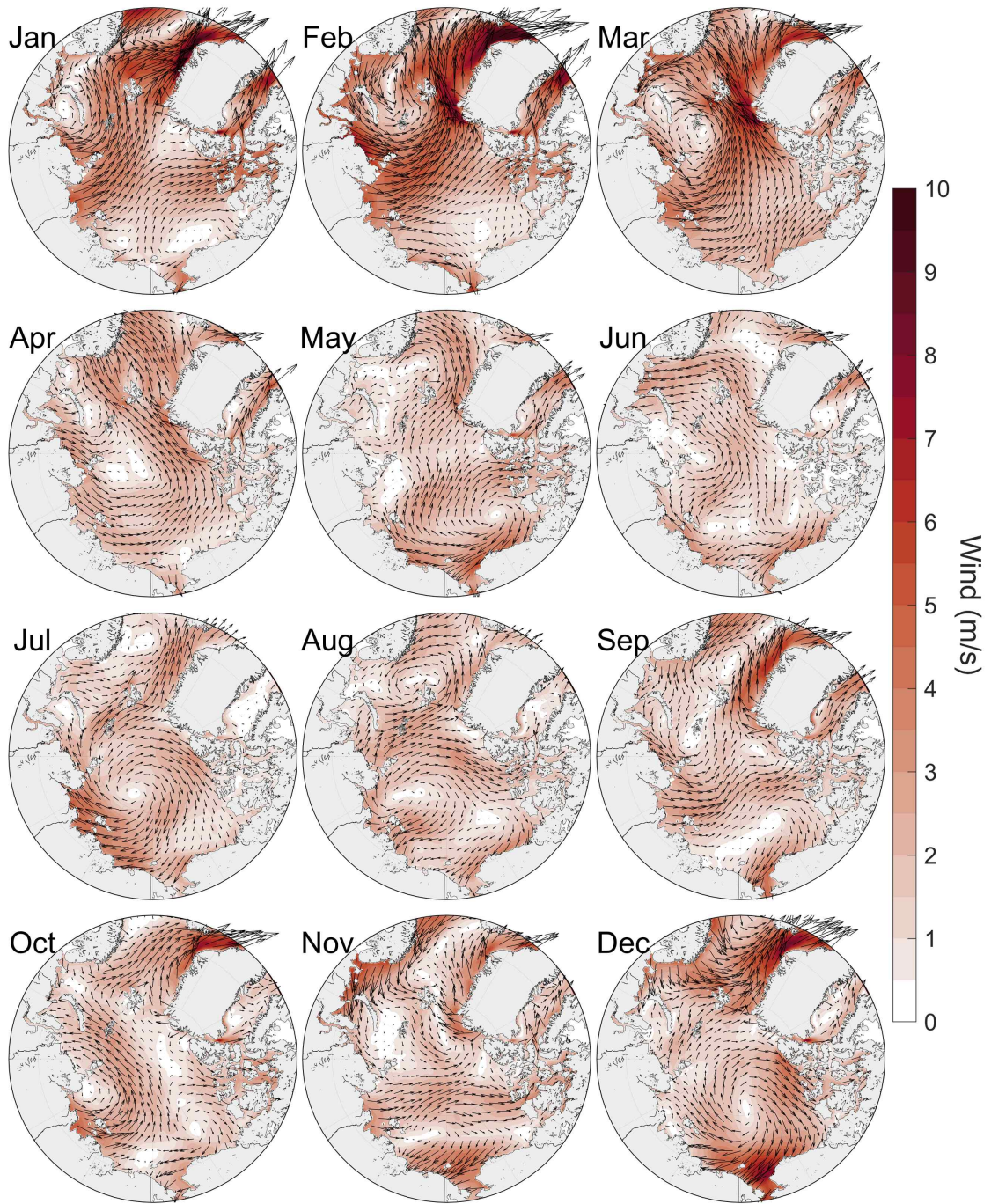
- <그림 3-20>는 북극해의 월별 경압성 유속 성분의 수평 분포를 나타낸다.
- 해양-해빙의 상호작용이 고려된 수치모의 실험결과에서 재현되는 경압성 유속은 <그림 13, 14>의 선행연구결과에서 제시하는 북극해 전반의 순환 양상과 상당부분 일치한다. 북대서양에서 북상하는 난류의 흐름은 노르웨이해 연안을 통과하여 바렌츠해 외곽의 스발바르 제도와 그린란드 대륙 사이의 프람 해협(Fram strait)를 통과하며, 이후 카라해 외곽의 해수면 경사를 따라 랍테프해와 동시베리아해 외곽을 따라 흐른다.
- 척치해로부터 북상되는 흐름은 북극해로 유입되는 주요 난류성분의 하나로, 월별로 세기의 차이는 존재하지만 연중 지속적으로 유지되며 따뜻한 물을 공급하고 있다. 동시베리아에서 동쪽으로 흘러오는 흐름과 합세하여 알래스카 연안을 따라 동쪽으로 흐르며 보퍼트해로 유입되는 양상을 보이고 있다.
- 캐나다와 그린란드 사이의 배핀만, 데이비스 해협, 그리고 캐나다 북극 제도에서 경압성 유속성분이 가장 빠르게 나타나는데 이는 전세계에서도 수위에 속하는 강한 조석에 의한 조류 성분이 반영된 결과로 그 잔차류 성분은 <그림 3-13, 14>에 제시한 결과와 유사하게 캐나다 북극 제도와 배핀만, 그리고 데이비스 해협을 통과하여 저위도로 향한다.
- 수치모의를 통해 재현된 북극해의 해류 특성은 해역별로 크게 세 가지의 특징을 보이는 것으로 나타난다. 첫째로 노르웨이해, 바렌츠해, 카라해 인근에서는 복잡한 해저 지형 등의 요인으로 외곽의 수심 경사를 따라 흐르는 흐름과 별개로 내부에서 복잡한 양상이 재현된다. 둘째로 랍테프해와 동시베리아해, 보퍼트해 및 북극해 중심에서는 수심이 얇은 대륙붕 외곽의 해저면 경사를 따라 반시계방향으로 회전하는 양상의 흐름이 지배적으로 나타난다. 마지막으로 캐나다 북극 제도와 배핀만에서는 강한 조석에 의한 조석잔차류 성분이 매우 강하게 나타나며 전반적으로 저위도로 향하는 흐름을 보인다.



<그림 3-20> 2020년 월별 평균 해면 유속 수평 분포.

○ 북극 해역의 월별 해상풍 분포 재현 결과

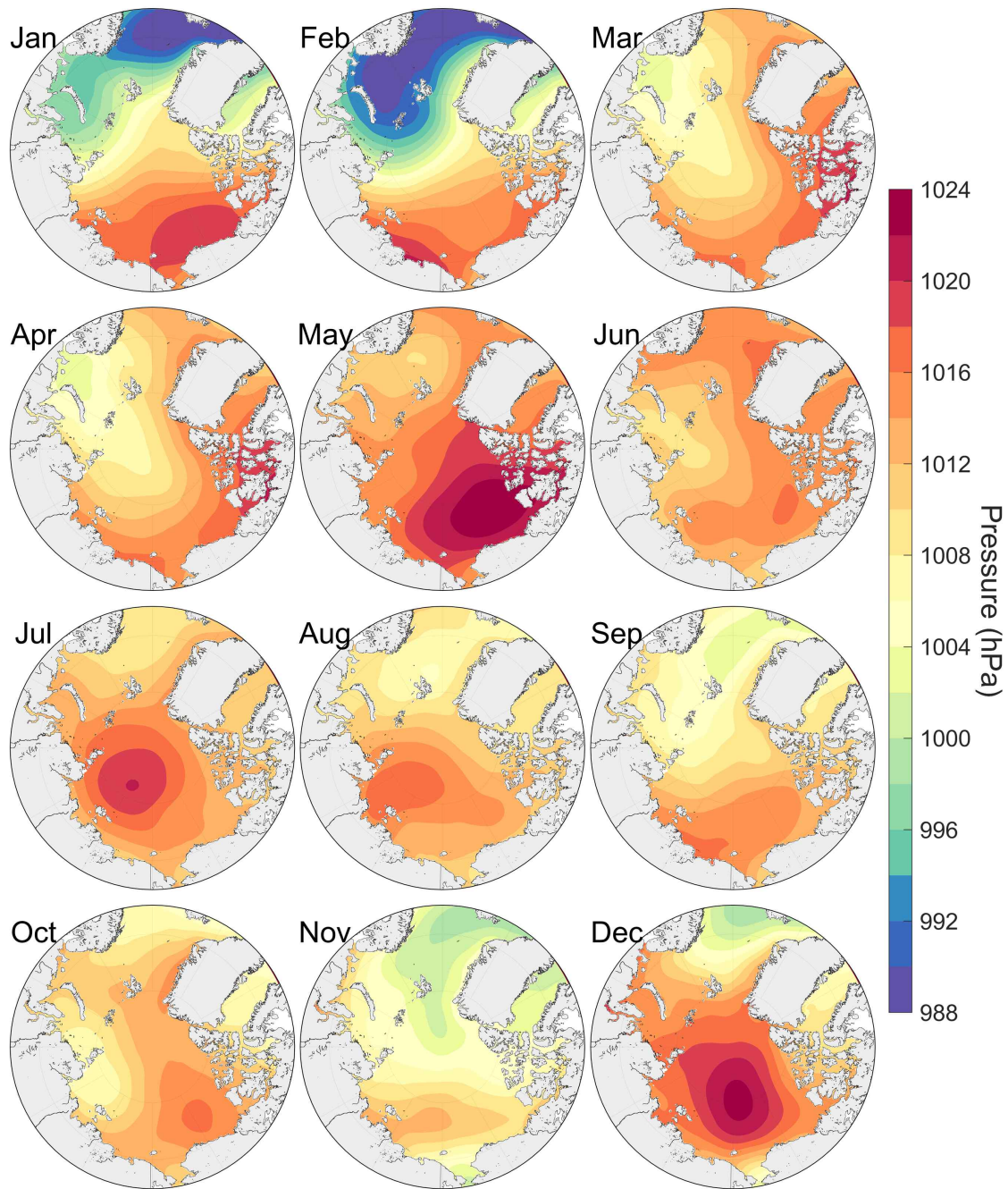
- <그림 3-21>는 북극해의 월별 해발 10m 고도의 해상풍 수평 분포를 나타낸다.
- ECMWF의 ERA5 재분석장으로부터 획득하여 해양-해빙 결합 수치모형에 외력으로 작용하는 해상풍 분포는 해역에 따라 뚜렷한 계절 변동성이 확인되는 곳이 있는 반면, 연중 일정한 양상이 유지되는 해역도 존재한다.
- 그린란드 동부해역과 베핀만은 계절에 상관없이 연중 일정하게 북풍이 유지되며, 특히 러시아와 북유럽 북부의 바렌츠해, 카라해 등지의 저기압의 영향을 받는 것으로 보인다.
- 바렌츠해와 카라해 등 북극해 인근의 저기압은 겨울철에 특히 발달하며 여름철에도 유지되는 것으로 확인되는데, 이 극지 저기압의 규모와 기압경사에 따라서 북극해 주변부의 저기압성 바람 순환 특히 서풍이 결정되는 것으로 확인된다.
- 척치해와 동시베리아해, 그리고 보퍼트해 인근의 해상풍 양상은 매 월마다 큰 변동성을 보이는데, 이는 열속 변동과 관련한 계절 변동성이라기 보다는 주변부 기압배치에 따라 나타나는 단기 변동성의 결과로 판단된다.
- 북극해 중심부와 동시베리아해 또는 보퍼트해 인근 연안에서 움직이는 고기압성 순환의 중심이 매 월마다 움직이며 주변 해역의 바람 분포를 변화시키는데, 이러한 고기압성 순환이 약해질 때에는 극지 저기압성 순환 세력에 맞추어 흐르지만, 기압 경사가 강하게 발달할 때에는 동시베리아와 유럽 북부에 강한 동풍을 야기시키는 것으로 보인다.
- 북극의 연안에서 발달하는 강한 동풍은 연안의 해빙을 북극해 중심으로 이동시키는 데 기여할 수 있으므로 관련한 수송기작에 대하여 장기 수치모의를 통한 정량분석을 시행할 필요가 있다.



<그림 3-21> 2020년 월별 평균 10m 고도 해상풍 수평 분포.

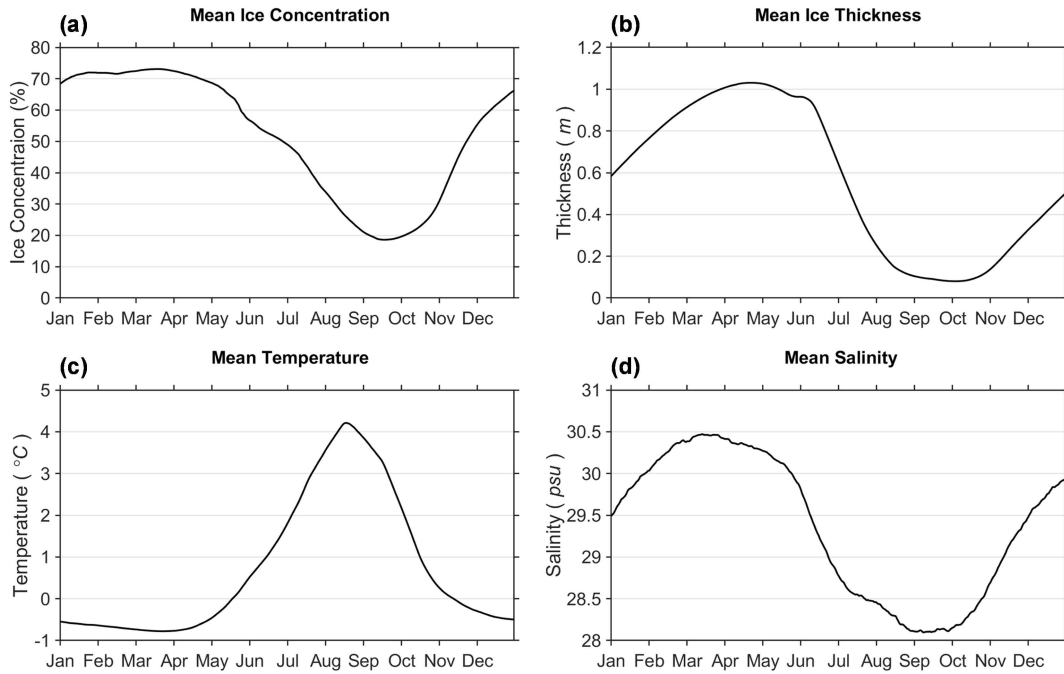
○ 북극 해역의 월별 해면기압 분포 재현 결과

- <그림 3-22>는 북극해의 월별 해면기압 수평 분포를 나타낸다.
- ECMWF의 ERA5 재분석장으로부터 획득하여 해양-해빙 결합 수치모형에 외력으로 작용하는 해면기압 분포는 해역에 따라 뚜렷한 계절 변동성이 확인되는 곳이 있으며, 월별 단기 변동성이 나타나는 해역도 존재한다.
- 그린란드 동부해역과 베핀만은 주변의 다른 해역에 비하여 기압이 낮게 유지되며 이에 따라 반시계 방향의 저압성 순환이 나타나게 된다. 특히 겨울철에는 북대서양과 바렌츠해를 중심으로 매우 강한 저기압 세력이 존재하여 북극해 중심을 기준으로 매우 강한 서풍이 지배적이다.
- 동시베리아해, 척치해, 보퍼트해 인근에서는 반대로 주변 해역에 비하여 강한 고기압 분포가 유지되며, 이에 따라 연안에서는 동풍이 우세하고 북극해 중심 해역에서는 서풍을 강화시키는데 기여할 것으로 판단된다.
- 3월부터 8월까지 따뜻한 계절에는 매월마다 강한 단기 변동성이 확인되지만, 그린란드제도과 보퍼트해를 중심으로 강한 고기압이 유지되는 경향은 꾸준히 나타나고 있다. 북극해 중심부와 동시베리아해 또는 보퍼트해 인근 연안에서 움직이는 고기압성 순환의 중심이 매 월마다 움직이며 주변 해역의 바람 분포를 변화시키는데, 이러한 고기압성 순환에 의하여 동시베리아해와 보퍼트해 연안에서는 강한 동풍의 영향이 나타나게 되며, 북극해 중심에서는 서풍의 영향이 나타날 것으로 보인다.



<그림 3-22> 2020년 월별 평균 해면기압 수평 분포.

- <그림 23>은 수치모델의 전 영역에 대한 (a) 해빙 농도, (b) 해빙 두께, (c) 해면 수온, 그리고 (d) 염분의 시계열 분포를 나타낸다. 북극 해역 전반에 걸쳐 평균 해면 수온은 11월부터 영하로 떨어져 5월까지 유지되며, 이후 5월 말부터 급격하게 증가하기 시작하여 북반구 여름철인 8월에 최대치를 나타낸다. 여름철 최대 수온은 4℃ 이상을 기록하며 이후 9월부터 11월까지 급격하게 감소한다.
- 북극 해역의 전체 평균 해빙 농도는 12월부터 4월까지 65% 이상으로 높게 유지되며, 연중 최저치는 9월에 약 20% 내외로 수온의 계절 변동성과 상당부분 일치한다. 수온이 상승하는 5월부터 해빙의 농도 역시 감소하기 시작하며, 여름철 이후 수온이 감소하는 8월까지도 농도가 증가하다가 9월부터 본격적으로 해빙의 농도가 상승하기 시작한다.
- 해빙의 두께 변화는 농도보다 한 달 늦은 6월부터 7월에 급격하게 감소하고, 9월에서 10월까지 연중 최저 두께를 유지한다. 수온 변동성에 따라 해빙의 농도가 먼저 변화하기 시작하며 해빙의 두께가 약 한달의 시간 차이를 두고 변화하기 시작하는 결과로 판단할 수 있다.
- 해면 염분은 해빙 농도와 두께와 함께 계절 변동성이 일치하며, 특히 해빙 두께와 변화 양상이 매우 유사하다. 해빙이 얼어 두껍게 형성되거나 얇아지면서 변화하는 염분의 반응이 뚜렷하게 나타나는 것으로 판단할 수 있다.



<그림 3-23> 2020년 수치모델 북극 영역 전체 평균 (a) 해빙 농도, (b) 해빙 두께, (c) 표층 수온, 표층 염분 시계열 분포도



4. 요약

- 북극해 수치모델 구축 및 해빙 자료 수집 연구 수행은 북극해빙 이동의 재현을 위하여 지역규모 해양순환 수치모델 Regional Ocean modeling System (ROMS)와 해빙 이동 수치모델 Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (CICE)이 결합된 수치모델을 이용하여 구축하였다.
- 수치모델의 격자의 해상도는 수평적으로 약 20km 간격으로 300×300개 격자로 구성하였으며 수직적으로 20개 층으로 구성하였다. 모델 구축에 사용된 수심자료는 General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)에서 제공하는 수평해상도 15초 격자형 수심 자료를 이용하였다 (<https://www.gebco.net/>).
- 2020년 북극의 해빙 이동 예측자료 생산을 위한 수온, 염분, 해류, 해수면 높이 등 초기조건과 개방경계조건은 the global ocean eddy-resolving reanalysis (GLORYS12) 자료를 내삽하여 적용하였으며, 2020년 1월 1일부터 12월 31일까지의 월평균 자료를 이용하였다(<https://www.hycom.org/>).
- 해빙 수치모델의 초기조건인 Ice fraction, Ice thickness, Ice velocity 등 GLORYS12 자료를 이용하였다.
- 수치모델 개방경계에서 조석은 TPXO Global Tidal Models로부터 얻은 M2, S2, O1, K1 N2, K2, P1, Q1, Mf, Mm 10개 분조의 조위와 조류 자료를 이용하였다 (<https://www.tpxo.net/home>).
- 수치모델에서 표면경계조건으로 적용되는 기상외력자료(기온, 기압, 상대습도, 바람 등)는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF; <https://cds.climate.copernicus.eu/>)에서 제공하는 ERA5의 월평균 자료를 이용하였다.
- 수치모델을 활용한 북극 해빙 이동 재현 실험을 위하여 2020년 한 해를 대상으로 모의하였고, 수치모델의 안정화 및 적용을 위하여 30년 기후 평균값을 활용하여 Spin-up을 2년간 진행하였다.
- 북극 해역의 계절별 해빙 분포 재현 결과는 2020년 해양과 대기의 재분석 자료를 활용하여 해양순환과 해빙 역학을 고려한 북극 해역 수치모델의 시험 결과를 제시하고자 한다.
- 그린란드해, 노르웨이해를 포함한 그린란드 동부 해역과, 바렌츠해 인근의 북유

립 북부 해역에서는 계절에 상관없이 연중 해빙 농도가 매우 낮은 수준으로 유지된다. 이는 저위도에서 서안경계류(걸프해류)에 의해 북상하는 온난 해수가 고위도까지 북상하며 형성되는 북대서양 해류와 밀접한 연관이 있는 것으로 알려져있으며, 북태평양에서 척치해로부터 북상하는 해류와 규모 면에서 큰 차이를 보인다.

○ 북극의 해빙은 10월부터 본격적으로 형성되기 시작하며, 특히 북극해 중심과 그린란드 서부해역(배핀만), 알래스카 북부 해역(보퍼트해), 러시아 북동부 (랍테프해, 카라해)를 중심으로 생성된다. 생성된 해빙의 두께는 대략 11월부터 두꺼워지기 시작하며, 이후 대략 5월까지 유지된다.

○ 북극 해빙의 용융은 생성과 반대로 5월부터 북극해 중심부터 본격적으로 녹기 시작하며, 러시아와 알래스카 북부 연안의 순서대로 용융된다<그림2>. 해빙의 두께는 면적이 먼저 감소하기 시작하고 6, 7월에 해빙의 두께가 급격히 감소하여 9월부터 10월에 평균 약 50cm 내외로 연중 최저치를 나타낸다.



제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

연구 개발 최종 목표 :

- 위성-모델 기반 북극해 해빙 이동장 기술 개발

세부연구목표 및 연구 개발 내용	2023	2024	2025
위성기반 해빙 이동장 지역해 최적화 방법 개선 연구 - 위성자료 기반 해빙 이동 추적 방법 검증 - 해역별/시기별 해빙의 시/공간적 특성 변화에 따른 추적 방법 검증 - 위성 기반 지역해 최적화 해빙 이동장 자료 생산	1차년		

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)
지구 온난화에 따른 해빙 이동 변화 분석	1-1 위성기반 해빙 이동장 지역해 최적화 방법 개선 연구	- 위성자료 기반 해빙 이동 추적 방법 검증 - 해역별/시기별 해빙의 시/공간적 특성 변화에 따른 추적 방법 검증 - 위성 기반 지역해 최적화 해빙 이동장 자료 생산	- 100% - 유빙 이동장 추출 방법 기반 고해상도 해빙 이동벡터 산출 - 2023 추계 GeoAI 데이터 학회 발표 예정 - 논문 투고 준비 중

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
- 수치모델링을 활용한 시뮬레이션을 수행하여, 해빙 하부 용융에 대한 학술적 이해 증대
- 해류, 기상, 지구 온난화 등의 요인을 통합하여 북극 해빙의 이동에 대한 정교한 예측을 통해 미래 해빙 양상과 기후적 영향 평가에 대한 연구 능력 향상.
- 해양, 기후, 생태학 등 다양한 과학 분야의 연구 역량을 집중하여 북극 해양 환경에 대한 총체적 관점의 이해와 학제간 교류 연구 증대
- 기후 규모 수치모의를 통한 북극 빙권 시스템과 중위도 기후 변화와의 연관성 연구 확대

○ 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
- 대기와 해빙의 상호작용을 포함하는 고도화된 해빙 유동 모델을 개발하여 해빙의 유실 및 이동 양상 예측 및 모니터링을 위한 기반 기술 확보
- 북극해 해빙과 더불어 해양 생태계의 변화를 모니터링하기 위한 첨단 원격 감지 기술과 수치모델링 기술을 개발함으로써 생물 자원 등의 보존 전략과 지속 가능한 관리를 위한 기반 구축

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
- 장기적인 북극 해빙 관측 자료 수집을 위한 종합적인 관측 네트워크를 구축 및 유지하여 지속적인 연구와 모델 검증을 지원.
- 북극해 해빙 유동 시뮬레이션을 활용한 이동 양상 예측 및 추적 정보 제공.
- 연구 결과에 대한 적극적 홍보 활동을 통해 북극 해빙 문제에 대한 인식 및 이해 증대
- 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 표층수온, 해빙농도 및 클로로필의 장기 변화, 33(6), 901-915.
- 북극 해빙 위성관측을 위한 분석 기술 개발. 2019. 한국해양과학기술원 부설 극지연구소
- Anderson, L. G., & Macdonald, R. W. (2015). Observing the Arctic Ocean carbon cycle in a changing environment. *Polar Research*, 34(1), 26891.
- Comiso, J.C. 2012. Large Decadal Decline of the Arctic multiyear ice cover. *Journal of Climate*, 25, 1176-1193.
- 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.
- 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.
- Hunke, E. C., Lipscomb, W. H., & Turner, A. K. (2010). Sea-ice models for climate study: retrospective and new directions. *Journal of Glaciology*, 56(200), 1162-1172.
- 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.
- Kim, H. C., Han, H., Hyun, C. U., Chi, J., Son, Y. S., & Lee, S. (2018). Research on Analytical Technique for Satellite Observstion of the Arctic Sea Ice. *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6_2), 1283-1298.
- 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, 1 - 14. doi:10.1029/2009JC005958.
- 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.
- Park, J., Kang, H. S., Hyun, Y. K., & Nakazawa, T. (2018). Predictability of the arctic sea ice extent from s2s multi model ensemble. *Atmosphere*, 28(1), 15-24.
- 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.

Plueddemann, A.J., R. Krishfield, T. Takizawa, K. Hatakeyama, and S. Honjo, 1998. Upper ocean velocities in the Beaufort Gyre, *Geophysical Research Letters*, 25(2), 183-186.

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.

Timmermans, M.-L., J. Toole, A. Proshutinsky, R. Krishfield, and A. Plueddemann, 2008. Eddies in the Canada Basin, Arctic Ocean, observed from Ice-Tethered Profilers, *Journal of Physical Oceanography*, 38, 133-145.



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.