

지구시스템모델 기반 북극 해빙 위성 산출물
자료동화 시스템 개발

Assimilation of sea ice products from satellite measurements
in earth system model



서울대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “지구시스템모델 기반 북극-한반도 통합 재해기상 예측 시스템 (KP0PS-Earth)의 개발 및 활용” 과제의 위탁연구 “지구시스템모델 기반 북극 해빙 위성 산출물 자료동화 시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 김 주 흥

위탁연구기관명 : 서울대학교

위탁연구책임자 : 이 상 무

위탁참여연구원 : 김 지 수

“ : 강 의 종

“ : 정 인 채

“ : 최 서 은

“ : 김 준 희

“ : 윤 다 연

“ : 정 희 성

“ : 이 예 강

“ : Nguyen Thi My

“ : 박 재 연

“ : 강 다 현

“ : 임 민 정

“ : 김 세 직

보고서 초록

위탁연구과제명	지구시스템모델 기반 북극 해빙 위성 산출물 자료동화 시스템 개발				
위탁연구책임자	이 상 무	해당단계 참여연구원수	14	해당단계 연구비	147,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 지구환경과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	51
○ 연구 목적 및 필요성: 중위도 기상 예측 정밀도 향상을 위한 인공위성 기반 해빙 자료 동화 체계 구축 및 계절 예측 시스템 성능 평가 ○ 주요 연구 결과: - Landsat-8, SSMIS, AMSR2 등 다중 위성 자료를 확보하고, 계절별·지역별 정량적 오차 분석을 통해 자료동화 입력 데이터의 적정성 평가 및 자료동화 최적화 기술 개발 수행 - CESM 모델 내 CICE5의 물리 특성을 분석하고, DART 프레임워크 기반의 해빙 자료 동화 체계 구축 및 민감도·안정성 검사 수행 - 20년 이상의 장기간 전지구 해빙 초기장을 생산하였으며, CESM2 기반 계절 예측 실험을 통해 해빙 초기화가 예측 성능 향상에 기여함을 평가 - 차세대 기술 조사: 수동 위성 복사휘도 및 능동 위성 후방산란계수의 직접 동화 가능성을 검토하여 시스템 확장 기반 마련 ○ 활용 계획: 지구시스템모델의 계절 예측 성능 향상에 기여하여 북극 항로 개척 및 기후 위기 대응을 위한 과학적 근거로 활용					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극 해빙, 위성 산출물, 자료동화, 해빙예측모델, 해빙점유율, 해빙두께			
	영 어	Arctic sea ice, Satellite-derived retrievals, Data assimilation, Sea ice prediction model, Sea ice concentration, Sea ice thickness			

요 약 문

I. 제 목: 지구시스템모델 기반 북극 해빙 위성 산출물 자료동화 시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

인공위성 기반의 해빙 산출물 자료동화는 해빙과 관련된 중위도 기상현상 예측에 큰 영향을 주기 때문에 해빙모델의 자료동화체계 구축이 필요함. 본 연구에서는 장기간 해빙 초기장 생성을 위한 해빙 산출물 자료동화 시스템을 구축하고, 이를 통한 계절 예측 시스템 성능 평가를 목표로 함.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 인공위성 해빙 산출물의 자료동화를 기반 연구
2. 인공위성 해빙 산출물 자료동화 시스템 구축
3. 해빙 자료동화체계를 이용한 해빙모델 초기자료 생산

IV. 연구개발결과

1. 인공위성 해빙 산출물의 자료동화를 기반 연구
 - 인공위성 해빙 산출물 정확도 파악
 - 장기간 해빙 산출물의 확보
 - 해빙 산출물의 정확도 파악 및 입력자료 적정성 평가
 - 인공위성 해빙 산출물 자료동화 시스템 구축 및 선행연구 조사
 - CESM 내의 CICE의 물리 변수 특성 파악 및 선행연구 조사
 - 해빙 산출물 자료동화 시스템 구축 및 선행연구 조사
2. 인공위성 해빙산출물 자료동화 시스템 구축
 - 인공위성 해빙산출물 자료동화 시스템 구축
 - 해빙 산출물 자료동화체계 구축
 - 계절예측 시험 테스트 및 민감도 검사 수행
 - 해빙 자료동화체계의 안정도 실 검사 및 기타 문제점 해결
3. 해빙 자료동화체계를 이용한 해빙모델 초기자료 생산
 - 해빙 자료동화체계를 이용한 해빙모델 초기자료 생산
 - 자료동화 시스템의 안정성 확보
 - 해빙자료동화에 따라 생성된 분석장의 성능 평가
 - 수동 위성센서의 복사휘도 및 능동센서의 후방 산란계수 동화 가능성에 대한 조사 수행

V. 연구개발결과의 활용계획

- 본 연구과제를 통해 개발된 위성 기반 해빙산출물 자료동화 시스템은 지구시스템모델의 계절예측시스템에 도입이 가능함.
- 지구시스템모델의 예측 성능 향상은 북극 항로 개척, 지하자원 탐사, 해양 활동 등 경제 분야에 활용이 가능함.
- 기후 위기 대응 및 재난 예방을 위한 과학적 근거를 제공할 수 있음.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title:

Assimilation of sea ice products from satellite measurements in earth system model

II. Purpose and Necessity of R&D

The data assimilation of satellite-based sea ice products significantly impacts the prediction of mid-latitude meteorological phenomena related to sea ice. Therefore, it is essential to establish a data assimilation system for sea ice models. This study aims to construct a sea ice data assimilation system for generating long-term initial sea ice fields and to evaluate the performance of seasonal prediction systems through this framework.

III. Contents and Extent of R&D

- Foundational research on the data assimilation of satellite-based sea ice products.
- Establishment of a satellite-based sea ice data assimilation system.
- Production of initial data for sea ice models using the data assimilation framework.

IV. R&D Results

1. Foundational research on satellite-based sea ice data assimilation

- Acquisition of long-term sea ice products.
- Analysis of product accuracy and evaluation of input data suitability.
- Analysis of physical variable characteristics of CICE within the CESM (Community Earth System Model).
- Review of previous studies on sea ice data assimilation systems.

2. Construction of satellite-based sea ice data assimilation system

- Building the sea ice data assimilation experiment framework.
- Conducting seasonal prediction pilot tests and sensitivity experiments.
- Verifying system stability and resolving technical issues.

3. Production of sea ice model initial conditions

- Ensuring the stability of the data assimilation system.
- Evaluating the performance of the analysis fields generated by sea ice data assimilation.
- Investigating the feasibility of assimilating radiance from passive satellite sensors and back-scattering coefficients from active sensors.

V. Application Plans of R&D Results

- The satellite-based sea ice data assimilation system developed in this study can be integrated into the seasonal prediction systems of Earth System Models (ESM).
- Improved prediction performance of ESMs can be utilized in economic sectors, such as opening Arctic shipping routes, exploring natural resources, and managing maritime activities.
- The system provides a scientific basis for responding to the climate crisis and preventing natural disasters.



목 차

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

제 2 절 연구범위

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 (1차년도)인공위성 해빙 산출물의 자료동화를 위한 기반 연구

제 2 절 (2차년도)인공위성 해빙산출물 자료동화 시스템 구축

제 3 절 (3차년도)해빙자료동화에 따른 해빙모델 분석장 평가 및 해빙모델 기반 테스트

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 (1차년도)인공위성 해빙 산출물의 자료동화를 위한 기반 연구

제 2 절 (2차년도)인공위성 해빙산출물 자료동화 시스템 구축

제 3 절 (3차년도)해빙자료동화에 따른 해빙모델 분석장 평가 및 해빙모델 기반 테스트

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

본 문

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

인공위성 기반의 해빙 산출물 자료동화는 해빙과 관련된 중위도 기상현상 예측에 큰 영향을 주기 때문에 해빙모델의 자료동화체계의 구축이 필요하며, 이를 통한 계절예측 시도 또한 중요함. 본 위탁연구는 해빙 산출물의 자료동화 시스템을 개발하는데 최종 목표가 있음. 이를 위하여 본 연구에서는 (1) 인공위성 기반 해빙 산출물(해빙의 두께, 해빙의 온도, 해빙의 영역 등)을 지구시스템모델에 동화하기 위한 기반 연구(분석, 오차 정보 파악 등)를 수행함. (2) 지구시스템모델 내에서 구현되는 해빙의 변수의 특성과 인공위성 기반의 해빙산출물 변수의 특성을 비교 대조하여, 정확한 물리적 의미를 내포하는지에 대한 평가를 수행함. (3) 또한, 위성 산출물의 정성적 및 정량적인 검증작업 수행을 통한 오차 정보를 획득하여, 계절 예측에 있어서 앙상블 구성 수립에 대한 기본적인 지식을 제공함. (4) 앞선 기반 연구를 토대로 지구시스템모델인 CESM2 (Community Earth System Model 2) 내의 CICE (Los Alamos sea ice model) 기반 해빙 자료동화 시스템을 DART (Data Assimilation Research Testbed) 등의 자료동화 체계를 이용하여 개발 및 구축하고, (5) 해빙 산출물의 자료동화 수행 후 해빙의 계절 모의 정확도 향상을 도모함

제 2 절 연구범위

1. 인공위성 해빙 산출물의 자료동화를 위한 기반 연구(1차년도; 2023)
 - 가. 인공위성관측(예: ICESat, CryoSat, AMSR2 등)의 산출물인 해빙 영역, 해빙의 온도, 해빙의 두께 등의 산출물 자료를 확보
 - 나. 해빙 산출물의 정량적/정성적 오차 정보를 생산
 - 다. 계절별 해빙 산출물의 입력자료 적정성 평가
 - 라. CESM 모델 내의 해빙 모델인 CICE의 내부 구조 파악 및 관련 기반연구 수행 (알고리즘 확보, 시험 실행(test run) 수행, 모델 안정도 평가 등)
 - 마. 위성산출변수와 모델변수 사이의 물리적인 관계 파악 및 자료동화 가능성 타진
 - 바. 국외기관의 해빙 자료동화 시스템 조사
 - 사. 해빙 자료동화를 위한 자료동화기법 관련 조사
2. 인공위성 해빙산출물 자료동화 시스템 구축(1차년도; 2024)
 - 가. 해빙 산출물 자료동화 시스템 구축

나. 입력된 해빙 산출물을 토대로 해빙예측 시험 테스트 및 민감도 검사 수행(목표변수: 해빙 점유율, 해빙 두께)

다. 해빙 자료동화 시스템의 안정도 실 검사 및 기타 문제점 해결

3. 해빙자료동화에 따른 해빙 모델 분석장 평가 및 해빙모델 기반 테스트(3차년도; 2025)

가. 자료동화 시스템의 안정성 확보

나. 해빙자료동화에 따라 생성된 분석장의 성능 평가 (재분석자료, 위성자료, 일점자료의 활용)

다. 독립형 해빙모델 기반 성능 검사

라. 해빙-해양 결합 상태에서 해빙모델 기반 성능 검사

마. 수동 위성센서의 복사휘도 및 능동센서의 후방산란계수 동화 가능성에 대한 조사 수행



제 2 장 국내외 기술개발 현황

1. 국외 기술개발 현황

세계기상기구에서는 산하 프로그램들인 세계 기상연구 프로그램과 세계 기후연구 프로그램의 공동 연구과제로 계절 내-계절 시간 규모의 예측성 향상 프로젝트를 2013년부터 진행하고 있음. 이 프로그램에서는 지구시스템 내의 기상-기후 규모 현상에 대한 이음새 없는 통합 예측을 주요 구현 목표로 선정하여 진행 중임. 기상청은 영국 기상청으로부터 현업 기상예보 통합 모델과 해양, 해빙, 지면 성분 모델이 접합된 전지구 기후예측 시스템(GloSea5)을 도입한 후, 국내 학계 연구진들과의 여러 연구과제의 공동 수행을 통해 예측성 개선과 공동활용을 추진 중임

2. 국내 기술개발 현황

기상청은 현업 기후예측모델인 GloSea5의 동아시아 예측 능력 개선을 위해 기후예측시스템 개선 관련 다양한 R&D 사업을 지속 추진하고 있으나 기후예측의 불확실성으로 인해 GloSea5에만 의존하지 않고 다양한 외부 모델의 예측을 수집, 활용하고 있는 실정임. 본 사업에서 개발하는 커뮤니티 모델 기반 예측 시스템은 기반 기후모델의 차별성으로 기상청 GloSea5와 상호 보완적인 역할을 하기에 충분함. 실제로 매년 분기별 극지연구소는 기상청의 계절예측 전문가 회의에 참석하여 자체 예측 결과를 공유하고 있어 자료공유 측면에서도 실질적인 기여를 하고 있음

극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 (1차년도)인공위성 해빙 산출물의 자료동화를 위한 기반 연구

해빙 위성 산출물 동화를 위한, 위성 산출물의 정성적/정량적 오차 분석을 수행하였으며, 2차, 3차년도 연구에서 수행할 해빙모델(CICE5)에 동화될 초기 입력자료로 타당한지에 대한 검증을 수행하였음. Landsat-8, SS MIS (Special Sensor for MICrowave Imager and Sounder), AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2), CryoSat-2, SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity mission) 등의 위성 센서 기반으로 산출된 해빙 산출물은 해빙 점유율, 해빙 두께 변수이며, 특히 해빙 점유율은 알고리즘별 산출된 해빙 점유율 값의 차이가 크기 때문에 이에 대한 정확한 오차 분석이 필요하여 정성적/정량적 오차 정보를 생성하였음

1. 인공위성관측 산출물 자료 확보

해빙모델에 동화될 초기 입력자료는 해빙 점유율과 해빙 두께 변수임. 해빙 점유율은 마이크로파 센서 SS MIS (Special Sensor for MICrowave Imager and Sounder)에서 산출된 자료를 수집함. 해빙 점유율은 25 km 해상도로 일 간격으로 제공됨. 한편, 해빙 두께 변수는 CryoSat-2, SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity mission)의 관측 자료를 병합한 CS2SMOS 해빙두께 산출물을 확보하였음. 해빙 두께 산출물은 2011년부터 가용함

해빙 점유율의 오차정보를 생산하기 위한 기준 자료 확보가 필요한데, 본 연구에서는 마이크로파 센서와 독립적인 Landsat-8 위성에 탑재된 고해상도 가시/적외선 영역 센서인 Operational Land Imager (OLI) 자료를 이용해 해빙 점유율을 산출하였음. OLI의 밴드-5 반사율과 Normalized Difference Snow Index (NDSI)를 이용하여 Landsat-8 픽셀을 해빙 또는 해양으로 분류하였으며(그림 3.1.1), 분류된 픽셀의 개수를 이용해 북극해의 12개의 해역에 대해 3년 (2020-2022)간 참값에 근접한 표준 해빙 점유율을 25 km 해상도의 National Snow Ice Data Center (NSIDC) Polar Stereographic 격자 형태로 생산하였음. Bootstrap 방식을 활용하여 Landsat-8 해빙 점유율 산출물의 95% 신뢰구간을 계산하였고, 25 km 격자 내에 위치한 Landsat-8 픽셀의 개수가 100,000개 이상인 경우에만 해빙 점유율을 산출하여, 산출물의 불확실성을 1% 미만으로 제한하였음(그림 3.1.2)

LC08_L1GT_067009_20220613_20220617_02_T2
(N_ice, N_water): (695875, 6379)

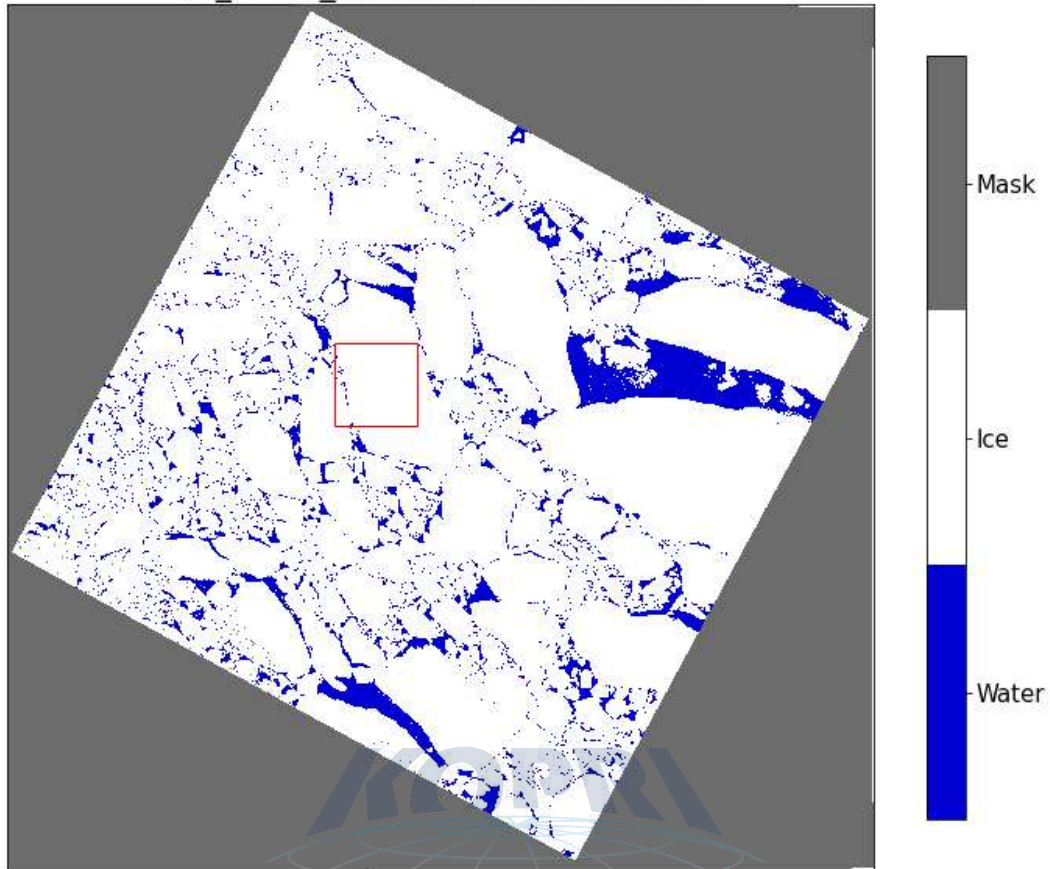


그림 3.1.1. NSIDC polarstereographic 그리드 상에 표시된 해빙과 해양으로 분류된 Landsat-8 이미지. 25 km 그리드를 빨간색 박스로 표시하였음.

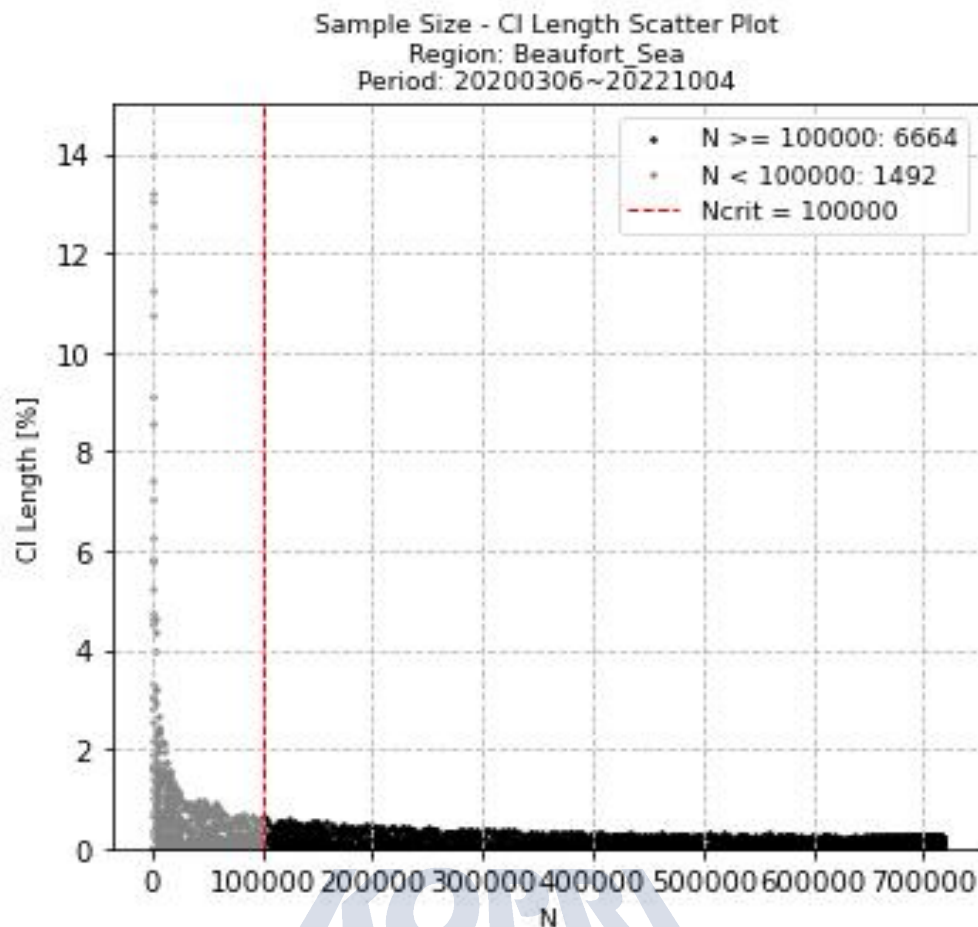
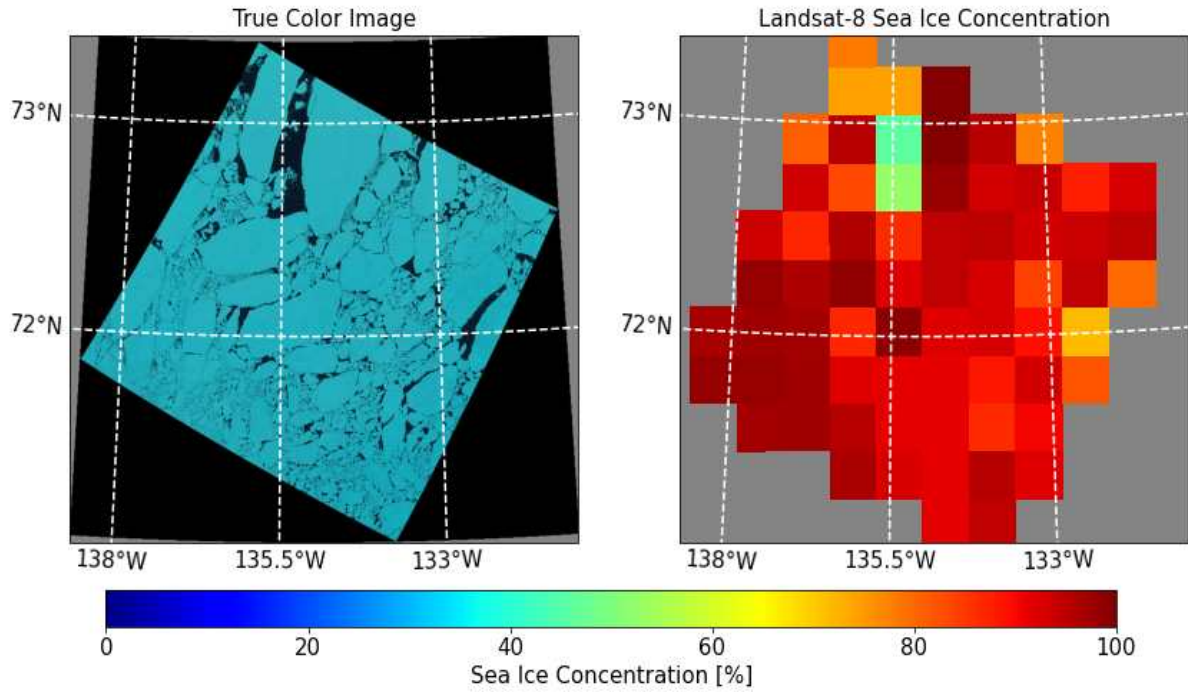


그림 3.1.2. 25 km 그리드 내부 위치한 Landsat-8 픽셀 개수와 Bootstrap 신뢰구간의 관계.

Landsat-8 해빙 점유율 산출물을 기준 삼아 NASA Team (NT), Bootstrap (BS), 그리고 Climate Data Record (CDR) 알고리즘의 인공위성 수동마이크로파 해빙 점유율의 오차 정보를 계산하였음. Landsat-8 해빙 점유율이 수동마이크로파 해빙 점유율에 비해 정밀한 해빙 점유율 값을 산출함을 확인하였으며(그림 3.1.3), Landsat-8 해빙 점유율의 값이 낮은 영역에서는 수동마이크로파 해빙 점유율의 음의 편의가, Landsat-8 해빙 점유율의 값이 높은 영역에서는 수동마이크로파 해빙 점유율의 양의 편의가 관찰되었음(그림 3.1.4)



LC08_L1GT_067009_20220613_20220617_02_T2
Region: Beaufort_Sea



LC08_L1GT_067009_20220613_20220617_02_T2
Region: Beaufort_Sea

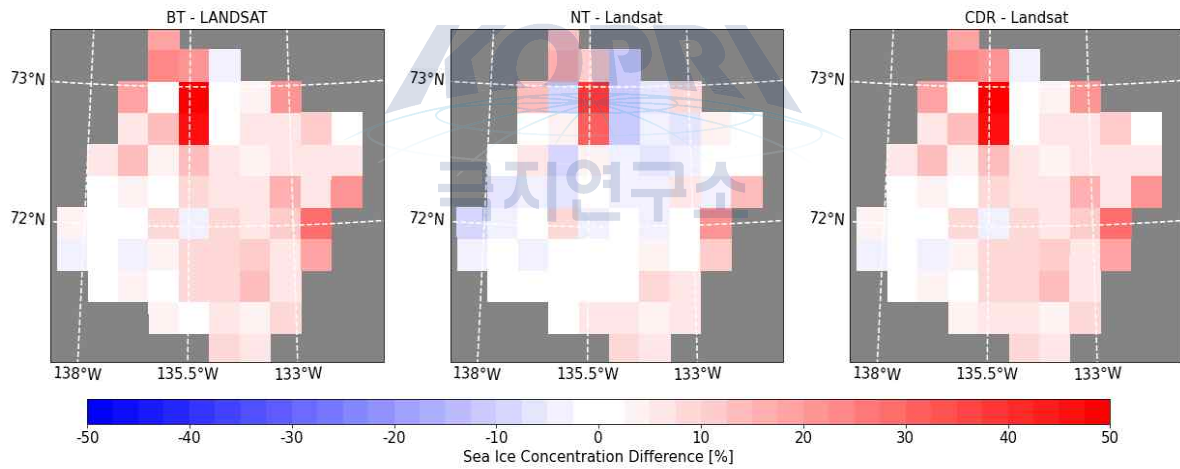


그림 3.1.3. 버포트해 영역 내부의 Landsat-8 이미지에 대한 (a) true-color 이미지, (b) 해빙 점유율 산출물, (c) - (e) BT, NT, CDR 해빙 점유율과 차이.

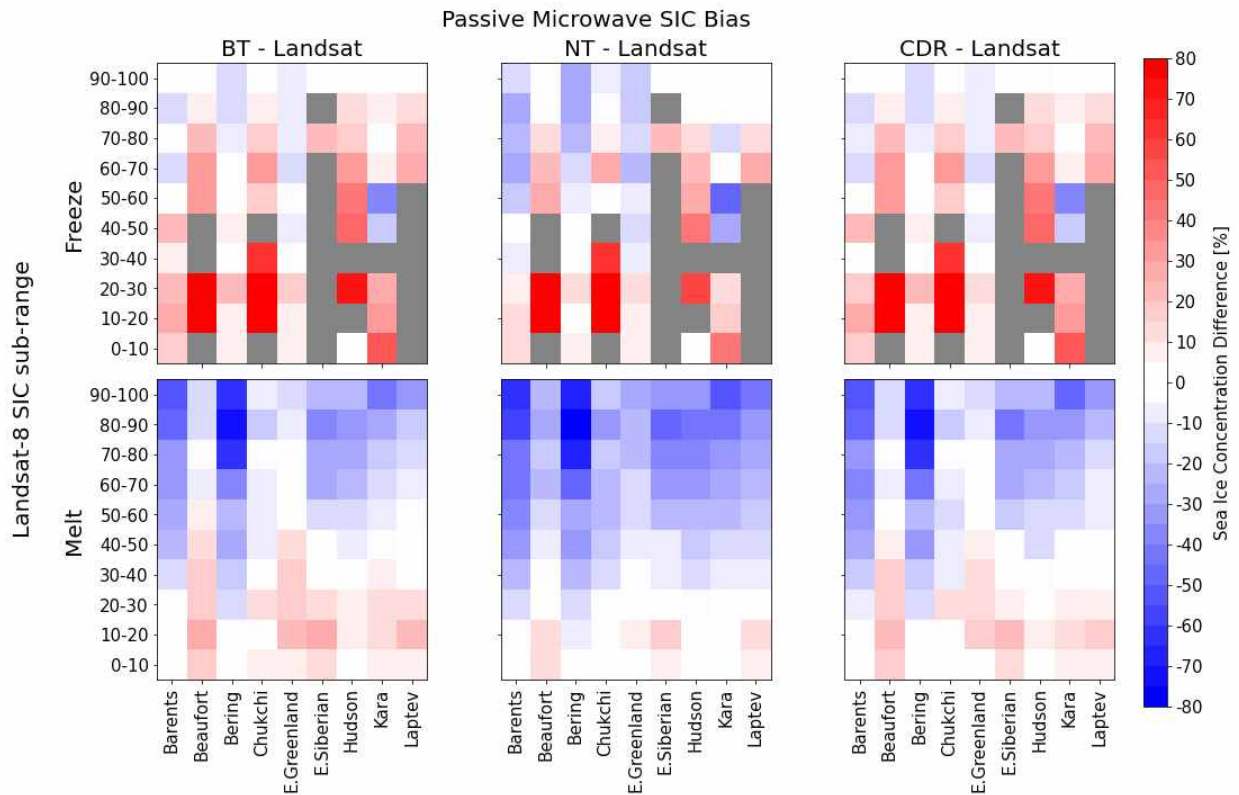


그림 3.1.4. Landsat-8 해빙 점유율의 범위에 따른 북극해의 해역별 수동마이크로파 해빙 점유율의 편의. 왼쪽부터 순서대로 BT, NT, CDR 알고리즘의 편의를 나타내며, 위쪽 행은 동결기, 아래쪽 행은 해빙기의 편의를 의미함.

극지연구소

2. 해빙 산출물의 정량적/정성적 오차정보 생산

차기 년도 자료동화에 사용할 위성 산출물의 정확성 파악을 위해 해빙 점유율, 해빙 두께에 대한 정성적/정량적 오차 분석을 수행함. 해빙 점유율 정확도 파악을 위해 사용된 위성 산출물은 DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) 위성의 SSMIS 센서로부터 산출된 결과이며, CDR, BT, NT 알고리즘에 따른 값이 존재함. 여기서 CDR 알고리즘은 지표면으로부터 멀리 떨어진 위성이 갖는 오차율을 보완하기 위해 만들어진 알고리즘임. 세 알고리즘 간 해빙 점유율 오차를 파악하기 위해 1990년도부터 2022년까지 연평균, 계절 평균, 지역 평균을 한 해빙 영역 및 해빙 면적 결과를 시계열 그래프로 비교했으며 (그림 3.1.5), 세 알고리즘 간의 상관성 분석, 선형 추세를 계산함. 세 알고리즘 간 상관도는 모두 0.996 이상으로 높은 일치성을 보였으며, 계절별 해빙 영역과 해빙 면적의 감소율은 여름철이 겨울철에 비해 2배 이상 빠른 것으로 나타남. 지역 평균에 활용된 마스킹 자료는 NSIDC (National Snow and Ice Data Center)에서 제공하는 자료를 활용했으며, 중앙 북극과 버퍼트 해역 시계열 그래프를 대표로 제시함 (그림 3.1.5 (c), (f)). 버퍼트 해역은 중앙 북극에 비해 해빙 점유율이 낮기 때문에 연도별 변동성이 큰 것으로 나타나며, 중앙 북극은 2007년을 기점으로 연간 해빙 점유율 변동성이 크게 나타남



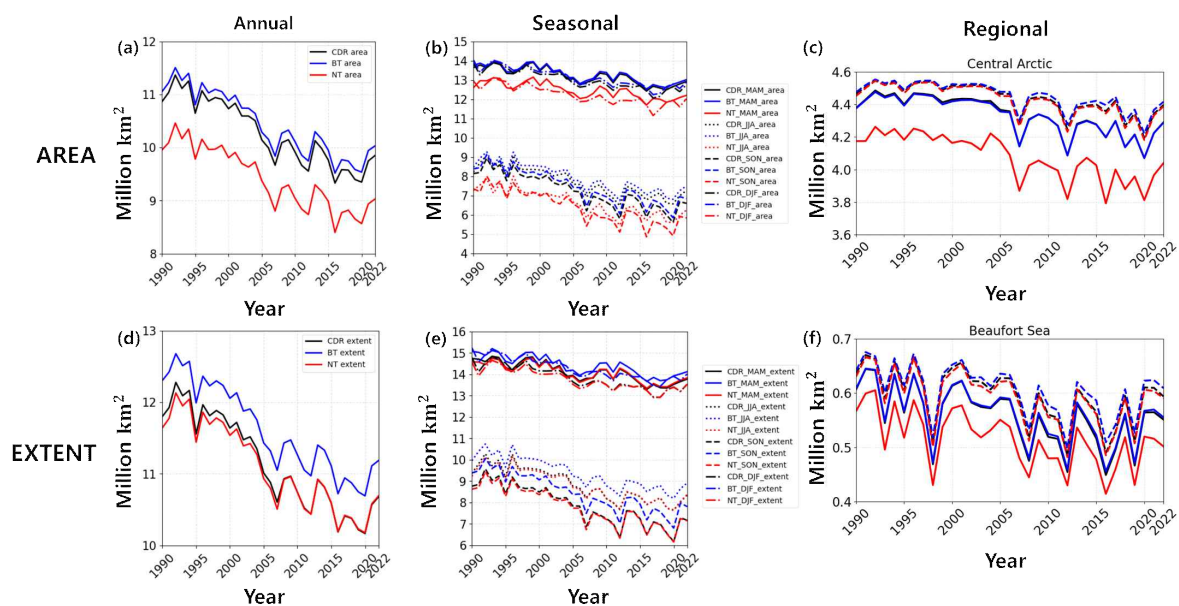


그림 3.1.5. 1990년부터 2022년까지 해빙 영역 (a), (b) 및 해빙 면적 (d), (e)에 대한 연평균 (a), (d), 계절 평균 (b), (e), 지역 평균 (c), (f) 시계열 그래프. CDR 알고리즘 산출물은 검정, BT 알고리즘 산출물은 파랑, NT 알고리즘 산출물은 빨강으로 표시함.

해빙 두께의 정확도 파악을 위해 사용된 위성 산출물은 CryoSat-2 (CS2)와 SMOS 산출물을 합쳐서 만든 CS2SMOS로, CS2가 얇은 해빙에서 해빙 두께 산출 오차가 커진다는 점을 SMOS가 보완함. 해당 자료는 2022년도 10월 15일부터 12월 31일까지 각 해역의 단년빙, 다년빙 변화 추이를 정량적으로 계산해 시계열 그래프로 나타냈으며, 해빙 두께의 일변화가 크지 않은 해역을 기준으로 함. 그림 3.1.6에서 중앙 북극과 머포트 해역 단년빙 (a), (b), 다년빙 (c), (d) 평균 두께를 시계열 그래프로 나타냄. 해빙 두께가 얇은 지역에서 위성 산출물의 오차가 큰 것으로 나타났지만, 선행연구(1)를 참고한 결과 비행체의 고도계로 관측한 자료와 비교했을 때 CS2SMOS 자료가 0.71의 높은 상관도를 보이며 얇은 해빙 두께를 비교적 정확하게 산출함을 파악함



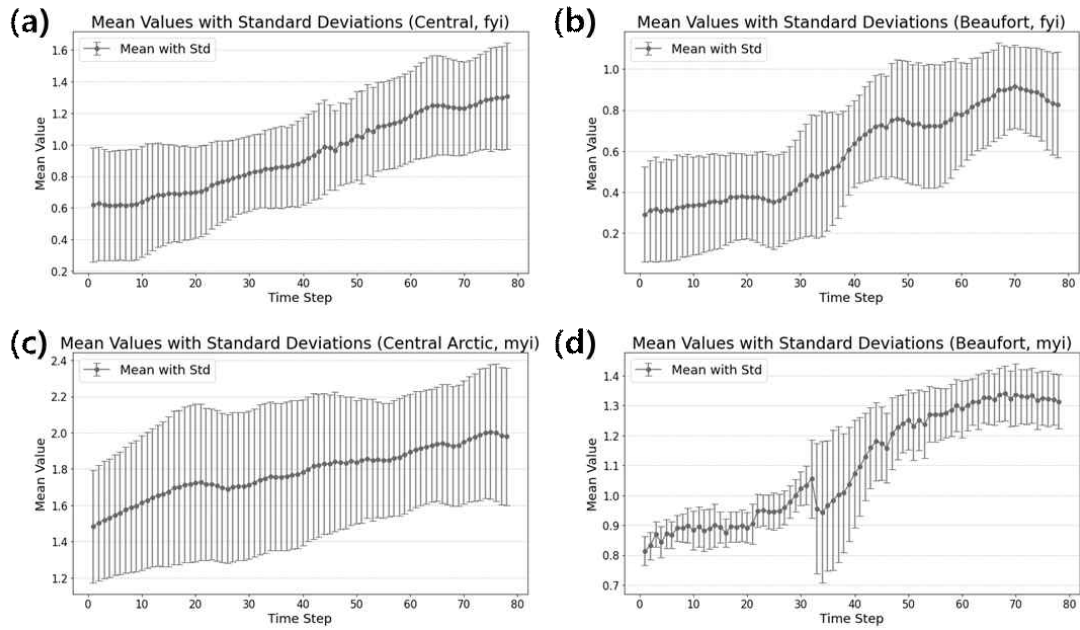


그림 3.1.6. 중앙 북극 (a), (c)와 버퍼트 해역 (b), (d)의 단년빙 (a), (b)과 다년빙 (c), (d) 시계열 그래프로 점은 해당 해역 평균 해빙 두께를 나타내고, 연한 회색 선은 표준 편차를 나타냄. 단위는 미터 (m) 임.



3. CESM 모델 내의 해빙 모델인 CICE의 내부 구조 파악 및 관련 기반연구 수행

또한 본 위탁연구에서 사용할 해빙모델로 지구시스템모델(CESM2: Community Earth System Model 2) 기반 해빙모형인 CICE5 (Community Ice Code 5)를 활용하여 연구를 수행하고자 함. CICE는 Los Alamos National Laboratory에서 단일 모형으로 개발된 후 NCAR (National Center for Atmospheric Research) CESM의 해빙 모형 성분으로 셋업되었음. CICE5의 내부 구조 및 특성에 대하여 파악하였으며 이는 다음과 같음. CICE5는 해빙과 눈의 성장 속도를 모의하고자 열역학과 역학 과정으로 이루어져 있으며 특히 용빙호(melt pond), 얼음산맥(ridging) 모수화 등의 복잡한 물리 모수화 체계가 포함되어 있는 최신의 해빙 모델임. CICE5의 수평 해상도는 1° 로 약 320×384 의 격자로 이루어져 있음(그림 3.1.7). CICE5는 해빙 두께 분포에 따른 5개의 카테고리 이루어져 있는데(그림 3.1.8), 각 카테고리는 순서대로 0, 0.64, 1.39, 2.47, 4.57 m의 경계로 나뉘어져 있고 각 카테고리는 해빙 온도와 염분 변동을 모의하고자 7개의 연직 얼음 층과 1개의 눈 층으로 이루어져 있음. 또한, CICE5를 활용한 해빙 자료동화시스템을 조사 및 선정하였으며, 이는 NCAR DART (Data Assimilation Research Testbed)로 CESM 뿐만 아니라 다른 모델들과의 자료동화시스템이 잘 구축되어 있고 DART CESM community 환경 또한 잘 구축되어 있기 때문에 연구를 수행함에 있어 적합하다고 판단하였음



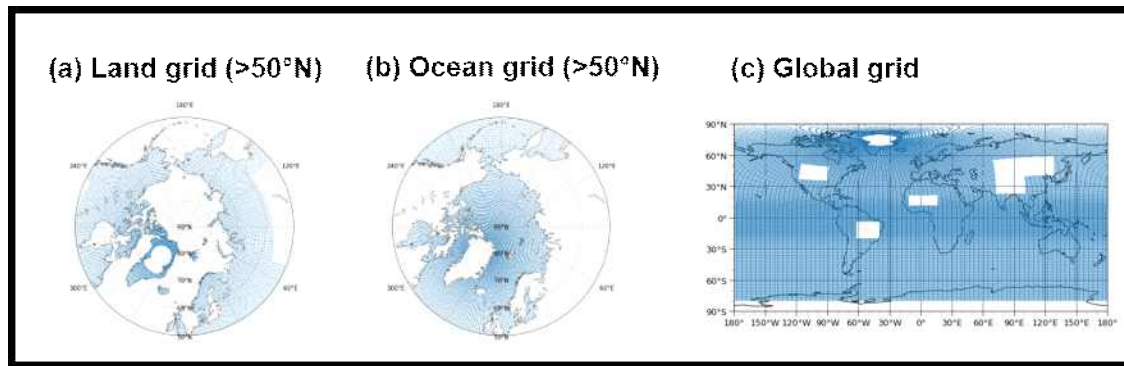


그림 3.1.7. 해빙모델(CICE5)의 격자구조 (a) 육지 마스크 (b) 해양 마스크 (c) 전지구 마스크



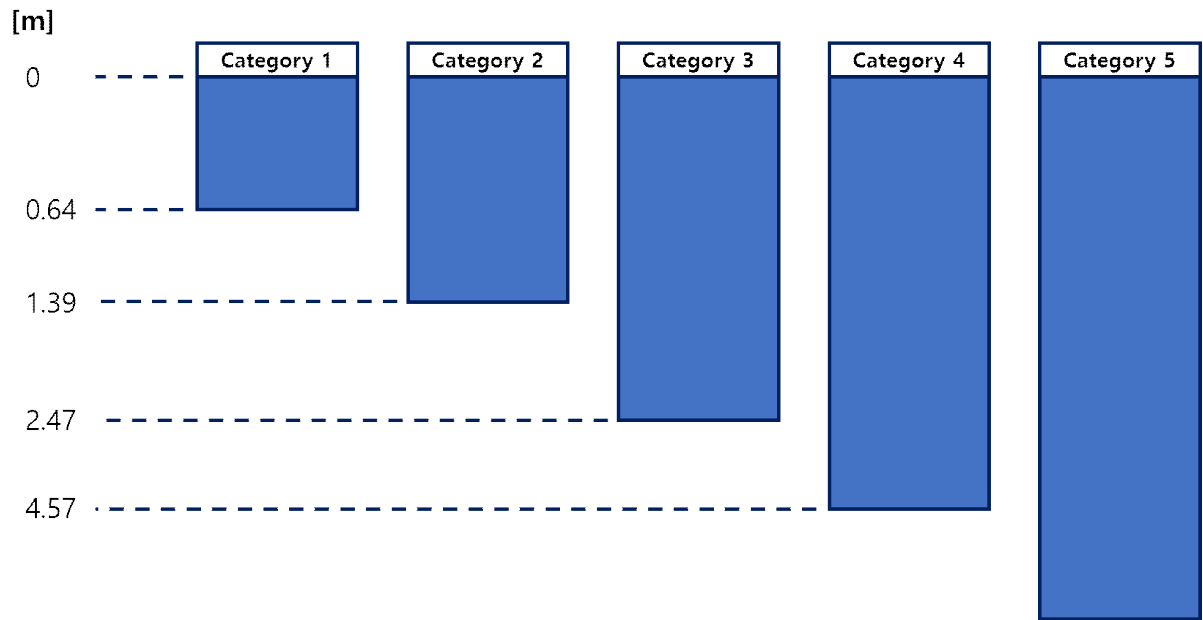


그림 3.1.8. 해빙모델(CICE5)의 두께 분포에 따른 카테고리 분포



제 2 절 (2차년도)인공위성 해빙산출물 자료동화 시스템 구축

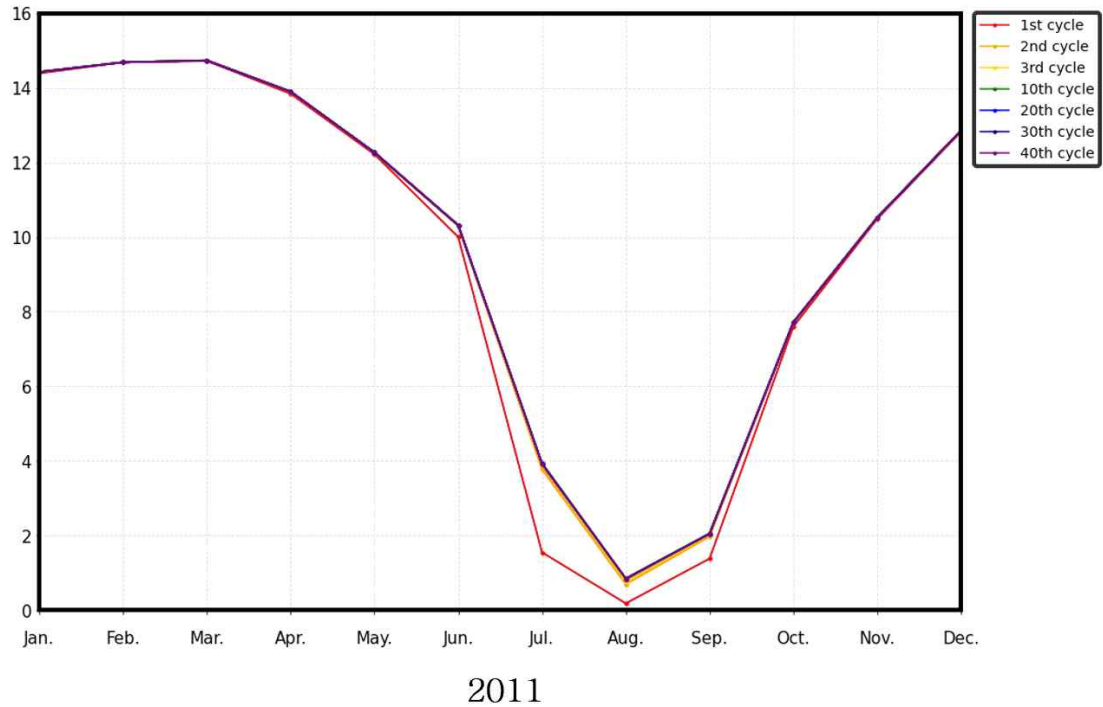
2차년도(2024)에는 해빙 위성 산출물 자료동화를 수행하기 위하여 1차년도(2023)에서 구축한 해빙 자료동화 시스템을 사용하였음. 해빙모델은 NCAR에서 운용 및 배포 중인 전 지구 기후 모델 CESM2의 해빙 성분 모형인 CICE5을 활용하였으며, 자료동화시스템은 동 기관에서 운용 및 배포 중인 DART를 활용하였음. 두 모델(시스템)은 같은 기관에서 운용되고 있기 때문에 호환성이 좋으며, 국내/외 많은 과학자들간의 커뮤니티가 활성화 되어 있어 안정성 및 기타 문제점이 발생하였을 때 비교적 어려움 없이 해결할 수 있다는 장점하에 두 모델을 선정하였음. 본 연구에서는 해빙모델/자료동화시스템(CICE5/DART)의 환경이 잘 구축되었음을 확인하였으며, 시험 테스트 또한 잘 수행되었음을 확인하였음. 해빙 자료동화체계에서 사용되는 주요 위성 기반의 산출물 변수는 각각 해빙점유율(sea ice concentration, SIC)과 해빙두께(sea ice thickness, SIT)로, 본 연구에서는 SSMIS 센서 기반의 SIC 산출물 자료와 CS2SMOS 위성 기반의 SIT 산출물 자료를 자료동화 수행 및 결과 비교 검증에 활용하였음. 또한, CICE5 해빙모델은 단일 모델로 대기와 해양 강제력 자료를 처방받음으로써 모델이 구동될 수 있음

1. 자료동화 시스템 구축

먼저 자료동화를 수행하기 위해서는 모델의 초기 값과 적절한 양상블 스프레드를 필요로 함. CICE5 해빙모델은 대기와 해양 강제력 자료를 처방해줌으로써 구동되며, 초기에 해빙을 모의하기 시작할 때는 해빙이 없는 상태(ice-free state)에서부터 적분을 시작하기 때문에 해빙모델이 평형 상태에 도달하기 위해 적절한 모델 적분 기간을 필요로 하게 됨. 이를 위한 과정을 스핀업(spin-up)이라고 하며, 이때 사용되는 대기 강제력 자료는 NCAR에서 제공하고 있는 Community Atmosphere Model version 6/DART (CAM6/DART) 양상블 기반의 대기 재분석장 자료이고(Raeder et al., 2022), 해양 강제력 자료는 NCAR에서 제공하고 있는 Slab Ocean Model의 자료를 사용하였음

그림 3.2.1은 스핀업을 수행하였을 때의 결과로 2011년 한 해를 40번 동안 반복하여 총 40년 기간의 모델 적분을 수행하였음. CICE5 해빙모델은 해빙의 온도와 염분의 변동성을 고려하기 위해 5개의 해빙두께 카테고리로 나뉘어져 있는데, 각 카테고리의 변수를 합한 것을 aggregated variable, 각각을 categorized variable이라고 함. 그림 3.2.1(a)의 aggregated sae-ice extent를 볼 때, 스핀업을 이루기까지 약 2~3년 정도의 모델 적분 기간이 충분할 것으로 보임. 그러나 그림 3.2.1(b)와 같이 categorized sea-ice extent로 볼 때, 특히 category 4와 category 5에서 약 30~40년 정도의 모델 적분이 수행되었을 때 평형 상태에 이르는 것을 볼 수 있음. 그러므로 본 연구에서는 총 40년 기간의 모델 적분 기간이 충분할 것으로 보여 40년의 스핀업을 수행하였음

(a) Timeseries of aggregated sea-ice extent ($\times 10^6 \text{ km}^2$)



(b) Timeseries of categorized sea-ice extent ($\times 10^6 \text{ km}^2$)

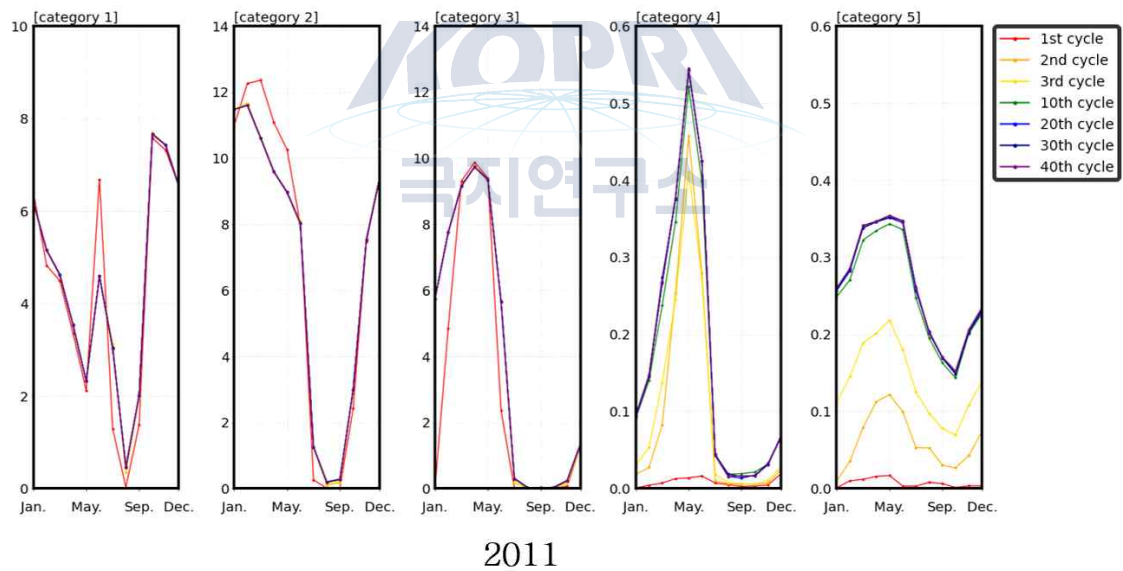


그림 3.2.1. CICE5 해빙 예측모델의 스핀업 결과. (a) Aggregated sea-ice extent (b) Categorized sea-ice extent. 기간은 2011.01-2011.12.

스핀업으로부터 얻은 모델의 시작값을 기반으로 앙상블 적응 실험을 수행하였음. CICE5/DART는 앙상블 기반의 자료동화 시스템으로 앙상블 자료동화의 성능을 개선시키기 위해서는 적절한 앙상블 스프레드가 있어야 함. 본 연구에서의 앙상블 개수는 30개로 선정하여 자료동화 실험을 진행하였음

스핀업과 앙상블 적응 과정을 통해 필요한 실험 과정을 구축한 뒤 자료동화 실험을 진행하였음. 본 CICE5 해빙모델에 동화할 SIC 관측자료는 지난 40년 동안 꾸준히 관측 및 산출되어 오고 있으며, 이를 활용한 자료동화 연구도 꾸준히 진행되어 왔음. 반면, SIT 관측자료는 산출하는 과정에서부터 큰 불확실성을 갖고 있으며 특히 해빙이 녹아 해빙 위에 융빙호(melt ponds)가 생성되는 여름철 및 가을철에는 해빙두께 자료의 산출이 어려워 해당 기간을 제외한 계절에만 자료가 제공되고 있음. 이러한 이유로 위성 기반의 SIT 관측자료를 동화하는 연구는 SIC 관측자료를 동화하는 연구에 비교적 적음. 본 연구에서 활용한 SIC 관측자료는 National Snow and Ice Data Center에서 제공하고 있는 Defense Meteorological Satellite Program - F17 위성에 탑재된 Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS)로부터 산출된 밝기 온도를 해빙점유율로 산출된 자료이며, 2014년 5월부터 2015년 4월까지 1년 동안 사용하였으며 자료동화의 성능을 평가하고자 대조군으로 사용하였으며, 해당 자료의 공간 해상도와 시간 해상도는 각각 25 km x 25 km, 일일 간격이며 관측오차는 시공간적으로 0.15의 일정한 값으로 처방하였음. 또한, 본 연구에서 활용한 SIT 관측자료는 Alfred Wegener Institute에서 제공하고 있는 CryoSat-2 (CS2) 위성으로부터 산출되는 해빙두께와 European Space Agency에서 제공하고 있는 Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) 위성으로부터 산출되는 해빙두께 자료를 혼합한 자료인 CS2SMOS의 해빙두께 산출물 자료이며, 겨울철 자료만 제공하고 있기 때문에 2014년 10월 중순부터 2015년 4월까지 사용하였고, 마찬가지로 자료동화의 성능을 평가하고자 대조군으로 사용하였음. 해당 자료의 공간 해상도와 시간 해상도는 SIC 관측자료와 동일하며, 관측오차는 해당 데이터세트에서 제공되는 불확실성 값을 사용하였음

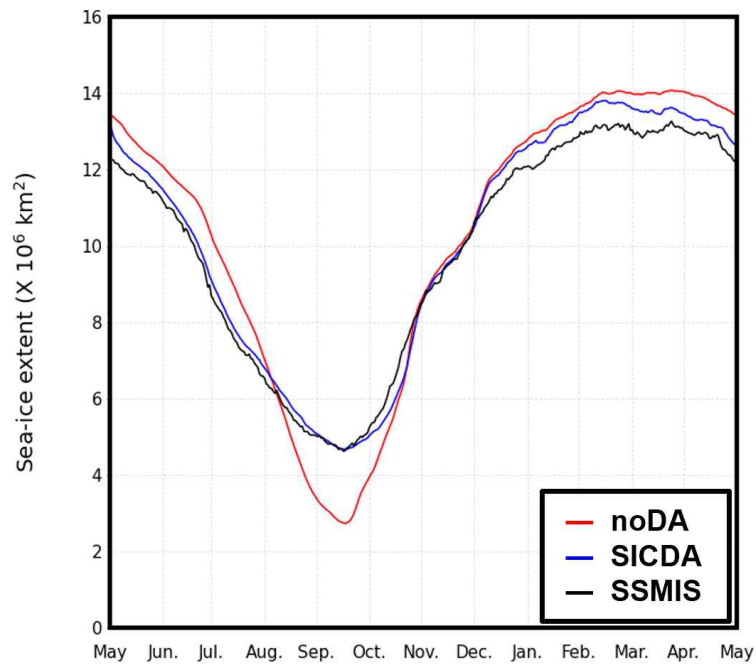
본 연구에서는 다음과 같이 세 개의 자료동화 실험을 수행하였음: (1) noDA - 자료동화가 수행되지 않은 기준 실험 (2) SICDA - SIC 산출물 자료동화가 수행된 실험 (3) SITDA - SIT 산출물 자료동화가 수행된 실험

먼저 실험 SICDA에 대하여, 그림 3.2.2는 위성 기반의 SIC 관측자료를 동화하였을 때의 결과를 일별 시계열 자료로 나타낸 그림으로, 기간은 2014년 5월 1일부터 2015년 4월 30일까지이고, 자료동화는 하루 간격으로 수행하였음. 그림 3.2.2(a)에서 빨간색 실선은 noDA, 파란색 실선은 SICDA, 그리고 검정색 실선은 SSMIS로, 자료동화가 수행되었을 때 빨간색 실선에서 파란색 실선으로의 결과가 검정색 실선과 가까울수록 자료동화 성능이 좋음을 의미함. 자료동화가 수행되면서 봄철과 여름철을 지나 가을철까지의 결과를 봤을 때, SICDA가 SSMIS와 근접한 모습을 보이고 있으며, 특히 5~8월에 noDA가 SSMIS에 비해 과대 모의하는 모습을 보이고 있고, SIC를 동화해줌으로써 SICDA에서 과대모의 양상이 크게 줄어드는 모습을 볼 수 있음.

또한, 8~10월 중순까지 noDA가 SSMIS에 비해 과소 모의하는 모습을 보이고 있지만, SIC를 동화해줌으로써 SICDA에서 과소 모의 양상 또한 크게 줄어드는 모습을 보임. 이는 그림 3.2.2(b)를 통해서도 확인할 수 있으며, 여기서 빨간색 실선은 noDA-SSMIS, 파란색 실선은 SICDA-SSMIS를 의미함. 다만 12~3월까지 겨울철 기간 동안 SICDA가 noDA와 비슷한 모습을 보이고 있으며, 이는 해당 기간의 자료동화 성능이 다른 기간에 비해 약한 것임을 알 수 있음. 이러한 이유로는, 겨울철 북극 지역에 직접적으로 입사하는 태양 복사 에너지가 없기 때문에 CICE5의 앙상블 모델에서 섭동을 주어도 앙상블 멤버간의 차이가 약하여 그로 인해 겨울철에 앙상블 스프레드가 적절히 퍼지지 못하고 그로 인해 관측자료의 영향이 줄어들었기 때문에 발생한 것으로 보임. 이는 겨울철이 지나 다시 봄철로 이르렀을 때 SIC 관측자료의 영향이 다시금 커지는, 즉, SICDA가 SSMIS와 근접해지는 모습을 통해 확인할 수 있음



(a) Time series of sea-ice extent analysis



(b) Time series of sea-ice extent departure OBS

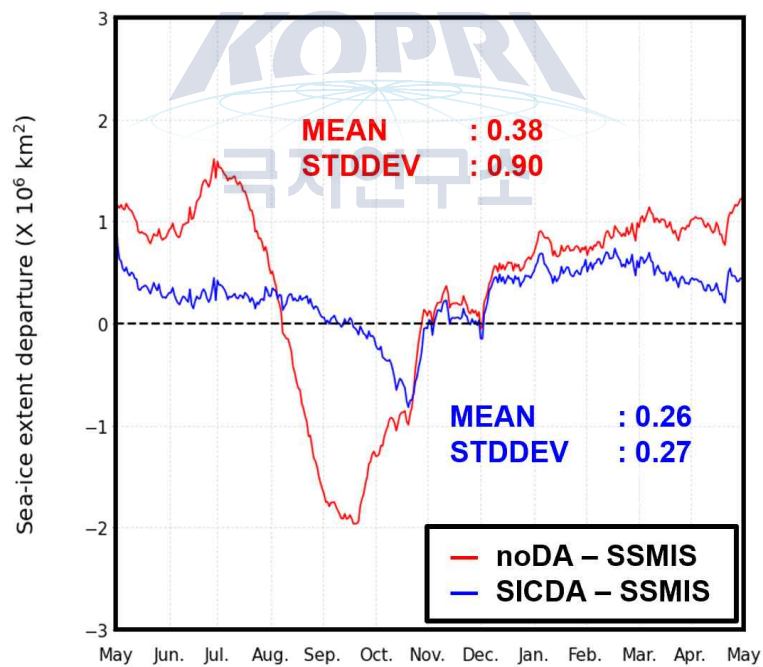


그림 3.2.2. (a) 일별 북극 해빙 면적(sea-ice extent). 빨간색 실선은 noDA, 파란색 실선은 SICDA, 검정색 실선은 SSMIS를 의미. (b) 일별 북극 해빙 면적 차이. 빨간색 실선은 noDA와 SSMIS의 차이, 파란색 실선은 SICDA와 SSMIS의 차이. 실험 기간은 2014.05-2015.04.

그림 3.2.3과 3.2.4는 계절별 noDA/SICDA와 SSMIS와의 SIC 공간 편차를 월별로 평균한 그림으로, 빨간색은 noDA/SICDA가 SSMIS보다 과대 모의를, 파란색은 noDA/SICDA가 SSMIS보다 과소 모의를 하는 것을 의미하고, 흰색의 분포가 많을수록 SIC 관측자료의 동화 성능이 좋음을 의미함. 또한 초록색 숫자는 SSMIS 대비 평균제곱근오차 (Root-Mean-Square Error, RMSE)를 나타낸 값으로 작을수록 동화 성능이 좋음을 의미함. 그림 3.2.3에서 noDA와 SSMIS의 계절별 SIC 편차 평균을 볼 때, 대부분의 기간에서는 해빙의 가장자리에서 양의 편차를 보이고 있는데, 이는 CICE5 해빙모델이 해빙의 가장자리에서 관측보다 과대모의하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있음. 반면, 7~8월에는 북극 중앙 해역에서 강한 음의 편차를 보이고 있어 CICE5 해빙모델이 관측보다 과소모의하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있음. 즉, 자료동화를 하기 이전의 CICE5 해빙모델은 겨울철에 해빙을 과대모의하고 여름철에는 과소모의하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있음

그림 3.2.4에서 자료동화를 수행한 결과인 SICDA와 SSMIS의 계절별 SIC 편차 평균을 볼 때, 5~10월까지 양/음의 편차가 대부분 줄어들었음을 알 수 있으며, 이는 계절별 그리고 지역별로 봤을 때 자료동화의 성능으로 인한 해빙 예측성이 좋아졌음을 의미함. 그러나 11월부터 겨울철에는 noDA-SSMIS의 편차보다 적지만 비슷한 분포를 보이고, 3월부터는 다시 편차가 줄어드는 모습을 보이는데, 이는 해당 기간 동안에 자료동화 성능이 비교적 약한 것을 알 수 있음. 그림 3.2.3과 그림 3.2.4에서의 RMSE의 최소값과 최대값, 평균값은 각각 12.11, 21.7, 16.18 그리고 5.01, 13.02, 8.40으로 SIC 관측자료를 동화해줌으로써 모든 계절에서 RMSE가 감소한 것을 알 수 있음. 그림 3.2.3과 3.2.4의 결과는 그림 3.2.2와 동일하게 분석할 수 있음

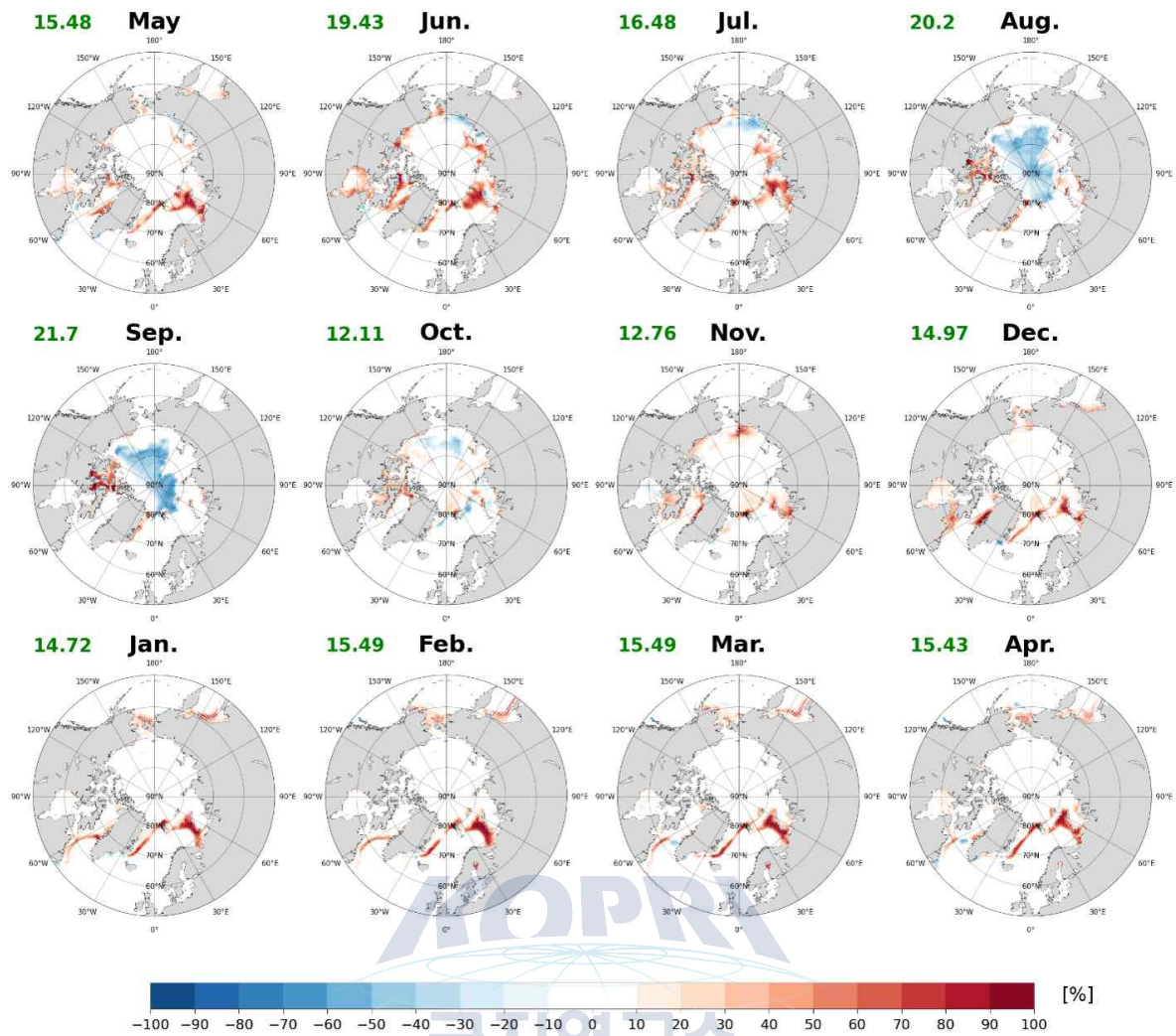


그림 3.2.3. 계절별 noDA와 SSMIS와의 SIC 편차 평균. 기간은 2014.05-2015.04.

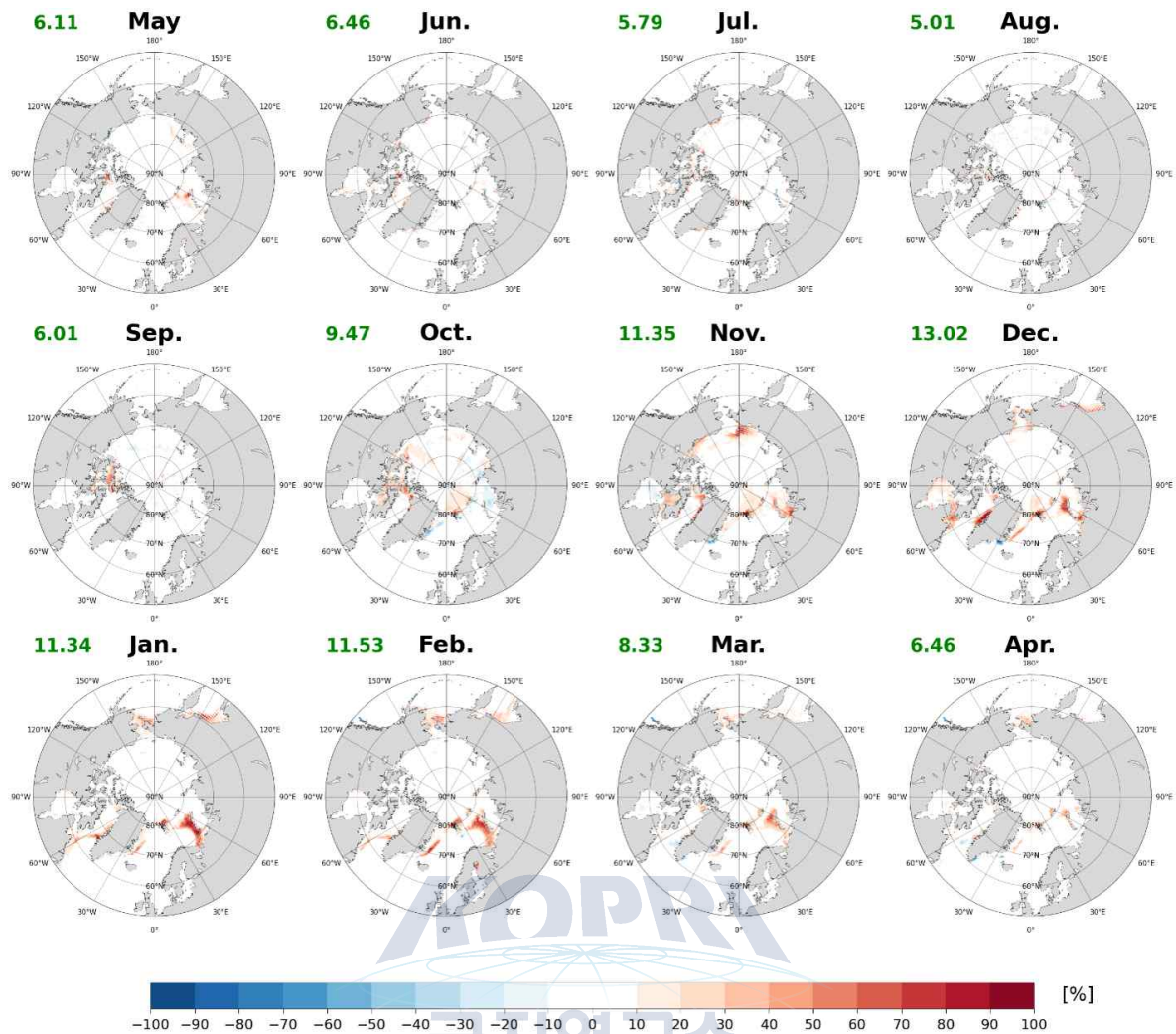
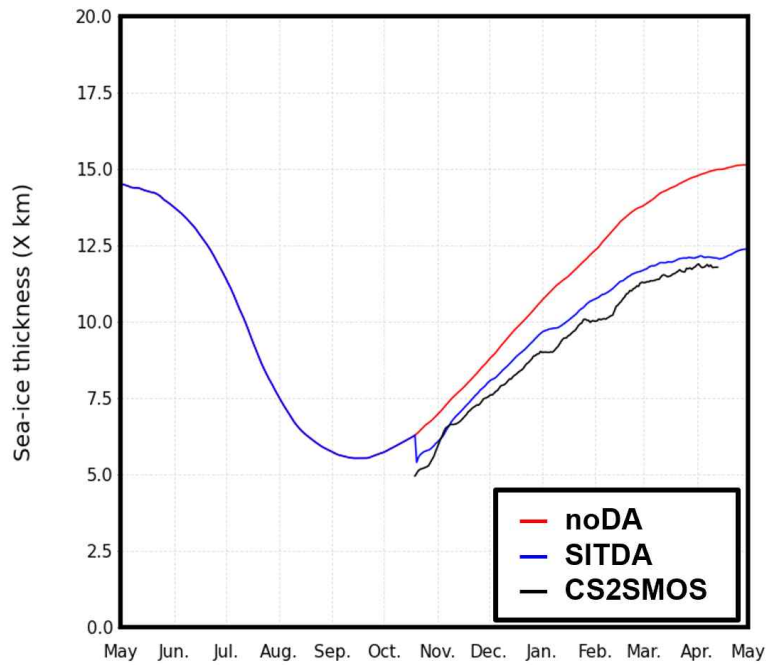


그림 3.2.4. 계절별 SICDA와 SSMIS와의 SIC 편차 평균. 기간은 2014.05-2015.04.

그 다음으로 SITDA 실험에 대하여, 그림 3.2.5는 위성 기반의 SIT 관측자료를 동화하였을 때의 결과를 일별 시계열 자료로 나타낸 그림으로, 기간은 2014년 5월 1일부터 2015년 4월 30일까지이고, 자료동화는 하루 간격으로 수행하였음. 다만 CS2SMOS 해빙두께 관측자료는 겨울철에만 제공되고 있기 때문에 자료동화는 10월 중순부터 4월 중순까지 수행되었음. 그림 3.2.5(a)에서 빨간색 실선은 noDA, 파란색 실선은 SITDA, 그리고 검정색 실선은 CS2SMOS로, 마찬가지로 자료동화가 수행되었을 때 빨간색 실선에서 파란색 실선으로의 결과가 검정색 실선과 가까울수록 자료동화 성능이 좋음을 의미함. 자료의 부재로 인해 첫 실험 기간인 5월부터 10월 중순까지 SITDA 실험은 noDA와 같이 해빙 산출물 자료가 동화되지 않기 때문에 동일한 결과를 보이고 있음. SIT 관측자료가 존재할 시점인 10월 중순부터 자료동화가 수행되자마자 SITDA의 결과는 noDA와 크게 달라지며 모델 적분 시간이 지나면서 점차 CS2SMOS SIT 관측자료에 접근하는 모습을 보임. 그러나 4월 중순 이후로 다시 관측자료의 부재로 인해 오로지 CICE5 해빙모델만의 적분으로 인해 해빙두께 결과가 noDA에 근접해지는 모습을 보이는데, 이러한 결과와 noDA 결과를 통해 알 수 있는 것은 CICE5 해빙모델은 해빙면적 뿐만 아니라 해빙두께 또한 과대모의하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있음. 이는 그림 3.2.5(b)를 통해서도 확인할 수 있으며, 여기서 빨간색 실선은 noDA-CS2SMOS, 파란색 실선은 SITDA-CS2SMOS를 의미함. CS2SMOS SIT 관측자료를 동화해줌으로써 파란색 실선이 0선에 가까워지는 모습을 보여 SITDA 실험이 잘 수행되었음을 알 수 있음



(a) Time series of sea-ice thickness analysis



(b) Time series of sea-ice thickness departure OBS

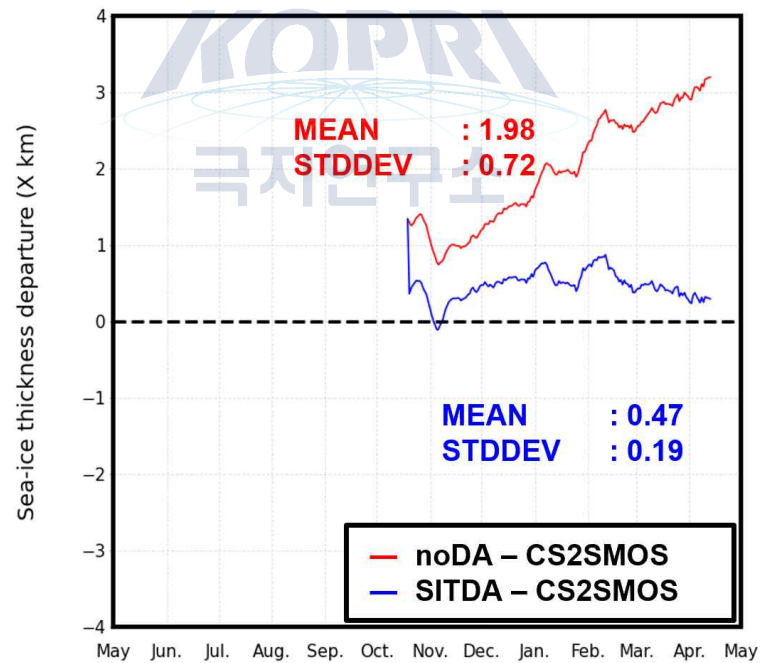


그림 3.2.5. (a) 일별 북극 해빙 면적(sea-ice thickness). 빨간색 실선은 noDA, 파란색 실선은 SITDA, 검정색 실선은 CS2SMOS를 의미. (b) 일별 북극 해빙두께 차이. 빨간색 실선은 noDA와 CS2SMOS의 차이, 파란색 실선은 SITDA와 CS2SMOS의 차이. 실험 기간은 2014.05-2015.04.

그림 3.2.6과 3.2.7은 계절별 noDA/SITDA와 CS2SMOS와의 SIT 공간 편차를 평균한 그림으로, 빨간색은 noDA/SITDA가 CS2SMOS보다 과대모의를, 파란색은 noDA/SITDA가 CS2SMOS보다 과소모의를 하는 것을 의미하고, 흰색의 분포가 많을수록 SIT 관측자료의 동화 성능이 좋음을 의미함. 또한 초록색 숫자는 RMSE이며, 작을수록 동화 성능이 좋음을 의미함. 마찬가지로 여름철 CS2SMOS SIT 관측자료의 부재로 인해 겨울철(10~4월) 기간동안에만 자료동화가 수행되었기 때문에 결과 또한 겨울철(10~4월) 기간에 해당됨. 그림 3.2.6에서 noDA와 CS2SMOS의 계절별 SIT 편차 평균을 볼 때, 겨울철 모든 기간에 대하여 캐나다 북쪽 지역(Canadian Archipelago)에서 큰 양의 편차를 보이고 있고, 북극 중앙 해역에서 큰 음의 편차를 보이고 있음. 그림 3.2.6에서와 마찬가지로 CICE5 해빙모델이 모의하는 해빙두께는 전반적으로 해빙을 크게 모의하는 경향을 보이는데, 특히 캐나다 북쪽 지역에서는 해빙을 관측자료 대비 약 3 m 이상 두껍게 모의하는 것을 알 수 있음. 그림 3.2.7에서 자료동화를 수행한 결과인 SITDA와 CS2SMOS의 계절별 SIT 편차 평균을 볼 때, noDA-CS2SMOS에서 보였던 큰 양/음의 편차가 대부분 감소한 것을 볼 수 있는데, 이는 SIT 관측자료의 동화가 잘 수행되었다는 것으로 볼 수 있음. 특히 모든 실험 기간에서 북극 중앙 해역에서 존재하였던 큰 음의 편차는 모두 없어졌으며, 캐나다 북쪽 지역에 있는 양의 편차는 일부 남아있지만 큰 과대모의성을 낮춰주는 역할을 하였음. RMSE의 최소값, 최대값, 그리고 평균값은 각각 0.95, 1.31, 1.05 그리고 0.39, 0.64, 0.45로 SICDA와 동일한 결과로 CS2SMOS SIT 관측자료를 동화해줌으로써 모든 실험 기간에서 RMSE가 감소한 것을 알 수 있음. 그림 3.2.6과 3.2.7의 결과는 그림 3.2.5와 동일하게 분석할 수 있음

KOPRI
극지연구소

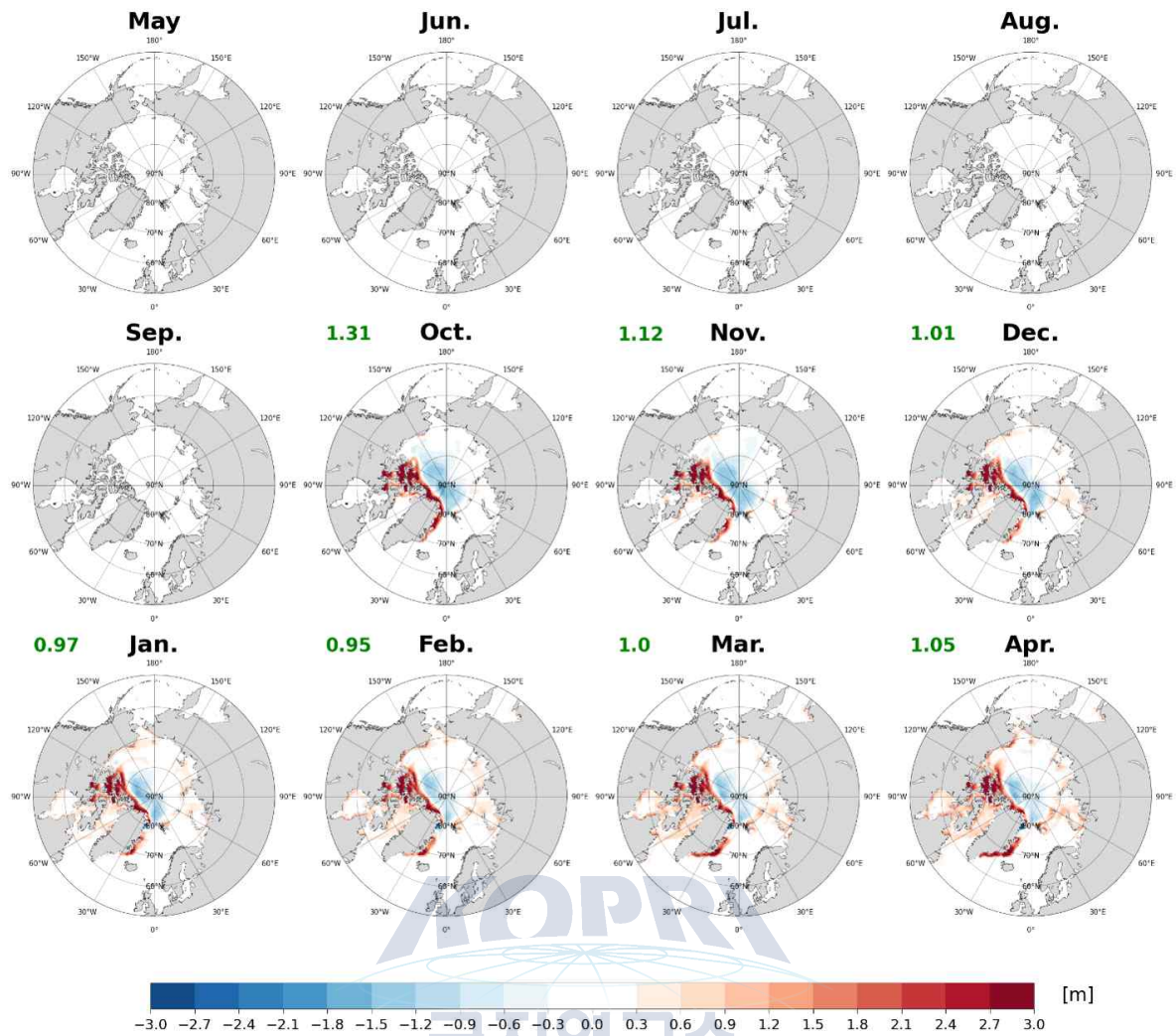


그림 3.2.6. 계절별 noDA와 CS2SMOS와의 SIT 편차 평균. 기간은 2014.05-2015.04.

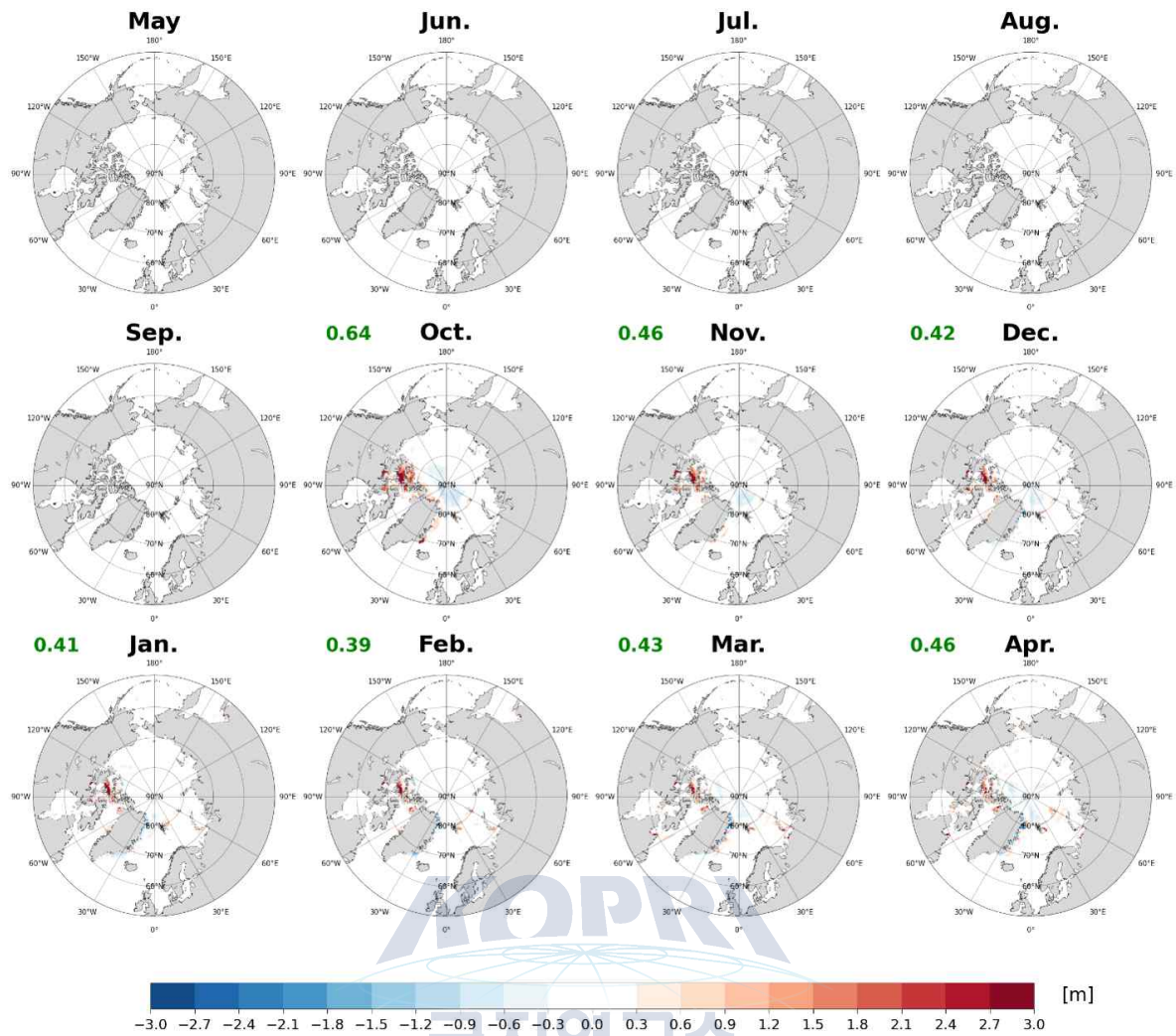


그림 3.2.7. 계절별 SITDA와 CS2SMOS와의 SIT 편차 평균. 기간은 2014.05-2015.04.

제 3 절 (3차년도)해빙자료동화에 따른 해빙모델 분석장 평가 및 해빙모델 기반 테스트

1. 해빙 자료동화체계를 이용한 해빙모델 초기자료 생산

2차년도에 구축한 해빙 위성산출물 자료동화체계의 안정성 확보를 위해 장기간 초기장 생산을 위한 대기강제력 자료를 변경하였음. 기존에 활용했던 CAM6-DART 대기강제력 자료는 2011년 이후로만 존재하여, 20년 이상의 장기간 초기장 생산에 제한적임. 이를 극복하기 위하여 1940년부터 10개 앙상블 멤버가 제공되는 ERA5 자료를 기반으로 새로운 대기강제력 자료를 추출하고 이를 자료동화에 입력자료로 활용함. ERA5 자료의 변수(10 m 바람장, 2 m 온도, 이슬점 온도, 평균 해수면 압력, 표면 압력, 강수량, 강설량, 단파 및 장파 복사)를 DART 대기강제력 입력 형식으로 변환 후, 해빙 자료동화시스템에 입력하는 체계를 구축함

해빙모델(CICE5)의 수치적 안정성은 확보를 위해 동역학과 열역학 시간 간격의 비율을 조정하였음. 예를 들어, CICE 모델에서 ndtd (Number of dynamic time steps per thermodynamic time step) 조정: ndtd 값을 2로 설정(열역학 시간 간격 1회마다 동역학 시간 간격 2회 수행)하여 모델의 수치 안정성을 높임. 또한, 단변량 및 다변량 자료동화 과정에서 Localization Radius에 따라 최적화된 분석장이 다르다는 것을 파악하여, 자료동화 과정에 따른 최적의 Localization Radius를 찾아서 반영함. 단변량 동화시 0.05 rad, 다변량 동화시 0.02 rad가 CICE5/DART에서 최적화된 Localization Radius임

해빙의 기후적 변동성 분석을 위해 장기간(20년 이상) 전지구 해빙 초기장을 생산하였음. ERA5 대기강제력을 이용한 20년 이상 전지구 해빙 초기장 생산은 그림 3.3.1과 같이 스핀업, 앙상블 스핀업, 자료동화 단계로 구성됨. 먼저, CICE5 해빙모델이 주어진 대기강제력 정보를 반영하여 물리적 및 동역학적 평형 상태에 도달하기 위해 적절한 모델 적분 기간이 필요하며, 이를 위해 본 연구에서는 40년의 스핀업을 수행하였음. 이후 스핀업을 통해 얻은 모델의 초기값에 ERA5 대기강제력의 10개 앙상블 정보를 적용하여, 모델의 초기값을 10개 앙상블로 구성하였음. 또한, 앙상블 멤버에 분산을 부여한 후, 물리적 및 동역학적으로 일관된 초기 상태를 확보하기 위해 일정 기간(본 연구에서는 2년 5개월) 동안 모델 적분을 추가로 수행함. 2차년도 구축한 자료동화체계를 기반으로, 해빙 위성산출물(해빙점유율 및 해빙두께)을 1994년 5월부터 2020년 12월까지 동화하였음. 이때, 해빙점유율(sea ice concentration; SIC)은 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)의 F17 위성에 탑재된 Special Sensor Microwave Imager/Sounder 센서로 관측된 밝기온도를 바탕으로, NASA Team 알고리즘을 통해 산출된 자료를 사용함. 해빙두께(sea ice thickness; SIT)는 CryoSat-2 (CS2) 위성과 Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) 위성으로부터 관측되는 해빙 두께를 혼합한 자료(이하 CS2SMOS)를 사용함. 두 해빙 위성산출물 모두 공간해상도는 25 km, 시간 해상도는 일일 간

격으로 동일함. 한편, 해빙 두께 산출 시 용빙호(melt pond)와 해빙(sea ice)과의 분간이 어려운 문제로 인해 해당 자료는 겨울철(10월 중순부터 4월 중순)에만 제공되며, 이 기간에만 자료를 활용함



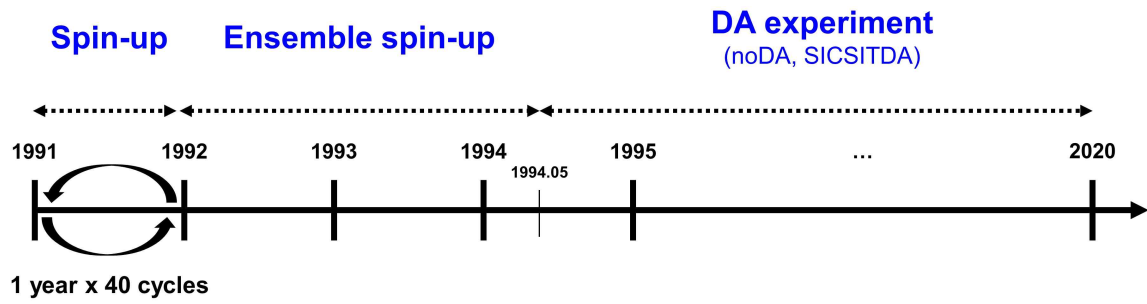


그림 3.3.1 장기간 전지구 해빙 초기장 생산 설계도



해빙점유율 및 해빙 두께를 동화하여 초기화된 해빙모델(CICE5) 초기장(해빙 면적)의 시계열 변화는 그림 3.3.2에 제시됨. 20년 이상의 장기간 동안 자료동화 시스템이 안정적으로 수행되었으며, 자료동화를 적용하지 않은 실험(noDA) 대비 관측 값에 더 근접한 결과를 나타냄. 자료동화의 효과는 봄, 여름, 그리고 가을철에 뚜렷하고 겨울철에는 미미함



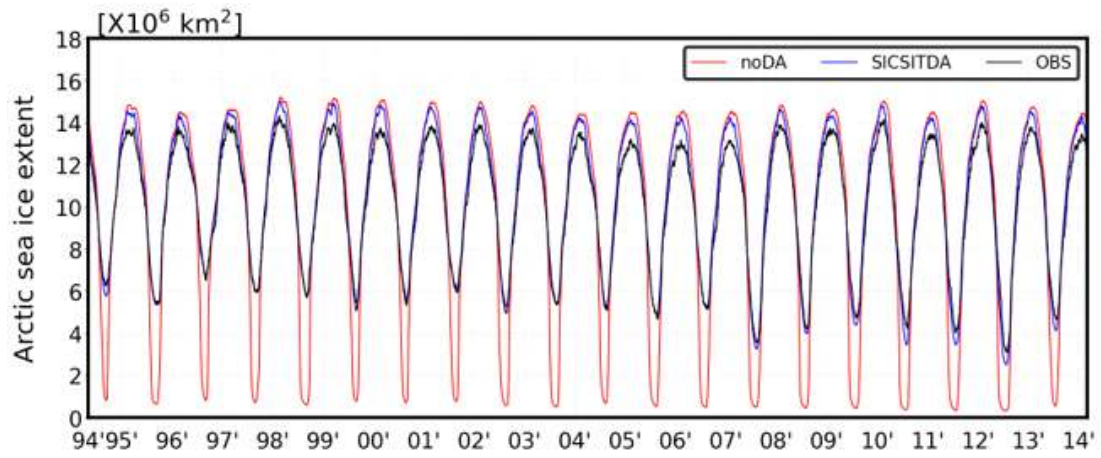


그림 3.3.2 장기간 전지구 해빙 초기장(해빙면적) 시계열



2. CESM2 기반 계절예측 수행 및 해빙 자료동화를 통한 해빙모델 초기화가 계절예측에 미치는 영향 평가

CESM2 기반 계절예측 실험을 수행하여, 해빙 자료동화를 통해 초기화된 해빙장이 계절예측 성능에 미치는 영향을 평가하였음. 이를 위해 다음 네 가지 초기 조건을 사용하여 예측 실험을 수행하고 비교 분석함. (1) 자료동화를 수행하지 않은 실험(noDA)의 초기장, (2) 해빙점유율을 동화한 실험(SICDA)의 초기장, (3) 해빙두께를 동화한 실험(SITDA)의 초기장, (4) 해빙 점유율 및 해빙두께를 동화한 실험(SICSITDA)의 초기장.

초기장 자체의 영향뿐만 아니라 초기화 시기(예측 시작 월 또는 계절)에 따른 예측 성능 변화를 분석하기 위해, 다양한 월 또는 계절별로 예측을 시작하여 평가를 수행함. 계절 변화에 따른 실험결과를 확인하기 위하여 2019년 4월, 6월, 9월, 11월에 각각 초기화하여 융빙기와 결빙기, 해빙 최대 및 최소시기로 서로 다른 계절적 특징을 갖는 시점부터 실험이 수행됨.

기준실험(noDA)과 비교하여 자료동화 실험에서 PIOMAS 해빙 면적에 일치하는 경향을 보임(그림 3.3.3). 분석장 성능평가의 경우 기준실험과 SITDA 실험에서는 여름철 해빙의 면적을 과소 모의하는 경향을 보임. SICDA와 SICSITDA 실험에서는 관측 및 재분석자료와 일치하는 모습을 보임. 반면, 겨울철 해빙에서는 모든 실험에서 관측 및 재분석자료 대비 과대 모의하는 특징이 나타남. 모델과 관측의 차이를 편차와 평균제곱근오차로 비교하면, 전반적으로 자료동화 후의 예측 결과가 기준실험 대비 작은 값을 보임. 즉, 자료동화로 인해 예측성능이 향상됨이 확인됨(2019년 4월 초기화 실험 예제, 그림 3.3.4). 초기화 시점에 대한 성능 비교 결과, 모든 실험에서 해빙 점유율과 해빙 두께를 모두 동화한 다변량실험(SICSITDA)의 예측 결과가 관측과 일치하는 모습을 보였으며, 그 뒤를 해빙 점유율 단변량실험(SICDA), 해빙 두께 단변량실험(SITDA), 기준실험(noDA)이 따랐음. 즉, 다변량 자료동화는 해빙모델의 예측성능을 향상시키는데 필수적인 동화 기법이라 판단됨(그림 3.3.5). 예측 시작 시점에 따라 예측성능은 다르게 나타남. 특히, 모델의 불확실성이 커지는 융해기에 초기화된 예측 실험에서 성능 향상이 두드러지게 나타남. 아래는 가장 우수한 예측성능을 보이는 SICSITDA 실험 결과와 PIOMAS 재분석장 대비 예측 시작 시점별 해빙면적 RMSE 값임

- 2019년 4월 초기화: RMSE = -4.9 % (해빙면적(Sea Ice Extent))
- 2019년 6월 초기화: RMSE = -7.7 % (해빙면적(Sea Ice Extent))
- 2019년 9월 초기화: RMSE = -3.7 % (해빙면적(Sea Ice Extent))
- 2019년 11월 초기화: RMSE = -0.7 % (해빙면적(Sea Ice Extent))

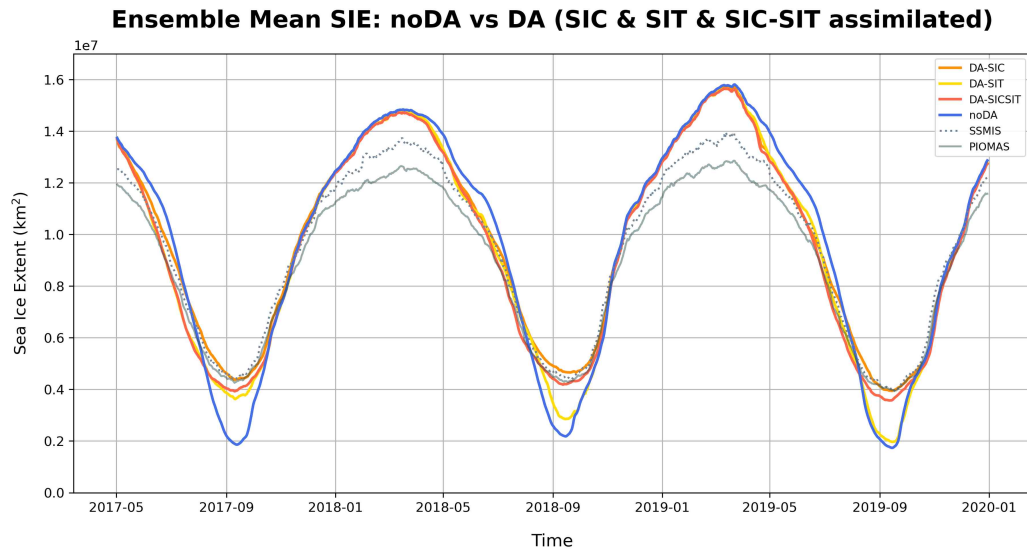


그림 3.3.3 자료동화 분석장 성능평가: 규준실험(noDA, 파란색)과 자료동화 실험 및 PIOMAS 재분석장(초록색)의 해빙면적 시계열 그래프 (주황색: SICDA 실험, 노란색: SITDA 실험, 빨간색: SICSITDA 실험)



**Evaluation of forecast skill:
August 2019 monthly mean Sea Ice Concentration**

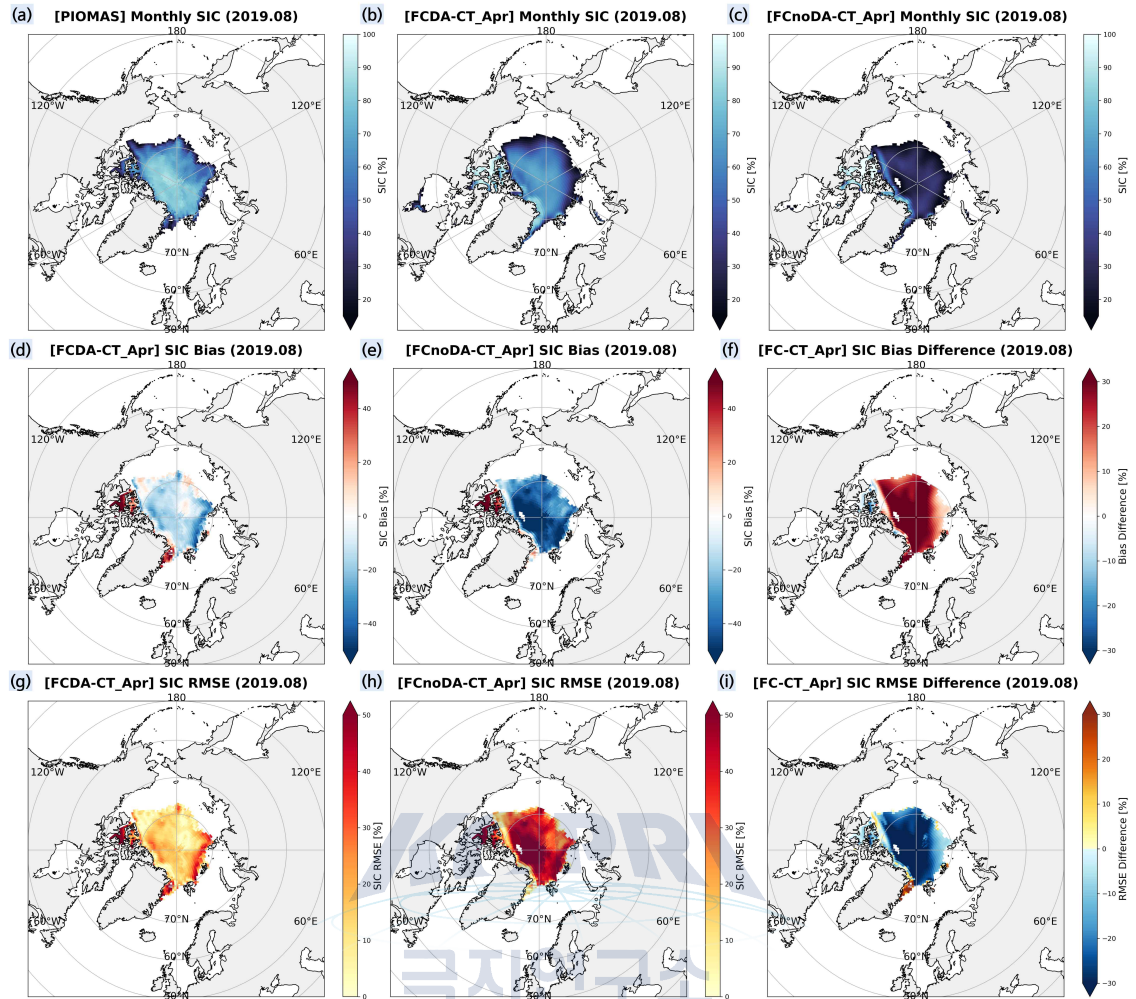


그림 3.3.4 해빙 점유율과 두께 동화 실험(SICSITDA)의 4월 초기화 예측 실험(FC) 결과의 계절 예측(seasonal forecasting)을 의미하는 4개월 리드타임을 가지는 2019년 8월 한 달 평균 값을 북극 지도 위에 나타낸 그래프. (a) PIOMAS 자료, (b) 동화 실험의 예측 실험(FCDA-SICSIT, FC: Forecast) (c) 표준 실험의 예측 실험(FCnoDA), (d) FCDA의 편향(bias), (e) FCnoDA의 편향, (f) FCDA에서 FCnoDA를 뺀 편향 차이(Bias difference), (g) FCDA의 평균 제곱근 오차(RMSE), (h) FCnoDA의 평균 제곱근 오차, (i) FCDA에서 FCnoDA를 뺀 평균 제곱근 오차 차이(RMSE difference)

Ensemble Mean SIE: Forecasting from Apr/Jun/Sep/Nov (SIC & SIT & SIC-SIT assimilated)

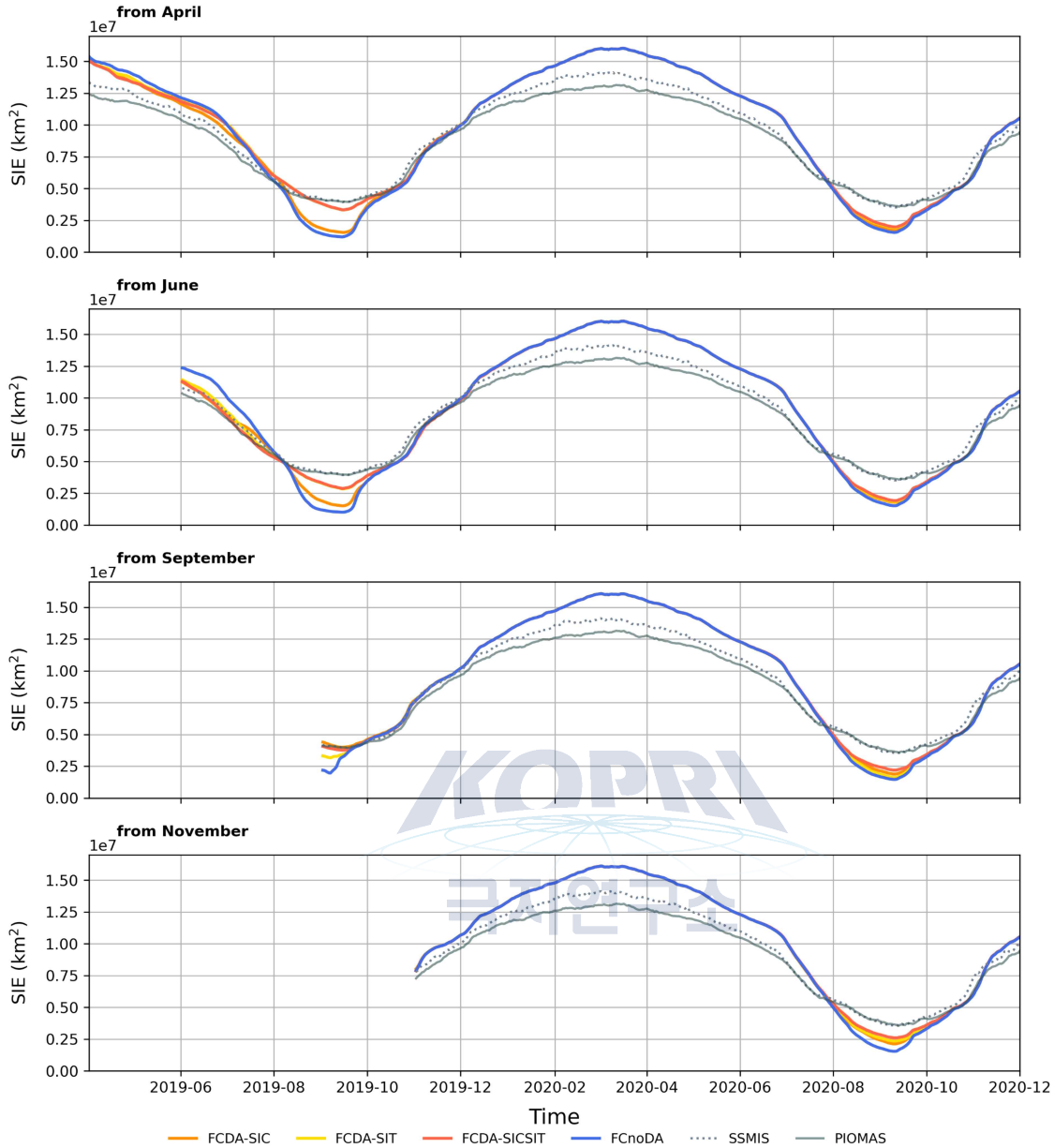


그림 3.3.5 네 개의 다른 초기화 시점 (Apr/Jun/Sep/Nov)에 따른 예측 실험(FC)의 해빙 면적 (SIE) 시계열 그래프. FCDA는 FCDA-SIC, FCDA-SIT, FCDA-SICSIT로 나타남. 색은 그림 1.2.4와 같음.

3. 해빙 위성산출물 이외의 수동위성센서의 복사휘도와 능동센서의 후방산란계수 동화 가능성 조사

Level-2 산출물이 아닌 Level-1B 위성관측 복사휘도 혹은 후방산란계수를 활용하여 자료동화를 수행할 시 산출물 생산에 있어 구동되는 알고리즘의 불확실성을 줄일 수 있음. 하지만, 복사휘도 및 후방산란계수를 해빙 모델에 동화하기 위해서는 정확한 해빙복사전달모델링이 선결 조건임

본 연구에서는 문헌 조사를 통해서 SMRT (Snow Microwave Radiative Transfer)의 모델의 자료동화 활용 가능성을 탐구하였음. 해당 모델은 눈, 해빙, 호수 얼음의 능동 및 수동 마이크로파 복사전달을 모의하기 위해서 개발되었으며, 모듈식 구조를 채택하여 다양한 모델링 접근 방식을 차용하여 쉽게 비교할 수 있도록 설계되었음. SMRT 모델은 다양한 전자기 산란이론을 토대로 해빙 혹은 눈 내부의 산란 과정을 다양한 미세구조 표현을 통해 구현하였으며, 이를 토대로 다양한 센서의 설정에서 눈과 얼음에서의 복사휘도와 후방산란계수를 계산할 수 있음. 또한, 이 모델은 오픈 소스로서 활용성 및 추후 개선의 가능성이 크다고 판단됨

본 연구에서는 CICE5 분석장을 입력자료로 하여, SMRT 구동을 default 세팅으로 수행하였음. 그 결과 관측(AMSR2: Advanced Microwave Scanning Radiometer 2)과 모델의 편차가 10 K 이상 나타나는 지역도 존재하지만, 일정 수준 이상의 안정적인 모의가 가능하다는 결과를 얻음(그림 3.3.6). 따라서, 추후에는 마이크로파 복사량을 해빙 모델에 동화할 수 있는 가능성이 있음. 학회 참석, 전문가 토의 및 문헌조사를 토대로 아직 해당 연구가 진행되어있지 않다는 사실을 발견함. 추후 관련 연구가 진행된다면 도전적인 연구 수행이 가능할 것으로 판단함

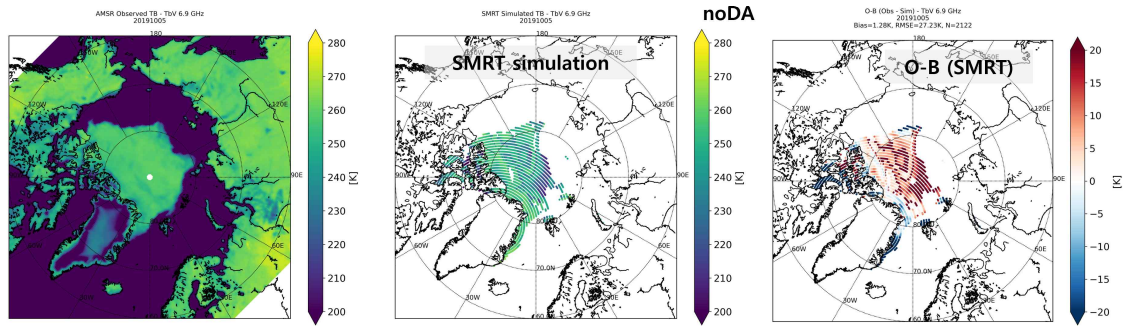


그림 3.3.6 SMRT를 활용한 복사량 모의 실험 결과. (좌측) AMSR2 관측 밝기온도, (중간) CICE5 분석장을 입력으로 한 SMRT 모의 결과, (우측) 관측과 모의값의 차이 분포임.



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제1절 (1차년도)인공위성 해빙 산출물의 자료동화를 위한 기반 연구

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)
인공위성 해빙 산출물 정확도 파악	장기간 해빙 산출물의 확보	- 인공위성관측(Landsat-8, SSMIS, AMSR2 등)의 산출물인 해빙 점유율, 해빙 영역, 해빙 면적, 해빙 두께 등의 산출물 자료 확보	100
	해빙 산출물의 정확도 파악 및 입력자료 적정성 평가	해빙 산출물의 정성적/정량적 오차 정보 생산 계절별/지역별 해빙 산출물의 입력자료 적정성 평가	100
인공위성 해빙 산출물 자료동화 시스템 구축 및 선행연구 조사	CESM 내의 CICE의 물리 변수 특성 파악 및 선행연구 조사	해빙모델(CICE5)의 내부구조, 물리특성 분석 국내/외 해빙모델(CICE5) 선행연구 조사	100
	해빙 산출물 자료동화 시스템 구축 및 선행연구 조사	적합한 해빙 자료동화시스템 조사 및 선정 선정한 자료동화시스템, DART 구축 국내/외 해빙 자료동화 선행연구 조사 및 문서화	100

제2절 (2차년도)인공위성 해빙산출물 자료동화 시스템 구축

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)
인공위성 해빙 산출물 자료동화 시스템 구축	해빙 산출물 자료동화 체계 구축	- 인공위성 수동 마이크로파를 기반으로 한 해빙 산출물(해빙점유율, 해빙두께)의 자료동화체계 구축	100
	계절예측 시험 테스트 및 민감도 검사 수행	구축한 자료동화체계에서의 계절에 따른 해빙 모의 정도 테스트 확인 및 다양한 민감도 검사 수행	100
	해빙 자료동화체계의 안정도 실 검사 및 기타 문제점 해결	본 해빙 자료동화체계를 구축하는 데 있어 시스템의 안정도와 기타 문제점 발생 시 해결	100

제3절 해빙 자료동화체계를 이용한 해빙모델 초기자료 생산

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)
해빙 자료동화 체계를 이용한 해빙모델 초기 자료 생산	자료동화 시스템의 안정 성 확보	2차년도에 구축한 해빙 위성산출물 자료 동화체계의 안정성 확보 장기간(20년 이상) 전지구 해빙 초기장 생산	100
	해빙자료동화에 따라 생 성된 분석장의 성능 평 가	생산된 초기장을 기반으로 CESM2 기반 계절예측 수행 모델 초기화가 계절예측에 미치는 영향 평가	100
	수동 위성센서의 복사휘 도 및 능동센서의 후방 산란계수 동화 가능성에 대한 조사 수행	수동 위성센서의 복사휘도의 해빙모델 동화 가능성 조사 능동센서의 후방산란계수 동화 가능성 조사	100



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 지구시스템모델의 계절예측 시스템 도입

본 연구과제를 통해 개발된 위성 관측 기반 해빙산출물 자료동화 시스템은 지구시스템모델의 계절예측시스템에 도입이 가능함. 이를 통해 보다 정확한 계절 예측이 가능하며, 향후 민감도 검사를 통해 중·단기 예측이나 격년변동(예, 엘니뇨-남방진동 등) 예측에도 활용할 수 있을 것으로 기대됨

2. 경제 분야 활용

지구시스템모델의 예측 성능 향상은 북극 항로 개척, 지하자원 탐사, 해양 활동 등과 같은 북극 지역 관련 산업에서 핵심적인 지구환경정보로 활용될 수 있음. 특히, 계절 예측 정확도의 향상은 기후 리스크 대응에 필요한 시간적 여유를 제공하므로, 유통, 교통, 기타 기반 산업, 제조업 등 다양한 경제 분야에 긍정적인 영향을 미칠 수 있음

3. 국가경쟁력 및 정책 수립에 활용

기후변화가 현실로 다가오는 시점에서, 미래 지구환경 변수에 대한 정확한 예측 역량 확보는 국가경쟁력 확보는 물론, 경제·사회 전반의 중장기 정책 수립에도 실질적인 기여를 할 수 있음. 향후 기후 위기 대응 및 재난 예방을 위한 과학적 근거 제공의 측면에서도 본 연구의 활용 가능성은 높음

극지연구소

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 해빙 및 눈 복사전달모델 조사

SMRT (Snow Microwave Radiative Transfer) 모델을 통한 인공위성에서 관측한 복사휘도 및 후방산란계수를 해빙모델에 동화할 수 있는 가능성을 파악하였음. 입력자료의 일치여부 등의 추가 조사를 통해서 예측모델과 복사전달모델사이의 입출력자료가 일치하면 얼음과 눈 층에서 복사전달 모의(복사휘도, 후방산란계수 모의)가 가능하다는 것을 조사하였음



제 7 장 참고문헌

- (1) Sallila, H., Farrell, S. L., McCurry, J., and Rinne, E.: Assessment of contemporary satellite sea ice thickness products for Arctic sea ice, *The Cryosphere*, 13, 1187 - 1213, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1187-2019>, 2019.
- (2) Raeder, Hoar, T. J., El Gharamti, M., Johnson, B. K., Collins, N., Anderson, J. L., ... & Coady, M. (2021). A new CAM6+ DART reanalysis with surface forcing from CAM6 to other CESM models. *Scientific Reports*, 11(1), 16384.



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.