

표 지

<p>주 의 (편집 순서8)</p> <p>(16 포인트 고딕체)</p> <p>↑ 7cm ↓</p>	<p>극 해양-빙권 표면 관측을 활용한 북극-중위도 원격상관 예측성 향상 연구</p> <p>부경대학교</p> <p>↑ 5cm ↓</p>	<p>↑ 7cm ↓</p> <p>극 해양-빙권 표면 관측을 활용한 북극-중위도 원격상관 예측성 향상 연구 (20 포인트 중고딕체)</p> <p>Predictability study on the Arctic-midlatitude teleconnection using polar oceanic and cryospheric surface observations (16 포인트 명조체)</p> <p>극지연구소</p> <p>부경대학교 (20 포인트 중고딕체)</p> <p>↓ 7cm ↑</p>
--	---	--

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 해양·해빙 변화에 기인한 북극과 한반도의 재해기상 현상 모델링 시스템(KPOPS-Earth)의 개발 및 활용” 과제의 위탁연구 “극 해양-빙권 표면 관측을 활용한 북극-중위도 원격상관 예측성 향상 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	:	김 주 흥
위탁연구기관명	:	부경대학교
위탁연구책임자	:	김 백 민
위탁참여연구원	:	심 지 한
“	:	고 민 희
“	:	김 하 림
“	:	옥 정

보고서 초록

위탁연구과제명	극 해양-빙권 표면 관측을 활용한 북극-중위도 원격상관 예측성 향상 연구				
위탁연구책임자	김 백 민	해당단계 참여연구원수	13명	해당단계 연구비	180,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	부경대학교 지구환경시스템과학부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	70
<ul style="list-style-type: none"> ○ 최신 기후모델(NCAR-CESM2)의 극지역 모의성능 평가 <ul style="list-style-type: none"> - CESM1과 CESM2 모델을 100년간 적분하여 재분석자료와 비교, 분석 - CESM1 모델과 비교, 분석을 통해 CESM2 모델의 개선점 파악 ○ 빙권 표면 경계 조건 초기화 체계 수립 <ul style="list-style-type: none"> - 해빙 초기장이 계절예측에 미치는 영향을 평가하기 위해 초기화 체계 수립 - 세 가지 해빙 초기화 기법을 통해 해빙 초기장을 생성하고 평가 ○ 빙권 초기화를 통한 계절예측 수행 및 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 세 가지 해빙 초기장을 활용하여 네 가지 계절예측 실험을 구성 - 1996/1997년부터 2015/2016년까지 과거재현실험을 구성하고 이를 평가 ○ 빙권 초기화를 통한 극-중위도 원격상관 모의성능 평가 <ul style="list-style-type: none"> - 해빙초기화 실험별 북극진동지수 모의성능 평가 - 해빙초기화 실험별 ART 지역 기온과 동아시아 및 북미간 상관관계 평가 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	해양-해빙 초기화, 계절예측시스템, 해빙 관측자료, 계절예측, 예측성능			
	영 어	Ocean-ice initialization, Seasonal forecast system, Sea-ice observation data, Seasonal forecast, Prediction skill			

요 약 문

I. 제 목

극 해양-빙권 표면 관측을 활용한 북극-중위도 원격상관 예측성 향상 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

극지예측시스템(KPOPS)가 기반하고 있는 미국국립기상연구소의 CESM1 모델은 최근 최신버전으로 업그레이드되어 CESM2 모델의 대기모델인 CAM6 모델의 예측성능을 평가할 필요가 있음. 또한 극지예측시스템의 대기모델 기반 체계를 대기-해양-해빙 결합된 지구시스템 모델 기반으로 통합하기 위해서는 해양-해빙 초기화 과정이 필수적임. 따라서 본 연구에서는 최신 기후모델인 NCAR CAM6의 모의성능을 분석하였고, 이를 기반으로 CESM2 대기-해양-해빙 결합모델을 구성하여 해양-해빙 초기장에 따른 북극-중위도 원격상관 모의성능을 평가하였음.

III. 연구개발 내용 및 결과

최신 기후모델(NCAR-CESM2)의 극지역 모의성능 평가

최신 기후모델의 극지역 모의성능 평가를 위해서 모델을 100년간 적분하여 재분석자료와 비교, 분석하였음. 분석 결과, CESM2 모델의 극지역 지상기온은 CESM1 모델에 비해 높게 모의하였고, 하향장파복사에너지 또한, CESM1 모델에 비해 높게 모의함. 지상기온과 장파복사 에너지가 증가하였음에도 CESM2 모델의 해빙농도가 더 높고 눈 깊이를 더 두껍게 모의하는 특징을 보였음.

빙권 표면 경계 조건 초기화 체계 수립

해빙 초기조건이 계절예측에 미치는 영향을 평가하기 위해 세 가지 실험으로 초기화 방안을 구성하였음. 첫 번째, 대기강제력 자료를 입력하여 해빙을 초기화한 실험, 두 번째, 해빙 관측 자료를 넣기하여 해빙을 초기화한 실험, 세 번째, 해양 관측자료를 넣기하여 해양을 초기화한 뒤 초기화된 해양자료를 입력하여 해빙을 초기화한 실험임. 산출된 해빙 초기장을 위성 관측자료와 비교 결과, 관측 해빙을 넣기하여 만든 두 번째 실험이 관측과 가장 유사하였고, 첫 번째, 세 번째 실험은 해빙 변동이 큰 지역에서 과대모의하는 경향을 보였음.

과거재현실험 중위도 예측성 및 극-중위도 원격상관 모의성능 평가

세 가지 방안으로 생산된 해빙 초기장과 동일한 대기, 해양, 지면 초기장을 입력하여 세 가지 과거재현실험을 구성하였고 해양, 해빙 관측자료를 넣기한 해양-해빙 초기장을 입력한 실험까지 총 네 가지 실험을 구성하여 중위도 예측성 및 극-중위도 원격상관 모의성능을 평가

하였음. 해빙 관측자료를 넣정한 해빙 초기장을 입력한 실험이 예측성능이 가장 낮게 나타나 모델과 해빙 초기 변수간의 불균형으로 인한 오차로 판단됨.

IV. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 개발한 해양-해빙 초기화 방안으로 계절예측시스템을 구축할 예정이며, 추후 기상청의 기후전문가 회의에 참석하여 모델 결과를 공유할 계획임.



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Predictability study on the Arctic-midlatitude teleconnection using polar oceanic and cryospheric surface observations

II. Purpose and Necessity of R&D

The CESM1 model of the National Center for Atmospheric Research, on which the Polar Prediction System (KPOPS) is based, has recently been upgraded to the latest version, and it is necessary to evaluate the predictive performance of the CAM6 model, an atmospheric model of the CESM2 model. In addition, the ocean-sea ice initialization process is essential to change the atmospheric model-based system of the KPOPS to the Earth system model coupled with atm-ocn-ice. Therefore, in this study, the simulation performance of NCAR CAM6, the latest climate model, was analyzed, and based on this, the CESM2 fully-coupled model was constructed to evaluate the simulation performance of Arctic-midlatitude teleconnection according to the initial ocean-ice data.

III. R&D Contents and Results

Evaluation of polar region simulation performance of the latest climate model

In order to evaluate the simulation performance of the latest climate model in the polar region, the model was integrated for 100 years and compared with the reanalysis data. As a result of the analysis, the surface temperature in the polar region of the CESM2 model was simulated higher than that of the CESM1 model, and the downward longwave radiation flux was also simulated higher than that of the CESM1 model. Although the surface temperature and longwave radiation increased, the CESM2 model showed higher sea ice concentration and simulated thicker snow depth.

Establishment of initialization system for ice initial condition

In order to evaluate the effect of sea ice initial conditions on season prediction, an initialization was composed of three experiments. First, sea-ice was initialized by inputting atmospheric forcing data. Second, sea ice was initialized by nudging sea-ice observation data. Third, ocean was initialized by nudging ocean observation data, and then the initialized ocean data was input. As a result of comparing the initial conditions of sea-ice with satellite observation data, the second experiment

initialize by nudging the observed sea-ice was most similar to the observation, and the first and third experiments tended to over-simulate in areas with large sea ice fluctuations.

Evaluation of mid-latitude predictability and Arctic-midlatitude teleconnection simulation performance

Three hindcast experiments were constructed by inputting the sea ice initial field produced by the three methods, and a total of four experiments were composed, including an experiment inputting the ocean-ice initial condition by nudging the ocean and sea-ice observation data, to determine mid-latitude predictability and Arctic-midlatitude teleconnection simulation performance was evaluated. The experiment in which the sea ice initial condition was input by nudging the sea-ice observation data showed the lowest predictive performance, so it was judged to be an error due to an imbalance between the model and the initial sea-ice variables.

IV. Application Plans of R&D Results

We plan to establish a seasonal forecasting system as the sea-ice initialization developed in this study, and plan to share the model results by attending the climate expert meeting of the Korea Meteorological Administration in the future.

극지연구소

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌



제 1 장 서론

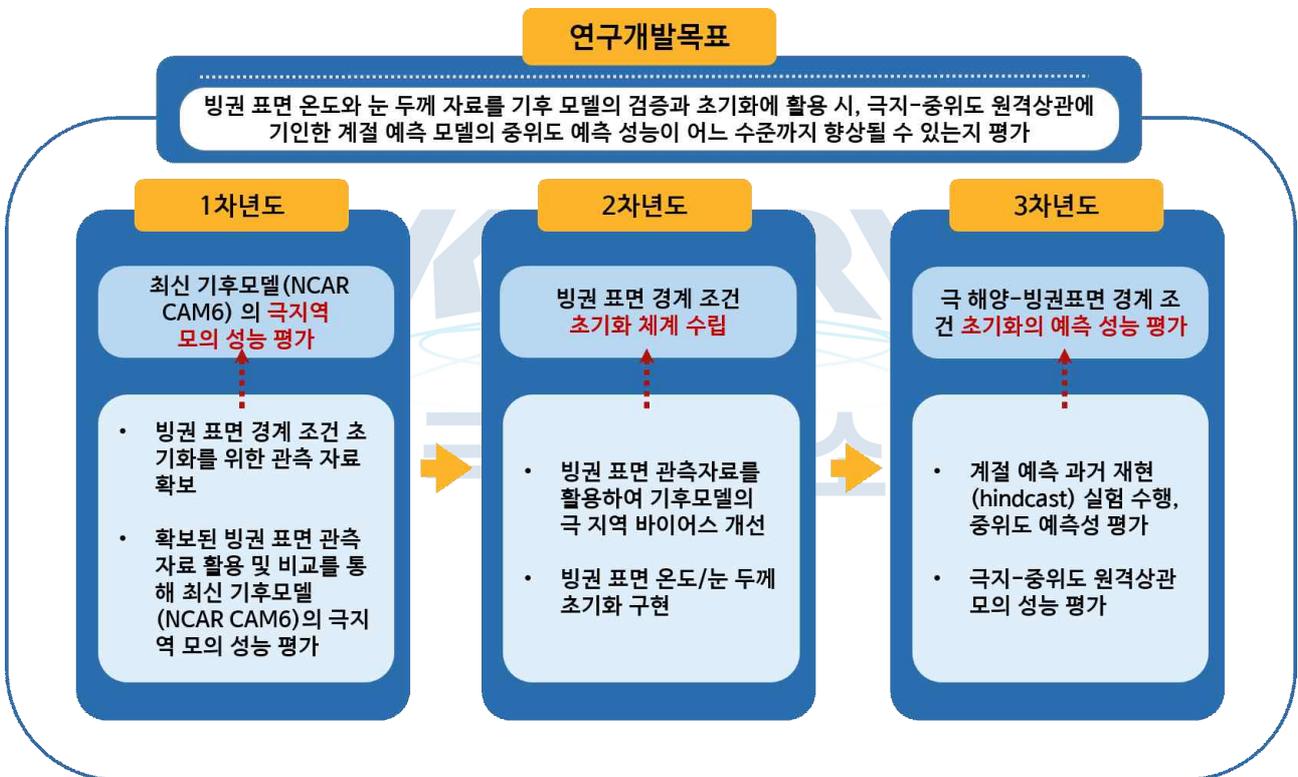
1절 연구개발의 목적

1. 최종목표

- 위성으로 관측한 빙권 변수들을 기후모델의 검증과 초기화에 활용 시, 극지-중위도 원격상관에 기인한 중위도 계절 예측 성능이 어느 수준까지 향상될 수 있는지를 평가함

2. 연차별 세부목표

- 1차년도: 최신 기후모델(CESM2)의 극 지역 모의성능 평가
- 2차년도: 빙권 표면 경계 조건 초기화 체계 수립
- 3차년도: 빙권 초기화를 통한 계절예측 및 극-중위도 원격상관 모의성능 평가



2절 연구개발의 필요성

- 본 과제와의 연계성을 위한 필요성

- 극지 예측 시스템(KPOPS; Korea Polar Prediction System)이 3년간의 성공적인 연구수행을 통해 준현업 예측이 가능한 상태가 됨에 따라, 과거 발생했던 극한 기후 현상 분석에 활용하고, 관련 메커니즘 연구를 진행할 필요가 있음.
- 최근 극지 예측 시스템(KPOPS)가 기반하고 있는 미국국립기상연구소(NCAR; National Center for Atmospheric Research)의 지구시스템모델인 커뮤니티 지구시스템 모델(CESM; Community Earth System Model)이 최신 버전으로 성능이 향상됨에 따라 본 연구 과제의 극지 예측 시스템(KPOPS)의 대기 모델 또한 동일한 성능을 기반으로 하여 최신 버전인 NCAR CESM CAM6 모델을 바탕으로 연구를 수행할 필요가 있음. 이에 본 과제의 원활한 과업 수행을 위해서는 NCAR CAM6 모델의 극지 기후 바이어스에 대한 분석이 필요함.
- 특히, 최근 빙권 표면 관측자료들이 다양한 기관들로부터 제공되어 여러 연구에 활용되고 있어 이를 활용한 모델 검증과 초기화 분석이 가능해졌음. 또한, 북극 지역의 표면 온도와 눈 깊이 바이어스는 북극 증폭(Arctic Amplification)의 정도를 조절할 수 있어 극 제트 기류와 중위도 이상기후 현상 예측성에 영향을 미칠 가능성이 큼. 따라서 이들의 바이어스 개선 및 초기화에 따른 예측성 향상 연구수행이 필수적임.

- 북극-중위도 원격상관 분석의 필요성

- 최근 지구 온난화 영향에 의한 기후 변화에 따라 북극 지역의 기온이 상승하고 해빙이 빠르게 감소하고 있으며 연 변동성이 크게 증가하고 있음 (Stroeve et al., 2007; Comiso, 2012).
- 이러한 북극 지역의 급격한 변화는 다시 지구 온난화를 가속 시키고 북극해 인근 지역뿐 아니라 극 지역과 큰 원격상관성을 가진 중위도 기온 및 기압계에 큰 영향을 미침 (Francis and Vavrus 2012; Honda et al., 2009; Kug et al., 2015; Mori et al., 2014).
- 또한, 중위도 대륙 지역에서 증가하고 있는 이상기후 현상이 극 지역 기후의 변동과 밀접한 연관이 있음을 다양한 선행 연구에서 확인할 수 있음 (Kim et al., 2014; Overland and Wang, 2012).
- 이러한 선행 연구들을 심화하여 북극-중위도 관련성을 규명하고 예측성을 향상시키기 위해서는 위성 원격탐사 자료와 같은 보다 정밀한 극 지역 자료를 수집 및 구축하여 계절 예측에 활용할 필요성이 있음.
- 본 연구개발사업에서는 극 지역 빙권 표면 관측자료를 활용하여 극지 예측 시스템(KPOPS)의 극 지역의 표면 경계 조건에 따른 중위도 계절 예측성을 평가하고, 북극-중위도 원격상관성 모의능력을 확인하여 관측자료의 활용성을 높이고 계절 예측에 활용 가능한 정보를 생산하고자 함.

3절 연구개발의 범위

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1. 최신 기후모델(NCAR-CESM2)의 극 지역 모의성능 평가	1-1	빙권 표면 경계 조건 초기화를 위한 관측자료 확보 및 품질 검증	- 해빙 관련 변수 확보 및 검증	100%
	1-2	확보된 빙권 표면 관측자료와 비교를 통해 최신 기후 모델(NCAR-CESM2)의 극 지역 모의성능 평가	- 최신 기후 모델(NCAR-CESM2)의 한랭 바이어스 및 물리과정 개선 확인	100%
2. 빙권 표면 경계 조건 초기화 체계 수립	2-1	빙권 표면 온도/눈 두께 초기화 구현	- 빙권 초기장 구현 및 검증	100%
	2-2	빙권 표면 관측자료를 활용하여 기후모델의 극 지역 바이어스 개선	- 구현된 빙권 초기장을 입력한 hindcast 실험을 구성 및 극지역 바이어스 개선점 평가	100%
3. 빙권 초기화를 통한 계절예측 및 극-중위도 원격상관 모의성능 평가	3-1	계절 예측 과거 재현(hindcast) 실험 수행 및 중위도 예측성 평가	- 계절 예측 과거 재현 실험 체계 구축 - 극지역 예측성능 평가 - 중위도 예측성능 평가	100%
	3-2	극지-중위도 원격상관 모의성능 평가	- 극지-중위도 원격상관 모의성능 평가	100%

제 2 장 국내외 기술개발 현황

1절 국내 기술개발 현황

- 현업기관인 기상청 국립기상과학원은 계절예측과 장기예보 지원을 목적으로 전지구 기후예측시스템(GloSea5; Global Seasonal forecasting system version 5)를 도입하여 2016년부터 현업 운영하고 있으며, GloSea5 모델의 예측성능을 검증하고 개선하기 위한 다양한 학계의 노력이 있어왔음(Lee et al., 2018; Lim et al., 2018; Kim et al., 2019; Lee et al., 2020).
- 최근 국립기상과학원은 GloSea5 모델의 개선 버전으로 GloSea6 모델을 도입하여 현업 예보에 활용하고 있음 (그림 1). 그에 따라 GloSea6 모델의 예측성 향상을 위해 다양한 연구와 R&D 과제가 수행되고 있음.

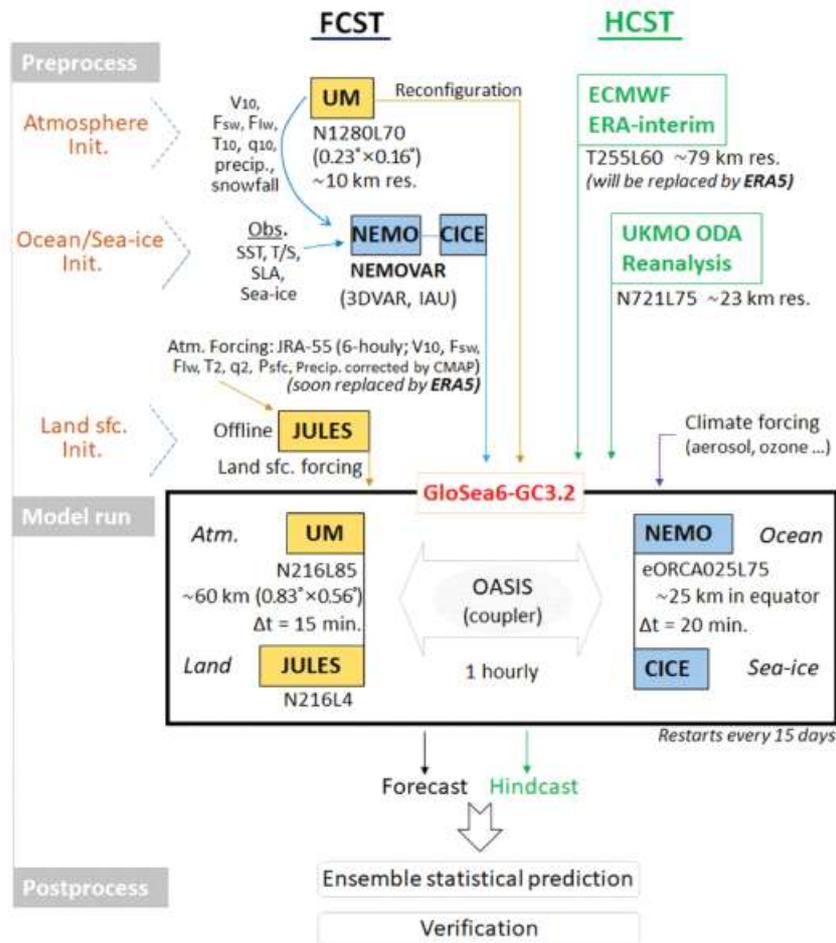


그림 1. GloSea6 모델의 현업 구조

- 현업기관 뿐만 아니라 계절예보를 위한 노력은 학계에서도 있었는데, 부산대학교에서는 CGCM(Coupled General Circulation Model)을 구축하여 모델의 예측성을 평가하고 예측결과를 APCC 기후센터에 제공하여 타기관의 예측결과와 비교 분석이 가능하도록 하였음 (Ahn et al., 2018).

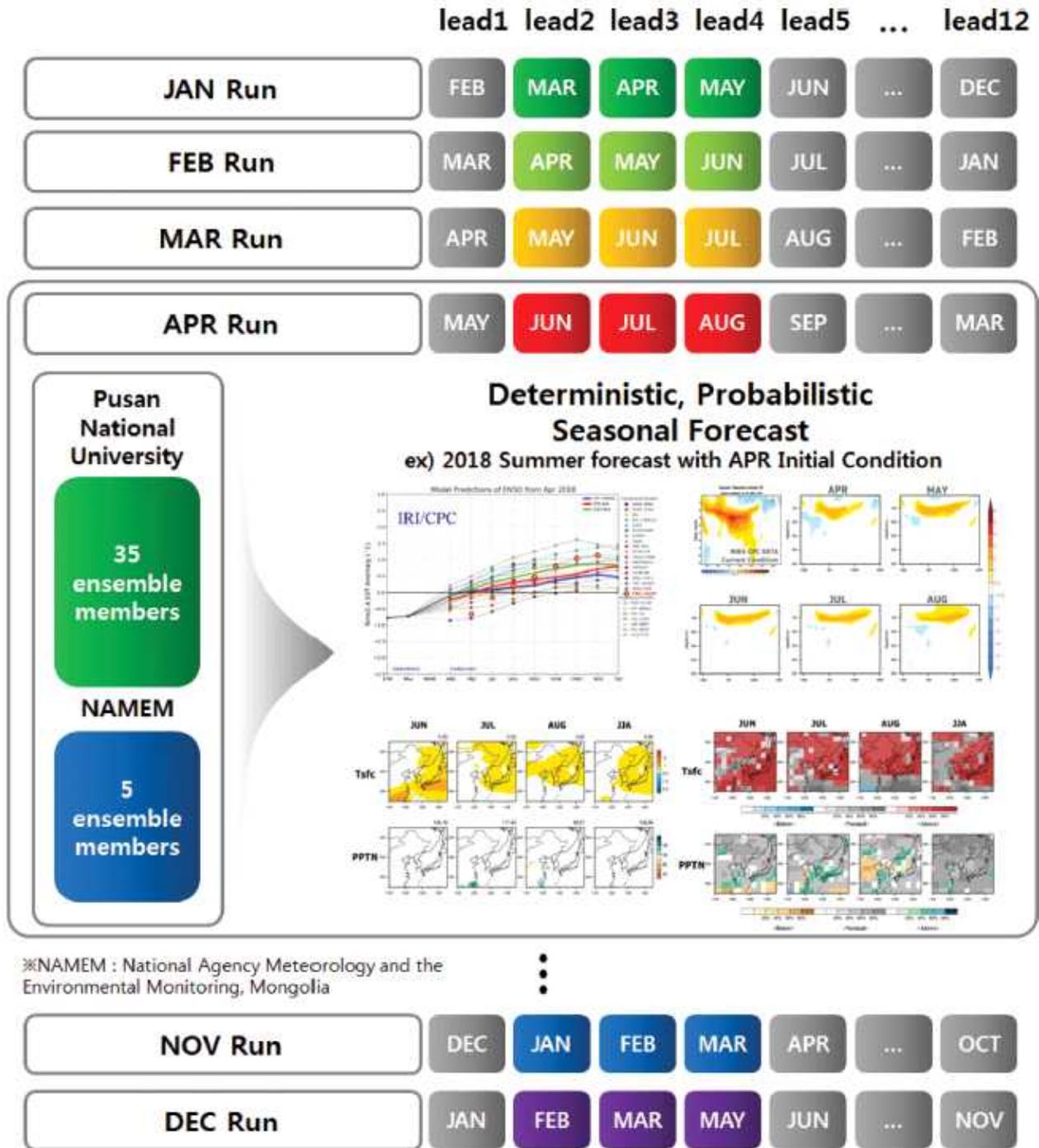


그림 2. 부산대학교 계절예측시스템 CGCM 모델 구성

- 계절내 원격상관에 관한 국내 학계의 기술 수준은 비교적 높은 수준이고 다수의 논문게재 등을 통해 관련 분야의 발전에 기여하고 있음. 다만, 원격상관 예측 등과 같이 기후예측모델의 성능은 여전히 개선이 필요하고 이를 개선하기 위한 추가적인 연구가 필요함.

2절 국외 기술개발 현황

- 유럽중기예보센터(ECMWF; European Center of Medium-Range Weather Forecasts)에서는 1997년부터 계절예측시스템을 구축하여 운영하고 있으며 5년간격으로 계절예측시스템을 개선하고 있음. 현재 운영 중인 계절예측시스템은 SEAS5 모델로 ECMWF의 5번째 계절예측 시스템이며 2011년부터 운영해왔던 SEAS4 모델에서 2017년 11월에 대체되었음.
- SEAS5 모델은 구성 요소 모델과 초기조건 개발을 통해 개선되었음. IFS(Integrated Forecast System) 대기 모델의 개선은 특히 열대 대류현상을 잘 모의하였고(Bechtold et al. 2014), 수평 해상도의 상당한 개선을 보였음. 또한, SEAS4 모델에 포함되지 않은 해빙 모델을 SEAS5에서 포함시켜 성능을 향상시킴 (Johnson et al., 2019).
- 이와 같이 국외 기관에서 계절예측시스템을 개선하기 위해 물리과정 개발 뿐만 아니라 초기조건 개발을 통해 예측시스템을 개선하고 있음.

표 1. ECMWF SEAS4 모델과 SEAS5 모델 구성 비교.

	SEAS4	SEAS5
IFS cycle	36r4	43r1
IFS horizontal resolution (dynamics)	T255	T319
IFS horizontal grid	linear	cubic octahedral
IFS horizontal resolution (physics)	N128 (80 km)	O320 (36 km)
IFS vertical resolution (Top of atmosphere)	L91 (0.01 hPa)	L91 (0.01 hPa)
IFS model stochastic physics	3-scale SPPT and SKEB	3-scale SPPT and SKEB
Coupling	OASIS3	single executable
Ocean model	NEMO v3.0	NEMO v3.4.1
Ocean horizontal resolution	ORCA 1.0	ORCA 0.25
Ocean vertical resolution	L42	L75
Sea-ice model	sampled climatology	LIM2
Wave model resolution	1.0°	0.5°

- NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)는 NCEP CFSv2(National Centers for Environmental Prediction's Climate Forecast System, version 2) 모델을 활용하여 계절예측을 수행하고 있음. 2004년 8월에 대기-해양-지면 커플 모델인 CFSv1이 수행되었고 2011년 3월부터 CFSv2가 활용되기 시작되었음. CFSv2 모델에서는 four-level 토양 모델과 three-layer 해빙 모델이 개선되었음. 이러한 개선에 있어 중요하게 고려한 점은 CFSv2 모델의 상태(state)와 자료동화 시스템에서부터 생산되는 초기자료간의 일관성임(Saha et al., 2014). CFSv2 모델과 초기조건과의 일관성을 위해 대기-해양-지면-해빙이 결합된 CFSR(Climate Forecast System Reanalysis) 재분석자료를 초기조건으로 사용하여 계절예측을 운영하고 있음.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절 최신 기후모델의 극지역 모의성능 평가

1. 빙권 표면 경계 조건 초기화를 위한 관측자료 확보 및 품질 검증

- 빙권 표면 경계조건 초기화를 위해서는 활용가능한 관측자료를 확보하는 것이 중요함. 따라서 본 연구에서는 해빙농도, 해빙두께, 눈 깊이, 구름량 등의 극지역 관측자료를 확보하였음.

가. CryoSat-2 위성 관측 자료

- ESA (European Space Agency) 기관의 CryoSat-2 위성데이터로 해빙 두께(Ice thickness), 눈 깊이(Snow depth)의 변수를 확보하였음 (표 1-1).
- CryoSat-2 변수의 특징으로 해빙두께는 해빙농도(Sea ice concentration)가 70% 이상일 때 산출되므로 분석에 유의해야 함.

표 1-1. CryoSat-2 위성 관측자료 정보

데이터명	CryoSat-2 (Level-4)
기관	NSIDC(https://nsidc.org/data/RDEFT4/versions/1)
기간	2010-09 to present
해상도	25km x 25km
변수	Ice thickness(m)
	Snow depth(m)

- CryoSat-2 위성데이터의 2010년부터 2019년까지 겨울철 평균 해빙 두께와 눈 깊이의 공간 분포는 그림 1-1과 같음.
- 2010-2019년 겨울철 평균 해빙두께는 바렌츠-카라해에서 약 1m의 해빙 두께를 보이며 랩티브해와 동시베리아해 부근에서 1.5m로 두꺼워지고 베링해로부터 해수가 유입되는 추크치해와 보퍼트해에서는 두께가 1m인 특징을 보임.
- 같은 기간 평균 눈 깊이는 대체로 해빙두께 공간분포와 일치하는 양상을 보이며, 겨울철 해빙 변동이 큰 바렌츠-카라해에서는 눈 두께가 관측되지 않았으며, 동시베리아해와 추크치해, 보퍼트해에서는 0.1m의 눈 두께가 관측됨.

CryoSat2 2010-2019 DJF Mean

CryoSat2 2010-2019 DJF mean

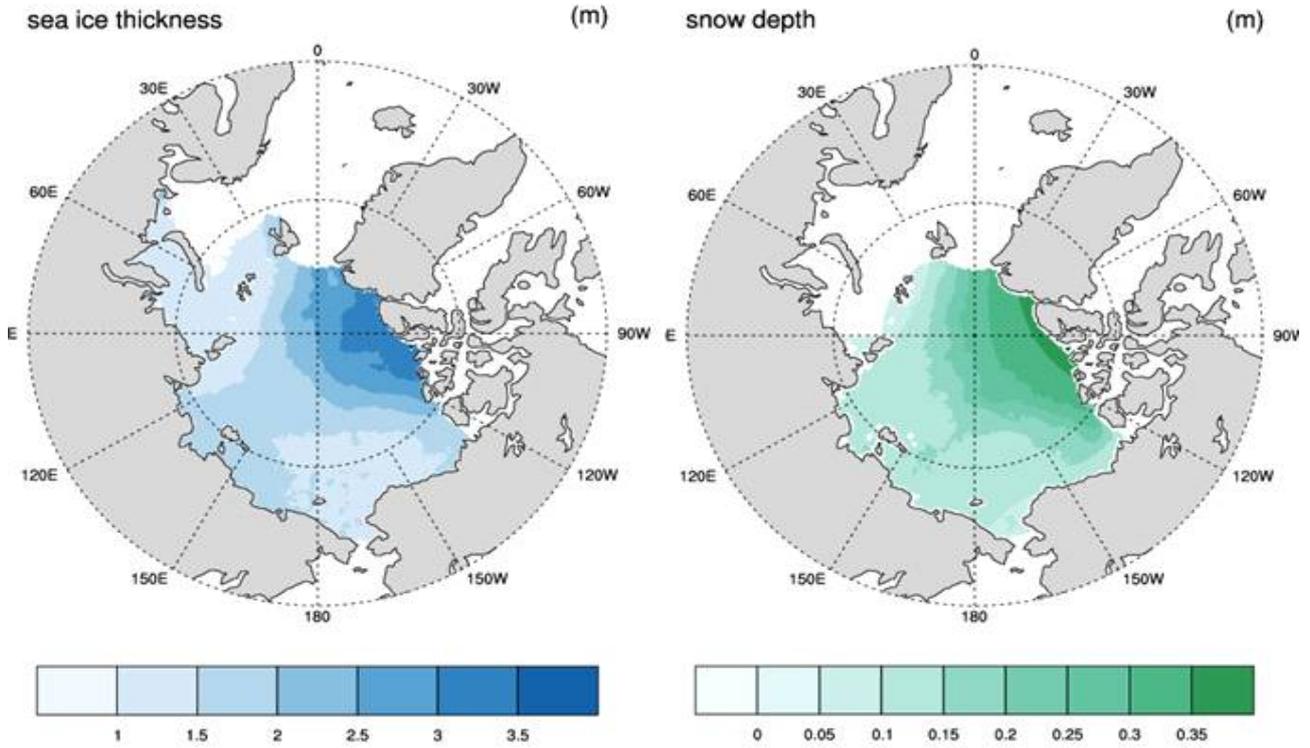


그림 1-1. CryoSat-2 해빙두께(왼쪽),눈 깊이(오른쪽) 2010-2019 겨울철 평균

나. SSMIS 위성 관측 자료

- NSIDC(National Snow and Ice Data Center)에서는 DMSP(Defence Meteorological Satellite Program) SSMIS(SepECIAL Sensor Microwave Imager/Sounder) 센서에서 산출된 통해 관측된 SSMIS 자료를 제공함.
- SSMIS 위성 관측 자료는 해빙 농도(Sea ice concentration)를 제공하며, 자세한 정보는 표 1-2와 같음.

표 1-2. SSMIS 위성 관측 자료 정보

데이터명	SSMIS
기관	NSIDC(https://nsidc.org/data/NSIDC-0051/versions/1)
기간	1978-10 to present
해상도	25km x 25km
변수	Sea ice concentration(%) Sea ice fraction(1)

- SSMIS 데이터는 SSMIS 센서가 관측할 수 없는 지역인 북극홀(Pole hole)에 masking이 되어 있는 특징이 있음. SSMI 센서의 개선으로 기간에 따라 점점 북극홀 masking 크기가 작아지는데, 기간에 따른 북극홀 masking 크기는 표 1-3과 같음.

표 1-3. 센서별 북극홀 크기

Pole Hole mask	Pole Hole Area (million km ²)	Pole Hole Radius(km)	Latitude	Dates Used
SSMIS	0.029	94	89.18N	2008-2019
SSMI	0.31	311	87.2N	1987-2007
SMMR	1.19	611	84.5N	1978-1987

- SSMIS 관측 데이터의 기간별 해빙농도 변화를 확인하기 위해 1979년부터 1999년까지 겨울철 해빙농도와 2000년부터 2019년까지 겨울철 해빙농도를 비교하였음(그림 1-2).
- 2000년대 이전과 이후의 겨울철 해빙농도를 비교하면 동시베리아 지역과 바렌츠해 지역에서 해빙농도 감소를 관찰 할 수 있음.

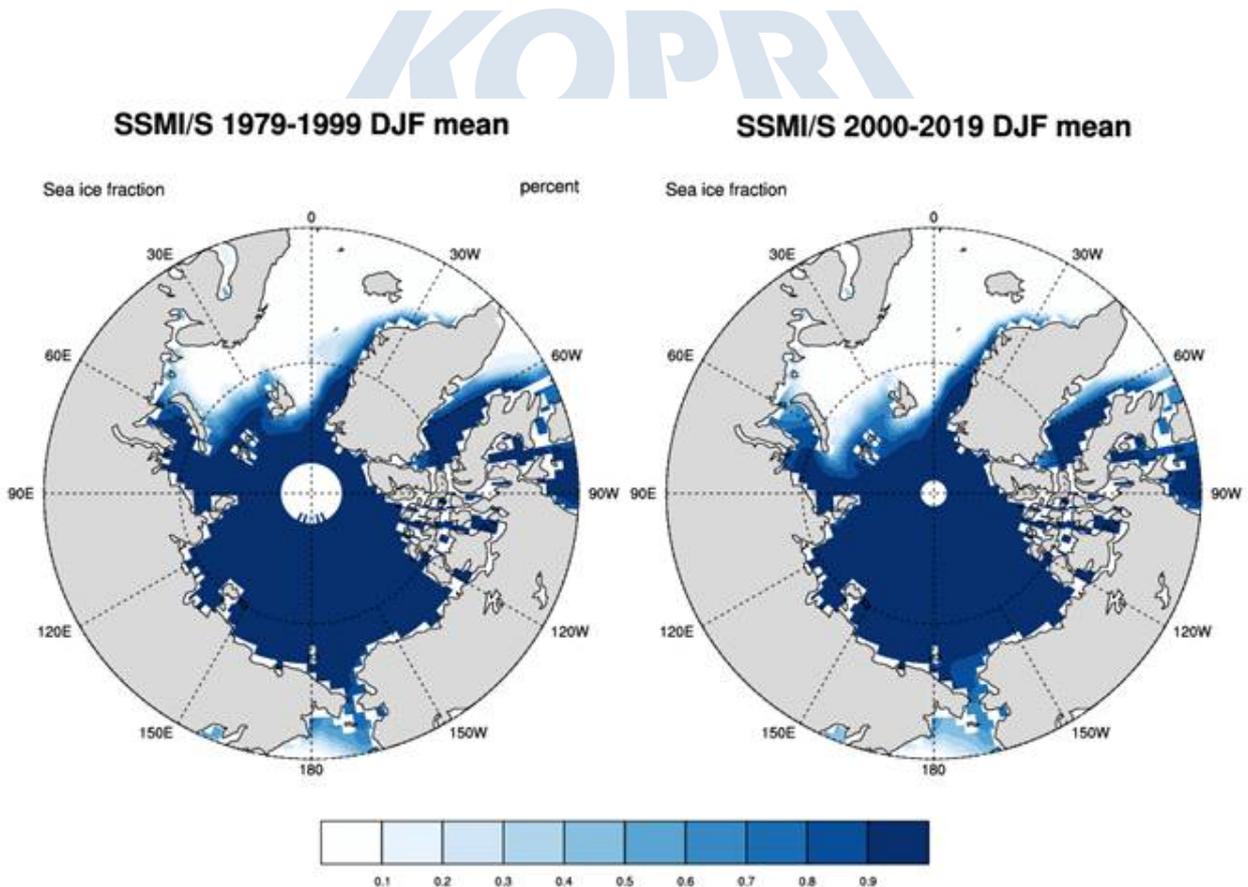


그림 1-2. SSMIS 2000년대 이전 해빙농도(왼쪽),2000년대 이후 해빙농도(오른쪽) 2010-2019 겨울철 평균

다. CloudSat 위성 관측 자료

- CloudSat은 NASA와 CSA(Canadian Space Agency)가 개발한 remote sensing satellite mission으로 레이더를 사용하여 구름의 특성을 측정함.
- 본 연구에서는 빙정수경로(IWP; Ice Water Path)와 액체수경로(LWP; Liquid Water Path) 변수를 수집하여 분석하였고 자료의 자세한 정보는 표 1-4와 같음.

표 1-4. CloudSat 위성 관측 자료 정보

데이터명	CloudSat
기관	http://www.cloudsat.cira.colostate.edu/data-products/level-2/b/2b-cwc-rvod?term=99
기간	2006-06 to 2018-12
해상도	1 x 1
변수	Ice water path (kg/m ²)
	Liquid water path (kg/m ²)

- 수집가능한 기간인 2006년부터 2018년까지 겨울철 빙정수경로(IWP)와 액체수경로(LWP) 분포를 분석함(그림 1-3).
- 겨울철 구름 내 빙정수경로(IWP)와 액체수경로(LWP)는 북대서양지역에서 높게 관측됨.

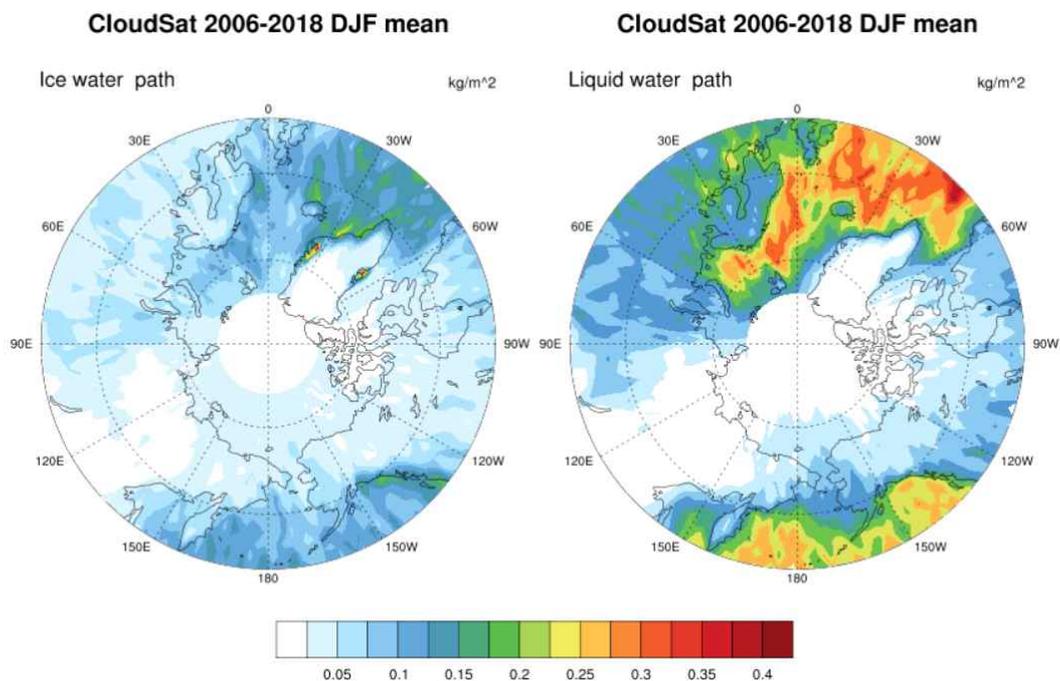


그림 1-3. CloudSat 관측자료의 빙정수경로(IWP; Ice Water Path)(왼쪽), 액체수경로(LWP; Liquid Water Path)(오른쪽) 2006-2018 겨울철 평균 (kg/m²)

라. SSMIS 데이터로 산출된 SIIT(Snow Ice Interface Temperature)

- 극지역 빙권 데이터를 활용한 장기간 기후 분석은 해빙 농도, 해빙 면적과 같은 소수의 변수로만 분석하고 있음.
- 해빙 표면 온도와 눈 깊이 등과 같은 새로운 관측 변수는 활용 가능한 데이터 기간이 기후 분석에 있어 매우 짧은 실정임.
- 이러한 단점을 개선하고자 Lee et al., 2018에서는 극지역 해빙 변동성의 특성을 분석하기 위해 장기간 운용되고 있는 SSMIS의 위성 데이터를 사용하여 눈/얼음의 산란, 얼음 표면 거칠기가 방출률에 미치는 영향을 고려하여 겨울철 눈/해빙 계면 온도(SIIT; Snow Ice Interface Temperature) 산출 알고리즘을 개발하였음.
- 산출된 눈/해빙 계면온도의 겨울철 평균 온도는 그린란드 다년빙 지역에서는 -30°C 이상의 온도가 관측됨.
- 반면, 바렌츠-카라해, 척치해, 동시베리아해 지역에서 약 -20°C 정도로 다년빙 지역의 온도와 약 10°C 가량 차이가 나고 바렌츠-카라해 지역에서 가장 높은 온도를 보임.

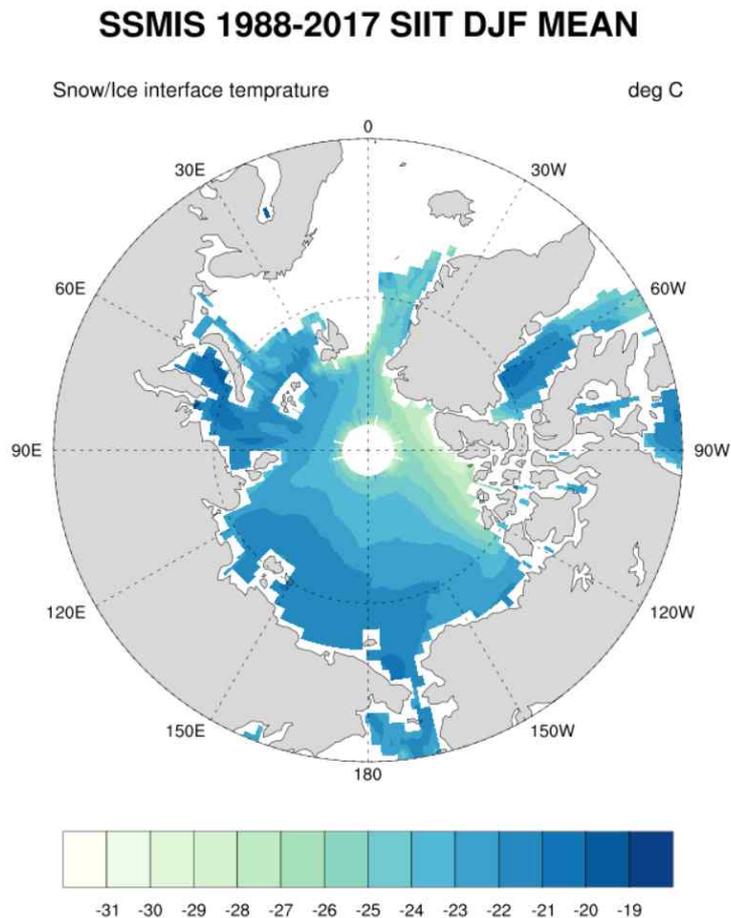


그림 1-4. SSMIS 위성 데이터를 사용하여 산출한 눈/해빙 계면 온도(SIIT; Snow/Ice Interface Temperature, units : $^{\circ}\text{C}$)

2. 최신 기후모델(NCAR CESM2)의 극지역 모의성능 평가

가. 실험 구성

- NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 CESM(Community Earth System Model) 모델은 대기, 지면, 해양, 해빙 모델을 포함한 결합 기후 모델임.
- CESM1.2는 2012년에 처음 공개되어 다양한 기후 연구에 활용되어왔고, 대기모델은 CAM5(Community Atmosphere Model version 5), 지면모델은 CLM4(Community Land Model version 4), 해양모델은 POP2(Parallel Ocean Program version 2) 그리고 해빙모델은 CICE4(Community Ice Code version 4)로 구성되어있음.
- CESM2.1 모델은 CESM1.2를 구성하고 있는 모델들이 최신 버전으로 업데이트 되었으며, 자세한 변경사항은 표 1-5와 같음.
- 본 연구에서는 최신 기후모델의 극지역 모의성능을 평가하기 위해 CESM1.2와 CESM2.1 실험을 구성하였고, 100년을 적분하여 초반 30년은 spin-up으로 하고 이후 70년을 평균하여 관측자료와 비교·분석하였음.

표 1-5. CESM1.2와 CESM2.1의 실험 구성

Experiment name	CESM1.2	CESM2.1
Initialization time	2000 present day	2000 present day
Atmosphere	CAM5	CAM6
Land	CLM4	CLM5
Sea-ice	CICE4	CICE5
Ocean	POP2	POP2
River runoff	RTM	MOSART
Resolution	2.5°x1.9°	

나. 최신 기후모델(NCAR-CESM2)의 극지역 모의성능 평가

- 극지역에서 재분석자료는 관측데이터가 부족하여 다른 지역에 비해 정확도가 낮음.
- 이러한 단점을 개선하기 위해 세 가지 재분석자료(ERA-interim, JRA55, NCEP2)를 활용하여 실험 결과를 비교하였음.
- 먼저 재분석자료 지상 기온(T2m) 분포를 보면 그린란드에서 가장 낮은 기온을 보이고, -15~-20°C 구간의 지상기온 분포가 그림 1-1의 해빙두께 분포와 유사하였음(그림 1-5).
- 재분석자료간의 차이점으로는 JRA55와 NCEP2 지상기온 분포는 -15~-20°C 구간이 시베리아해까지 확장된 반면, ERA interim자료의 경우 북극해에 분포하고 있는 것을 확인함.
- CESM1.2 모델과 CESM2 모델 실험 결과, CESM1.2 실험의 지상기온의 경우 재분석자료와 유사한 분포를 보였고, CESM2 모델의 지상기온은 재분석자료 중 -15~-20°C 구간이 가장 좁은 ERA_interim에 비해서도 더 좁은 영역을 모의하였음.

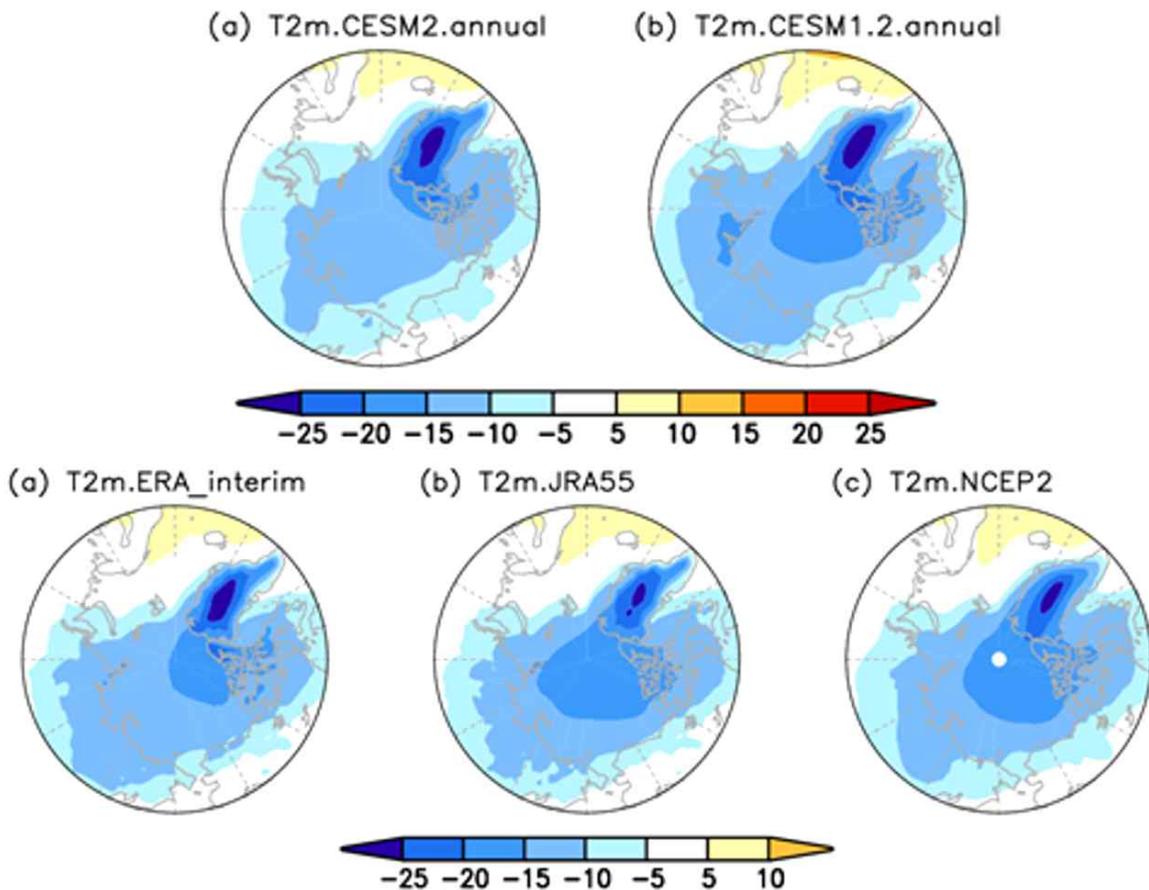


그림 1-5. CESM2와 CESM1.2 실험(위)과 ERA-interim, JRA-55, NCEP2 재분석 자료(아래)의 극 지역(60N)의 평년 지상 기온 분포를 나타내며, 실험은 30년 spin-up 후 이후 70년 자료를 평균하여 사용하였으며, 재분석 자료 기간은 1979-2014 (unit: °C).

- 다음 비교 변수로써 하향 장파 복사 플럭스(DLWRF; Downward Long-Wave Radiation Flux) 변수를 비교 분석하였음(그림 1-6).
- 재분석자료의 하향 장파 복사 플럭스는 지상기온 분포와 같이 JRA55와 NCEP2 자료의 분포가 유사하였고 ERA interim 재분석자료는 다른 재분석자료들 보다 높은 하향 장파 복사 플럭스 분포를 보였음.
- 모델 실험 결과는 재분석자료와 비교했을 때, CESM1.2 모델은 재분석자료의 하향 장파 복사 플럭스와 유사한 분포를 보였지만, CESM2 모델은 하향 장파 복사 플럭스를 과대모의하는 경향이 나타났음.
- 하향 장파 복사 플럭스를 과대모의 한다는 것은 지상으로 많은 양의 플럭스가 지상으로 방출된다는 것을 의미하므로 이는 북극해에서 높은 기온 분포(그림 1-5)와 관련이 있음.
- 두 실험의 결과만 비교하였을 때, CESM1.2 모델보다 CESM2 모델에서 극 지역의 지상 기온과 하향 장파 복사가 증가하며, 이는 선행 연구에서 지상 기온 완화 결과와 동일함 (McIlhatten et al., 2020).

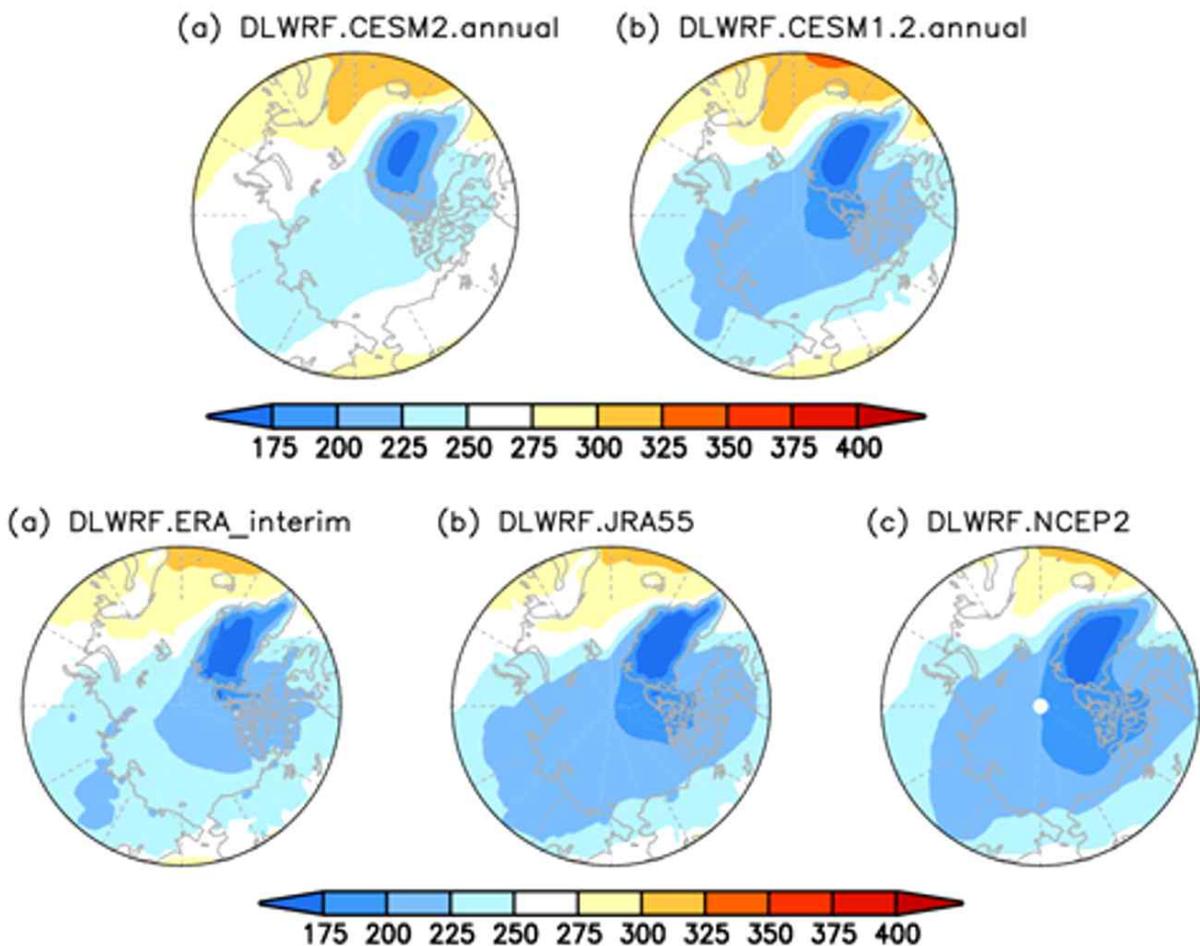


그림 1-6. 그림 1-5과 동일하나, 하향 장파 복사의 분포를 나타냄 (unit: W/m^2).

- 지상 기온과 장파 복사가 증가하였음에도 CESM2 모델에서 해빙 면적이 더 넓고, 눈 깊이 (snow depth)를 더 두껍게 모의함 (그림 1-7, 그림 1-8).
- 이는 해빙 모델이 CICE4에서 CICE5로 바뀌면서 열역학, 해수 염분의 예단과 용해 연못 (melt pond)의 유출 변화가 있어 CICE5에서 해빙면적에는 큰 차이가 없지만 해빙의 두께가 증가하는 선행 연구 결과가 있음 (Turner and hunke, 2015).
- 그러나 본 실험에서는 CESM2 모델에서 해빙면적을 많이 모의하는 차이가 있으며, 이는 대기 모델의 차이에 따른 영향으로 추측됨.
- 위성 관측 데이터와 비교해보면 CESM2, CESM1.2 두 모델 모두 해빙면적을 과소 모의하는 경향을 보임 (그림 1-7).

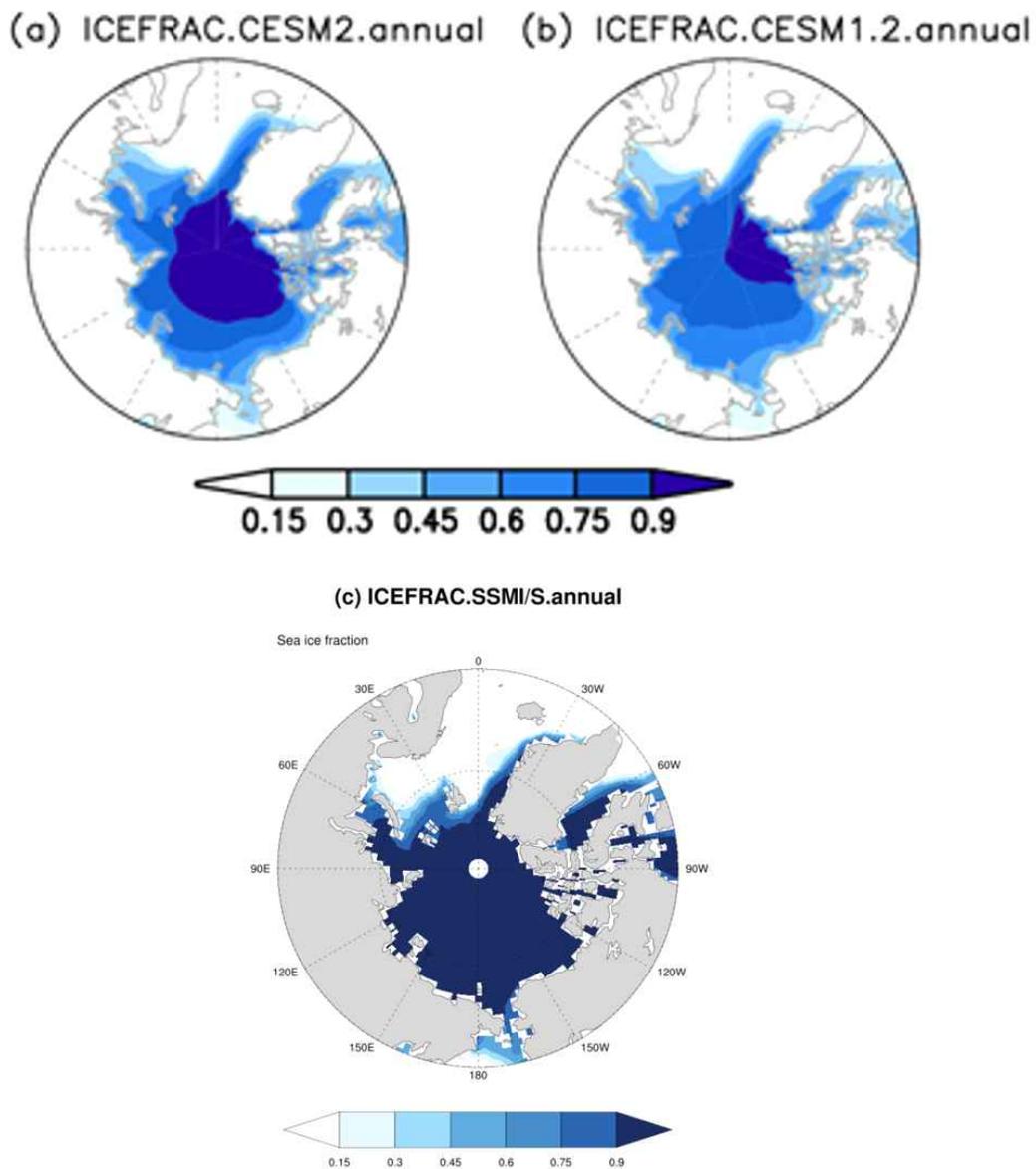


그림 1-7. CESM2와 CESM1.2 모델 실험의 해빙 면적 분포와 위성관측데이터의 해빙면적 분포

CESM2 snow depth annual

CESM1 snow depth annual

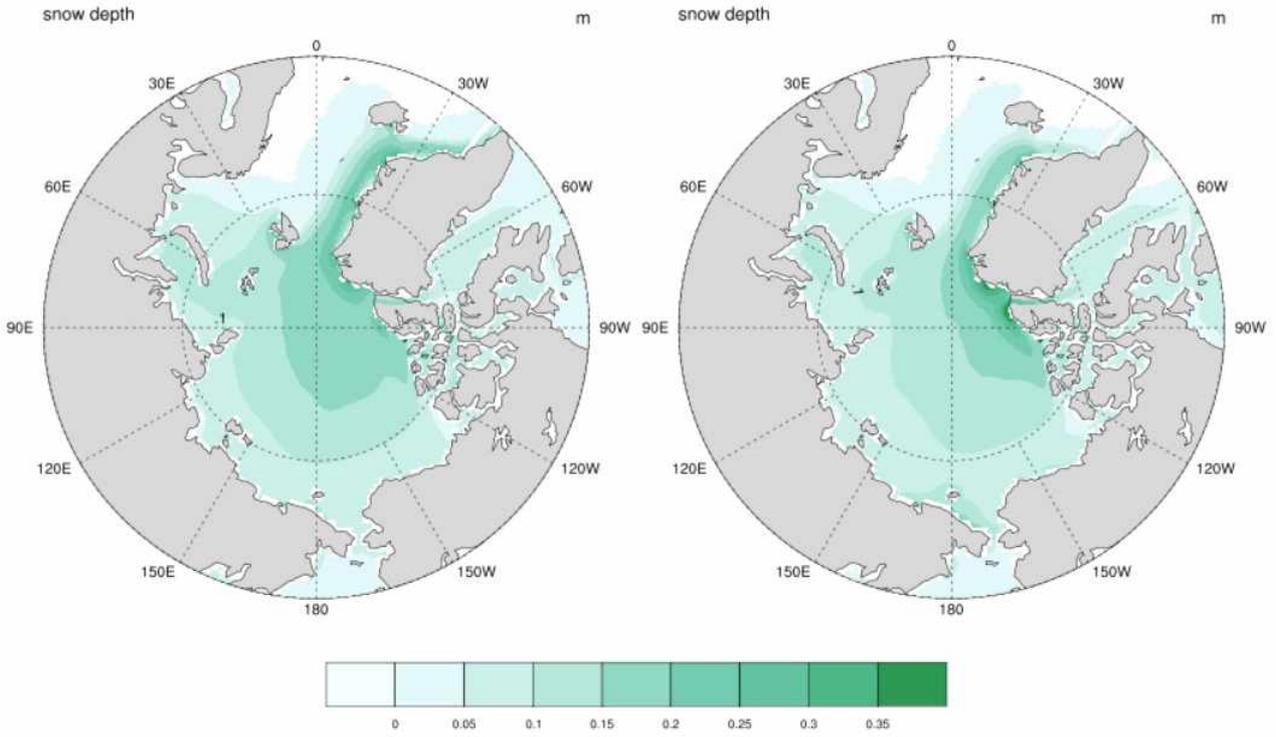
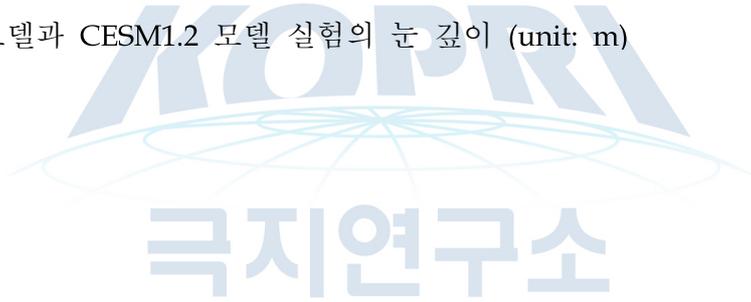


그림 1-8. CESM2 모델과 CESM1.2 모델 실험의 눈 깊이 (unit: m)



- 관측에 비해 CAM5의 북극 구름이 충분하지 않고 (Kay et al., 2012; English et al., 2014), 구름을 이루는 과냉각 수적은 과소 표현되며, CAM5에서 발생하는 과냉각 수적은 관찰된 빙도에 비해 너무 자주 눈을 모의하고, CAM5에서 과냉각 수적에 대해서 거의 고려되지 않은 수준이었고, 하향복사에너지(DLR)는 관측소에서 측정한 측정치에 비해 낮다는 McIlhattan (2017)의 선행 연구가 있음.
- 빙정 수 경로는 CESM1.2 모델의 값이 관측에 더 가까우며, CESM2 모델에서는 오히려 과소 모의하는 경향이 있음(그림 1-9, 그림 1-10).
- CAM5에서 관측에 비해 과소 표현되었던 북극 구름을 이루는 과냉각 수적이, CAM6에서 상당 부분 개선되어 McIlhattan(2017)의 선행 연구와 동일한 결과가 나타남(그림 1-9, 그림 1-11).

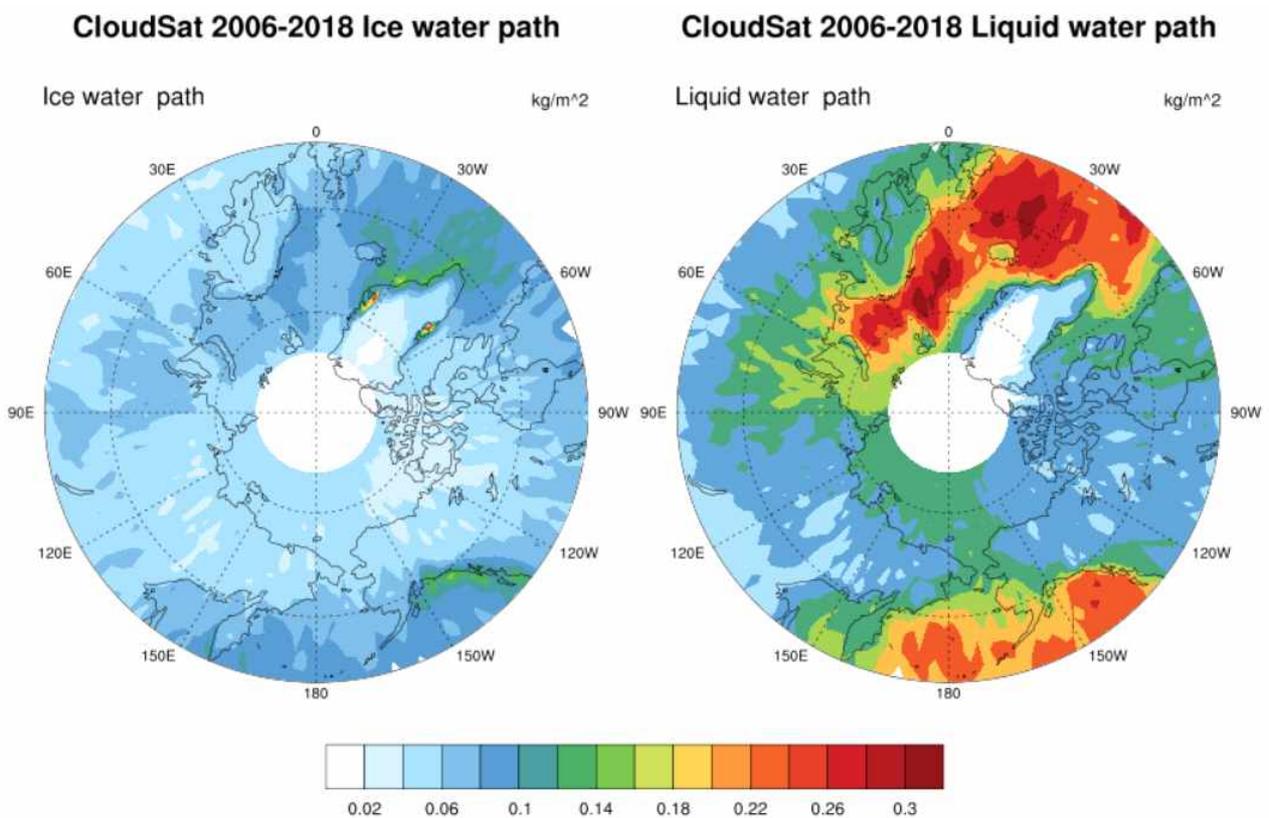
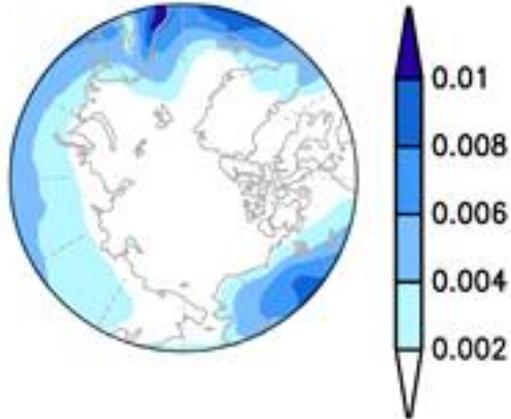


그림 1-9. 빙정수경로(Total ice water path, IWP)과 액체수경로(Total liquid water path, LWP)의 Cloudsat 위성 관측 자료로 2006년 6월 -2018년12월 평균 분포(unit : kg/m^2)

(a) TGCLDIWP.CESM2.annual



(b) TGCLDIWP.CESM1.2.annual

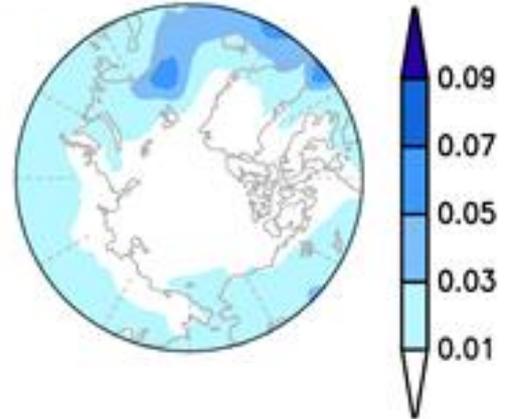
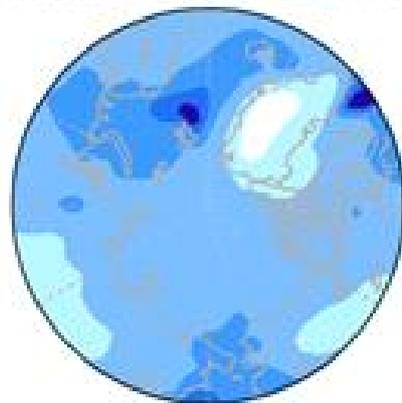


그림 1-10. CESM2와 CESM1.2의 구름 내 빙정 수 경로(ice water path) 분포 (unit: kg/m^2)

(a) TGCLDLWP.CESM2.annual



(b) TGCLDLWP.CESM1.2.annual



그림 1-11. CESM2와 CESM1.2의 구름 내 액체 수 경로 (unit: kg/m^2)

- CESM2가 CESM1.2에 비해 하향장파복사 에너지가 증가된 것으로 나타나 해빙/눈 표면온도 (snow/ice surface temperature) 변수를 비교해보면 CESM2의 해빙/눈 표면온도가 더 높게 모의하는 것을 볼 수 있음 (그림 1-12).
- 그러나, CESM2의 해빙/눈 표면온도가 따뜻하게 개선되었음에도 눈 깊이, 해빙농도는 CESM2의 모델이 많이 모의하는 것에 대해 더 분석할 필요가 있음.

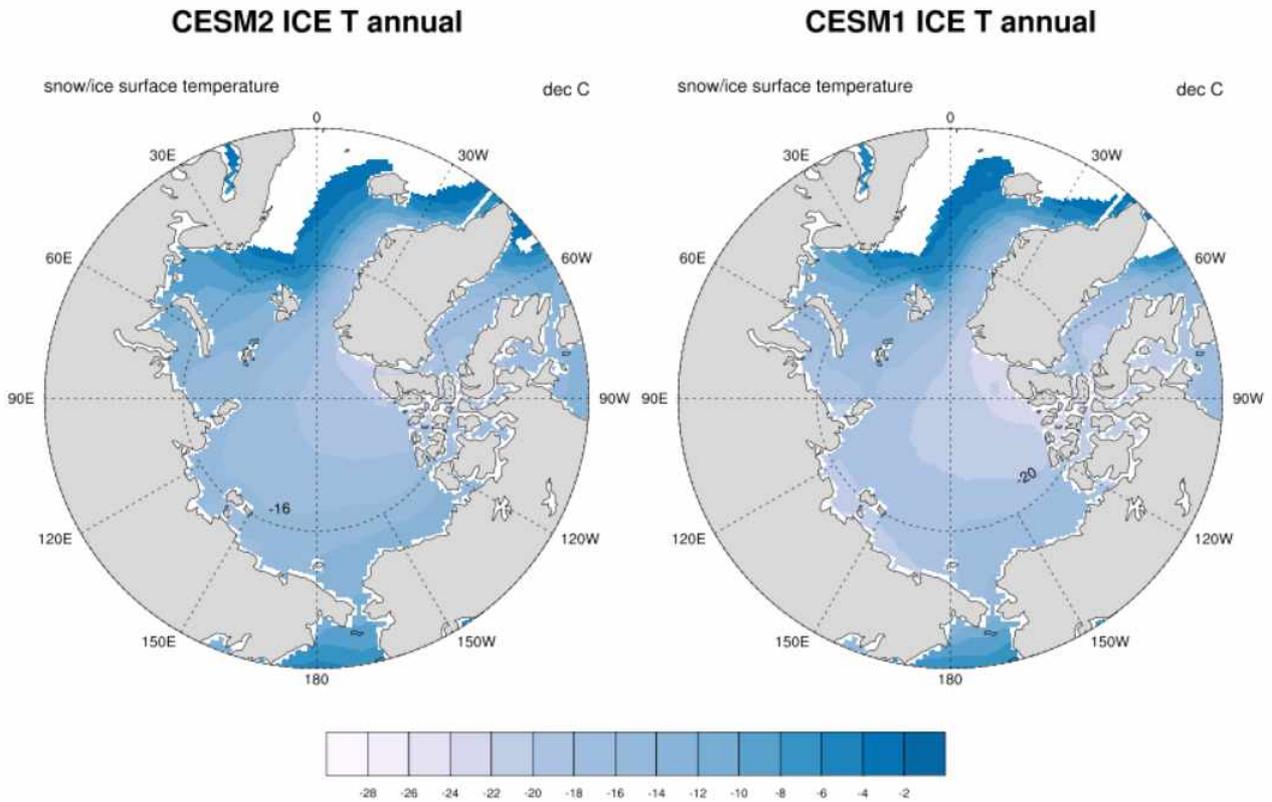


그림 1-12. CESM2와 CESM1.2의 눈/해빙 표면 온도 (unit : °C)

- CESM2 모델에서 유라시아 지역에 한랭했던 앙상블 멤버들만을 선택했을 때, CESM1.2 모델에 비해 바렌츠 지역의 온난화가 강화되며, 척치해에서 반대로 한랭하게 나타남 (그림 1-13).
- 500hPa 지위고도에서 두 모델 모두 바렌츠 지역에 고기압과 유라시아 지역에 저기압이 나타나지만, CESM2 모델에서 더 뚜렷하게 나타남.
- CESM2에서 바렌츠 지역이 더 온난하고, 유라시아 지역 더 넓게 한랭한 온도가 나타나지만, 지상의 온도 분포보다는 연직 열전달이 개선되어 500hPa 지위고도 합성장이 뚜렷하게 나타난 것으로 판단됨.

Composite field of 1.0std cold years (ND-mean)

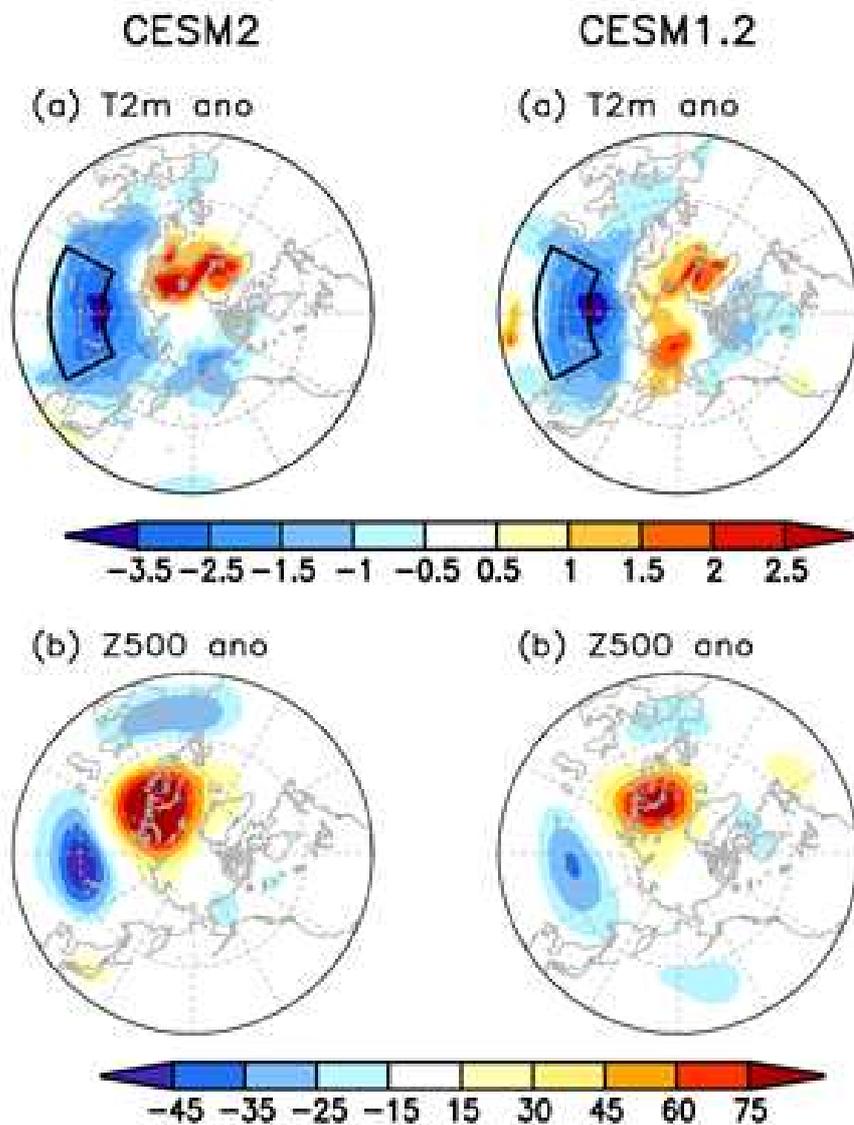


그림 1-13. CESM2와 CESM1.2의 초겨울(ND) 유라시아 지역(60E-120E, 40N-60N)이 한랭한 앙상블 멤버들에 대한 지상 기온과 500hPa 지위고도 합성장

2절 빙권 표면 경계조건 초기화 체계 수립

1. 빙권 표면 온도/눈 두께 초기화 구현

가. 빙권 초기자료 생성 실험

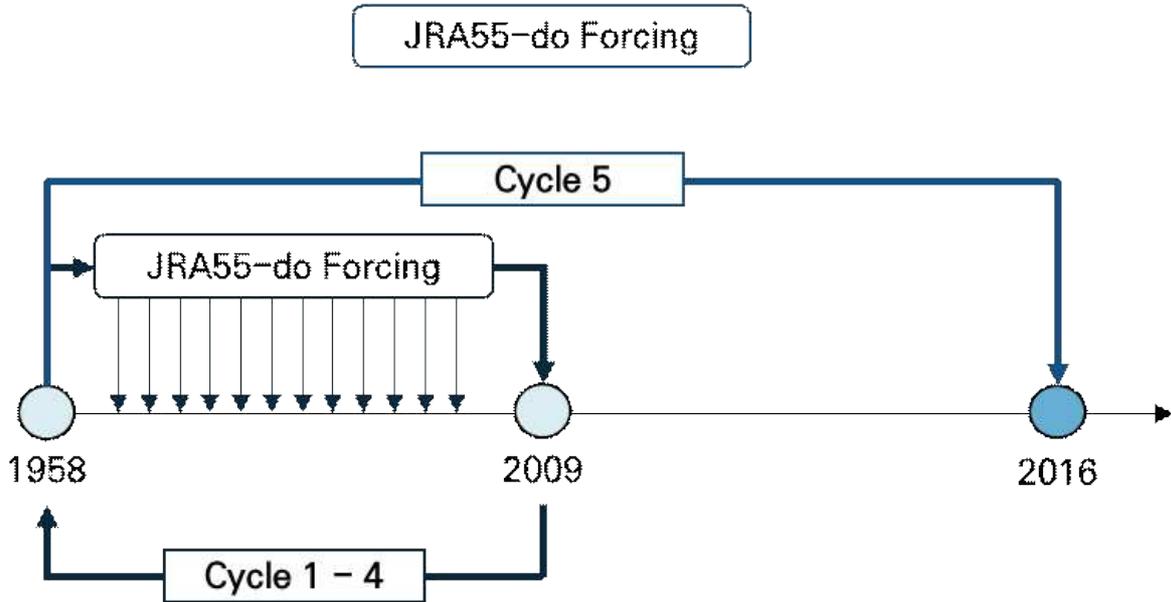
(1) 빙권 초기장 생성 실험: M1 실험

- 빙권 초기장 생성 실험(M1)을 위한 세팅으로 CMIP6(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)와 S2S(Sub-seasonal to seasonal) 프로젝트에서 활용하는 해양-빙권 초기장 생성 방안으로 초기장을 생산함.
- 해양-빙권 초기장 생성 절차는 다음과 같음. 1) POP2-CICE 결합 모델 구축(표 2-1) 2) 1958-2009년까지 JRA55-Do 대기장을 forcing 하여 4 cycle 수행 3) 4 cycle 이후 1958-2016년까지 데이터를 해양-빙권 초기장으로 활용 (그림 2-1 모식도 참고)
- M1 실험은 해양-해빙 관측자료를 직접 동화하지 않고 대기 강제력만으로 해양-해빙 초기장을 생산하여 생산된 초기장 변수와 모델간의 동적 균형(dynamic balance)이 있음.
- POP2-CICE compset
: 2000_DATM%JRA-1p4-2018_SLND_CICE_POP2_DROF%JRA-1p4-2018_SGLC_SWAV

표 2-1. POP2-CICE 결합 모델 구성 (M1)

Initialization time	2000 present day
Atmosphere	DATM%JRA-1p4-2018
Land	SLND
Sea-ice	CICE5
Ocean	POP2
River runoff	DROF%JRA-1p4-2018
Land Ice	SGLC
Wave	SWAV
Resolution	f19_g16, gx1v6

POP2-CICE5 Coupled Model



(Griffies et al., 2016; Richter et al., 2020; Tusjino et al., 2020)

그림 2-1. 대기 Forcing 자료를 활용한 해빙 초기장 생산 방안 모식도 (M1)

(2) 빙권 초기장 생성 실험: M2 실험

- M2 실험은 CICE offline Model에 SST(Sea Surface Temperature), SIC(Sea Ice Concentration), SIT(Sea Ice Thickness) 관측자료를 넷징 하여 빙권 초기장을 생산하는 방안임.
- SST와 SIC는 NOAA OISST, OISIC Reanalysis(v2) daily 자료를 활용하였고, SIT는 PIOMAS Reanalysis monthly 자료를 활용함.
- 본 방법은 '중장기 북극 해빙 면적 예측을 위한 해양-해빙 결합 초기화 기법 개발(극지연구소), 2017'에서 개발한 CICE 넷징 시스템을 활용하였고, 완화시간규모를 해당 연구에서 제안한 SST, SIC, SIT 각각 20일, 0.25일, 5일로 설정하여 수행하였음 (그림 2-2).
- M2 초기화 방안은 1982년부터 2016년까지 상기 언급한 관측자료를 넷징하여 생산하였음 (그림 2-3).
- M2 초기장은 해양-해빙 관측자료를 넷징하여 실제 관측자료와 유사하게 초기장이 구성된다는 장점이 있지만, 생산된 초기장과 모델간의 dynamic unbalance가 발생할 수 있음.

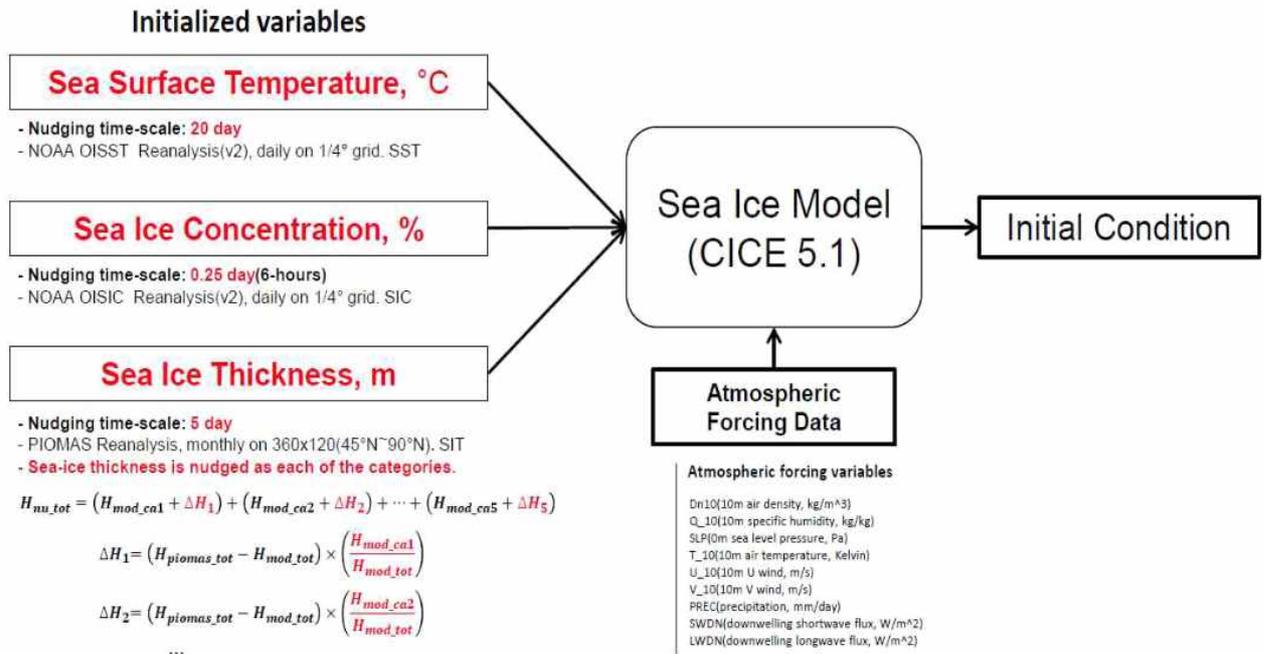
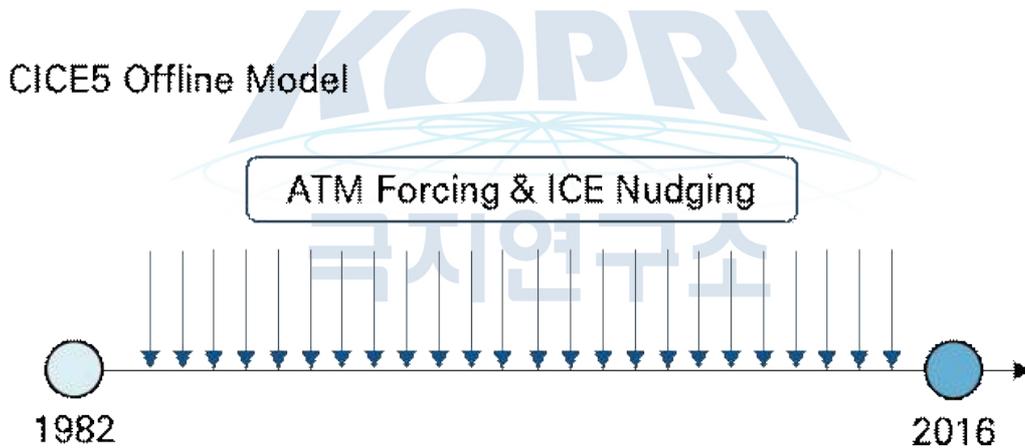


그림 2-2. 해빙 자료동화 시스템 개요 (출처: 중장기 북극 해빙 면적 예측을 위한 해양-해빙 결합 초기화 기법 개발(극지연구소), 2017)



(함유근, “중장기 북극 해빙 면적 예측을 위한 해양-해빙 결합 초기화 기법 개발”, 2017)

그림 2-3. 해빙 관측 자료를 활용한 해빙 초기장 생산 방안 모식도 (M2)

(3) 빙권 초기장 생성 실험: M3 실험

- M3 실험은 직접적인 Sea Ice 관측 데이터를 입력하여 초기장을 생산하는 것이 아닌, 해양 관측자료를 넷징하여 생산된 해양 초기장 자료를 Fully-coupled 모델에 입력하여 빙권 초기장을 생산하는 방안임.
- EXP_POP 실험의 절차는 다음과 같음 (그림 2-4). 1) POP2 offline 모델 구축(표 2-2) 2) EN4+HadISST 데이터를 1977-2016년까지 넷징 하여 해양 초기장 생성 3) CESM2 Fully-coupled 모델 구축(표 2-3) 4) 1977-2016년까지 넷징 된 해양 초기장 및 대기 초기장을 한 달 간격으로 CESM2 fully-coupled 모델에 입력하여 매달 빙권 초기장 생산
- M3 실험의 빙권 초기장은 CESM2 fully-coupled 모델을 통해 구현된 빙권 초기장으로, 각기 다른 모델에서 나온 빙권 초기장을 활용하는 것에 비해 모델 drift가 적을 것으로 판단됨.

표 2-2. POP2 offline 모델 구성(M3)

Initialization time	2000 present day
Atmosphere	DATM%NYF
Land	SLND
Sea-ice	DICE%SSMI
Ocean	POP2
River runoff	DROF%NYF
Land Ice	SGLC
Wave	DWAV%CLIMO
Resolution	f19_g16, gx1v6

표 2-3. CESM2 Fully-coupled 모델 구성(M3)

Atmosphere	CAM6
Land	CLM50%SP
Sea-ice	CICE5
Ocean	POP2
River runoff	MOSART
Land Ice	SGLC
Wave	SWAV
Resolution	f19_g16, gx1v6

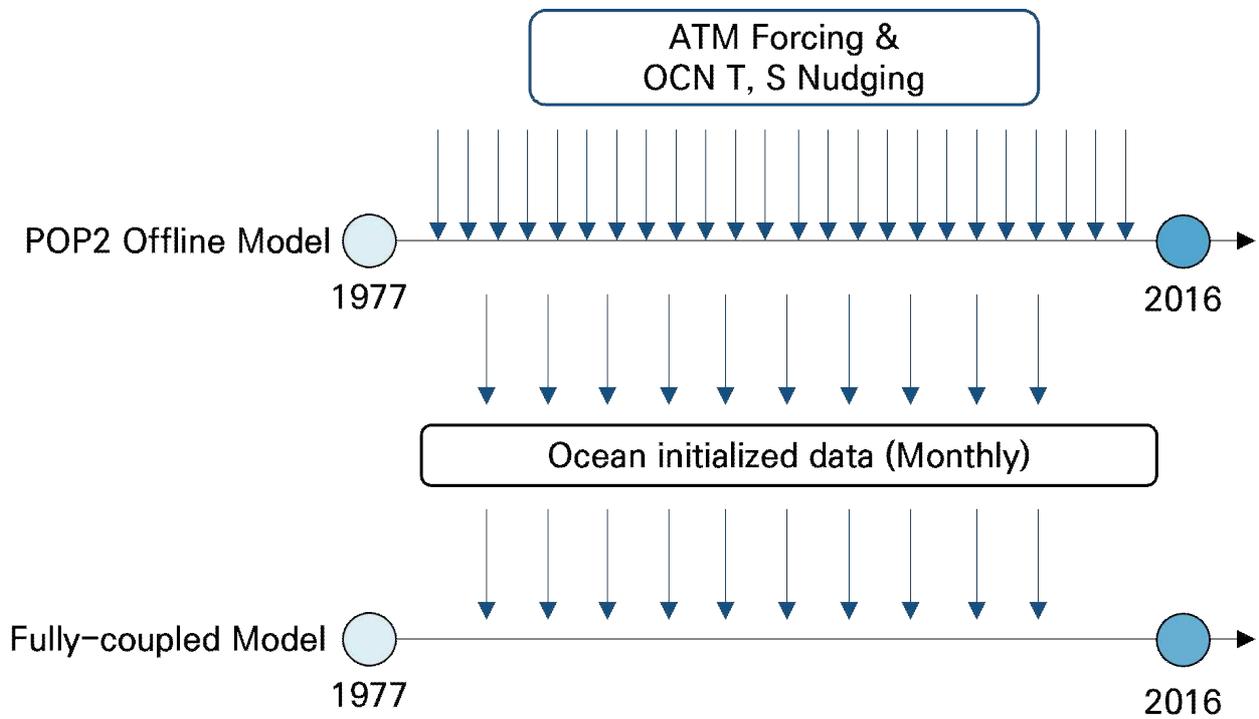


그림 2-4. 해양 관측 자료를 활용한 해빙 초기장 생산 방안 모식도 (M3)

- 절차 2)에서 EN4와 HadISST를 결합하여 사용하는 이유는 극 지역에서의 EN4 관측지점 분포가 부족하기 때문에 이를 보완하기 위함임(그림 2-5).

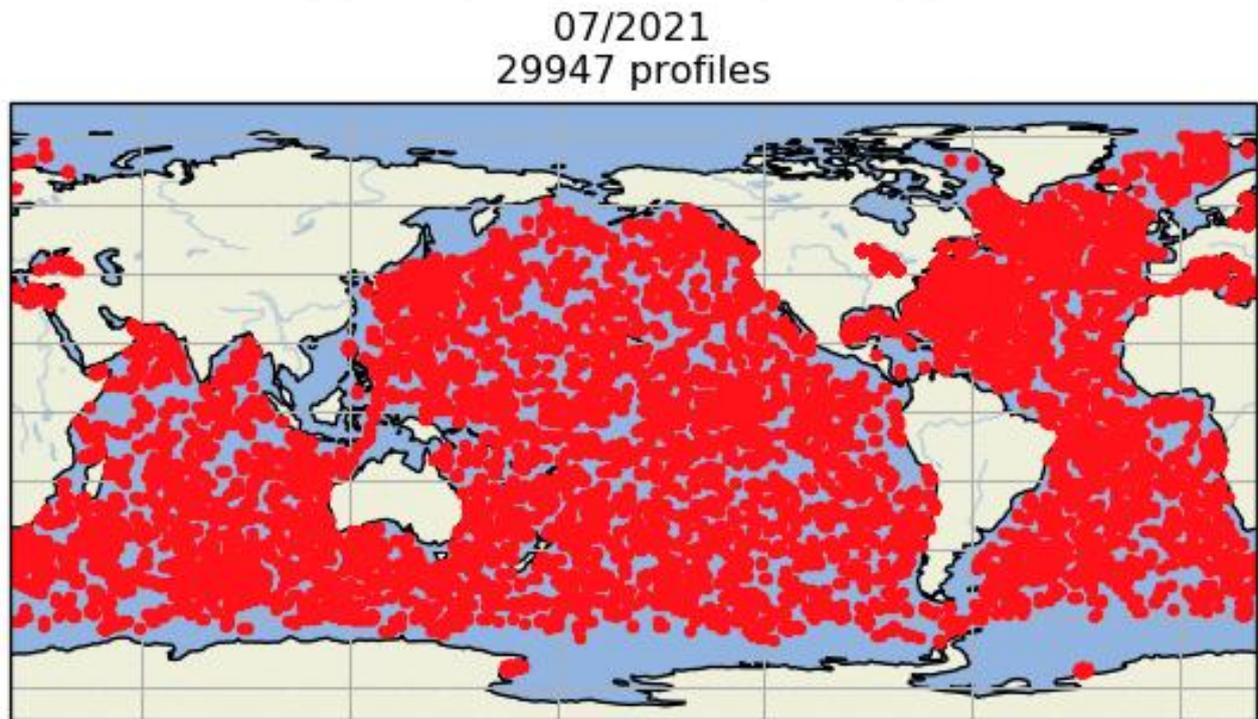


그림 2-5. EN4 데이터의 관측지점 분포 (Met Office Hadley Centre observations datasets)

나. 빙권 초기장 생성 실험 결과

- 빙권 초기장은 과거재현실험 구성에 맞춰 1996년 11월부터 2016년 2월까지 겨울철(11-2월) 매달 1일 초기장을 생산하였음. 초기장 생성 실험별 모의성능 평가를 위해 위성 관측자료가 있는 해빙농도와 해빙두께 변수를 비교 분석하였음. 관측 해빙농도는 SSMIS 해빙농도 자료를 사용하였고 관측 해빙두께는 PIOMAS 해빙두께 자료를 활용하였음.
- 분석 방법으로는 평균오차(mean bias)와 이상상관계수(ACC; Anomaly Coefficient Correlation), 평균제곱근예측성(MSSS; Mean Squared Skill Score) 분석을 진행하였음. 이상상관계수의 경우 모델의 예측결과 편차와 관측자료 편차의 상관성을 기준으로 예측성을 진단하며, 값이 1에 가까울수록 모델의 결과가 관측자료와 높은 상관성을 보임을 의미함. 평균제곱근예측성의 경우 이상상관계수가 모형과 관측 사이의 선형적인 상관성만을 기준으로 하기 때문에, 모델과 관측 사이의 오차를 고려할 수 없는데 이러한 한계를 개선하기 위해 추가적인 예측성 검정 방법으로 활용하였으며, 평균제곱근예측성 분석 기법의 경우 이상상관계수가 반영하지 못하는 관측과 모델 결과 간의 분산 차이를 고려하기 때문에 예측성 판단의 정략적인 평가가 가능하며, 1에 가까울수록 모델의 예측성이 우수함을 의미하고, 값이 낮을수록 예측성이 떨어짐을 의미하며 보통 0 이하의 값을 갖는 경우 모델의 예측성이 없음을 의미함.



(1) 빙권 초기장 분석 결과: 11월 1일 초기장

- 초기장 생산 방안별(M1-3) 11월 1일 초기장의 해빙농도, 해빙두께 변수의 평균오차를 분석하였음 (그림 2-6).
- 먼저 M1 초기장의 해빙농도의 평균오차는 북극해에서는 양의 편차를 보이지만, 척치해와 카라해에서는 음의 편차를 보임. 또한 그린란드와 바렌츠해 사이 해빙 변동이 큰 지역에서 큰 양의 편차를 보임. 해빙두께의 경우, 그린란드 주변에 양의 편차를 제외하고는 대부분의 북극해에서 음의 편차를 보임. 따라서 M1 초기장은 해빙농도는 과대모의하는 경향이, 해빙두께는 과소모의하는 경향이 나타남.
- M2 초기장은 M1 초기장에서 나타난 그린란드와 바렌츠해 사이 해빙농도 양의 편차가 많이 완화 된 것을 확인하였고 해빙두께는 관측과의 오차가 없었음. 이는 M2 초기장이 해빙농도와 해빙두께를 직접 넷징하여 생산된 초기장이기 때문임.
- M3 초기장의 해빙농도는 북극해에서 양의 편차를 보이고, 그린란드와 척치해 사이 지역에서는 음의 편차를 보임. 해빙두께는 M1 초기장과 유사하게 북극해 전반에 걸쳐 음의 편차를 보임.
- 요약하면 해빙 관측자료를 넷징하는 M2 초기장이 관측자료와 가장 유사한 분포를 보였고, 대기 강제력을 처방한 M1 초기장은 Marginal ice zone (MIZ)에서 과대모의 경향, 해양 관측자료를 넷징한 M3 초기장은 해당 지역에서 과소모의하는 경향을 보임.

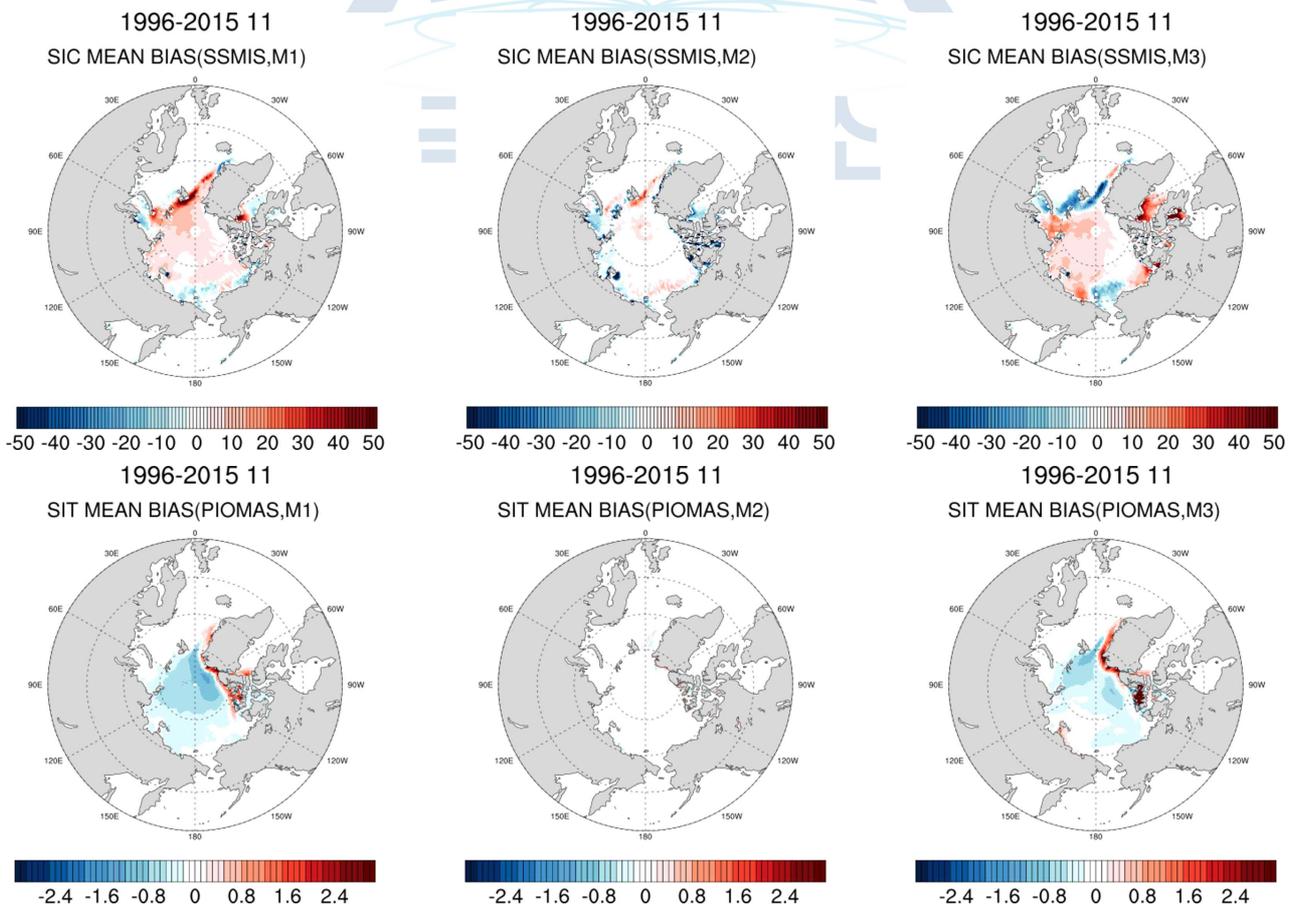


그림 2-6 11월 1일 초기장의 해빙농도(SIC), 해빙두께(SIT) mean bias 분포

- 평균오차 분석에 이어 이상상관계수와 평균제곱근예측성 분석을 진행하였음 (그림 2-7).
- M1 초기장의 해빙농도와 해빙두께 ACC, MSSS는 바렌츠-카라해와 적치해에서 높은 정확도를 보였음. M2는 두 개 변수 모두 높은 극지역 전체지역에서 높은 예측성을 보임. M3 초기장은 세 개의 초기장 중 가장 낮은 예측성을 보였고 MSSS로 평가했을때는 예측성이 거의 없었음.

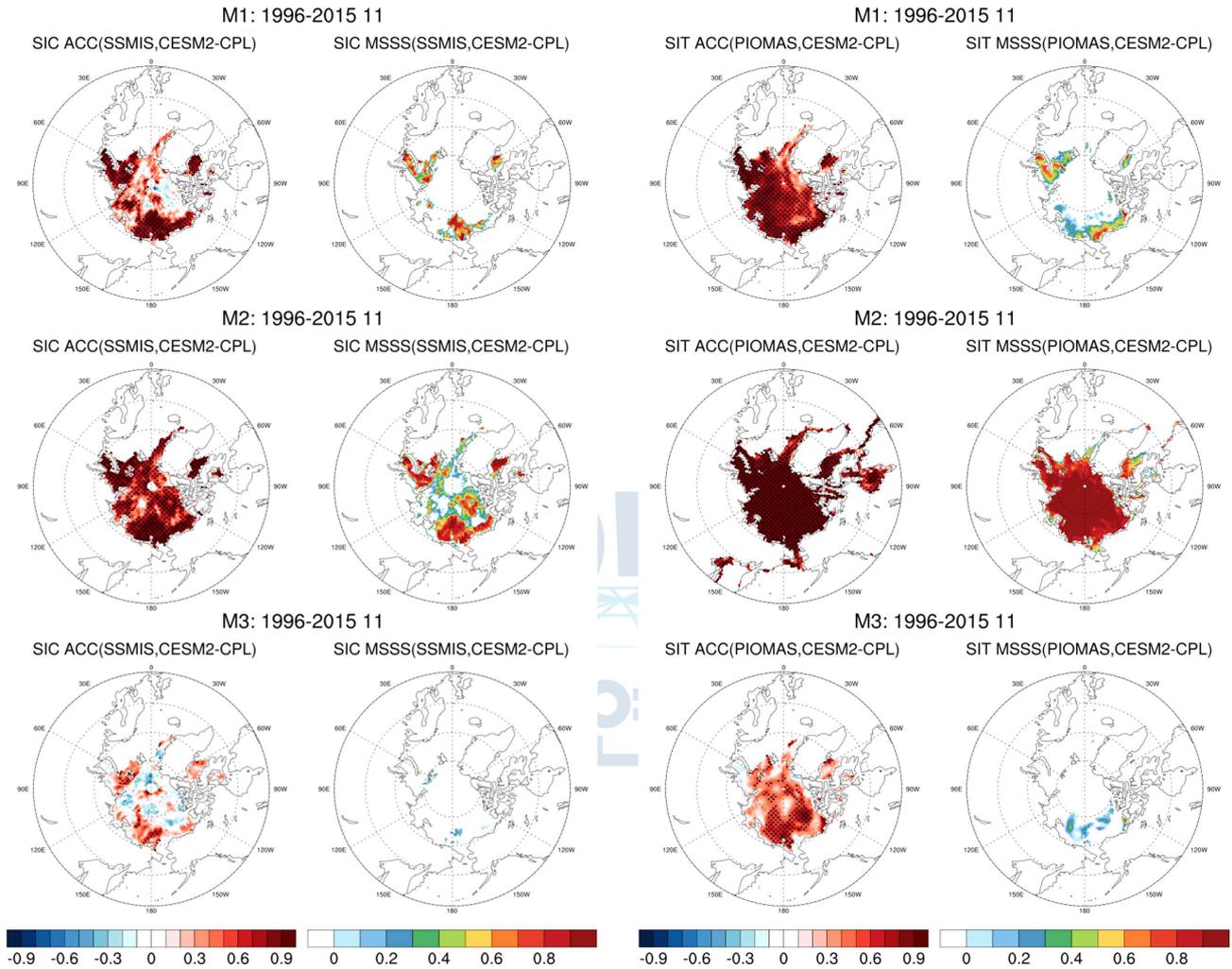


그림 2-7 11월 1일 초기장의 해빙농도(SIC), 해빙두께(SIT) ACC, MSSS 분포

(2) 빙권 초기장 분석 결과: 12월 1일 초기장

- 12월 1일 초기장의 해빙두께의 경우, M1-3 초기장 모두 11월 1일 초기장과 유사한 분포를 보였음.
- 해빙농도에서 차이가 있었는데, 12월에 들어 열기 시작한 허드슨만의 해빙 농도에 대해 세 실험 모두 음의 편차를 보였음. 세 실험 중 M2 실험이 가장 적은 음의 편차를 보임. 또한, M1의 11월 1일 초기장에서는 바렌츠해와 척치해에서 음의 편차를 보였지만 12월 1일 초기장에서는 두지역 모두 양의 편차를 보여 과대모의 경향을 보였음. M3 또한 그린란드 주변에서 양의 편차가 11월 1일 초기장에 비해 증가하였고, 척치해와 베링해 해역에서 음의 편차를 보임.
- 요약하면, 12월 1일 초기장에서 M1은 MIZ에서 과대모의 경향이 강화되었고, M2는 관측과 유사, M3는 MIZ에서 과대모의 경향이 강화됨.

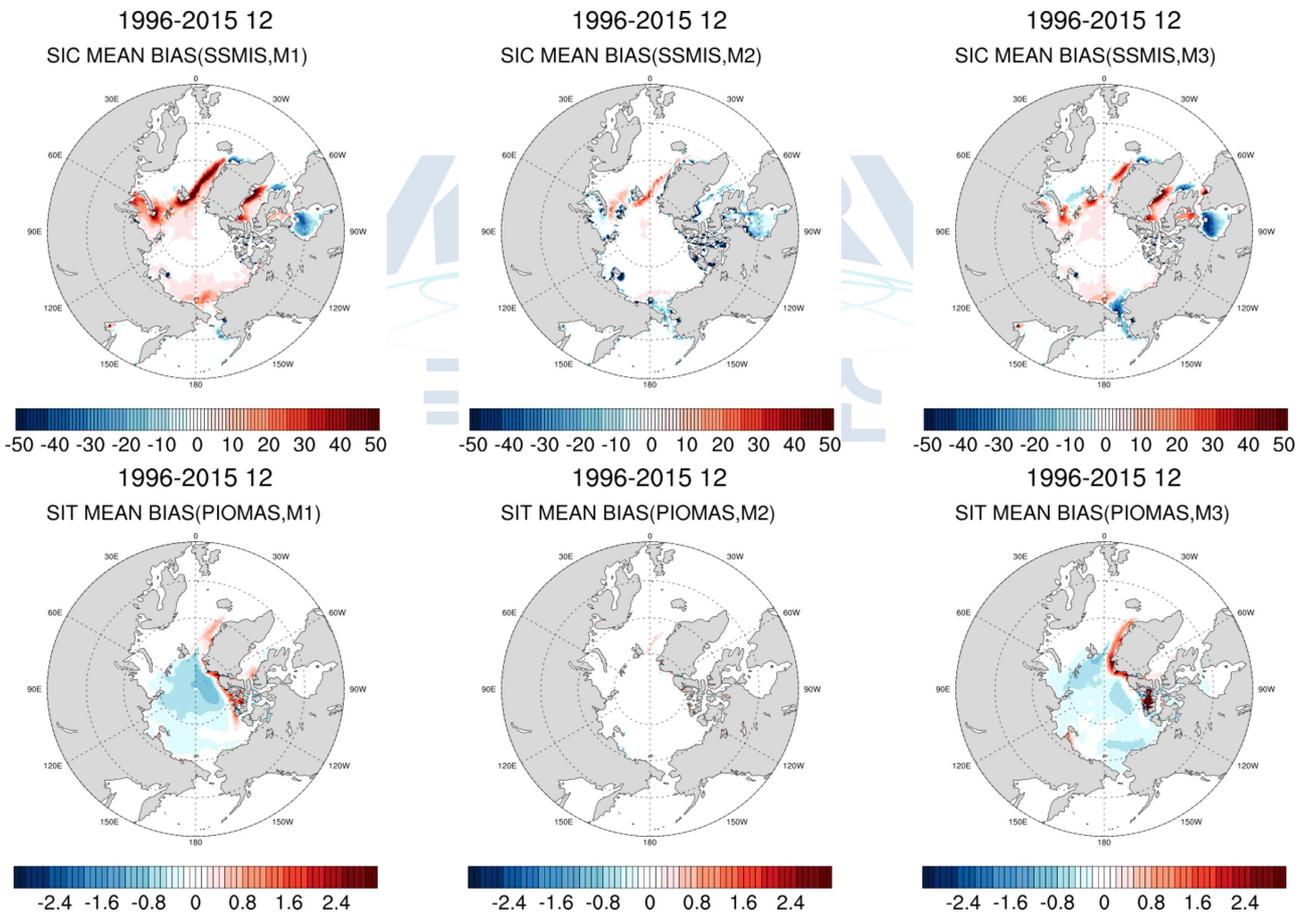


그림 2-8 12월 1일 초기장의 해빙농도(SIC), 해빙두께(SIT) mean bias 분포

- 12월 1일 초기장의 ACC, MSSS 분포 분석 결과, M1 해빙농도의 ACC가 11월 1일 초기장에 비해 예측성이 떨어졌고 바렌츠 일부지역과 척치해에서 높은 MSSS를 보였음. 해빙 두께의 ACC 분포는 11월 1일 초기장과 유사하였지만 MSSS 분포를 보면 11월 1일에 비해 낮은 예측성 분포를 보임.
- M2 실험 결과의 해빙농도는 11월 1일에 비해 ACC가 낮아졌지만 상대적으로 높은 ACC와 MSSS 분포를 보임. 해빙두께의 경우 ACC, MSSS 분포 모두 매우 높은 예측성을 보임.
- M3 실험은 해빙농도의 예측성이 거의 없게 나타났고 해빙두께의 ACC에서 비교적 높은 예측성을 보임.

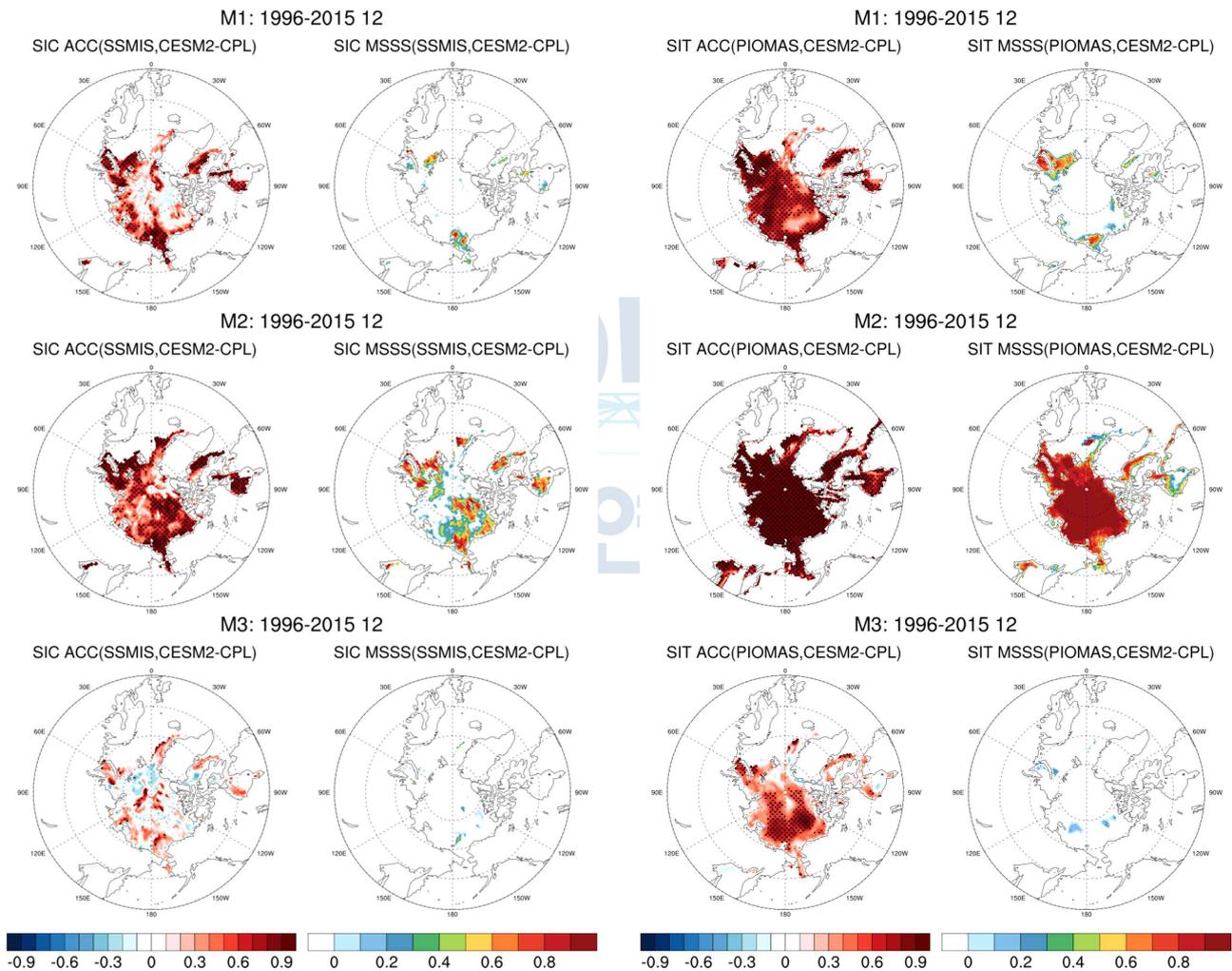


그림 2-9 12월 1일 초기장의 해빙농도(SIC), 해빙두께(SIT) ACC, MSSS 분포

(3) 빙권 초기장 분석 결과: 1월 1일, 2월 1일 초기장

- 1월 1일 초기장과 2월 1일 초기장의 분포는 거의 유사한 패턴으로 동일하게 분석하였음 (그림 1-10 - 그림 1-13).
- 1월 1일 초기장의 M1 실험 해빙농도의 경우 12월 1일 초기장과 유사한 패턴을 보여 MIZ 지역에서 양의 편차를 보였음. 12월 1일 초기장에서 나타났던 허드슨만에서 음의 편차는 1월 1일 초기장에서 양의 편차로 나타났음. 해빙 두께는 전체 기간에서 유사한 오차를 보였음.
- M2의 경우는 앞선 초기장과 유사하게 극지역 대부분에서 해빙농도, 해빙두께 모두 낮은 오차를 보임.
- M3의 해빙농도는 12월 1일 초기장 MIZ에서 보인 양의 편차가 1월 1일 초기장에서 양의 편차가 높아졌음. 해빙두께의 경우 허드슨만에서 음의 편차를 보이고 다른 지역은 앞선 초기장의 해빙두께 분포와 유사하였음.

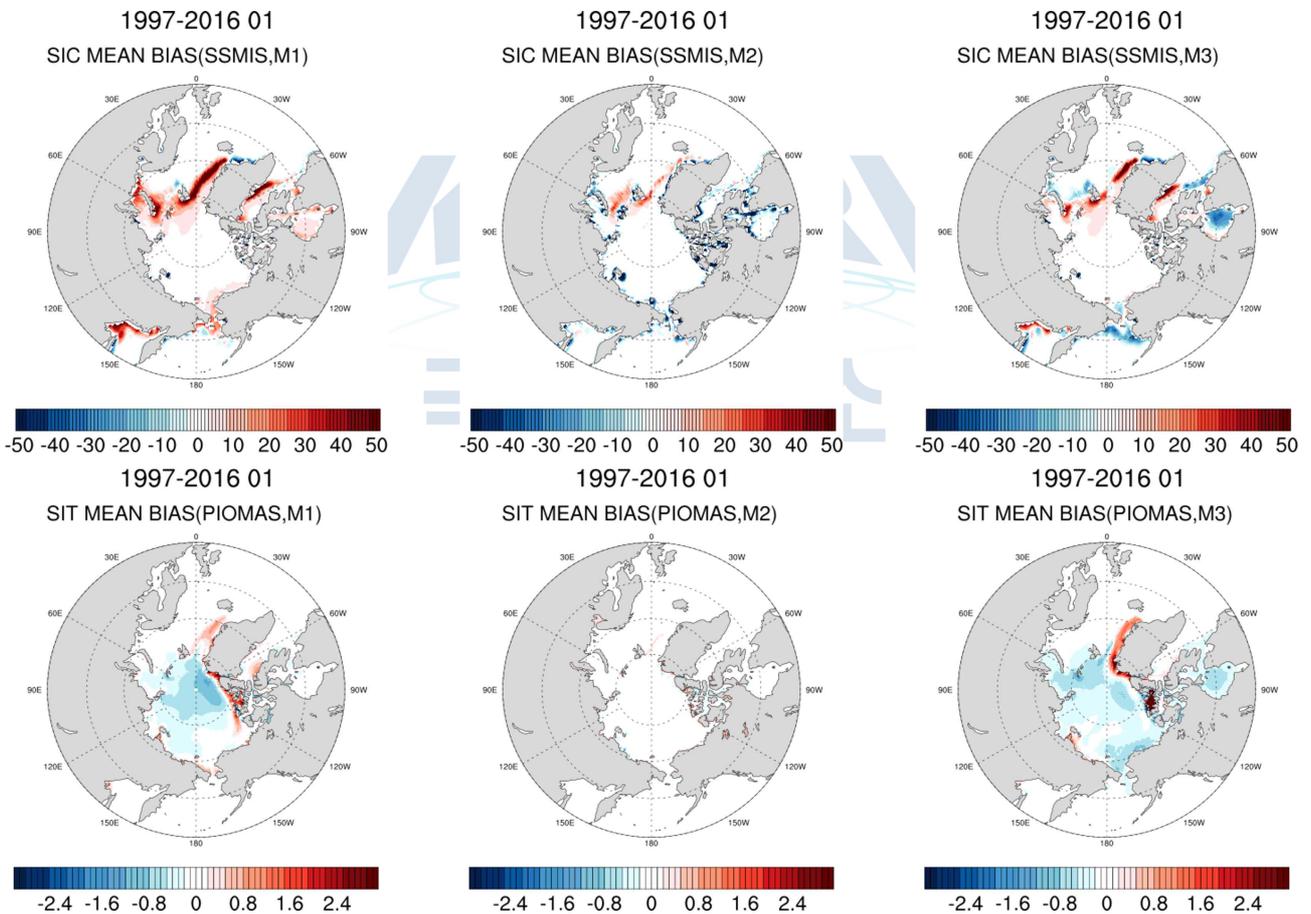


그림 2-10 1월 1일 초기장의 해빙농도(SIC), 해빙두께(SIT) mean bias 분포

- 1월 1일 초기장의 ACC, MSSS 분포는 앞서 분석한 초기장과 유사한 분포를 보였음.
- M1의 경우 ACC와 MSSS 모두 높은 예측성을 보인 지역은 바렌츠 일부지역과 베링해 부근임. 해빙두께 또한 같은 지역에서 높은 예측성을 보임.
- M2 초기장은 해빙농도, 해빙두께 모두 높은 예측성을 보임.
- M3는 해빙농도는 거의 예측성이 없었고, 해빙두께의 ACC 분포만이 높은 예측성을 보였음.

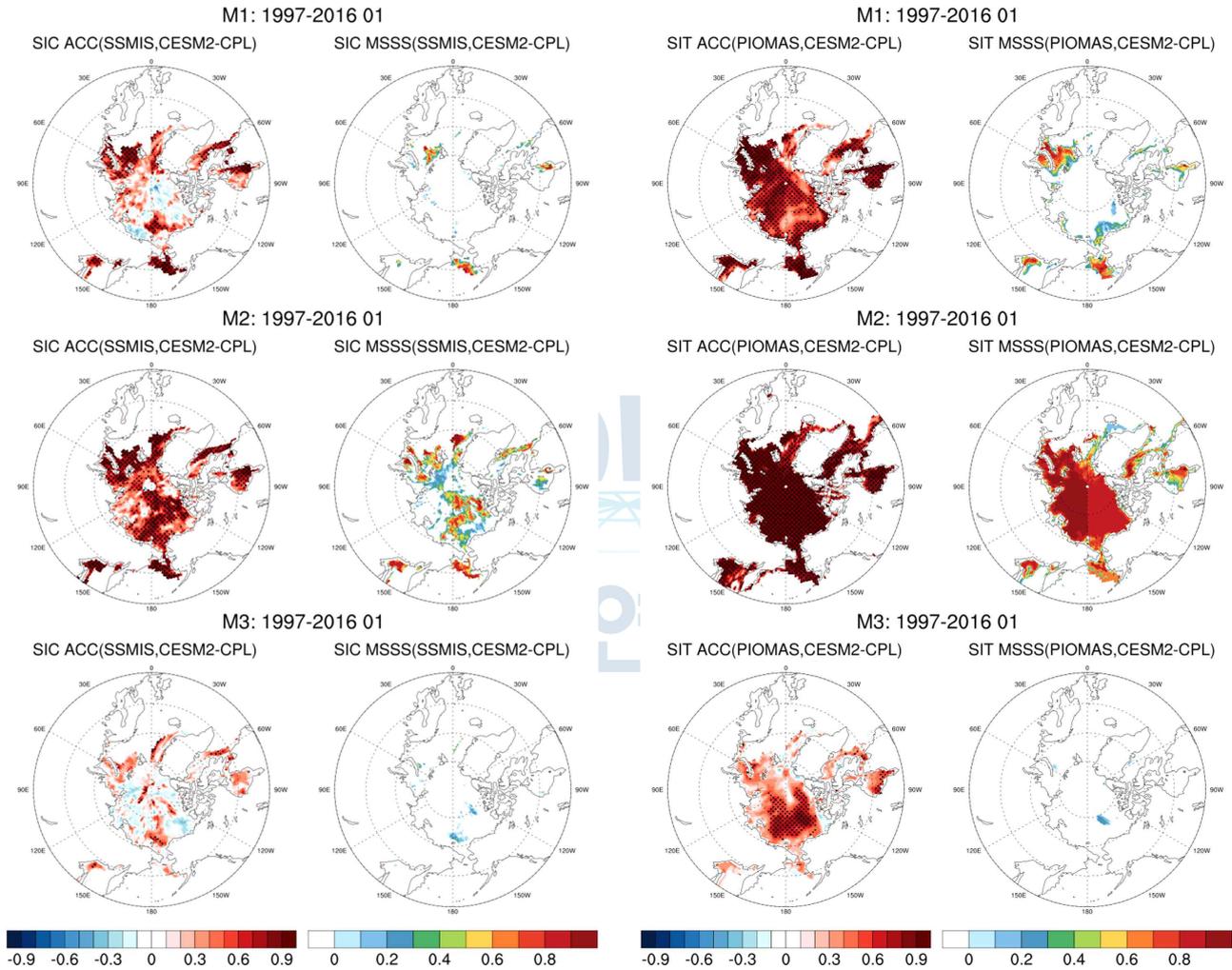
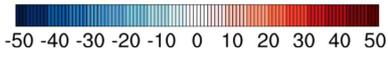
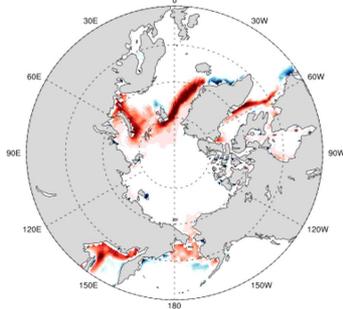
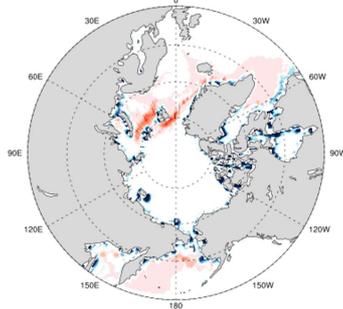


그림 2-11 1월 1일 초기장의 해빙농도(SIC), 해빙두께(SIT) ACC, MSSS 분포

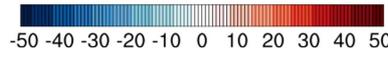
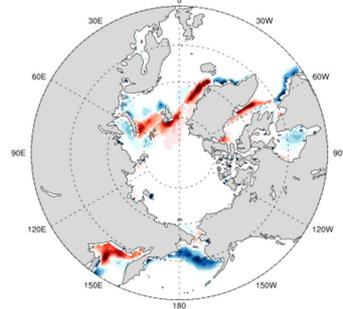
1997-2016 02
SIC MEAN BIAS(SSMIS,M1)



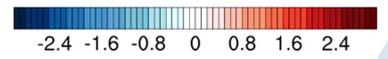
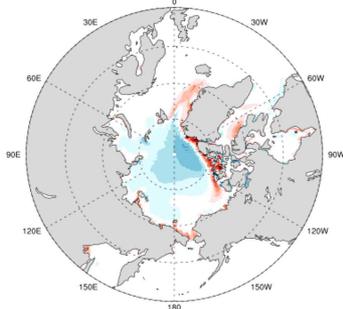
1997-2016 02
SIC MEAN BIAS(SSMIS,M2)



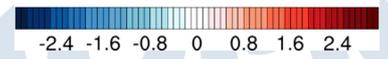
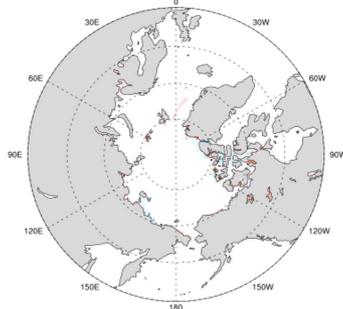
1997-2016 02
SIC MEAN BIAS(SSMIS,M3)



1997-2016 02
SIT MEAN BIAS(PIOMAS,M1)



1997-2016 02
SIT MEAN BIAS(PIOMAS,M2)



1997-2016 02
SIT MEAN BIAS(PIOMAS,M3)

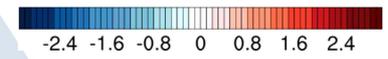
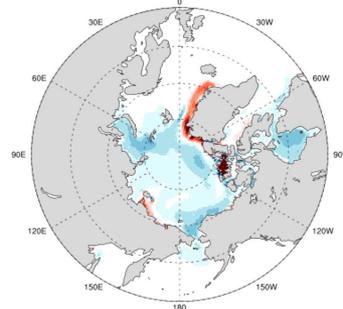


그림 2-12 2월 1일 초기장의 해빙농도(SIC), 해빙두께(SIT) mean bias 분포

극지연구소

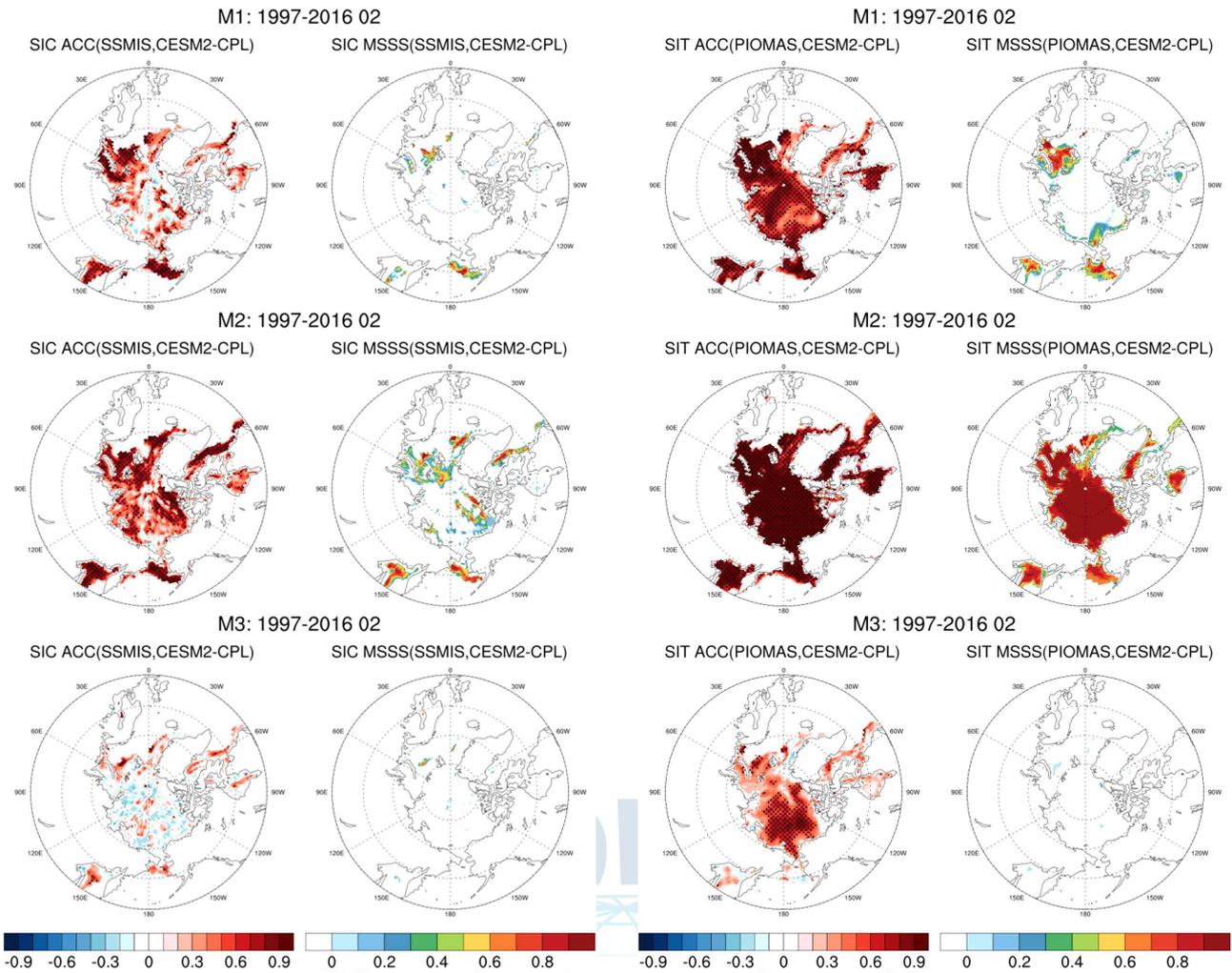


그림 2-13 2월 1일 초기장의 해빙농도(SIC), 해빙두께(SIT) ACC, MSSS 분포

3절 빙권 초기화를 통한 계절예측 및 극-중위도 원격상관 모의성능 평가

1. 계절예측 과거재현실험(hindcast) 수행 및 중위도 예측성 평가

가. 계절예측 과거재현실험 구성

- CESM2 fully-coupled 모델을 활용하여 과거재현실험을 구성하였고 이를 통해 앞서 생산한 해빙 초기장이 극 지역 기상 모의에 미치는 영향을 평가함. 모델 구성은 해빙 초기장 생성 실험인 M3 실험의 fully-coupled 모델 구성과 동일함 (표 2-3). 과거재현실험 기간은 1996년 11월부터 2016년 2월까지 겨울철(11-2월)에 대해 매월 1일 초기화하여 구성하였고, 적분시간은 45일로 설정하였음. 자세한 과거재현실험 구성은 표 3-1과 같음.

표 3-1. CESM2 fully-coupled 모델 기반 계절예측 과거재현실험 구성

Model	CESM2 fully-coupled
Period	1996/1997 - 2015/2016
Initial time	1st of every month in winter (NOV-FEB)
Intergration range	45 days
# of ensembles	5
Resolution	f19_g16(atm, land), gx1v6(ocn, ice)

나. 해빙 초기장별 실험 구성

- 총 네가지 실험을 구성하였고 EXP1-3 실험은 대기, 해양, 지면 초기장은 동일하게 하고, 해빙 초기장만 달리하여 해빙 초기장이 다른 기상 변수에 미치는 영향을 평가하고자 하였음 (표 3-2).
- 첫 번째 실험인 EXP1은 대기 강제력만을 입력하여 생산된 해양-해빙 초기장을 처방한 예측 실험으로 모델과 초기장 변수간의 균형이 가장 잘 맞는 실험임. EXP2는 해빙 관측자료를 직접 넛징한 초기장을 입력하여 예측한 실험으로 모델과 해빙 변수간의 균형이 맞지 않을 수 있고 공간 불연속을 보일수 있음. EXP3는 해양 관측자료를 넛징하여 해빙을 간접적으로 생산하여 예측한 실험으로 모델과 해빙 변수간 균형을 맞춘 실험임. EXP4는 해양관측자료를 넛징한 초기장과 해빙관측자료를 넛징한 초기장을 입력하여 예측한 실험으로 각 요소별 관측자료를 직접 넛징 해서 생산된 예측장을 평가할 수 있음.

표 3-2. 과거재현실험별 입력 초기장

	ATM	OCN	ICE
EXP1	ERA5 Reanalysis	M1 OCN initialization (Only ATM Forcing)	M1 ICE initialization (Only ATM forcing)
EXP2			M2 ICE initialization (ATM forcing & ICE nudging)
EXP3			M3 ICE initialization (ATM forcing & OCN nudging)
EXP4		M3 OCN initialization (OCN nudging)	M2 ICE initialization (ATM forcing & ICE nudging)

다. 앙상블 생성 방안

- 본 연구에서는 모델 자체 바이어스를 줄이기 위해 RFP(Random Field Perturbation) 방법을 활용하여 앙상블 예측을 수행하였음 (Magnusson et al., 2009). RFP 방법은 모델을 수행하고자 하는 날짜와 같은 계절의 다른 연도의 초기장을 무작위로 두 개를 추출하여 차이를 구하고, 그 차이에 PSF(Perturbation scaling factor)를 곱하여 초기 초기장에 더하고 빼서 두 개의 앙상블을 생성하는 방법임. 이 방법은 다른 복잡한 앙상블 생성 방안만큼 효과적인 것으로 나타났고, 초기장의 영향을 많이 받는 S2S 예측에서 유용한 방법으로 알려져 있음(Richter et al., 2020).
- 앙상블 예측의 효과를 확인하기 위해 싱글 앙상블 예측 결과와 앙상블 5개 평균 예측결과를 비교하였음 (그림 3-1). 모든 실험에서 앙상블 평균 예측이 RMSE가 낮아짐을 확인하였으며, 앙상블 예측 방법이 모델의 불확실성을 줄일 수 있음을 보였음.

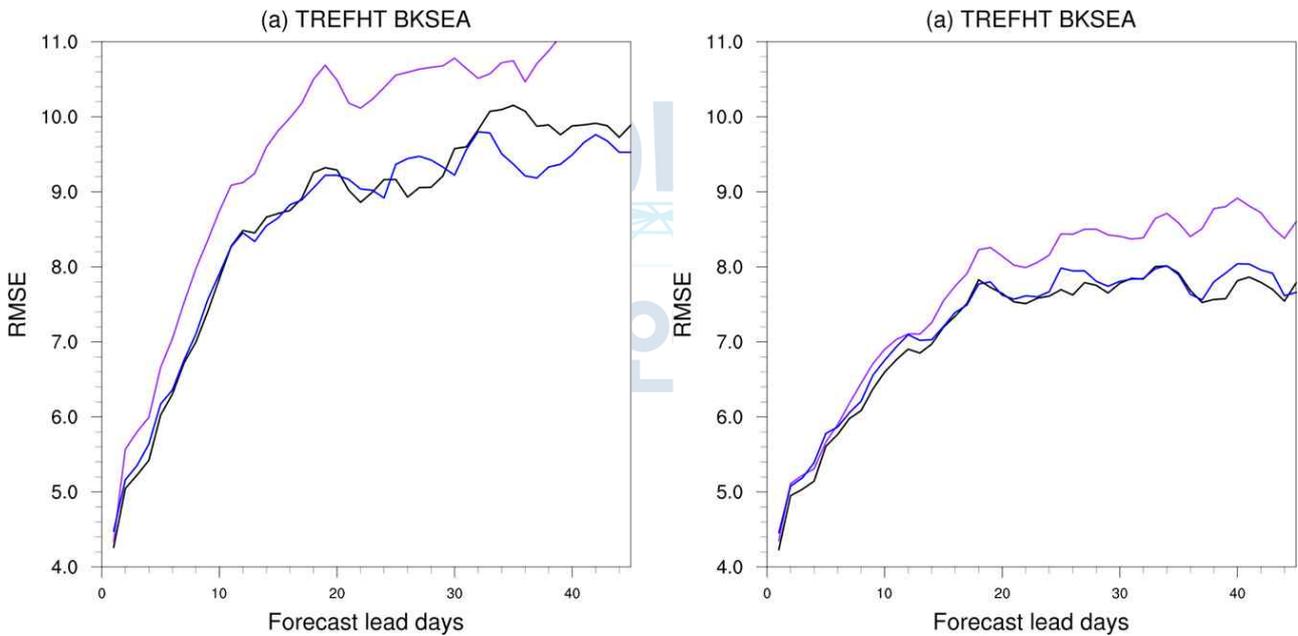


그림 3-1. 바렌츠-카라해 지역(65-80N, 20-105W)에서의 lead time에 따른 2m 기온의 RMSE 분포(검은실선: M1 실험, 보라색실선: M2 실험, 파란실선: M3 실험, 단위: °C) (좌) 싱글 앙상블, (우) 앙상블 5개 평균

라. 과거재현실험 북극 및 중위도 예측성 평가

- 과거재현실험 결과를 평가하기 위해 ACC와 RMSE 분포를 분석하였음. EXP1 실험은 ACC, RMSE 분포를 보였고, 나머지 실험은 EXP1과 비교하기 위해 그리드별로 ACC와 RMSE의 차를 분석하였음. 또한, zonal-mean ACC 분포를 분석하여 해빙 초기장이 위도별 예측성에 미치는 영향을 평가하고자 하였음.

(1) 과거재현실험 예측 결과: 11월 1일 초기장 45일 예측

- 11월 1일 초기장으로 45일 예측한 지상기온 ACC, RMSE 분석 결과는 그림 3-2과 같음.
- EXP1의 북반구 지상기온 ACC 평균값은 0.51로 다른 실험에 비해 높은 ACC를 보였음. EXP1의 ACC 분포를 보면, 동아시아와 북미에서 낮은 예측 성능을 보였고 이는 RMSE 분포에서도 나타났음. EXP1에서 그린란드 주변의 높은 RMSE는 모델 자체 바이어스로 보이며, 다른 실험에서도 동일하게 나타나는 오차였음.
- EXP2의 북반구 지상기온 ACC 평균값은 EXP1 실험에 비해 0.05 상관성이 떨어진 0.46으로 실험 중 가장 낮은 ACC를 보임. 극지역에서 지상기온의 ACC가 EXP1 실험에 비해 낮게 분포하였고, 특히 그린란드 주변 해역에서는 높은 RMSE를 보였음. 북미지역의 ACC가 EXP1 실험에 비해 상승하는 패턴을 보였지만, 아시아 지역에서는 ACC가 낮아졌음.
- EXP3는 EXP2와 유사한 북반구 ACC 평균값을 보였고, 보퍼트해와 배핀만 사이 지역에서 낮은 ACC를 보였고, RMSE 또한 상승하였음.
- EXP4는 북반구 평균 ACC가 0.48로 EXP1 비해서는 낮지만 EXP2와 EXP3 실험에 비해서는 높은 예측성을 보임. ACC와 RMSE 분포는 EXP2와 유사한 패턴을 보였음.

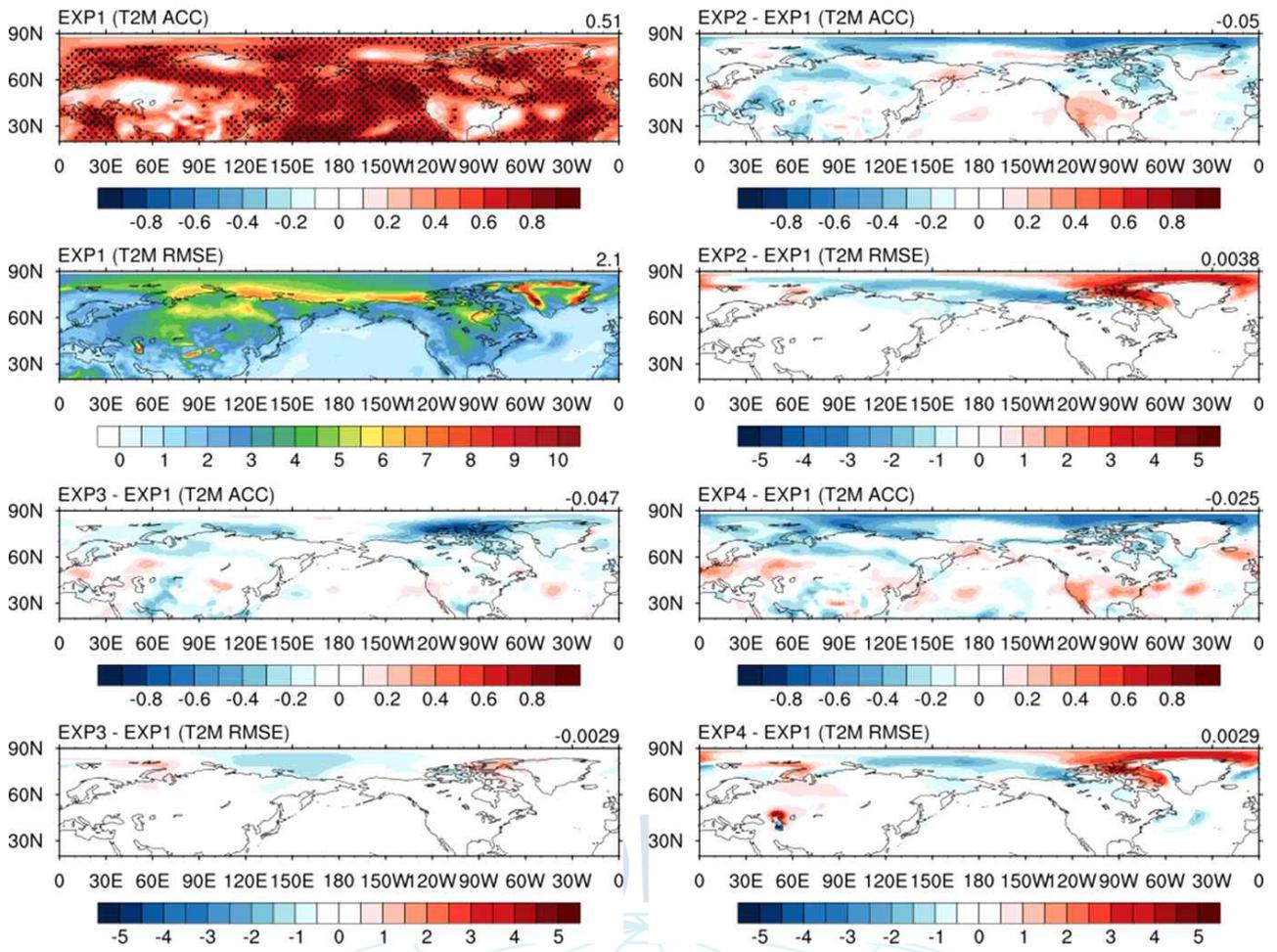


그림 3-2. 지상기온 ACC, RMSE 분포 (각 그림 오른쪽 위 숫자는 위도 20N 이상 지역 평균값을 의미)

극지연구소

- 그림 3-2의 지상기온 ACC를 경도 평균한 zonal-mean ACC를 보면, EXP1 실험이 고위도 (> 60N)에서 가장 높은 예측성을 보였고, 중위도(30~60N)에서는 EXP4가 가장 높은 예측성을 보였음. 중위도에서 가장 높은 예측성을 보인 EXP4는 고위도에서는 급격히 예측성능이 감소하는 특징을 보였고 이러한 특징은 EXP2에서 나타났음.

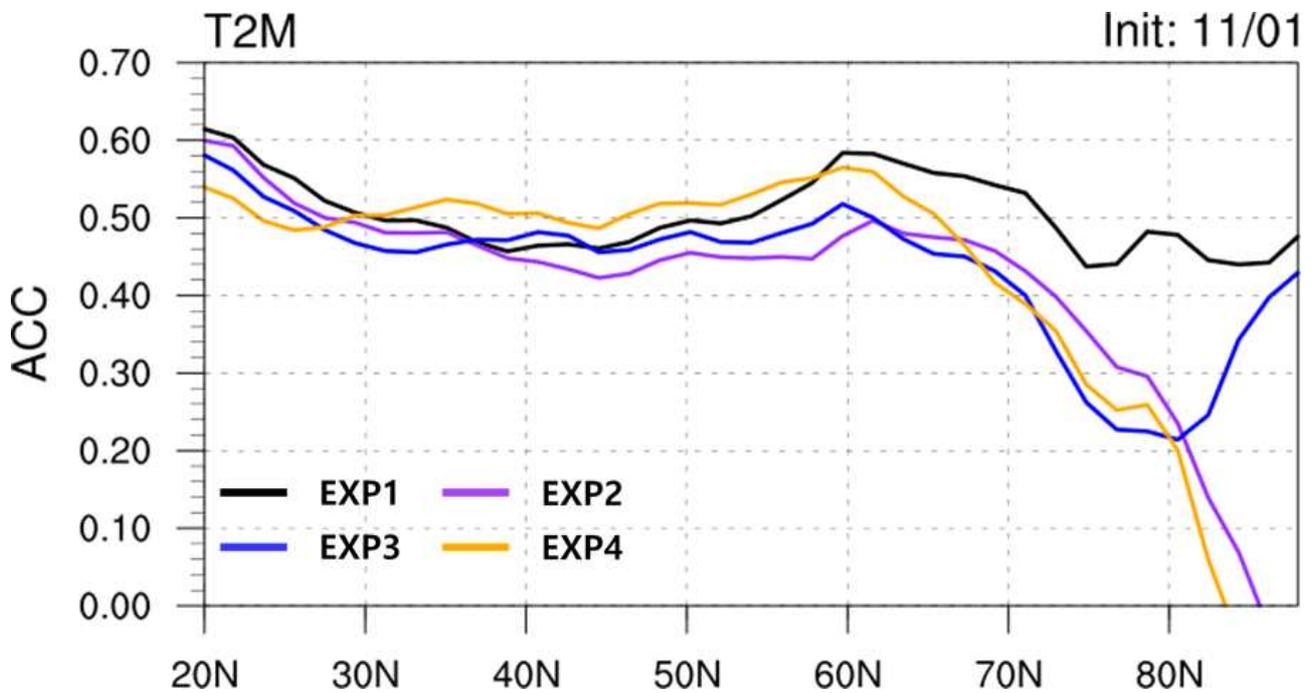


그림 3-3. 위도별 Zonal-mean 지상기온 ACC (검은선: EXP1, 보라선: EXP2, 파란선: EXP3, 주황선: EXP4)

- (요약) 지상기온 예측성은 EXP1 > EXP4 > EXP3 > EXP2 순서로 높은 예측성을 보였음. 해빙 관측자료를 직접 넷징한 실험인 EXP2와 EXP4 실험은 고위도에서 가장 낮은 지상 기온 예측성을 보여 해빙 초기장 변수와 모델간의 불균형으로 비롯된 것으로 판단됨. 하지만 해양 관측자료를 넷징한 해양 초기장을 처방한 EXP4의 경우, 중위도에서 높은 예측성을 보였음.

(2) 과거재현실험 예측 결과: 12월 1일 초기장 45일 예측

- 12월 1일을 초기시간으로 45일간 예측한 과거재현실험 결과는 그림 3-4와 그림 3-5와 같음.
- 먼저 EXP1 실험의 북반구 평균 지상기온 ACC는 0.54로 11월 1일 실험에 비해 비교적 높은 예측성을 보였지만, 아시아와 북미의 낮은 예측성은 동일하였음.
- EXP2의 북반구 평균 ACC는 0.49로 네 가지 실험 중 가장 낮은 예측성을 보였고, 바렌츠-카라해, 베링해, 그린란드 주변 해역에서 낮은 예측성을 보였고 RMSE 분포 또한 해당 지역에서 높은 RMSE를 보임.
- EXP3의 북반구 평균 ACC는 0.54로 EXP1의 ACC와 동일하였고, ACC와 RMSE 분포 또한 유사한 패턴을 보여, 유사한 예측 결과를 보임.
- EXP4의 북반구 평균 ACC는 0.50으로 EXP2 실험과 유사한 ACC와 RMSE 분포를 보임.

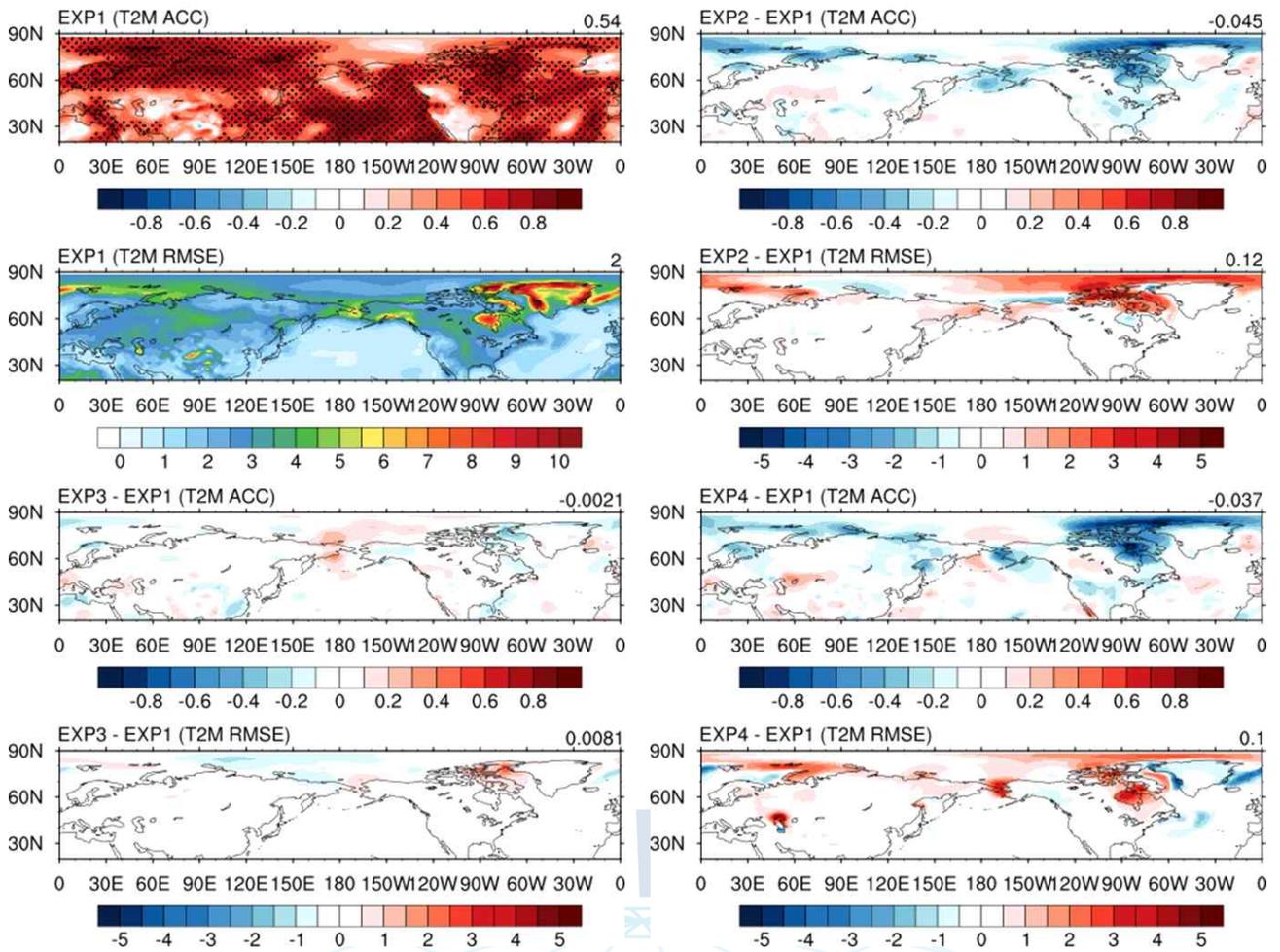


그림 3-4. 그림 3-2과 동일하지만, 12월 1일 예측장.

극지연구소

- Zonal-mean 지상기온 ACC 분석 결과, EXP1과 EXP3 실험이 유사한 분포를 보였고, EXP2와 EXP4 실험이 유사한 예측 결과를 보였음. 실험간 차이는 50N 이하 지역에서는 거의 나지 않았으며 극지역으로 갈수록 실험별 차이가 크게 나타났음.

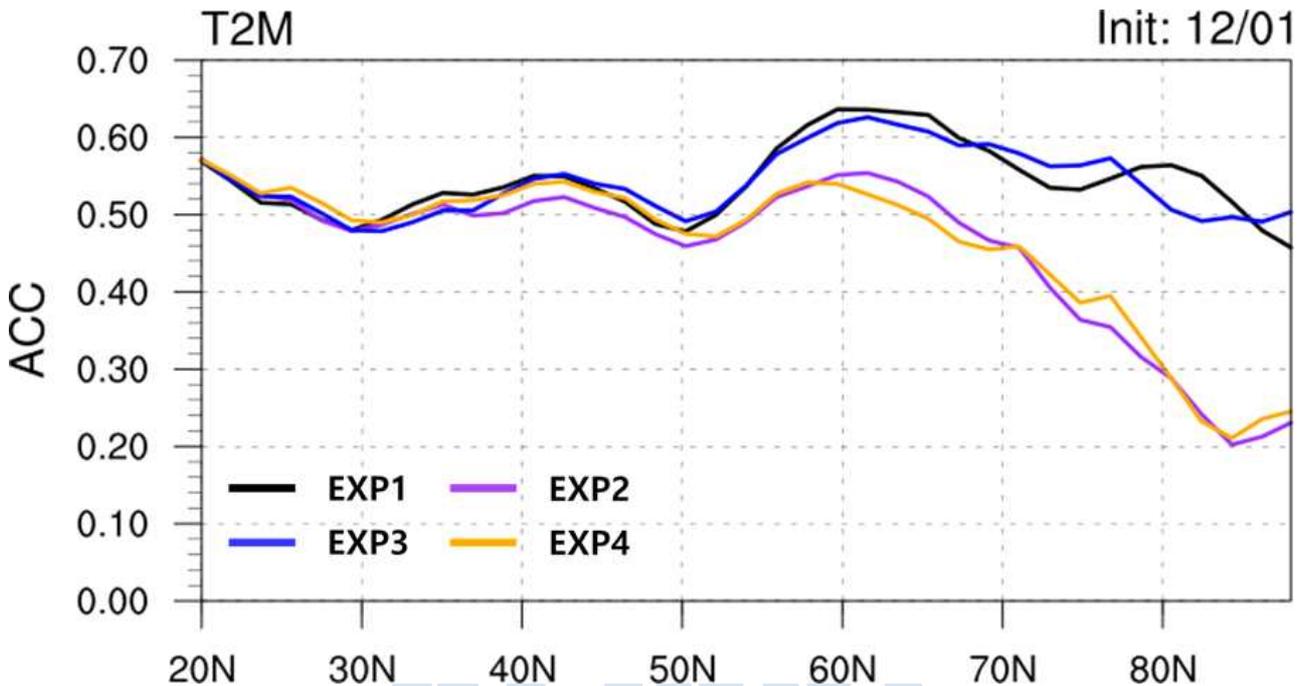


그림 3-5. 그림 3-3과 동일하지만, 12월 1일 예측장.

- (요약) 실험별 예측성은 EXP1 = EXP3 > EXP4 > EXP2 순서대로 예측성이 나타났음. 해빙 관측자료를 직접 넣었던 실험인 EXP2와 EXP4이 가장 낮은 예측성능을 보였고 이러한 특징은 11월 1일 실험과 유사하였음. EXP1 실험은 11월 1일 실험과 유사한 예측성능 분포를 보인 반면, EXP3 실험은 11월 1일 실험과 비교해서 0.1 이상 더 높은 예측성을 보였음. 이는 계절의 특성의 차이로 판단되며 계절적 특성에 대해 추가 분석이 필요할 것으로 보임.

(3) 과거재현실험 예측 결과: 1월 1일 초기장 45일 예측

- 1월 1일 초기장으로 45일 예측한 과거재현실험 결과 그림 3-6과 같음.
- EXP1의 북반구 평균 ACC는 0.53으로 12월 1일 실험결과와 유사한 결과를 보였음. 아시아와 북미지역 모두 낮은 예측성을 보인 12월 1일 결과와 달리, 1월 1일 실험 결과에서는 북미지역에서는 높은 예측성을 보였음.
- EXP2의 북반구 평균 ACC는 0.48로 나타났으며, 대부분의 예측성 감소는 바렌츠 카라해와 그린란드해 주변 해역에서 나타났음.
- EXP3는 12월 1일 실험과 동일하게 EXP1 실험과 거의 유사한 결과를 보였음.
- EXP4는 네 개의 실험중 가장 낮은 예측성능(0.47)을 보였고, EXP2에서 나타난 바렌츠-카라해와 그린란드해 주변 해역에서 낮은 예측성뿐만 아니라 중위도 일부 지역에서도 예측성이 낮게 나타났음.

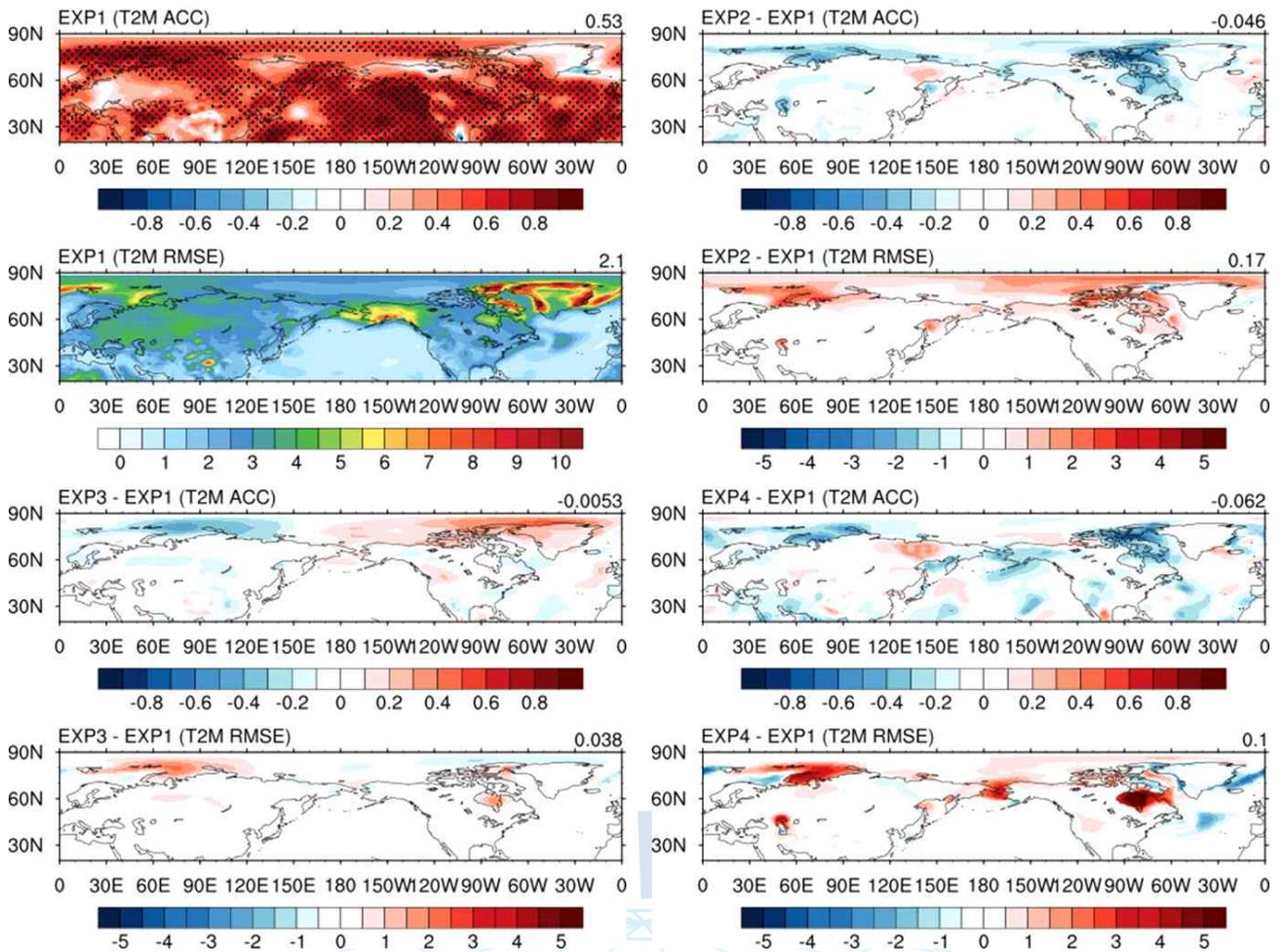


그림 3-6. 그림 3-2과 동일하지만, 1월 1일 예측장.

- 12월 1일 실험과 유사하게 EXP1과 EXP3 두 개 실험이 비슷한 예측성능을 보였고, EXP2와 EXP4 실험이 유사한 분포를 보였다. EXP4의 중위도 예측성은 EXP2 실험에 비해 낮게 나타났고 이는 두 실험의 차이인 해양 초기장으로 인한 것으로 판단됨.

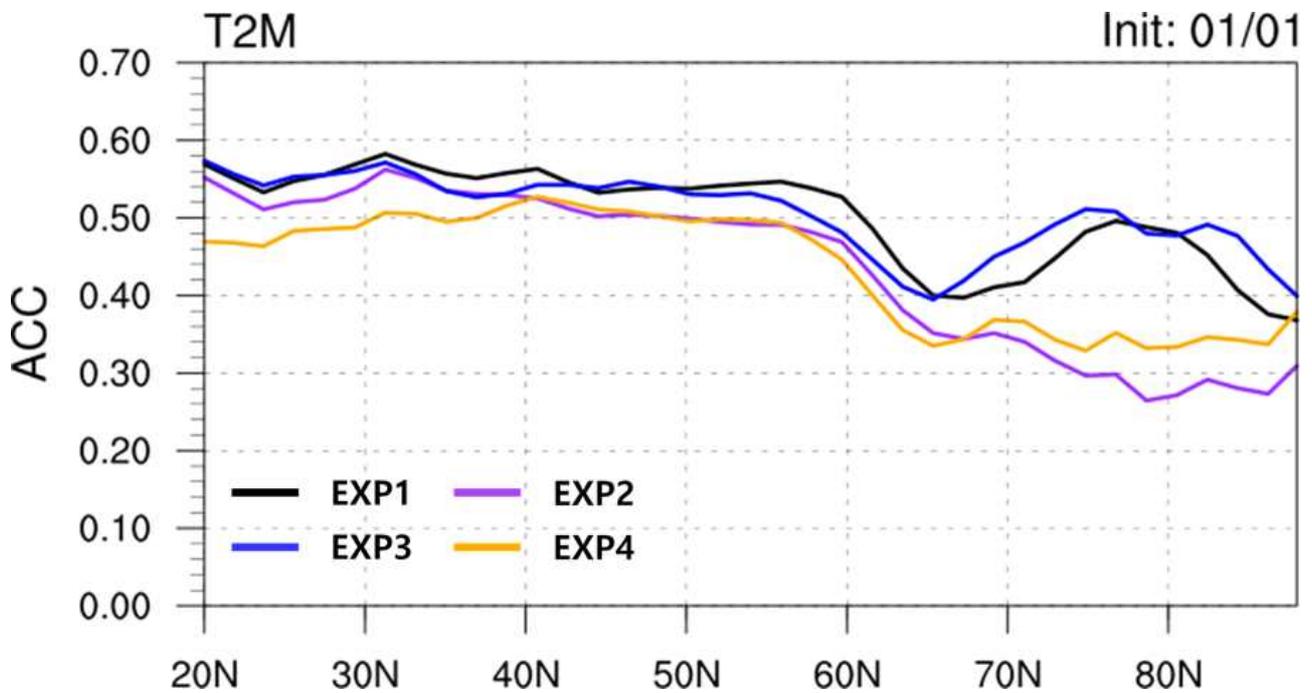


그림 3-7. 그림 3-3과 동일하지만, 1월 1일 예측장.

- (요약) 실험별 예측성능은 EXP1 > EXP3 > EXP2 > EXP4 순서대로 나타났음. 11월 1일 실험과 12월 1일 실험에서 가장 낮은 예측성을 보인 EXP2 실험은 1월 1일 실험에서는 EXP4 실험에 비해 높은 예측성능을 보임. 이는 EXP4 실험이 해빙의 불균형에서 나오는 오차와 해양의 불균형에서의 오차가 함께 발생했기 때문으로 판단됨.

(4) 과거재현실험 예측 결과: 2월 1일 초기장 45일 예측

- 2월 1일 초기장 실험 결과, EXP1의 북반구 평균 ACC가 0.6으로 월 별 실험 중 가장 높은 예측성능을 보임. 특히 예측성능이 낮게 나타났던 북미와 아시아에 대한 예측성이 높게 나타났음.
- EXP2 실험의 북반구 평균 ACC는 0.56으로 실험 중 두 번째로 낮은 예측성을 보였고 바렌츠 카라해와 베링해, 오호츠크해에서 낮은 예측성이 나타남.
- EXP3는 12월 1일 실험, 1월 1일 실험과 동일하게 EXP1 실험과 유사한 ACC와 RMSE 분포를 보였음. 허드슨만에서 높은 RMSE는 너트징하는 해양 관측자료의 특징으로 판단됨.
- EXP4의 북반구 평균 ACC는 0.55로 실험 중 가장 낮은 예측성을 보였음. 이는 앞서 언급한바와 같이 해빙에서 나타나는 오차와 해양에서 나타나는 오차가 결합되어 발생한 것으로 판단됨.

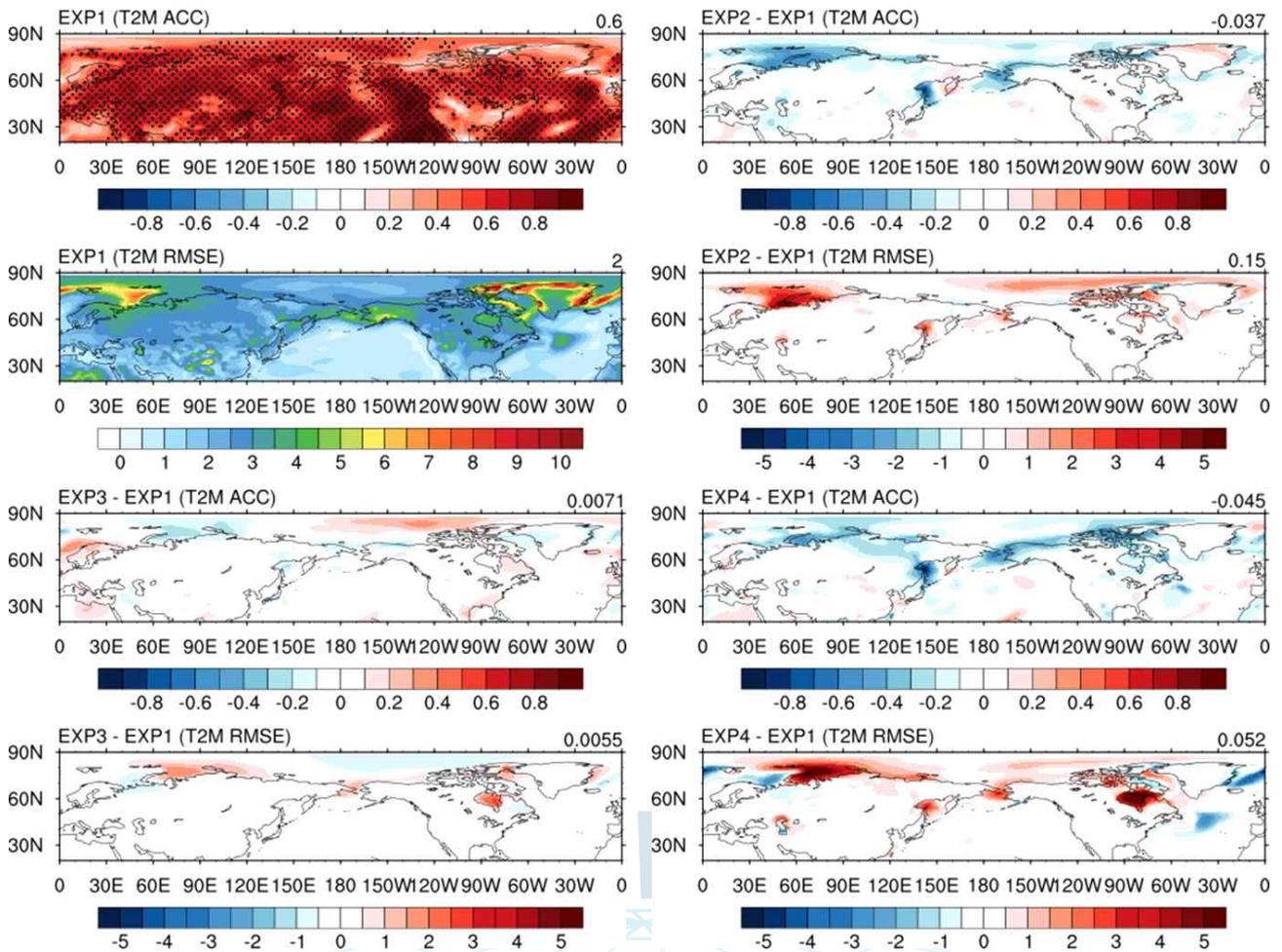


그림 3-8. 그림 3-2과 동일하지만, 2월 1일 예측장.

- 2월 1일 실험의 zonal-mean ACC는 1월 1일 실험과 유사하지만 전체적으로 높은 예측성능을 보임. EXP1과 EXP3의 ACC는 EXP2와 EXP3의 ACC보다 중,고위도 전체 지역에서 높은 예측성능을 보였음.

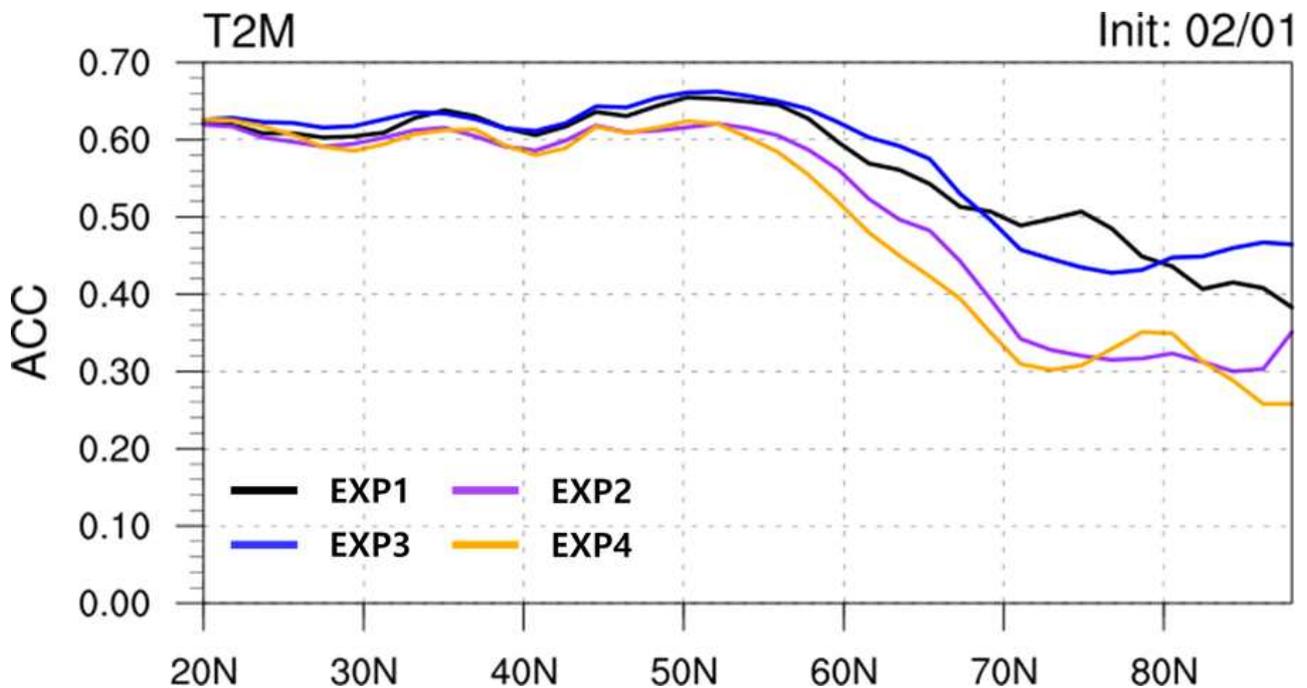


그림 3-9. 그림 3-3과 동일하지만, 2월 1일 예측장.

- (요약) 2월 1일 실험은 전체 계절 실험 중 가장 높은 예측성능을 보인 실험으로 예측성 순서는 $EXP3 = EXP1 > EXP2 > EXP4$ 임. EXP1과 EXP3는 거의 유사한 예측성능을 보였고, EXP2와 EXP4는 고위도에서는 유사한 예측성능 패턴을 보이지만 EXP4의 해양 초기장으로 인해 중위도에서 다른 패턴을 보였음.

(5) 과거재현실험 요약 및 결론

- 계절별로 실험에 따라 예측성능 결과가 달랐지만, 전체적인 기간에 대해 안정적인 예측성능을 보인 실험은 EXP1 실험임. EXP1 실험은 대기 강제력 자료만으로 해양-해빙 초기장을 입력한 실험으로 모델과 초기장 변수간의 dynamic balance가 일치함. 이로 인해 안정적인 예측성능을 보인 것으로 판단됨.
- EXP3 실험은 11월 1일 실험을 제외하고 전체 계절에서 EXP1 실험과 유사한 예측성능을 보였음. EXP2는 11월 1일과 12월 1일 실험에서 가장 낮은 예측성을 보였고, EXP4는 1월 1일, 2월 1일 실험에서 가장 낮은 예측성을 보였음. 이는 11, 12월에는 해빙의 영향이 가장 큰 시기이고, 이후 해빙의 변동이 감소하고 해양의 영향이 커져 나타나는 현상으로 판단됨.
- 또한 해빙을 직접 넣지 않은 초기장을 입력한 EXP2과 EXP4 실험이 가장 낮은 예측성을 보여 관측과 유사한 해빙을 입력하는 것은 더 나은 계절내 예측 결과를 주는 것이 아닌 오히려 예측성을 떨어트리는 요인임을 알 수 있음. 따라서 해빙 초기장에 있어 가장 중요한 요소는 모델과 초기장 변수간의 균형임.

2. 극지-중위도 원격상관 모의 성능 평가

가. 북극진동지수 분석

- 원격상관 패턴은 내부 대기 역학에 따라 자연적으로 발생하며, 대기 파동과 제트류를 변화시켜 중위도의 온도 및 강수 등에 영향을 미침(Barnston and Livezey, 1987). 특히, 중위도 한파와 밀접한 연관이 있는 북극진동을 분석 요소로 선택하여 실험별 예측성능을 평가하였음.
- 북극진동은 북극에 존재하는 찬 공기의 소용돌이가 일정 주기로 강약을 되풀이하는 현상으로 그 주기는 짧게는 수십 일에서 길게는 수십 년 정도임. 이러한 변동을 지수화한 것이 북극진동지수이며 북극진동이 강하면 양의 값, 약하면 음의 값으로 나타남(Thompson and Wallace, 1998; Higgins et al., 2000). 특히, 북극 기온이 하강하면 북극의 기압이 평년보다 낮아지고 중위도 지방의 기압은 북극보다 상대적으로 높게 됨. 이때, 북대서양의 표층 바람은 강해져 북극의 찬 공기가 중위도로 내려오기 어려우므로 중위도는 상대적으로 온난한 겨울을 보이며 북극진동지수는 양의 값을 나타냄. 반면, 북극 기온이 상승하면 북극의 해수면 기압은 평년보다 높아져 북극의 찬 공기 소용돌이가 약화 되고 북대서양의 표층 바람 역시 약해짐. 북극의 차가운 공기가 중위도로 내려오게 돼 중위도 지역에 추운 겨울을 나타내며, 이때 북극진동지수는 음의 값을 가짐(그림 3-10).

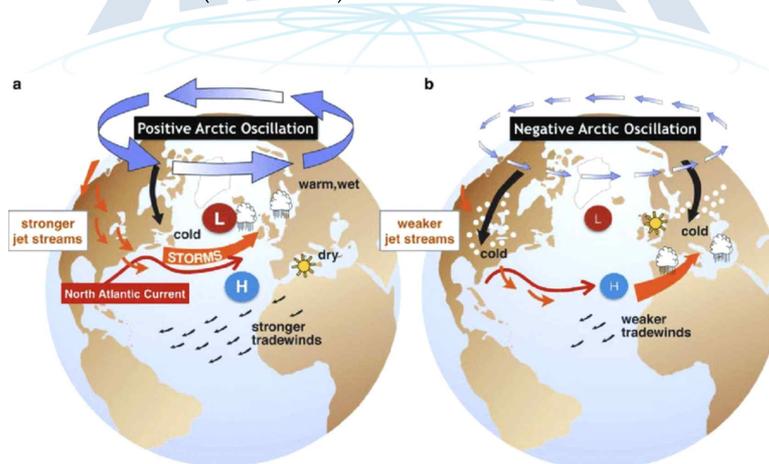


그림 3-10. 북극진동 메커니즘: (a) 음의 북극진동, (b) 양의 북극진동(Campos and Horn, 2018).

(1) 북극진동지수 분석 방법

- NOAA CPC(National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Prediction Center)에서 제공하는 북극진동지수 분석방법을 기반으로 JRA55 재분석자료를 적용하여 북극진동모드를 정의하였으며>Loading pattern; 1979-2000), 북위(20°-90°N)의 1000hPa 지위고도 아노말리를 사용하여 경험적 직교함수(Empirical orthogonal function; EOF) 방법을 구한 뒤 북극진동 모드에 각 계절을 투영하여(Projection) 북극진동지수를 구한 뒤 재분석 자료의 지수와 실험별 지수를 비교 분석하였음.

(2) 북극진동지수 분석 결과: 11월 1일 초기장 45일 예측

- 북극진동지수의 예측성능은 ACC 기준 EXP4 > EXP1 > EXP3 > EXP2 순서대로 EXP4 실험이 가장 높은 예측성능을 보였음. 하지만 MSSS의 값은 EXP2와 EXP4가 0.03, EXP1과 EXP3가 0.30으로 나타나 이를 고려한다면 EXP1과 EXP3가 변동성 및 오차 측면에서 안정적인 예측성을 보였음.

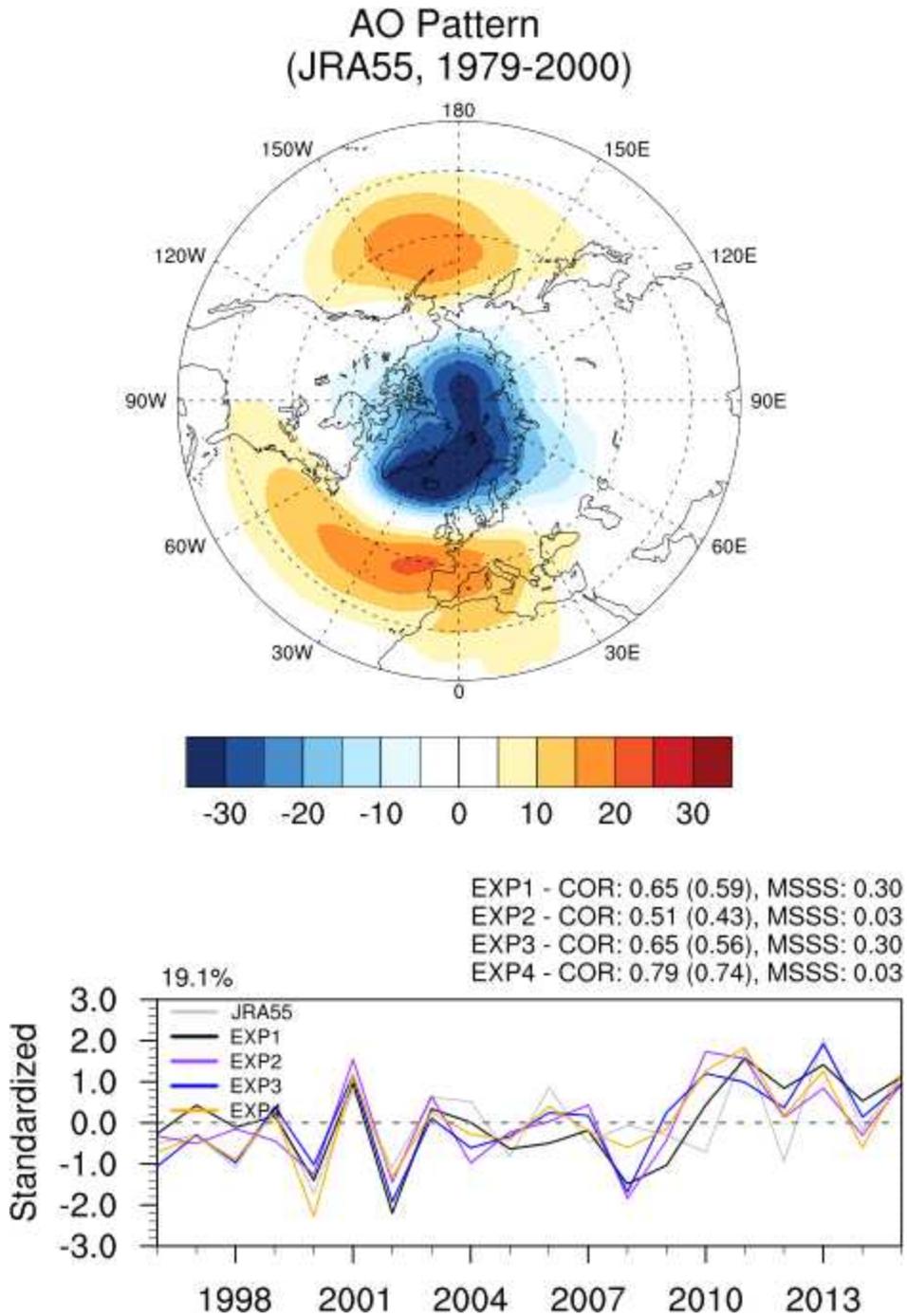


그림 3-11. 북극진동지수 예측성능 평가: 11/1일 실험 결과, (Top) JRA-55 재분석 자료의 1979-2000 북극진동모드, (Bottom) 북극진동지수.

(3) 북극진동지수 분석 결과: 12월 1일 초기장 45일 예측

- 12월 1일 실험에서의 북극진동지수 예측성능은 ACC 기준 EXP1 > EXP2 > EXP4 > EXP3 순서대로 EXP1 실험이 가장 높은 예측성능을 보였음. EXP1 실험은 ACC와 MSSS 모두 다른 실험에 비해 높은 예측성을 보였으며, EXP3 실험은 ACC, MSSS 모두 가장 낮은 예측성을 보였음.

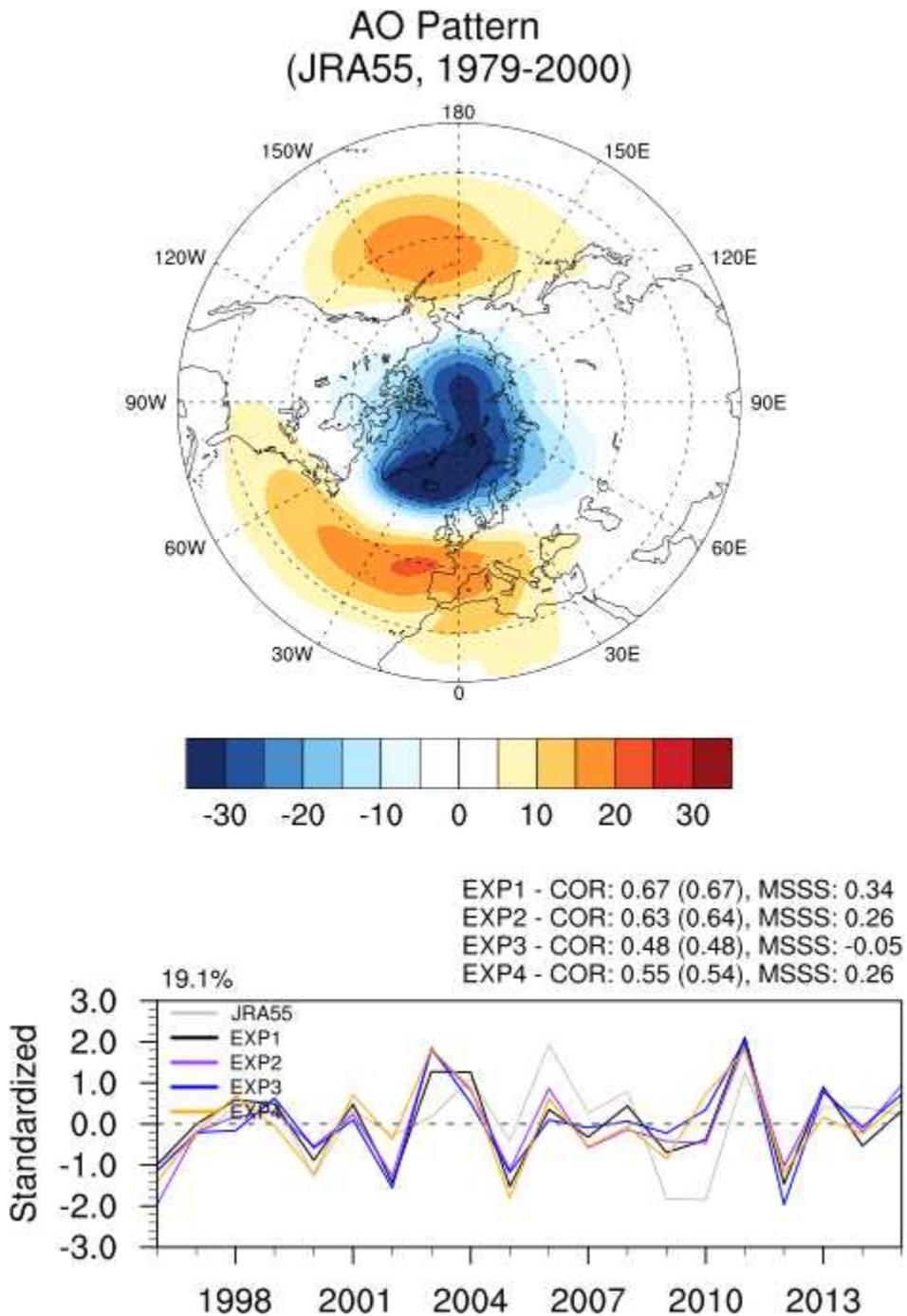


그림 3-12. 북극진동지수 예측성능 평가: 12/1일 실험 결과, (Top) JRA-55 재분석 자료의 1979-2000 북극진동모드, (Bottom) 북극진동지수.

(4) 북극진동지수 분석 결과: 1월 1일 초기장 45일 예측

- 1월 1일 실험에서의 북극진동지수 예측성능은 ACC 기준 EXP4 > EXP3 > EXP2 > EXP1 순서대로 EXP4 실험이 가장 높은 예측성능을 보였음. 12월 1일 실험에서 가장 좋은 예측성을 보인 EXP1 실험은 1월 1일 실험에서는 낮은 예측성을 보였음. 모든 실험에서 MSSS가 0에 가까워 오차 측면에서 예측성이 떨어졌음.

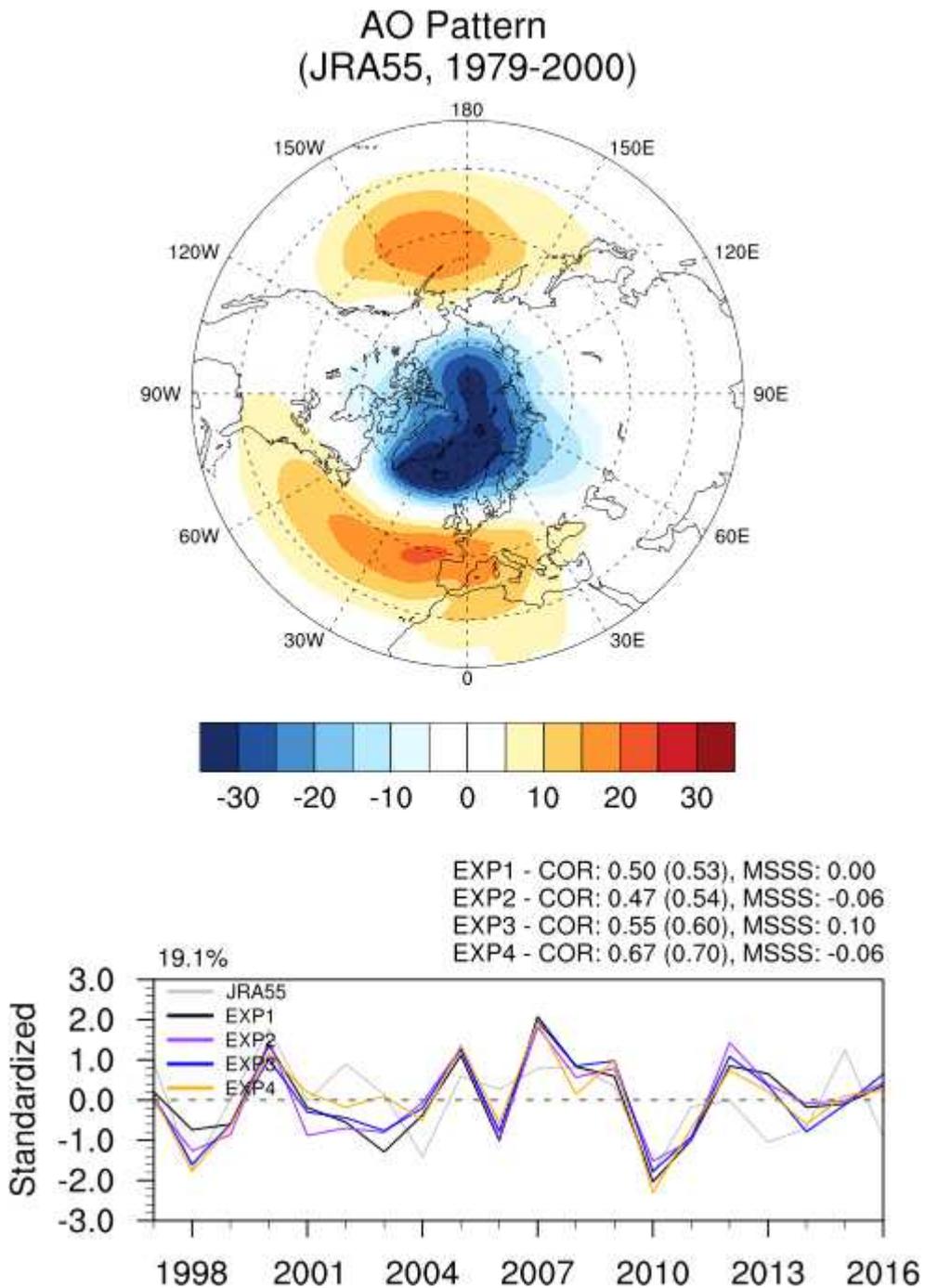


그림 3-13. 북극진동지수 예측성능 평가: 1/1일 실험 결과, (Top) JRA-55 재분석 자료의 1979-2000 북극진동모드, (Bottom) 북극진동지수.

(5) 북극진동지수 분석 결과: 2월 1일 초기장 45일 예측

- 2월 1일 실험에서의 북극진동지수 예측성능은 ACC 기준 EXP2 > EXP3 > EXP4 > EXP1 순서대로 EXP2 실험이 가장 높은 예측성능을 보였지만, 북극진동 예측성능이 0.45에서 0.53까지 분포하여 모든 실험이 유사한 예측성능을 보였음. MSSS가 모든 실험에서 0이하의 값을 보여 오차 측면에서는 예측성이 모든 실험에서 없었음.

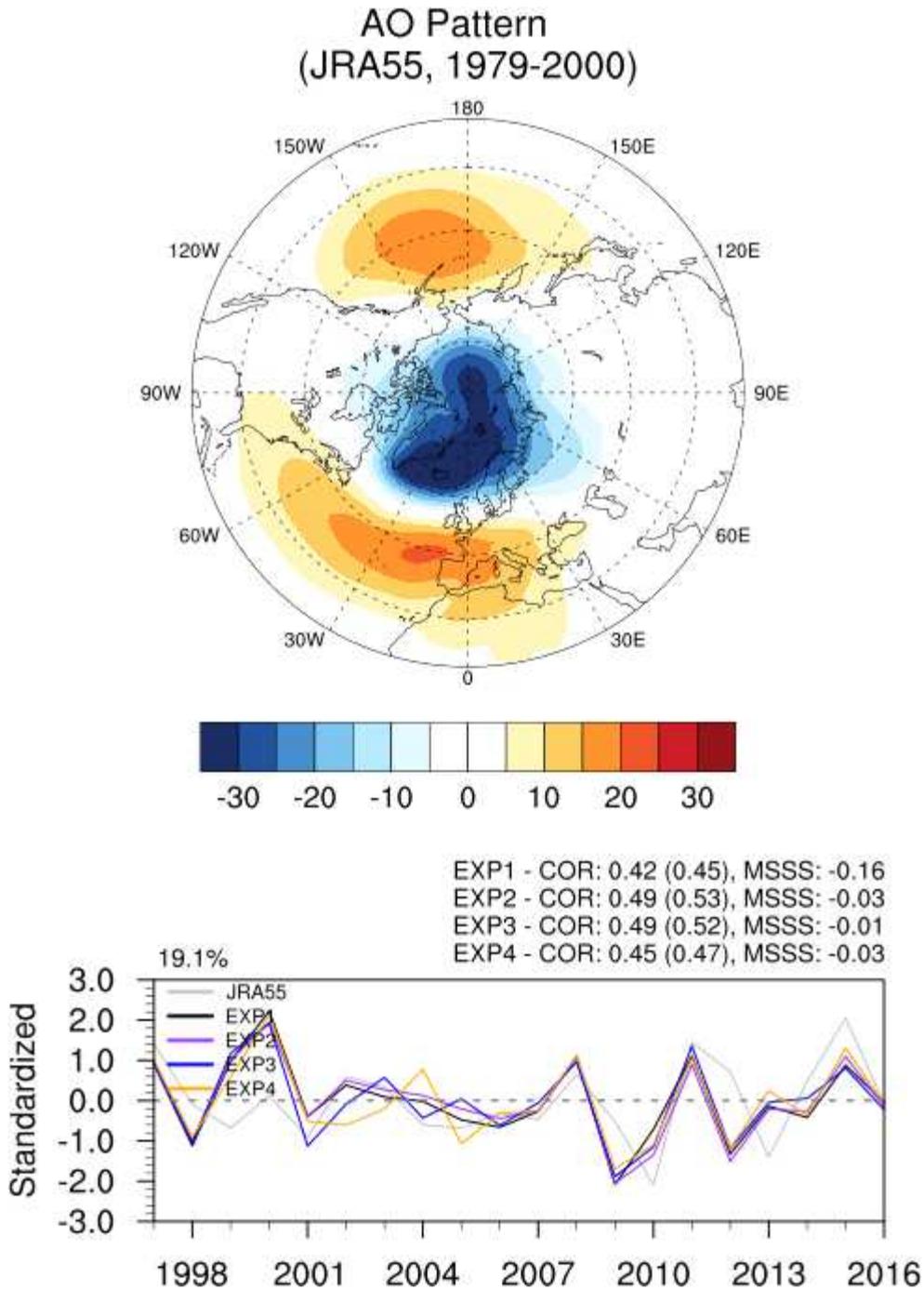


그림 3-14. 북극진동지수 예측성능 평가: 2/1일 실험 결과, (Top) JRA-55 재분석 자료의 1979-2000 북극진동모드, (Bottom) 북극진동지수.

(5) 북극진동지수 분석 요약 및 결론

- 11월 1일과 12월 1일 실험에서 가장 안정적인 예측성을 보인 실험은 EXP1으로 북반구 기온 ACC 결과와 일치하였음. 1월 1일 실험과 2월 1일 실험은 전체 실험에서 MSSS가 0에 가까워 북극진동지수 오차가 크게 나타났으며, 북극진동지수의 변동성은 1월 1일 실험은 EXP4가 가장 잘 모의하였고, 2월 1일 실험은 전체 실험이 유사한 결과를 보임. 1월 1일 실험에서 북극진동지수의 변동성을 가장 잘 모의한 EXP4는 북반구 기온의 예측성능을 가장 낮게 모의하여, 두 요소간의 예측성이 일치하지 않음.
- 따라서 11월 1일과 12월 1일 실험의 계절적 특징으로 인해 북극진동이 중위도 기온에 영향을 주었을 것으로 판단되며, 1월 1일 이후 실험의 경우 북극진동지수의 영향이 감소하는 것으로 판단됨.

표 3-3. 북극진동지수 예측성능 평가 요약

AO index	EXP1		EXP2		EXP3		EXP4	
11/1	0.65 (0.59)	0.30	0.51 (0.43)	0.03	0.65 (0.56)	0.30	0.79 (0.74)	0.03
12/1	0.67 (0.67)	0.34	0.63 (0.64)	0.26	0.48 (0.48)	-0.05	0.55 (0.54)	0.26
1/1	0.50 (0.53)	0.0	0.47 (0.54)	-0.06	0.55 (0.60)	0.10	0.67 (0.70)	-0.06
2/1	0.42 (0.45)	-0.16	0.49 (0.53)	-0.03	0.49 (0.52)	-0.01	0.45 (0.47)	-0.03
Skill Score	ACC	MSSS	ACC	MSSS	ACC	MSSS	ACC	MSSS

나. ART 지수 분석

- 대류권의 급격한 온난화 현상은 중위도 지역의 겨울철 극한 기상 현상과 밀접한 연관이 있으며(Wang et al., 2019) 특히, 북극 해역 내 카라-바렌츠 해역의 고온 현상은 동아시아 겨울철 한파와 높은 연관성을 보이고, 척치-동시베리아 해역의 고온 현상은 북아메리카와 한파와 높은 연관성을 보임(Kug et al., 2015).
- 본 연구에서는 중위도 기온 원격상관(북극 고온-중위도 저온) 예측 성능 평가를 진행하기 위해 겨울철 동아시아의 극한 기상과 연관된 북극 지역 고온 현상을 평가하기 위해 앞서 소개한 Kug et al.(2015) 연구의 분석방법인 ART 지수 기법을 활용하였음.
- ART 지수의 경우 극 지역의 기온 변동을 정량화하는 기법으로 두 개의 지수로 나눌 수 있으며, ART1 지수가 양일 때는 중위도 동아시아 지역의 한파 발생빈도가 커지고, 강도가 강해짐을 의미하며, ART2 지수가 양일 경우에는 북미 지역의 한파 발생 빈도가 커짐을 의미함. 즉, ART1 지수는 북극해 카라-바렌츠 해의 기온 변동과 동아시아 지역 기온 변동과의 연관성을 보여주며, ART2 지수는 북극해 척치-동시베리아 해의 기온 변동과 북아메리카 지역의 기온 변동과의 연관성을 정량적으로 보여주기 때문에 본 연구에서 분석하고자 하는 북극-중위도 원격상관 예측성 및 오차 파악에 적용할 수 있음.

(1) ART 지수 분석 방법

- 분석은 각 ART 지수를 대표하는 북극해 해역의 지표 온도 영역 평균 시계열을 북반구 지표 온도 공간분포 자료와의 회귀 분석을 통해 공간분포가 보이는 음 또는 양의 값을 기준으로 예측 성능을 평가할 수 있음. 본 분석에 활용하는 예측 인자는 2m 기온 자료로 ART 지수 분석 기법을 이용하여 회귀분석 공간분포를 진행하고, 영역 평균을 통해 ART 지수에 해당하는 해역과 중위도 대륙들의 선형회귀분석을 진행함.

(2) ART 지수 분석 결과: 11월 1일 초기장 45일 예측

- 먼저 재분석자료 결과를 보면 ART1 지역과 동아시아 지역간에 음의 상관성이 있지만, 그 규모가 매우 작았음(-0.07). ART1 지역과 유의미한 상관성을 보이는 지역은 그린란드 주변 해역과 베링해임. ART2와 북미간의 상관성은 -0.26으로 비교적 높은 상관성을 보임. 또한 ART2 지역과 동아시아 지역간의 약한 양의 상관성이 나타남.
- 실험별 ART1 지역과 동아시아 지역 기온의 상관성을 보면, 전체 실험에서 음의 상관성을 과대모의하는 경향을 보였고, 특히 EXP3 실험에 과대모의 경향이 가장 높았음. 또한, 재분석자료에서 나타나는 베링해 부근의 음의 상관관계를 모델에서는 모의하지 못하는 특징을 보였음. 하지만 그린란드 해역 주변의 음의 상관성은 EXP2 실험을 제외하고 모든 실험에서 모의함.
- ART2와 북미간의 상관성은 모든 실험에서 모의하지 못하였지만, EXP3 실험에서의 상관성 패턴이 재분석자료와 유사하였음. 하지만 EXP1과 EXP3에서 ART2와 동아시아와의 상관성이 재분석자료와 반대인 음의 상관성이 나타남.

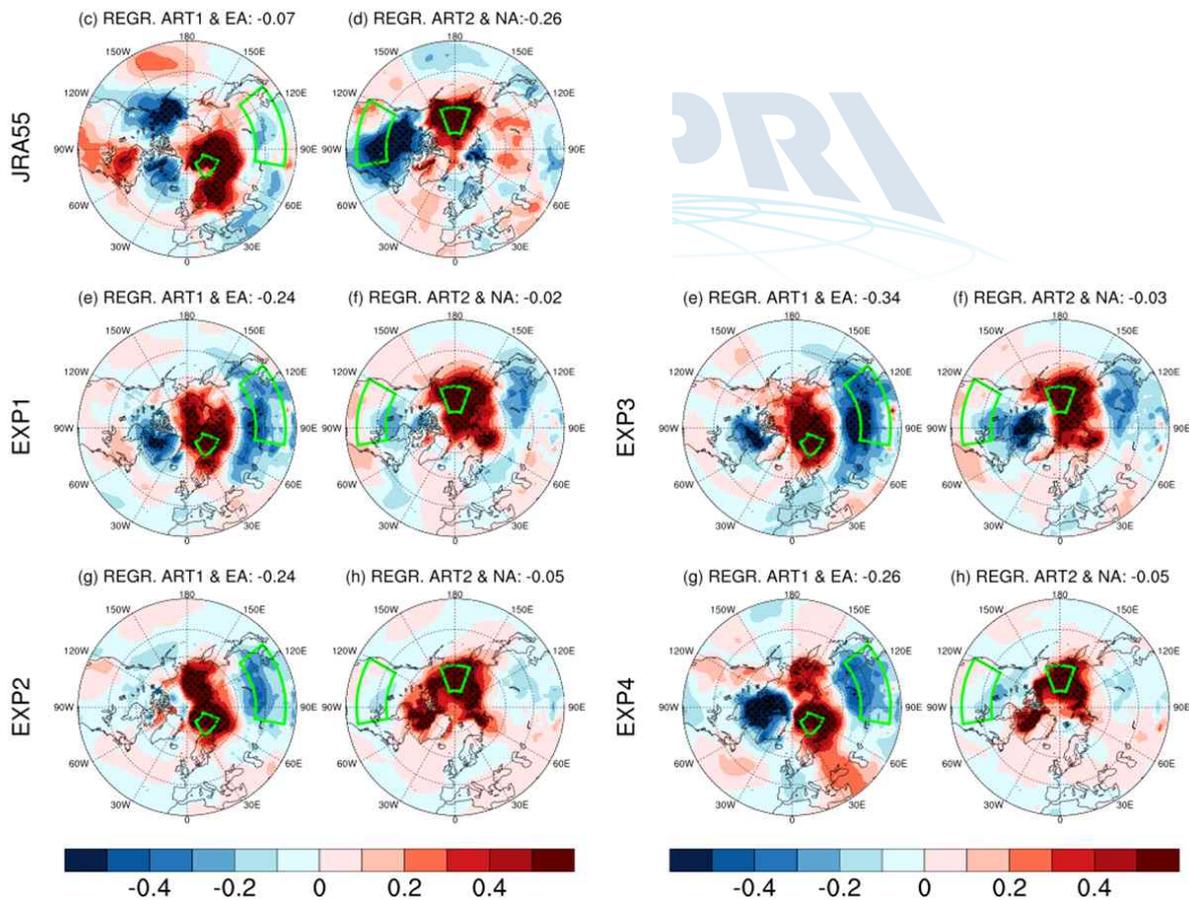


그림 3-15. ART 예측 성능 평가: 11/1일 실험 결과.

(3) ART 지수 분석 결과: 12월 1일 초기장 45일 예측

- 재분석자료 분석결과 ART1 지역과 동아시아 지역간의 상관성은 나타나지 않았고, 11월 1일 실험과 동일하게 그린란드 해역과 베링해에서의 음의 상관성을 보였음. 또한 북미지역과 양의 상관성이 나타남. ART2 지역과 북미간의 상관성은 -0.61로 강한 음의 상관성을 보였고, 북미 뿐만아니라 시베리아해 지역에서도 강한 음의 상관성을 보임.
- ART1 지역과 동아시아지역간의 상관성은 모든 실험에서 재분석자료와 유사하게 모의하였음. 하지만 EXP2와 EXP4에서 베링해와의 관계를 양의 상관관계로 모의하여 재분석자료와 반대의 결과를 보였음.
- ART2 지역과 북미간의 관계는 모든실험에서 음의 상관성을 모의하였지만 재분석자료에 비해 약한 상관성을 보임. 또한 재분석자료에서는 다양한 상관성 패턴을 보인 반면, 모델 결과에서는 ART2와 북미지역간의 상관성만이 모의되었음.

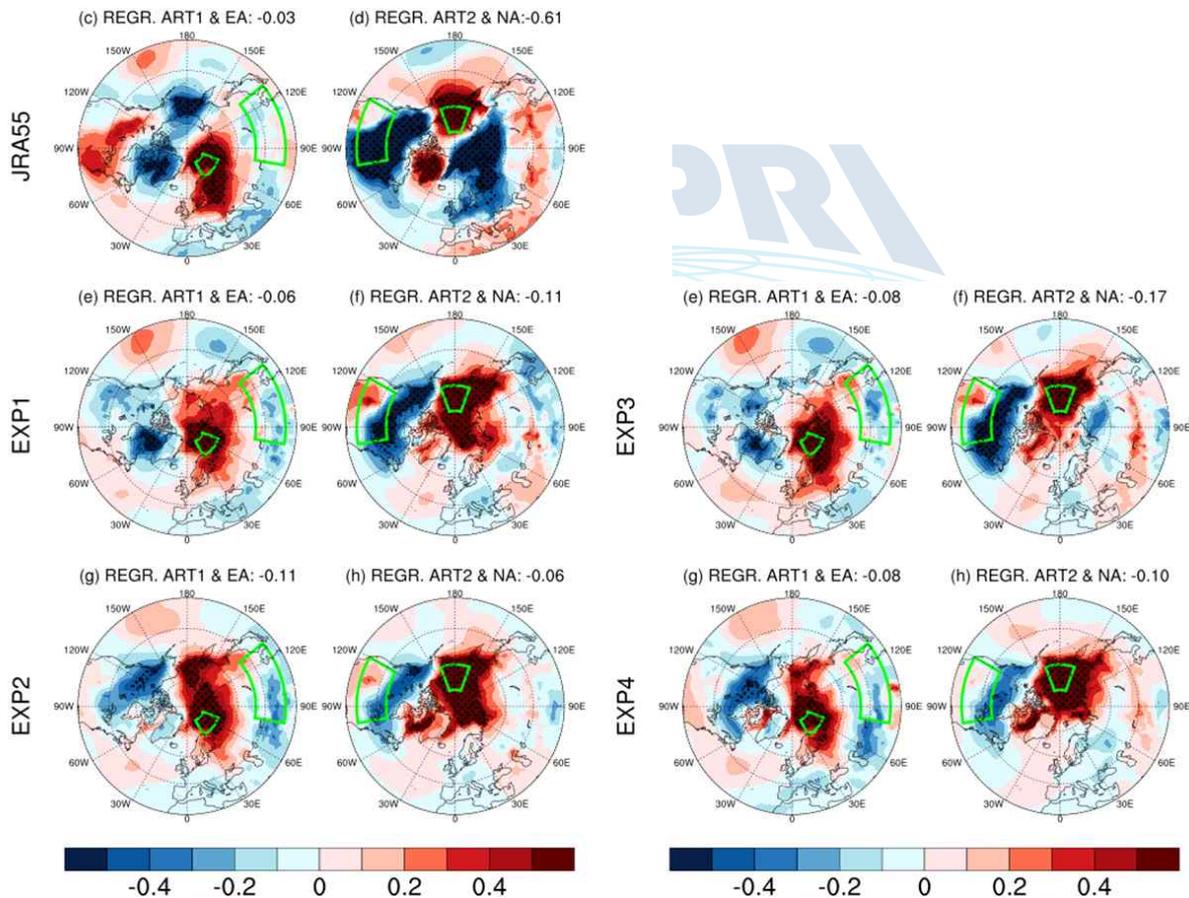


그림 3-16. ART 예측 성능 평가: 12/1일 실험 결과.

(4) ART 지수 분석 결과: 1월 1일 초기장 45일 예측

- 재분석자료 결과 ART1과 동아시아간의 기온 상관성은 -0.27 로 다른 계절에 비해 음의 상관성이 높아졌음. ART2와 북미간의 기온상관성은 -0.39 로 강한 음의 상관성을 보임.
- ART1과 동아시아의 상관관계는 모든 실험에서 약하게 모의하였음. 하지만 전체적인 상관성 패턴은 재분석자료와 유사한 패턴을 모의하였음. ART2와 북미의 상관관계를 모든 실험에서 재분석자료와 유사하게 모의하였고, 특히 EXP1과 EXP3 실험이 가장 잘 모의하였음.

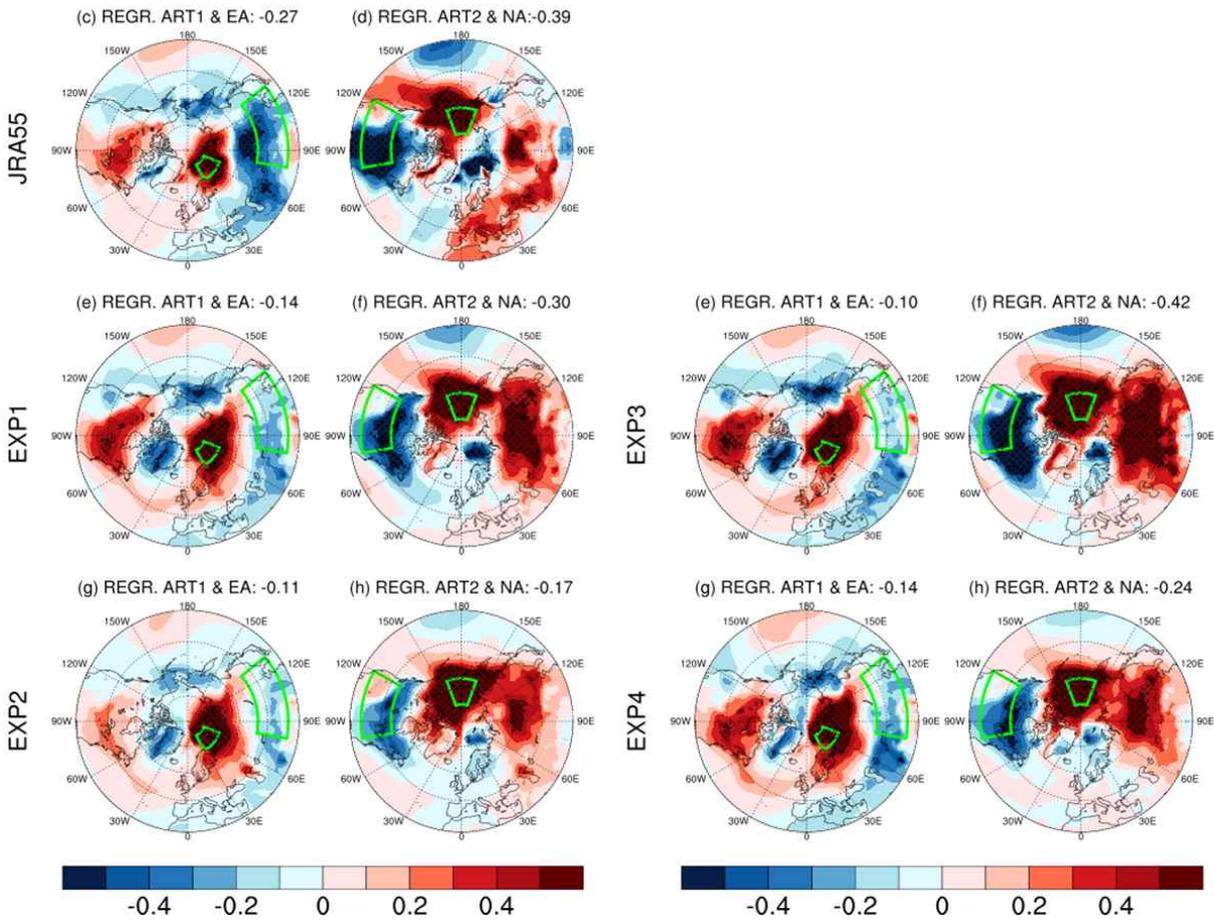


그림 3-17. ART 예측 성능 평가: 1/1일 실험 결과.

(5) ART 지수 분석 결과: 2월 1일 초기장 45일 예측

- 재분석자료 분석 결과 ART1과 동아시아는 -0.17 의 약한 음의 상관관계를 가지고 있고, ART2와 북미와의 상관성 또한 -0.25 로 약한 음의 상관성을 보임.
- EXP1과 EXP2 실험의 ART1과 동아시아와의 상관성을 -0.32 로 과대모의하는 경향을 보였고, EXP2는 -0.12 로 과소모의하였음. ART2와 북미간의 상관성은 모든 모델에서 잘 모의하였고 전체적인 상관성 패턴 또한 유사하게 모의하였음.

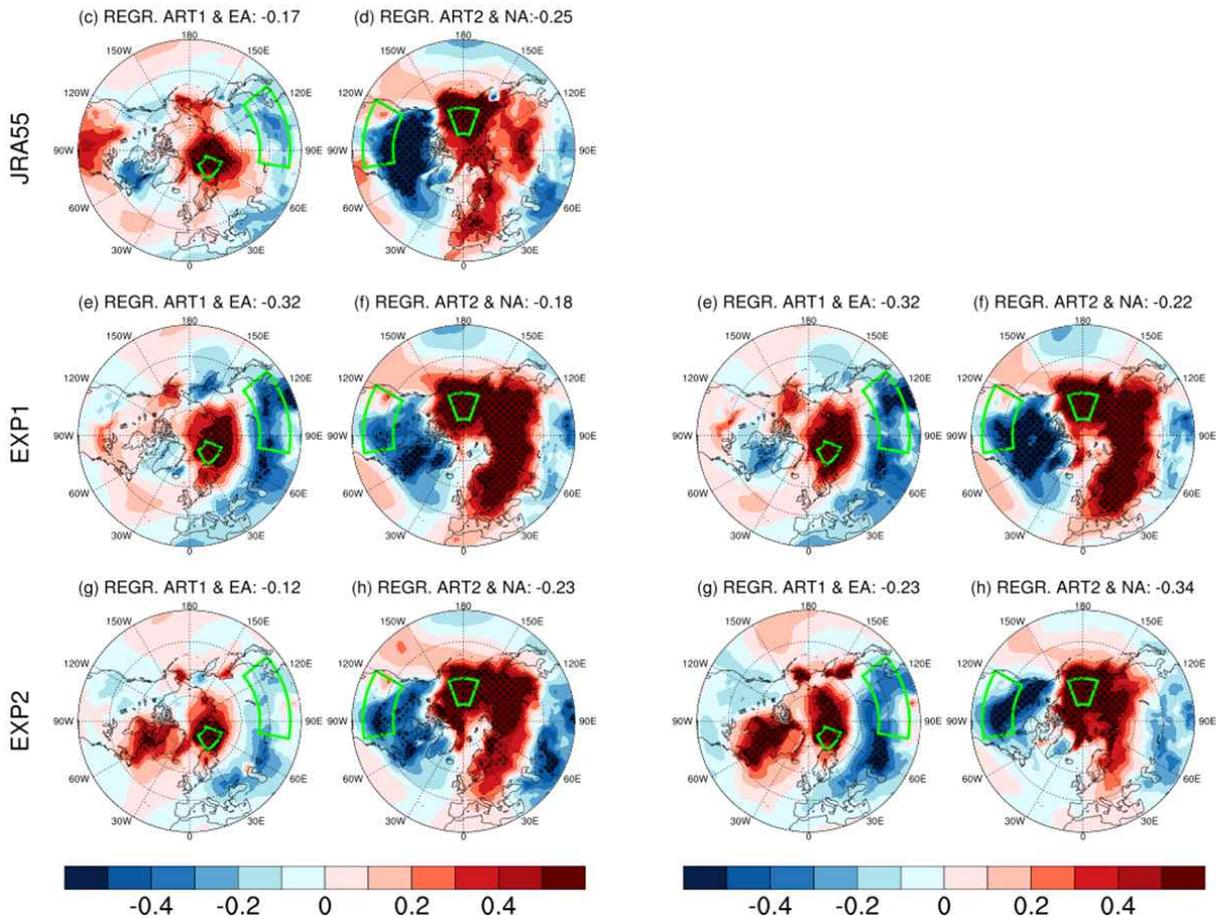


그림 3-18. ART 예측 성능 평가: 2/1일 실험 결과.

(5) ART 지수 분석 요약 및 결론

- 재분석자료에서 나타나는 ART1과 동아시아간의 상관성은 1월 1일과 2월 1일 실험에서부터 음의 상관성이 나타나며, 11월 1일과 12월 1일 실험에서는 상관성이 없었음. 하지만 11월 1일에서 모든 실험이 이를 과대모의하는 경향이 나타났음. 1월 1일 실험에서는 과소모의하는 경향을 보였고 대부분의 실험이 유사한 모의 패턴을 보였음. 2월 1일 실험에서는 EXP1과 EXP3, EXP4는 과대모의경향을 보였고 EXP2는 과소모의 경향을 보였음.

표 3-4. ART1 지수와 동아시아 지역간의 상관계수 요약

ART1-EA	JRA55	EXP1	EXP2	EXP3	EXP4
11/1	-0.07	-0.24	-0.24	-0.34	-0.26
12/1	-0.03	-0.06	-0.11	-0.08	-0.08
1/1	-0.27	-0.14	-0.11	-0.10	-0.14
2/1	-0.17	-0.32	-0.12	-0.32	-0.23

- 재분석자료에서 ART2와 북미지역간의 상관성은 모든 계절에서 0.25 이상의 음의 상관성으로 ART1과 동아시아 지역간의 상관성보다 비교적 높은 상관성을 보였음. 또한 12월 1일 실험에서 -0.61로 강한 음의 상관성을 보였음. 하지만 11월 1일, 12월 1일 실험에서 강한 음의 상관 패턴을 각 실험들은 모의하지 못하였음. 1월 1일과 2월 1일 실험부터 어느정도의 상관성이 나타났고 1월 1일 실험은 EXP1과 EXP3가 재분석자료 가장 유사한 패턴을 모의하였음.

표 3-5. ART2 지수와 동아시아 지역간의 상관계수 요약

ART2-NA	JRA55	EXP1	EXP2	EXP3	EXP4
11/1	-0.26	-0.02	-0.05	-0.03	-0.05
12/1	-0.61	-0.11	-0.06	-0.17	-0.10
1/1	-0.39	-0.30	-0.17	-0.42	-0.24
2/1	-0.25	-0.18	-0.23	-0.22	-0.34

- ART 지수 분석 결과는 특정 해역과 특정 지역간의 상관성에 대해 분석하여 앞서 분석한 북반구 지상기온 ACC와 결과가 일치하지 않을 수 있음. 하지만 본 분석을 통해 해빙 초기장에 따른 특정 지역간의 상관성 모의성능을 파악할 수 있었음.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

년도	성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차년도(2020)	최신 기후모델(NCAR-CESM2)의 극 지역 모의성능 평가	○빙권 표면 경계 조건 초기화를 위한 관측자료 확보 및 품질 검증	30	1. 빙권표면 관측자료 확보 여부 2. NCAR-CESM2 모델분석 여부
		○확보된 관측과의 비교를 통해 최신 기후 모델 (NCAR-CESM2)의 극 지역 바이어스 평가	70	
2차년도(2021)	빙권 표면 경계 조건 초기화 체계 수립	○빙권 표면 온도/눈 두께 초기화 구현	50	1. 빙권 초기장 구현 여부 2. Hindcast 실험 구성 및 극지역 바이어스 개선 평가 여부
		○빙권 표면을 관측 자료를 활용하여 기후모델의 극 지역 바이어스 개선	50	
3차년도(2022)	빙권 초기화를 통한 계절예측 및 극-중위도 원격상관 모의성능 평가	○계절 예측 과거 재현 실험 수행 및 중위도 예측성 평가	50	1. 계절 예측 과거재현실험 수행 여부 2. 극지역 및 중위도 예측성 평가 여부 3. 극지-중위도 원격상관 모의 성능 평가 여부
		○극지-중위도 원격상관 모의성능 평가	50	

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 본 연구에서 개발한 해양-해빙 초기화 방안으로 계절예측시스템 구축 예정
- 구축된 계절예측시스템의 계절 예측 결과를 기상청의 기후전문가 회의에 활용 예정. 기상청 계절예보에 큰 역할을 할 것으로 기대
- 본 연구 결과를 기반으로 지속적인 초기자료 개선을 통해 계절예측시스템 개선에 활용



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. CESM2.1.3

- 출처: <https://www.cesm.ucar.edu/models/cesm2>

2. JRA55

- 출처: https://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html

- 수집기간: 1996년 11월 ~ 2016년 3월

- 영역: 전지구

3. SSMIS

- 출처: https://ghrc.nsstc.nasa.gov/uso/ds_docs/ssmi_netcdf/ssmi_ssmis_dataset.html

- 수집기간: 1996년 11월 ~ 2016년 3월

- 영역: 극지역

4. HadISST

- 출처: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/>

- 수집기간: 1996년 11월 ~ 2016년 3월

- 영역: 극지역

5. EN4

- 출처: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/en4/>

- 수집기간: 1996년 11월 ~ 2016년 3월

- 영역: 극지역



제 7 장 참고문헌

- Ahn, J. B., Lee, J., & Jo, S. (2018). Evaluation of PNU CGCM ensemble forecast system for boreal winter temperature over South Korea. *Atmosphere*, 28(4), 509-520.
- Barnston, A. G., & Livezey, R. E. (1987). Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly weather review*, 115(6), 1083-1126.
- Campos, C., & Horn, M. (2018). The physical system of the Arctic Ocean and Subarctic Seas in a changing climate. In *YOUMARES 8-Oceans Across Boundaries: Learning from each other: Proceedings of the 2017 conference for YOUng MARine REsearchers in Kiel, Germany* (pp. 25-40). Springer International Publishing.
- Comiso, J. C. (2012). Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover. *Journal of climate*, 25(4), 1176-1193.
- English, J. M., Kay, J. E., Gettelman, A., Liu, X., Wang, Y., Zhang, Y., & Chepfer, H. (2014). Contributions of clouds, surface albedos, and mixed-phase ice nucleation schemes to Arctic radiation biases in CAM5. *Journal of Climate*, 27(13), 5174-5197.
- Francis, J. A., & Vavrus, S. J. (2012). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical research letters*, 39(6).
- Higgins, R. W., Leetmaa, A., Xue, Y., & Barnston, A. (2000). Dominant factors influencing the seasonal predictability of US precipitation and surface air temperature. *Journal of Climate*, 13(22), 3994-4017.
- Honda, M., Inoue, J., & Yamane, S. (2009). Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophysical Research Letters*, 36(8).
- Johnson, S. J., Stockdale, T. N., Ferranti, L., Balmaseda, M. A., Molteni, F., Magnusson, L., ... & Monge-Sanz, B. M. (2019). SEAS5: the new ECMWF seasonal forecast system. *Geoscientific Model Development*, 12(3), 1087-1117.
- Kay, J. E., Hillman, B. R., Klein, S. A., Zhang, Y., Medeiros, B., Pincus, R., ... & Ackerman, T. P. (2012). Exposing global cloud biases in the Community Atmosphere Model (CAM) using satellite observations and their corresponding instrument simulators. *Journal of Climate*, 25(15), 5190-5207.
- Kim, B. M., Son, S. W., Min, S. K., Jeong, J. H., Kim, S. J., Zhang, X., ... & Yoon, J. H. (2014). Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nature communications*, 5(1), 4646.
- Kug, J. S., Jeong, J. H., Jang, Y. S., Kim, B. M., Folland, C. K., Min, S. K., & Son, S. W. (2015). Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nature Geoscience*, 8(10), 759-762.
- Lee, S. M., Sohn, B. J., & Kummerow, C. D. (2018). Long-term Arctic snow/ice interface

- temperature from special sensor for microwave imager measurements. *Remote Sensing*, 10(11), 1795.
- Magnusson, L., Nycander, J., & Källén, E. (2009). Flow-dependent versus flow-independent initial perturbations for ensemble prediction. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 61(2), 194-209.
- McIlhattan, E. A., Kay, J. E., & L'Ecuyer, T. S. (2020). Arctic clouds and precipitation in the Community Earth System Model version 2. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(22), e2020JD032521.
- McIlhattan, E. A., L'Ecuyer, T. S., & Miller, N. B. (2017). Observational evidence linking Arctic supercooled liquid cloud biases in CESM to snowfall processes. *Journal of Climate*, 30(12), 4477-4495.
- Mori, M., Watanabe, M., Shiogama, H., Inoue, J., & Kimoto, M. (2014). Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nature Geoscience*, 7(12), 869-873.
- Richter, J. H., Pegion, K., Sun, L., Kim, H., Caron, J. M., Glanville, A., ... & Collins, D. (2020). Subseasonal Prediction with and without a Well-Represented Stratosphere in CESM1. *Weather and Forecasting*, 35(6), 2589-2602.
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., ... & Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of climate*, 27(6), 2185-2208.
- Stroeve, J., Holland, M. M., Meier, W., Scambos, T., & Serreze, M. (2007). Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophysical research letters*, 34(9).
- Thompson, D. W., & Wallace, J. M. (1998). The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical research letters*, 25(9), 1297-1300.
- Turner, A. K., & Hunke, E. C. (2015). Impacts of a mushy-layer thermodynamic approach in global sea-ice simulations using the CICE sea-ice model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(2), 1253-1275.
- Wang, C., Graham, R. M., Wang, K., Gerland, S., & Granskog, M. A. (2019). Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution. *The Cryosphere*, 13(6), 1661-1679.

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.