

중장기 북극 해빙 면적 예측을 위한
해양-해빙 결합 초기화 기법 개발

Development of data assimilation system to construct
an interannual sea-ice prediction system using
dynamical sea-ice model



전남대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극해 환경변화 통합관측 및 활용연구” 과제의 위탁연구 “중장기 북극 해빙 면적 예측을 위한 해양-해빙 결합 초기화 기법 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	: 강 성 호
위탁연구기관명	: 전남대학교
위탁연구책임자	: 함 유 근
위탁참여연구원	: 최 준 영
“	: 정 예 림
“	: 이 정 길
“	: 나 혜 윤
“	: 김 정 환
“	: 황 연 지

보고서 초록

위탁연구과제명	중장기 북극 해빙 면적 예측을 위한 해양-해빙 결합 초기화 기법 개발				
위탁연구책임자	함 유 근	해당단계 참여연구원수	7명	해당단계 연구비	70,000(천원)
연구기관명 및 소속부서명	전남대학교 산학협력단/ 해양학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	48
• 전 지구 해빙 역학 모형(CICEv5.1) 구축 • 장기간 해빙 농도 및 두께 변수 재분석 자료 확보 • 너징 기법에 기반을 둔 일 평균 해빙 농도 및 두께 변수 초기화 기법 개발 • 해빙 자료동화 시스템 버전1 구축 • 초기화 시스템을 통한 시험 예측 수행 및 평가 • 해빙 모형 내 예단 변수 파악 • 장기 적분을 통한 해빙 주요 변수의 배경 공분산장 산출					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	해빙 자료 동화, 해빙-해양 접합 초기화, 해빙 예측성, 해빙 예측 시스템, 앙상블 최적 초기화			
	영 어	Sea-ice data assimilation, Ocean-sea-ice coupled initialization, Sea-ice predictability, Sea-ice prediction system, Ensemble optimal interpolation			

요 약 문

I. 제 목

중장기 북극 해빙 면적 예측을 위한 해양-해빙 결합 초기화 기법 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

북극 해빙 변동성은 극 지역 및 중위도 기후의 예측에 있어 중요한 인자로 작용하지만, 역학 해양-해빙 접합 모형을 이용한 해빙 예측성은 해빙 변수의 초기화 과정에 대한 이해도 부족으로 낮은 편임. 성공적인 해빙 변수의 초기화는 극 지역 및 중위도 기후의 예측성을 담보하고, 북극항로 예측에도 필수적이라 할 수 있음. 따라서 본 연구에서는 중장기 북극 해빙 면적 예측을 위한 해양-해빙 결합 초기화 과정을 개발하고, 이를 통해 역학 모형을 이용한 중장기 해빙 예측 시스템의 구축을 도모함.

III. 연구개발의 내용 및 범위

○ 너징 기법에 기반을 둔 해빙 면적 변수 초기화 기법 개발

CICE5 해빙 역학 모형을 구축하고, 장기간 해빙 농도 및 두께의 재분석 자료를 확보하였음. 이를 이용하여 너징 기법에 기반을 둔 일평균 해빙 면적 초기화 기법을 개발하였음.

○ EnOI 기법 개발을 위한 해빙 변수 특성 파악 및 배경 공분산장 산출

해빙 모형 내의 예단 변수들을 파악하고, 해빙 모형 내 주요 변수들의 계절적 특성을 파악하였음. 해빙 모형에 최적 내삽 초기화 기법 적용을 위해 해빙 변수의 특성 파악 및 배경 공분산장을 산출하였음.

IV. 연구개발결과

구축된 해빙 역학 모형의 초기화 시스템을 통하여 해빙 초기조건을 생산하였고, 생산된 초기조건을 이용하여 과거예측실험을 수행하였음. 예측 수행 결과 규준실험보다 예측성이 향상되었고, 총 해빙 농도에 대한 예측성은 약 5개월까지 나타남을 확인함. 또한 해빙 변수 배경 공분산장 산출 결과, 해빙 변수에 대한 계절별 자료동화 접근방법의 필요성과 해빙 농도 변수 배경 공분산장의 지역적 특성 차이가 큼을 밝혔다.

V. 연구개발결과의 활용계획

북극해 예측 시스템 개발을 통한 북극해 지역 해빙 예측성 향상을 도모.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Development of data assimilation system to construct an interannual sea-ice prediction system using dynamical sea-ice model.

II. Purpose and Necessity of R&D

Arctic sea-ice variability which is used for prediction indicator of climate change affects significantly polar region and mid-latitude climate. However, predictability of the Arctic sea-ice extent using dynamical sea-ice-ocean coupled model is low, because understanding about initialization scheme for sea-ice variables lacks. Successful initialization of sea-ice variables guarantees improvement of predictability for the climate and Northern Sea Route. In this study, nudging data assimilation scheme based initialization system is developed for the dynamical sea-ice model.

III. Contents and Extent of R&D

- Development of the nudging based initialization scheme using a dynamical sea-ice model

The sea-ice dynamical model(CICE5) is built, and reanalysis data for sea-ice concentration and thickness is retained. Subsequently, the nudging based initialization system is developed.

- The calculation for background error covariance of sea-ice to develop EnOI scheme.

The prognostic variables are figured out and the seasonality of key sea-ice variables is understood. And, background error covariance of sea-ice is calculated to construct EnOI scheme.

IV. R&D Results

The sea-ice initialization system for dynamical model is developed, and produces the initial condition of sea-ice variables. The hindcast experiment with the initial condition produced in the sea-ice initialization system is performed. It is showed that improvement of sea-ice area predictability compared to control test and predictability with correlation coefficients of 0.5 or more from the prediction start to 5-months in correlation analysis of sea-ice concentration. The result of calculation for background error covariance of sea-ice variables showed that seasonal data assimilation approach to sea-ice variables is needed and that background error covariance of sea-ice concentration has a great difference in regional characteristics.

V. Application Plans of R&D Results

By developing a prediction system for an Arctic Ocean, it is possible to improve the predictability of sea-ice in the Arctic Ocean.



목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구방법

제 2 절 변수별 초기화 시스템 구축 결과

1. 해수면 온도 초기화 시스템 구축

2. 해빙 농도 초기화 시스템 구축

3. 카테고리 별 해빙 두께 초기화 시스템 구축

제 3 절 변수 조합 너징 기반 초기화 시스템 구축

제 4 절 해빙 자료동화 시스템 버전 1을 이용한 과거 예측 실험 수행

제 5 절 장기 적분을 통한 해빙 주요 변수들의 배경 공분산장 산출

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

본 문

제 1 장. 서론

최근 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서는 북극 해빙의 분포변화와 면적변화에 대한 예측을 위해 통합관측 자료 데이터베이스 구축과 예측 표출시스템을 구축하고자 하고 있음. 근래 북극 해빙 면적과 두께는 급격하게 감소하고 있고, 변동성은 증가하고 있음[Stroeve et al., 2007]. 이로 인하여, 북극 해빙 예측에 대한 수요가 증가하고 있고, 북극 해빙의 변동성이 극 지역 및 중위도 지역의 날씨와 기후에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음[Francis and Vavrus., 2012; Overland and Wang, 2010]. 즉, 이는 북극의 해빙 변동성이 극 지역과 중위도 지역의 기후 예측 인자로서 활용될 수 있음을 의미. 또한 북극의 해빙이 감소하면서 북극 항로에 대한 관심이 커지고 있음. 이는 북극 항로를 개척함으로써 동아시아 지역과 유럽 지역 등의 운항 거리를 줄여 경제적 효용을 누릴 수 있기 때문임[Bekkers et al, 2015]. 이러한 북극 항로의 개척은 운항 거리와 시간을 감소시킴으로 나라 간 무역이 활발히 이뤄지게 할 것으로 기대됨.

따라서 극 지역 및 중위도 지역의 날씨와 기후를 예측하고, 북극 항로 예측 및 개척을 위해 북극의 해빙 변수를 정확히 예측할 수 있는 기술이 필요함. 하지만, 현재 기후 모형을 이용한 역학적 예측은 모형 자체의 불확실성과 관측 자료 미비 등의 이유로 예측성이 낮은 편임[Chevallier et al., 2013; Tietsche et al, 2014; Sigmond et al., 2013; Wang et al., 2012]. 뿐만 아니라 해빙 변수에 대한 초기화 과정의 이해 부족으로 극 지역의 해빙 예측성은 상당히 낮음[Sigmond et al., 2013]. 최근 정교화 된 해빙 역학 모형의 개발이 진행되고 있고, 이와 더불어 해빙 관측의 발전이 이루어져 왔음[Hunke et al, 2015; Shu-Qiang et al, 2015]. 이에 따라 해빙 모형 자료동화의 문제가 대두되었고, 국제적으로 해빙 모형을 초기화 하여 기후 예측성을 향상시키려는 시도가 이루어지고 있음[Lindsay and Zhang, 2005; Yang et al, 2015]. 하지만, 대부분의 경우 해빙 두께가 성공적으로 초기화되지 않고 있으며 이에 따라 예측성 향상이 높지 않은 상황임. 즉, 해빙 변화에 기여하는 변수들에 대한 이해와 더불어 초기화 과정이 이루어져야 극 지역 및 중위도 지역의 기후 변동성 예측에 기여할 수 있음. 본 과제에서는 최종적으로 전 지구 해빙 역학 모형을 이용한 중장기 해빙 예측을 담보할 수 있는 해빙-해양 접합 초기화 시스템을 개발 및 구축하고자 함(그림 1).

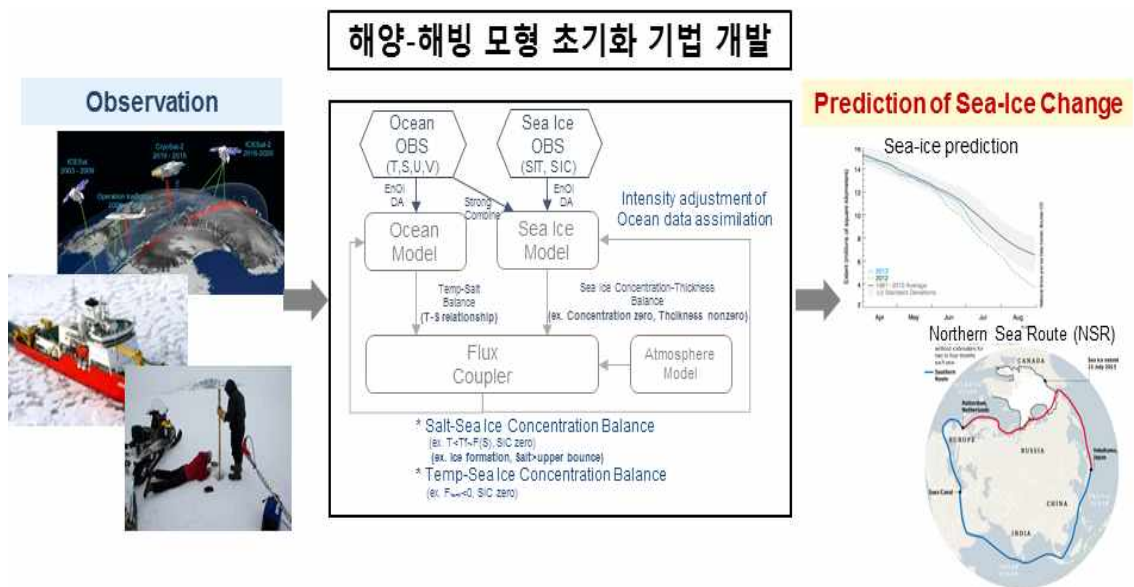


그림 1. 해양-해빙 모형 초기화 기법 시스템 개요. 실제 북극 해빙 실측 자료를 바탕으로 한 해양-해빙 모형 초기화 시스템을 통해 기대효과 창출.



제 2 장. 국내외 기술개발 현황

국내의 통계적 기법을 이용한 해빙 면적 예측 기술의 개발은 아직 초기 단계에 있으며, 역학 모형을 이용한 해빙 예측을 위한 초기화 과정 개발 및 이와 관련된 전문가는 전무한 상황이다. 또한 국외 NASA/GMAO, UK met office 등 대부분의 예측 기관들이 북극 해빙의 기후학적, 경제적 중요성을 인식하고 해빙 예측 시스템을 개발 중에 있으나 개발된 예측 시스템은 통계 예측의 성능을 증가하지 못하는 상황이다. 최근에는 NASA/GMAO에서는 해빙 두께를 초기화 하는 기법을 개발하여, 해빙 면적만 초기화하는 경우보다 예측성의 향상이 있음을 보였다. 또한, 앙상블 최적 내삽(EnOI) 기법을 기반으로 해빙 모형 초기화 기법을 개발하였으며, 최근 앙상블 칼만 필터(EnKF) 기법을 이용한 초기화 기법을 도입하려는 시도를 진행하고 있다.



제 3 장. 연구 개발수행 내용 및 결과

제 1 절. 연구방법

본 연구에서는 전 지구 해빙 역학 모형(Los Alamos Sea Ice Model, CICEv5.1)[*Hunke and Lipscomb, 2010*]을 이용하여 뉴턴 완화법(newtonian relaxation) 혹은 너징(Nudging) 기법[*Hoke and Anthes, 1976, 1976; Kistler, 1974*]에 기반을 둔 초기화 시스템을 개발한다. 그림 2는 CICE(Community Ice CodE) 모형 내의 여러 역학적/열역학적 과정을 나타낸 도식화이다. CICE 모형은 전 지구 대기-해양 접합모형에 포함된 해빙성분모형으로 사용되며, 해빙 변수를 예측하는 단일 기후모형으로도 사용된다. 본 과제에서는 해빙 관측 자료동화 시스템 개발의 효율성을 위하여 해빙-해양 접합 모형이 아닌 최신버전의 해빙 성분 모형만 따로 적분이 가능한 시스템을 구축하였다.

먼저, 표준실험으로 대기 강제력만 처방된 장기 적분을 수행하였다. 그 후, 모형 내의 예단 변수(Prognostic variables)인 해수면 온도(Sea Surface Temperature), 해빙 농도(Sea Ice Concentration), 그리고 각 카테고리 별 해빙 두께(Sea Ice Thickness each Categories)를 각각 초기화하는 시스템을 구축한다. 각 변수의 초기화가 성공적으로 진행되었는지 판단한 후, 세 변수를 적절히 조합한 초기화 시스템을 구축한다. 구축된 시스템을 이용하여 적절한 완화시간규모(Nudging time-scale)에 대한 민감도 실험을 여러 번 반복한다. 그 후 가장 현실적인 초기조건이 형성된 것으로 판단한 실험을 고정하여 예측실험(Hindcast)을 수행한다. 위 내용은 뒷 절에서 자세히 설명하였다.

이 연구에서 이용한 대기 강제력 자료로 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 제공하는 COREv2[*Large and Yeager, 2004*]를 이용하였다. 초기화에 이용되는 해수면 온도 자료는 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 OISST(Optimum Interpolation Sea Surface Temperature)의 Version 2 재분석 자료[*Raynolds et al., 2002*]를 이용하였다. 해상도는 위도와 경도가 $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ 이다. 해빙 농도 자료는 해수면 온도와 동일하게 NOAA에서 제공하는 OISIC.v2 재분석 자료[*Raynolds et al., 2002*]를 이용하였고, OISST.v2와 동일한 해상도를 갖는다. 해빙 두께 자료는 워싱턴 대학의 극지 과학 센터(Polar Science Center)에서 제공하는 PIOMAS(Pan-Arctic Ice-Ocean Modeling and Assimilation System) 재분석 자료[*Zhang and Rothrock., 2003*]를 이용하였다. 해빙 두께는 북위 $45^\circ \sim 90^\circ$ 지역에 대해서만 $360^\circ \times 120^\circ$ 해상도를 갖는다. 이는 표 1에 정리하였다.

CICE(Los Alamos Sea-Ice Model) v5.1

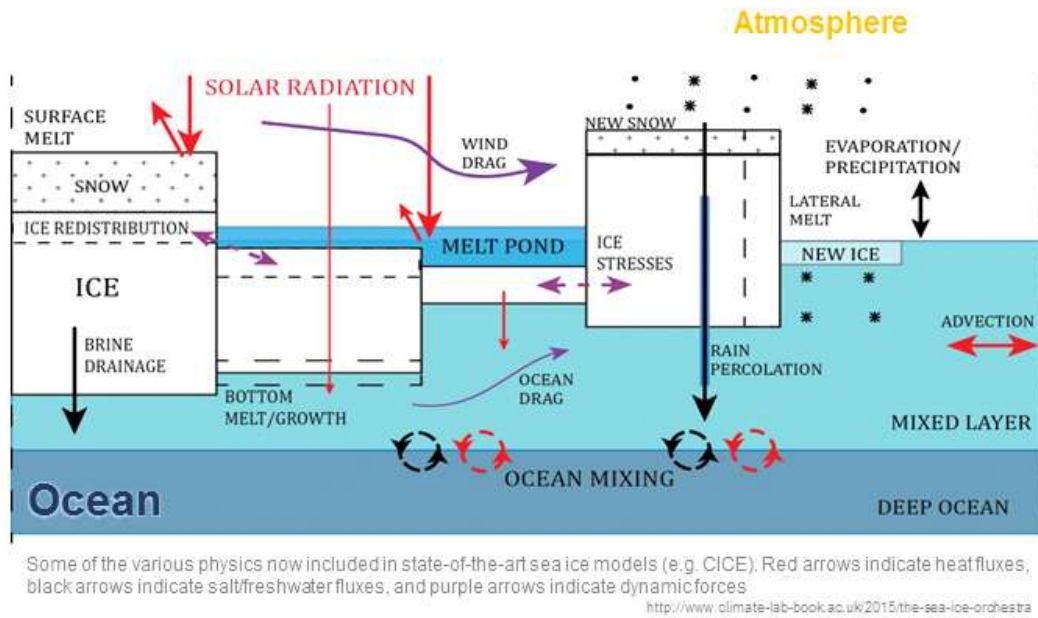


그림 2. 본 과제에서 사용된 전 지구 해빙 역학 모형 시스템의 도식화. 붉은색 화살표는 열 플럭스, 검은색 화살표는 염분과 담수의 플럭스, 그리고 보라색 화살표는 역학적 힘을 표시

극지연구소

Data	Variables	Resolution(space/time)	Units
NCEP/ NCAR	10m air density		kg/m ³
	10m specific humidity		kg/kg
	0m sea level pressure	T62 grid/	Pa
	10m air temperature	6-hourly	Kelvin
	10m U wind		m/s
	10m V wind		m/s
GCGCS	Precipitation	T62 grid/ monthly	mm/day
GISS	Downwelling shortwave flux	T62 grid/	W/m ²
	Downwelling longwave flux	daily	W/m ²
NOAA OISSTv2	Sea surface temperature	1/4°*1/4° grid/ daily	Celsius degree
NOAA OISICv2	Sea-ice concentration	360°×120° (45°N~90°N)/ monthly	%
PIOMAS	Sea-ice thickness		m

표 1. 본 과제에서 사용된 자료, 해상도 및 단위. 검정색은 대기 강제력(COREv2), 붉은색은 초기화에 이용된 변수를 표시.



제 2 절. 변수별 초기화 시스템 구축 결과

전 지구 역학 해빙 모형(CICE)은 gx1v6(약 $1^\circ \times 1^\circ$)라는 해양 모형과 동일한 Displaced-pole grid 격자 시스템을 채택하고 있다. 따라서 모형에 처방되는 변수(대기 강제력, 초기화에 이용되는 변수)는 모두 모형과 동일한 격자(혹은 해상도)로 변환 후 사용하였다. 초기화를 수행하기 전 모형에 의해 계산되는 값을 재분석 자료의 값으로 치환하는 Replace 실험을 통해 자료가 제대로 반영되는지 확인하였다(그림 3).

1. 해수면 온도 초기화 시스템 구축

먼저 전 지구 역학 해빙 모형(CICE)에 해수면 온도(Sea Surface Temperature) 변수에 대한 초기화를 수행한 결과이다. 해수면 온도는 하루 평균 자료인 OISST.v2를 이용하였고 초기화 기간은 1990년 1월 1일부터 2008년 12월 31일까지 19년이다. 해수면 온도는 해양 변수이지만, 해빙 변수의 유지 및 변화에 영향을 주는 중요한 변수로써, 특히 해양에서 해빙으로 유입되는 열 플럭스 변화 등의 지배적인 변수이다[Krishfield and Perovich, 2005]. 완화시간규모(혹은 Nudging time scale)에 대한 민감도 실험을 통해 적절한 완화시간규모를 채택하였다. 완화시간규모가 작을수록 관측자료(혹은 재분석자료)에 빨리 수렴한다.

그림 4는 초기화에 이용된 해수면 온도 재분석 자료(OISST.v2)와 해수면 온도를 완화시간규모 20일로 초기화를 수행한 결과의 해수면 온도 월별 상관관계(Correlation)를 나타낸 것이다. 대기 강제력만 처방된 기준 실험에 비해 매우 높은 상관성을 확인할 수 있고, 북극해 지역보다는 중위도 지역에서 좀 더 높은 상관성을 나타낸다. 북극해 지역에서도 1월을 제외한 계절에 0.6이상의 높은 상관성을 보인다. 이는 초기화에 이용된 재분석 자료와 초기화를 통해 적분된 모형 값의 관련성이므로, 해수면 온도의 너징 기반 초기화가 성공적으로 수행되었음을 확인할 수 있다.

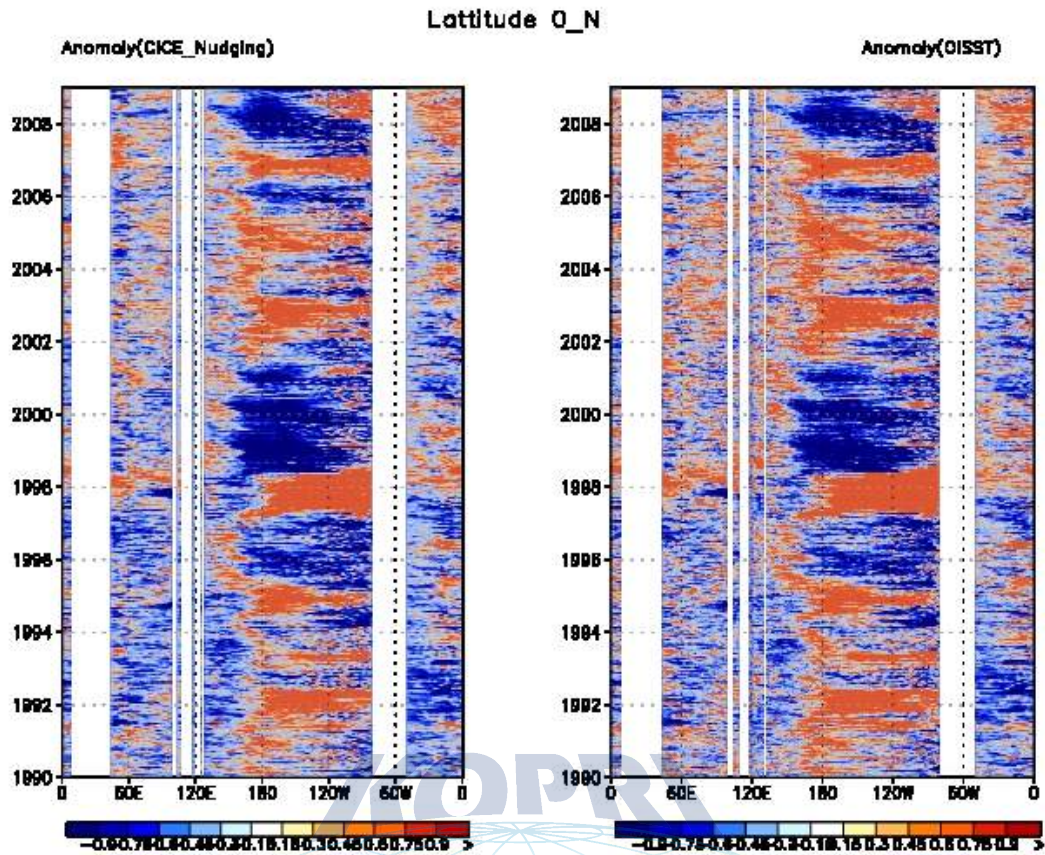


그림 3. 해수면 온도(OISST.v2)의 Replace 실험, 해수면 온도 아노말리(℃)의
경도-시간 그래프, 위도방향 평균.

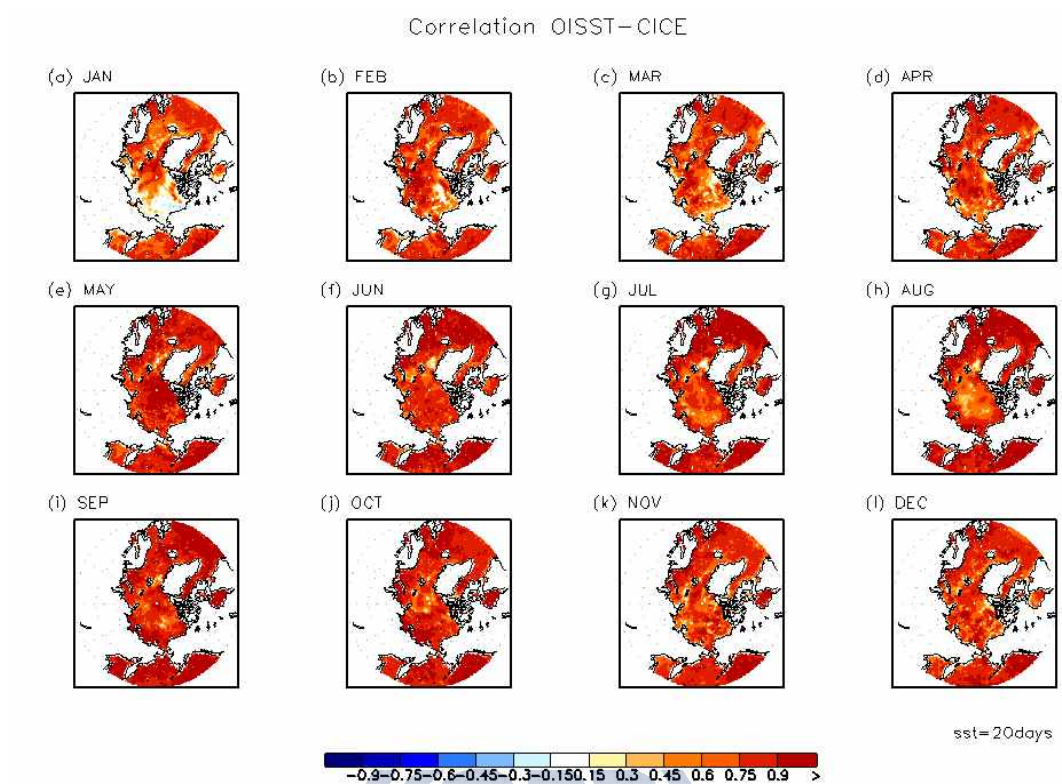


그림 4. 재분석 자료(OISST.v2)와 해수면 온도 초기화 수행 결과(20일 완화시간규모)의 해수면 온도 월별 상관관계. Period: 1990.01.01~2008.12.31, Plane projection: 50°N~90°N.

해수면 온도 변수 초기화 완화시간규모에 따른 민감도 실험도 수행하였다. 그림 5는 해수면 온도 초기화 수행 결과의 북극 해빙 면적(Sea Ice Extent)에 대한 기후장(Climatology)을 시계열로 나타낸 것이다. 여기서 해빙 면적은 해빙 농도가 15% 이상인 격자들의 면적 합을 구한 것이다[Gloersen *et al.*, 1993]. 규준실험(노란색 선)은 재분석 자료(검정색 선)보다 전체적으로 과대모의(Overestimating) 하는 것을 확인할 수 있다. 또한 완화시간규모에 따른 초기화 수행 결과(적색, 녹색, 청색)는 해수면 온도를 강하게 너징 시킬수록 관측보다 과소모의(Underestimating) 하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 융해시기(Melting season)인 7~9월에 급격한 감소를 보인다. 또한 완화시간규모가 변화함에 따라 해빙 면적의 평균장이 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 앞서 해수면 온도의 상관관계 분석(그림 4)과 뒤에 나오는 해빙 농도 상관관계 분석(그림 6)을 20일 완화시간규모의 실험으로 수행한 이유는 재분석 자료와 가장 비슷하여 보다 현실적인 해빙 초기조건을 생성할 것으로 생각되기 때문이다(적색 선).

그림 6은 초기화에 이용된 해빙 농도 재분석 자료(OISIC.v2)와 해수면 온도를 완화시간규모 20일로 초기화를 수행한 결과의 해빙 농도 월별 상관관계를 나타낸 것이다. 이는 해수면 온도의 초기화 결과가 실제 해빙 농도 자료와 얼마나 비슷한지를 보여준다. 분석 결과, 규준실험보다는 상관성이 증가하였으나, 전체적으로 상당히 낮은 상관성을 나타내며 융해시기(9~11월)에 일부 지역(Laptev sea, Beaufort sea)에서만 높은 상관성을 보인다. 하지만, 그 외의 계절(12~8월)에는 상관성이 높지 않고, 앞서 언급한바 융해시기에 상관성이 높다하더라도 과소모의를 하는 경향이 있다. 결과적으로 해수면 온도 변수 초기화 결과 예측성이 향상되기는 어렵다고 할 수 있다.

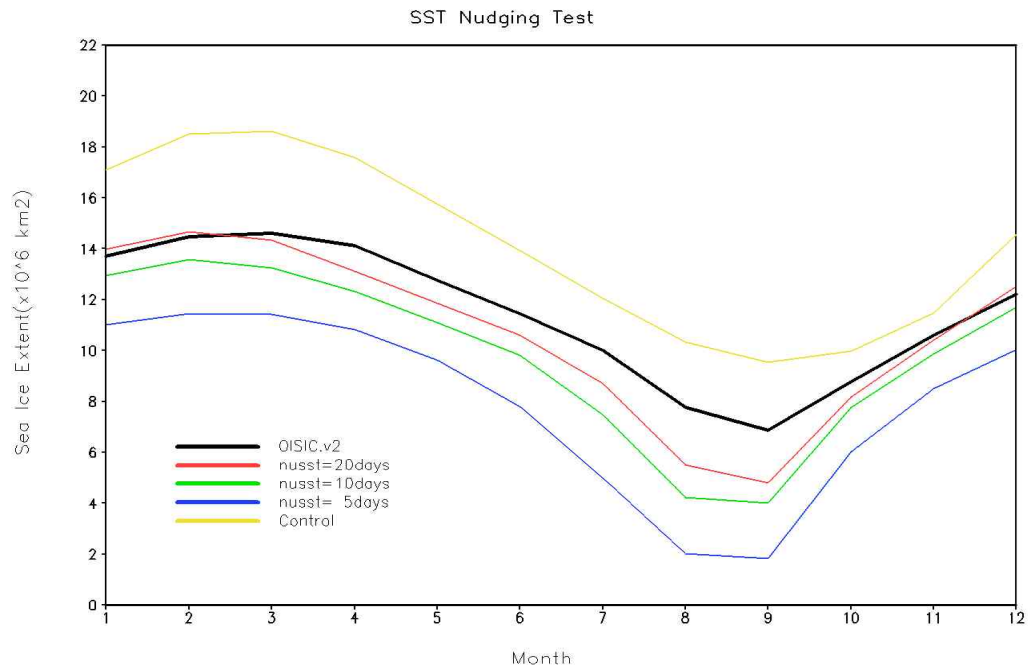


그림 5. 해수면 온도 초기화 수행 결과의 북반구 해빙 면적(10^6 km^2) 기후장 시계열. 검정색 선은 재분석 자료(OISIC.v2), 노란색 선은 기준실험, 적색, 녹색, 청색 선은 각각 20일, 10일, 5일의 완화시간규모를 갖는 초기화 수행 결과를 표시. Period: 1990.01.01.~2008.12.31

극지연구소

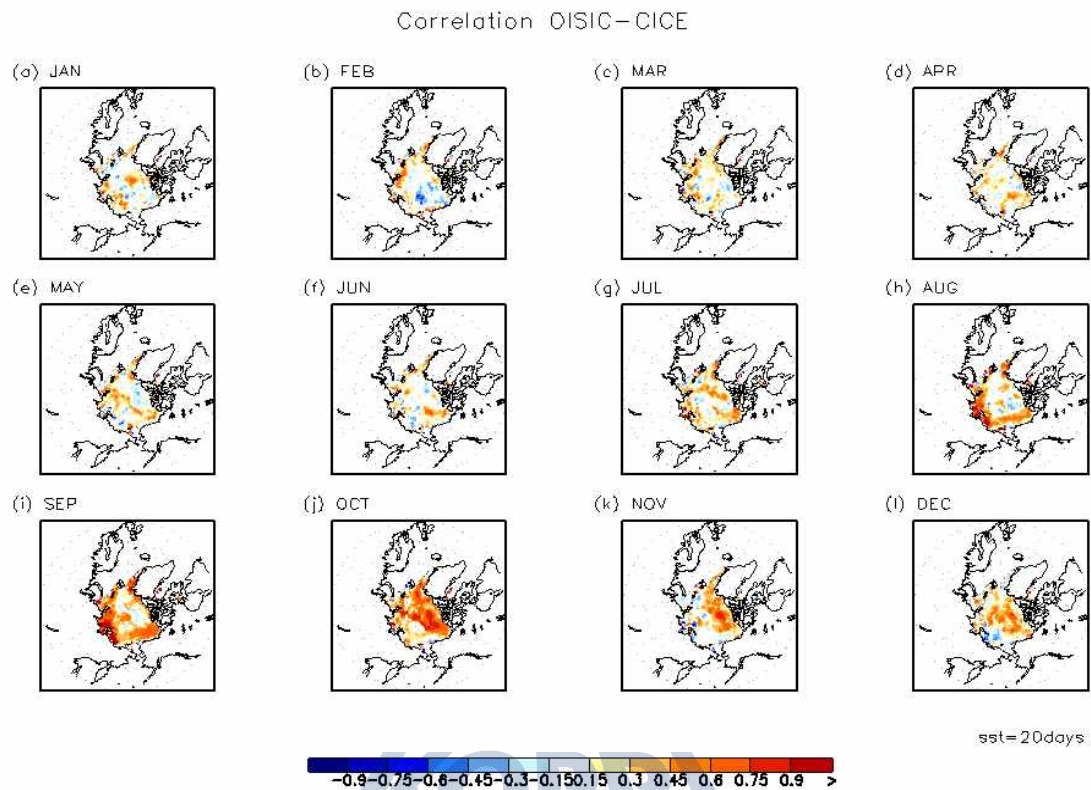


그림 6. 재분석 자료(OISIC.v2)와 해수면 온도 초기화 수행 결과(20일 완화시간규모)의 해빙 농도 월별 상관관계. Period: 1990.01.01~2008.12.31, Plane projection: 50°N~90°N.

2. 해빙 농도 초기화 시스템 구축

두 번째는 전 지구 해빙 역학 모형(CICE5.1)에 해빙 농도(Sea Ice Concentration) 변수를 초기화한 결과이다. 해빙 농도 자료도 하루 평균 자료인 OISIC.v2를 이용하였고 초기화 기간은 해수면 온도와 동일하게 1990년 1월 1일부터 2008년 12월 31일까지 19년 이다.

그림 7은 해빙 농도 변수 초기화 완화시간규모에 따른 민감도 실험 수행결과를 나타낸다. 해수면 온도의 분석과 동일하게 해빙 농도 초기화 수행 결과의 북반구 해빙 면적의 기후장을 시계열로 나타낸 것이다. 하지만, 해수면 온도의 초기화 경우와는 다르게 완화시간규모에 따른 초기화 수행 결과(적색, 녹색, 청색)는 완화시간 규모 변화에 따른 반응이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 완화시간규모가 작을수록 재분석 자료와 비슷해지는 것을 보이나, 기준실험과 큰 차이가 없다. 해빙 농도 변수에 대한 시계열 분석 결과에서는 해빙 면적보다 완화시간규모에 대한 반응이 컸지만, 다른 변수에 비해 상대적으로 너징 강도가 강함에도 불구하고 해빙 면적이 기준실험과 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 모형 내의 해빙 농도 변수 자체의 메모리가 크지 않기 때문에 모형 드리프트에 대한 의존성이 큼을 의미한다.

그림 8은 해빙 농도 재분석 자료(OISIC.v2)와 해빙 농도를 완화시간규모 0.25일(6시간)로 초기화를 수행한 모형 적분 결과의 해빙 농도 월별 상관관계(Correlation)를 나타낸 것이다. 분석 결과, 기준실험에 비해 상관성이 증가하였지만 전체적으로 낮은 상관성을 나타낸다. 하지만 해빙이 녹는 용해시기(Melting season)에 높은 상관성을 보인다. 이러한 상관성은 용해시기인 8월부터 시작해 해빙이 빙결되는 12월까지 지속됨을 보이고, 특히 그린란드 북부와 캐나다 다도해(Canadian archipelago, CAP)에서 큰 값을 보인다. 해빙이 녹음에 따라 변동성이 큰 계절인 가을에 예측성이 크게 나타난다고 볼 수 있다. 해빙 농도 변수를 직접 초기화함에도 불구하고 전반적인 상관성이 낮은 이유는 앞서 언급한바 모형 드리프트에 대한 의존성이 크고, 해빙 농도 변수의 메모리가 작기 때문이다. 따라서 해빙 농도의 변수 초기화 또한 전체적인 관련성이 크지 않고, 과대모의 경향이 있어 현실적인 초기조건을 생성하기에는 어려울 것으로 판단된다.

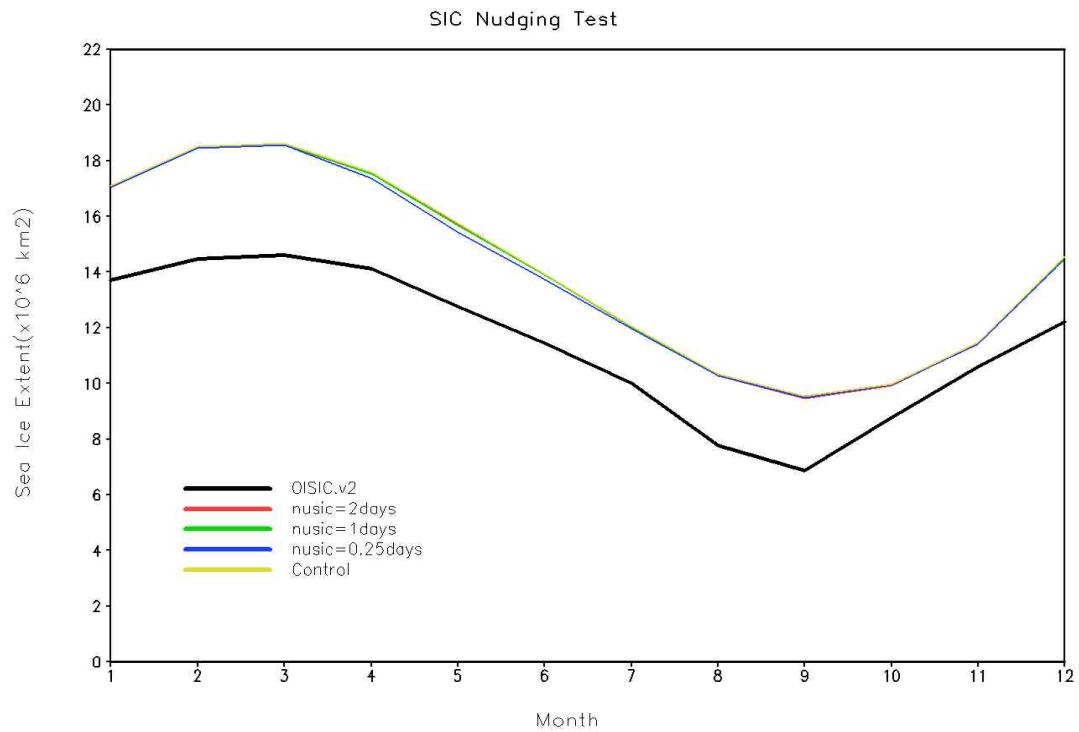


그림 7. 해빙 농도 초기화 수행 결과의 북반구 해빙 면적(10^6 km^2) 기후장 시계열. 검정색 선은 재분석 자료(OISIC.v2), 노란색 선은 기준실험, 적색, 녹색, 청색 선은 각각 2일, 1일, 0.25일(6시간)의 완화시간규모를 갖는 초기화 수행 결과를 표시. Period: 1990.01.01.~2008.12.31

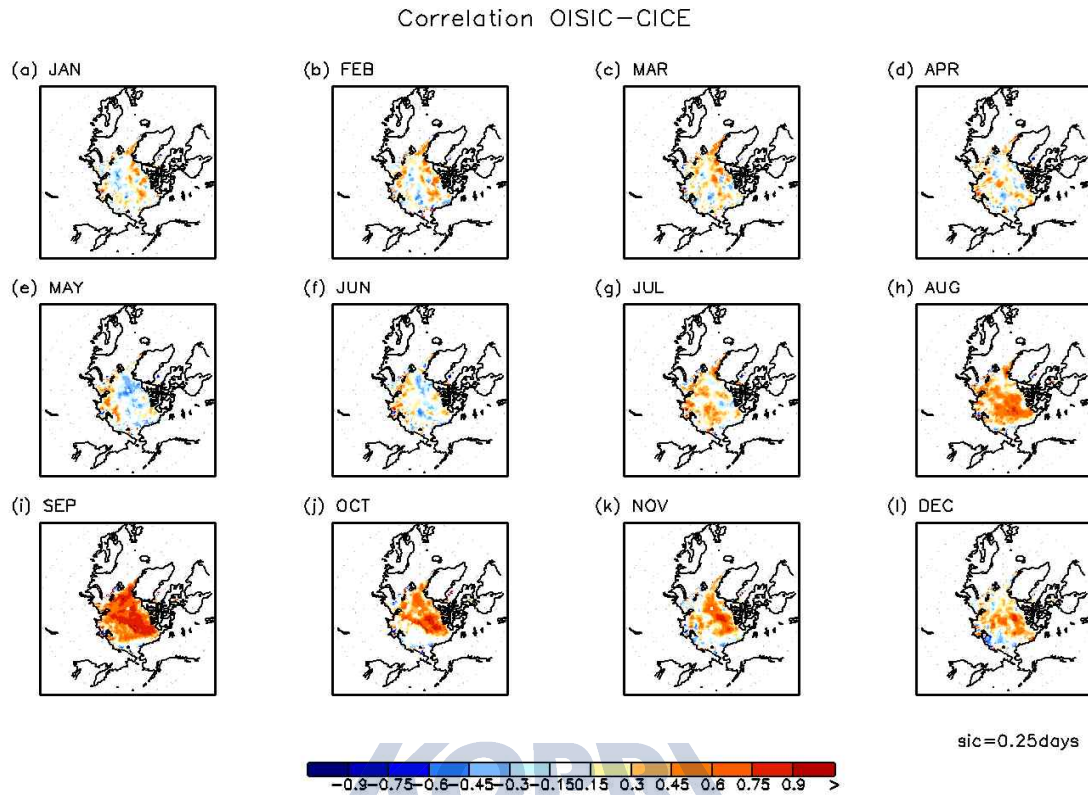


그림 8. 재분석 자료(OISIC.v2)와 해빙 농도 초기화 수행 결과(6시간 완화시간규모)의 해빙 농도 월별 상관관계. Period: 1990.01.01~2008.12.31, Plane projection: 50°N~90°N.

3. 카테고리 별 해빙 두께 초기화 시스템 구축

세 번째는 전 지구 해빙 역학 모형(CICE5.1)에 해빙 두께(Sea Ice Thickness) 변수 초기화를 수행한 결과이다. 해빙 두께 자료는 월 평균 자료인 PIOMAS를 이용하였고 초기화 기간은 앞서 두 변수와 동일하게 1990년 1월 1일부터 2008년 12월 31일까지 19년 이다.

해빙 두께는 앞서 두 변수보다 정교한 처리작업이 요구된다. 그 이유는 모형 내에서 총 해빙 두께(Total sea ice thickness)는 5개의 카테고리(Categories)로 구성되는데, 총 해빙 두께는 예단변수(Prognostic variable)가 아닌 진단변수(Diagnostic variable)이기 때문이다[Bitz et al, 2001]. 이러한 이유로 예단변수인 5개의 카테고리 별 해빙 두께에 대한 너징항(Nudging term)이 요구된다. 이 때 너징항은 아래의 식과 같이 구성한다.

$$\Delta H_n = (H_{piomas_tot} - H_{mod_tot}) \times \left(\frac{H_{mod_n}}{H_{mod_tot}} \right)$$

카테고리 별
너징 항

재분석 자료
총 해빙 두께

모형 내
총 해빙 두께

모형 내
카테고리 별
두께 비율

카테고리 별 해빙 두께의 너징항은 총 해빙 두께 관측증분(우변 첫 번째 괄호)에 모형 내의 각 카테고리 별 해빙두께가 갖는 비율을 곱해줌으로써 구성할 수 있다. 식 구성 자체가 복잡하지 않고, 모형 해빙 두께 변수의 균형을 유지하면서 초기화를 수행할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 각 카테고리 별 해빙 두께의 너징항을 모형값에 더해 줌으로써 다음 식과 같이 총 해빙 두께의 초기화를 수행할 수 있다.

$$H_{nu_tot} = (H_{mod_ca1} + \Delta H_1) + (H_{mod_ca2} + \Delta H_2) + (H_{mod_ca3} + \Delta H_3) + (H_{mod_ca4} + \Delta H_4) + (H_{mod_ca5} + \Delta H_5)$$

초기화 후
총 해빙 두께

모형내 3th 카테고리
해빙 두께

3th 카테고리
너징항

위와 같은 방법으로 해빙 두께의 초기화를 수행하였다.

그림 9는 해빙 두께 재분석 자료(PIOMAS)와 카테고리 별 해빙 두께를 완화시간 규모 45일로 초기화를 수행한 결과의 총 해빙 두께 월별 상관관계를 나타낸 것이다. 전체적으로 상관성이 높은 것을 확인할 수 있고, 규준실험과의 비교 결과도 상관성이 향상된 것을 확인하였다. 따라서 해빙 두께의 너징 기반 초기화가 성공적으로 수행되었음을 확인하였다.

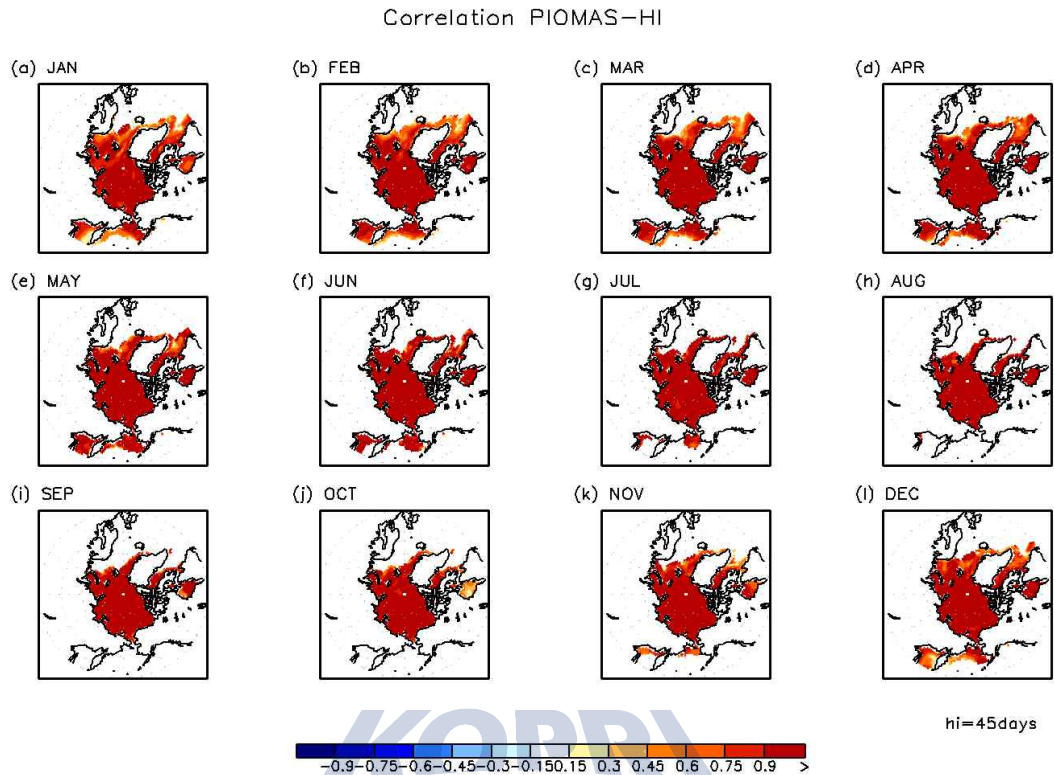


그림 9. 재분석 자료(PIOMAS)와 카테고리 별 해빙 두께 초기화 수행 결과(45일 완화시간규모)의 해빙 두께 월별 상관관계. Period: 1990.01.01~2008.12.31, Plane projection: 50°N~90°N.

그림 10은 카테고리 별 해빙 두께 초기화 완화시간규모에 따른 민감도 실험 결과이다. 해빙 두께 초기화 수행 결과의 북반구 해빙 면적의 기후장 시계열이다. 대체로 완화시간규모에 따른 반응은 크지 않은 것으로 확인된다. 해빙의 동결기(Freezing season)인 겨울과 봄철(12-4월)에 과대모의 하는 것을 확인할 수 있고, 융해시기(7-10월)에 재분석 자료와 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 즉, 카테고리 별 해빙 두께 초기화로 융해시기의 해빙면적 변동성이 대체로 재분석 자료와 비슷함을 나타낸다.

그림 11는 해빙 농도 재분석 자료(OISIC.v2)와 카테고리 별 해빙 두께를 완화시간규모 45일로 초기화를 수행한 결과의 총 해빙 농도 월별 상관관계 분석 결과이다. 대체로 상관성이 낮은 것을 확인할 수 있다. 앞서 해빙 면적 기후장은 융해시기에 재분석 자료와 비슷한 값을 나타냈지만, 해빙 농도 상관관계는 융해시기에도 상관성이 낮고 규준실험과의 상관관계 분석 결과와 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 카테고리 별 해빙 두께를 초기화하여도 현실적인 해빙 초기조건을 형성하기 어렵다고 할 수 있다.

종합적으로 각 변수별 너징 기반 초기화 시스템이 구축된 것은 확인하였지만, 예측성 향상을 담보할 만한 초기조건이 형성되기는 어려움을 확인하였다. 해수면 온도 초기화의 경우 너징 시간규모에 따라 해빙 변수가 민감하게 반응하고, 해빙 농도를 과소모의 하는 경향이 있었다. 해빙 농도 초기화의 경우는 모형에 의한 드리프트 현상이 강해 예측을 위한 초기조건 형성은 어렵고, 카테고리 별 해빙 두께는 동결기에 해빙 면적을 과대모의 하는 문제가 있었다. 따라서 세 가지의 변수를 변수 별 너징 강도(혹은 완화시간규모)에 대해 적절히 조합하여 초기화하는 시스템을 구축해야할 필요가 있다고 할 수 있다. 다음 절에서 변수 조합 너징 기반 초기화 시스템에 대하여 다루고 있다.

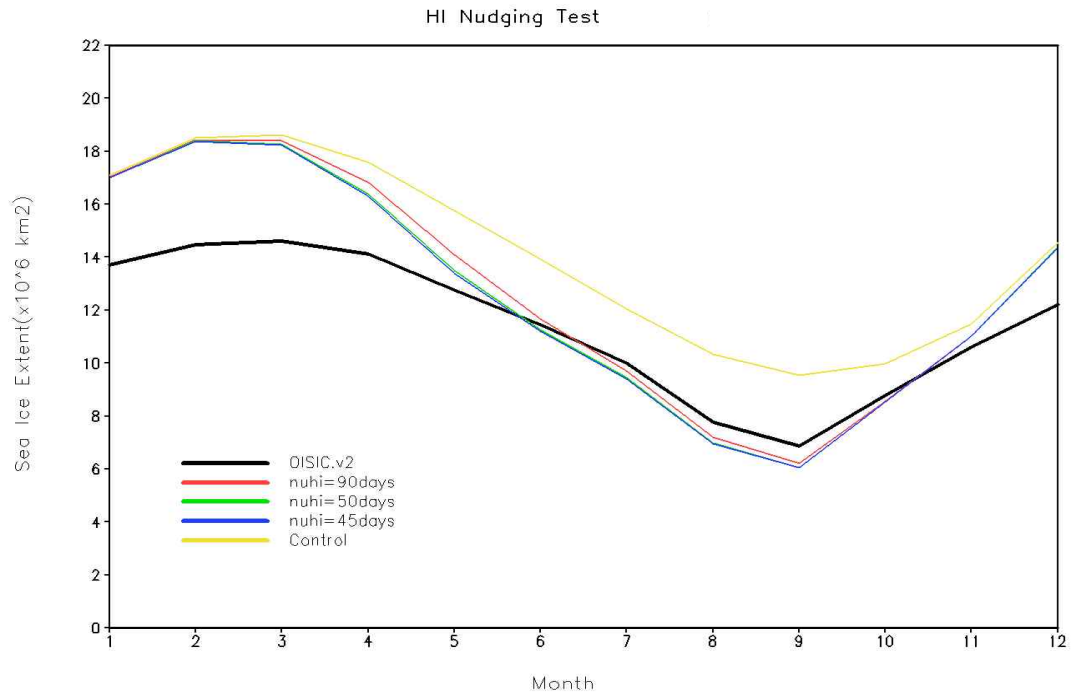


그림 10. 해빙 두께 초기화 수행 결과의 북반구 해빙 면적(10^6 km^2) 기후장 시계열. 검정색 선은 재분석 자료(OISIC.v2), 노란색 선은 기준실험, 적색, 녹색, 청색 선은 각각 90일, 50일, 45일의 완화시간규모를 갖는 초기화 수행 결과를 표시. Period: 1990.01.01.~2008.12.31

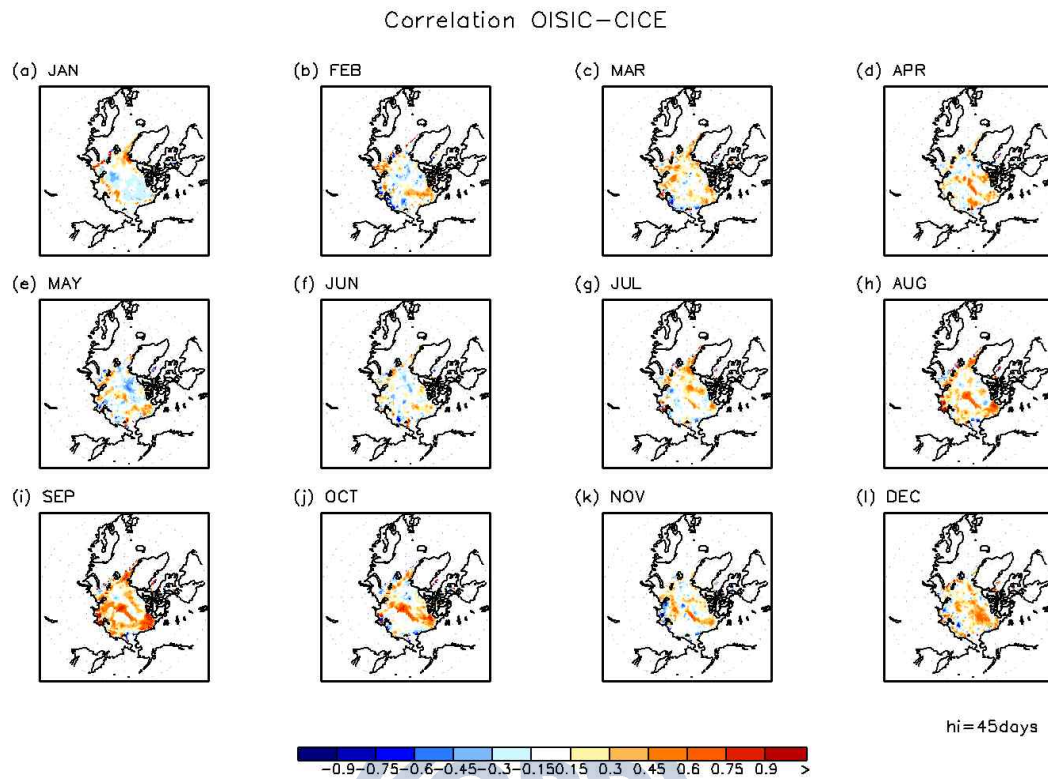
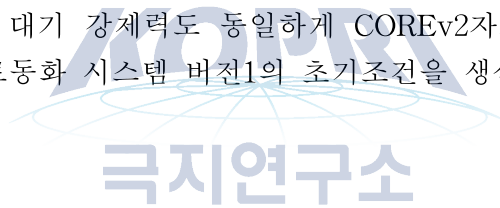


그림 11. 재분석 자료(OISIC.v2)와 카테고리 별 해빙 두께 초기화 수행 결과 (45일 완화시간규모)의 해빙 농도 월별 상관관계. Period: 1990.01.01~2008.12.31, Plane projection: 50°N~90°N.

제 3 절. 변수 조합 너징 기반 초기화 시스템 구축

앞서 변수 별 초기화 시스템(해수면 온도, 해빙 농도, 카테고리 별 해빙 두께)에 서는 중장기 해빙 예측을 위한 현실적인 초기조건을 형성하기 어렵다는 것을 보았다. 이러한 이유로, 세 가지 예단변수를 조합하여 초기화하는 시스템에 대한 연구를 진행하였다.

변수를 조합한 초기화를 시도하면서 초기화 된 변수 사이의 미세한 불균형에 의해 모형이 다운(Blow up)되는 문제가 발생하였다. 때문에 모형 내에서 균형을 유지하며 세 변수가 초기화 될 수 있는 조합을 찾기 위해 민감도 실험(Sensitivity experiment)을 여러 번 수행하였다. 각 변수별로 완화시간규모를 적절히 조합하면서 민감도 실험을 수행한 결과, 해빙 자료동화 시스템 버전1을 구축하였다. 그림 12는 해빙 자료동화 시스템 버전1의 개요를 도식화로 나타낸 것이다. 초기화 변수들은 해수면 온도, 해빙 농도, 그리고 카테고리 별 해빙 두께이다. 이용 자료는 이전과 동일한 재분석 자료들(OISSTv2, OISICv2, PIOMAS)이다. 각 변수의 완화시간규모를 해수면 온도 20일, 해빙 농도 6시간, 해빙 두께 5일로 설정하여 초기화를 수행하였다. 초기화 수행기간은 이전 변수들과 동일하게 1990년 1월 1일부터 2008년 12월 31일까지 진행하였고, 대기 강제력도 동일하게 COREv2자료를 이용하였다. 초기화 수행을 통해 해빙 자료동화 시스템 버전1의 초기조건을 생산하였다.



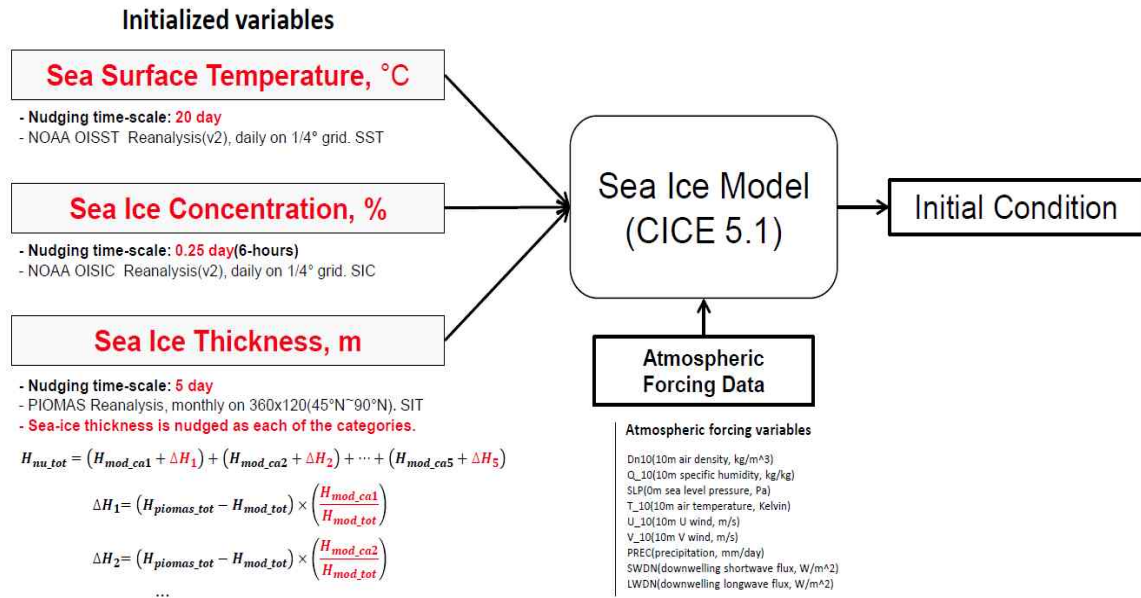


그림 12. 해빙 자료동화 시스템 개요(Ver.1). 초기화 변수는 해수면 온도(OISST.v2, 완화시간규모 20일), 해빙 농도(OISIC.v2, 완화시간규모 6시간), 카테고리 별 해빙 두께(PIOMAS, 완화시간규모 5일). 대기 강제력은 COREv2 자료를 이용. 초기화 수행 결과로 초기조건을 형성.



구축된 해빙 자료동화 시스템 버전 1의 성공적인 초기화 여부를 검증하기 위해 앞 절과 동일한 분석을 시행하였다. 그림 13은 해빙 두께의 재분석 자료(PIOMAS)와 해빙 자료동화 시스템 버전1을 통해 초기화된 모형 적분 해빙 두께의 월별 상관관계를 나타낸 것이다. 전 계절에 상관성이 높은 것을 확인할 수 있고, 해빙 두께 변수에 대한 초기화가 성공적으로 수행되었음을 확인할 수 있다. 그림 14는 해빙 농도 재분석 자료(OISIC.v2)와 해빙 자료동화 시스템 버전1로 초기화된 모형 적분 해빙 농도의 월별 상관관계를 나타낸 그림이다. 전 계절에서의 상관성이 앞 절의 변수 별 초기화 결과보다 유의미한 상승을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, 해빙이 가장 빠르게 녹는 6, 7월과 해빙의 결빙이 시작되는 10, 11월에 상관성이 특히 높다. 다년생 해빙(Perennial sea ice)이 존재하여 계절성이 크지 않은 지역(그린란드 북부)은 상관성이 대체로 낮고, 1년생 해빙(First-year ice)이 존재하여 계절성이 큰 연해(Marginal sea) 지역(Barents-Kara sea, Chukchi sea, Laptev sea 등)은 상관성이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 각 변수별로 초기화하는 것보다 변수를 조합하여 초기화를 수행한 결과가 더 현실적인 해빙 초기조건을 생산할 수 있다는 것을 의미한다. 특히, 해빙 농도 변수만을 초기화하였을 때(그림 11)보다 월별 해빙 농도 상관성이 더 크다는 것은 해빙 농도나 면적 변수의 유지 및 변화에 기여하는 변수의 초기화가 중요하다는 것을 암시한다. 분석 결과, 해빙 변수의 너징 기반 초기화가 성공적으로 수행되었음을 확인함과 동시에 보다 예측성 향상을 담보하기 위한 현실적인 해빙 초기조건을 생산할 수 있는 시스템이 구축되었음을 확인하였다.

극지연구소

Sea-ice thickness correlation

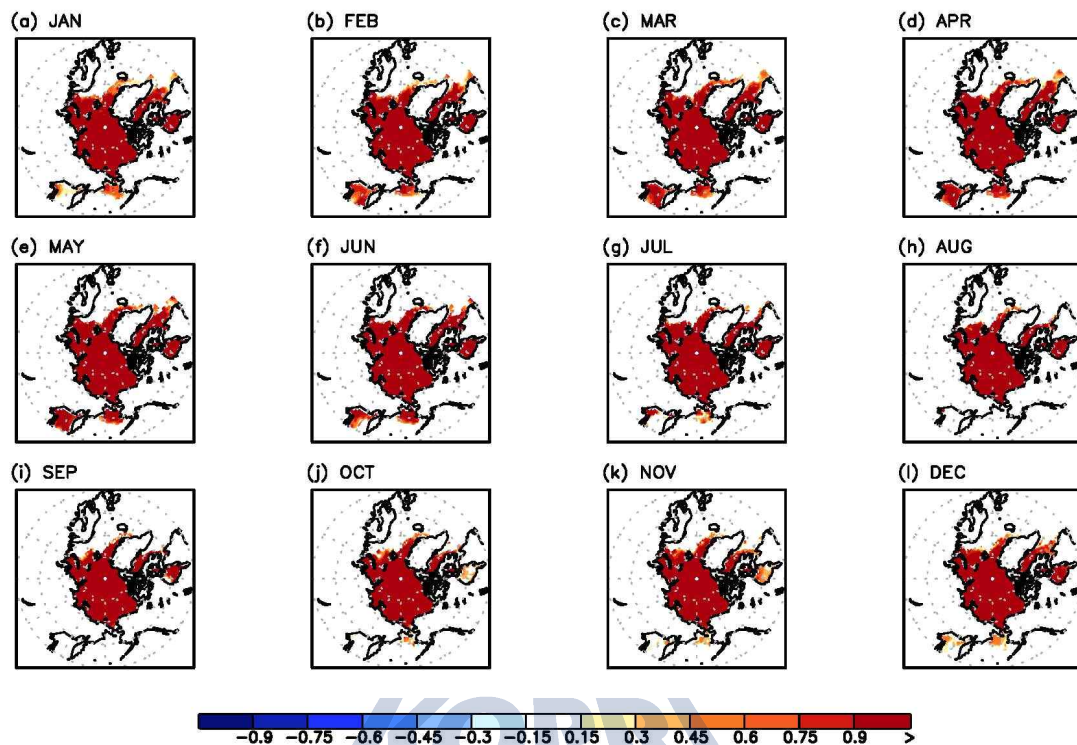


그림 13. 재분석 자료(PIOMAS)와 해빙 자료동화 시스템 버전1 모형적분 결과의 해빙 두께 월별 상관관계. Period: 1990.01.01~2008.12.31, Plane projection: 50° N~90°N.

Sea-ice concentration correlation

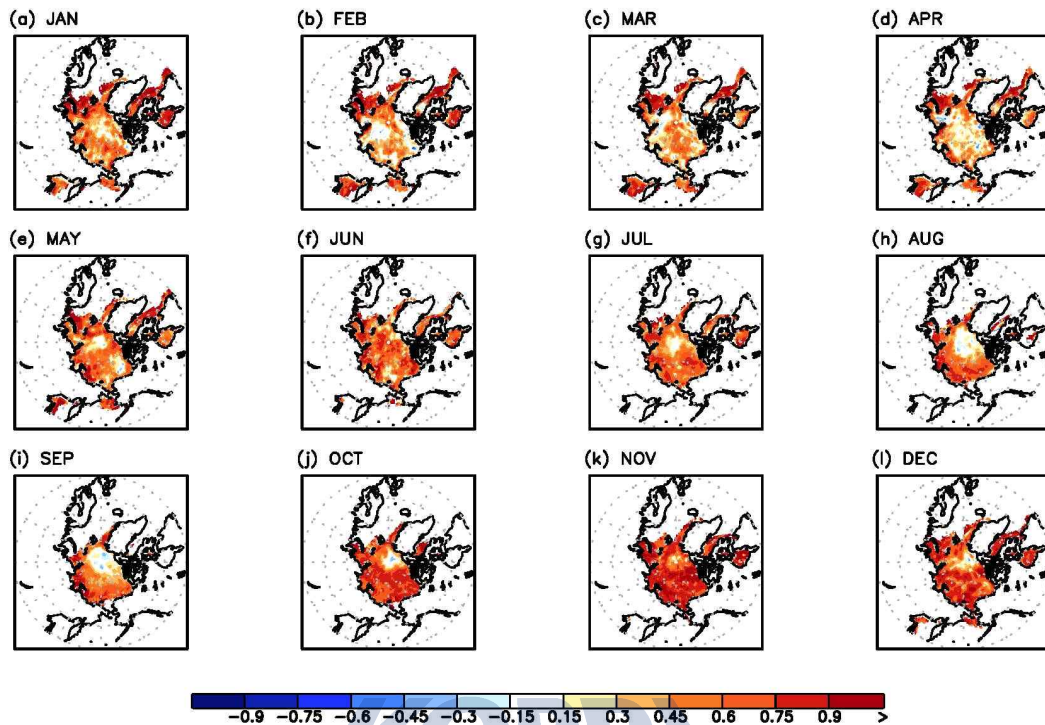


그림 14. 재분석 자료(OISIC.v2)와 해빙 자료동화 시스템 버전1 모형적분 결과의 해빙 농도 월별 상관관계. Period: 1990.01.01~2008.12.31, Plane projection: 50°N~90°N.

종합적으로 너징 기반 초기화 시스템의 구축을 확인하기 위해 모형과 관측의 평균장 차이(Bias)를 분석하였다. 그림 15a는 해빙 자료가 초기화 되지 않은 모형 적분을 이용한 분석 결과를 나타낸 것이고, 그림 15b는 해빙 자료동화 시스템 버전1을 통해 해빙 자료가 초기화된 모형 적분을 이용해서 분석 결과를 나타낸 것이다. 두 그림을 비교해 보면, 먼저 기준 실험(그림 15a)에서 재분석 자료와의 평균장 차이가 세 변수 모두 큰 것을 볼 수 있다. 먼저 그림 15a에서 해수면 온도(왼쪽)의 경우 다년생 해빙이 존재하는 그린란드 북쪽 해안을 제외하고 큰 음의 바이어스가 나타난다. 해빙 농도(가운데)는 북극해 지역에서 바이어스가 거의 나타나지 않지만, 동-그린란드해류(East Greenland Current, EGC)에 의해 해빙이 지속적으로 유출되는 그린란드 해(Greenland sea)지역에 큰 양의 바이어스가 나타남을 보인다. 해빙 두께(오른쪽)는 북극해(Arctic ocean) 전역에 걸쳐 큰 양의 바이어스가 나타남을 보인다. 즉, 기준 실험의 경우 해수면 온도와 해빙 두께 변수에서 큰 바이어스가 나타나고, 앞서 두 변수의 초기화가 필요함을 설명한바와 견주었을 때 예측성이 담보될 만한 초기조건 또한 형성하기 어렵다는 것을 의미한다.

반면, 해빙 자료동화 시스템을 통한 모형 적분 결과(그림 15b) 앞서 기준실험에서 보인 바이어스가 유의미한 수준으로 감소된 것을 확인할 수 있다. 해수면 온도(왼쪽)의 경우는 약한 너징 강도로 인해 바이어스의 감소 정도가 작지만, 해빙 변수의 경우는 기준 실험에서 나타난 바이어스가 거의 사라진 것을 확인할 수 있다. 해빙 농도(가운데)의 경우는 바렌츠 해와 그린란드 동부 지역에서 0.15~0.3% 정도의 양의 바이어스가 나타난다. 해빙 두께(오른쪽)의 경우 기준실험에서 보인 바이어스가 모두 사라진 것을 확인할 수 있다. 이에 따라, 해빙 너징 기반 자료동화 시스템 버전1이 성공적으로 구축되었음을 확인할 수 있다.

또한 그림 16은 북극 해빙면적의 기후장을 시계열로 분석한 결과이다. 재분석 자료에 비해 전 계절에 과대모의를 하는 기준실험의 결과와는 달리, 해빙 초기화 시스템의 결과 전반적으로 재분석자료와 비슷한 결과를 보인다. 11월부터 3월까지 다소 과대모의 경향이 있지만 4월부터 10월까지의 재분석 자료와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이는 해빙 초기화 결과가 기준실험에 비해 보다 재분석 자료와 비슷한 모형 재현을 수행하고, 그에 따른 현실적인 해빙 초기조건을 생산한다는 것을 암시한다.

Bias of the initial condition

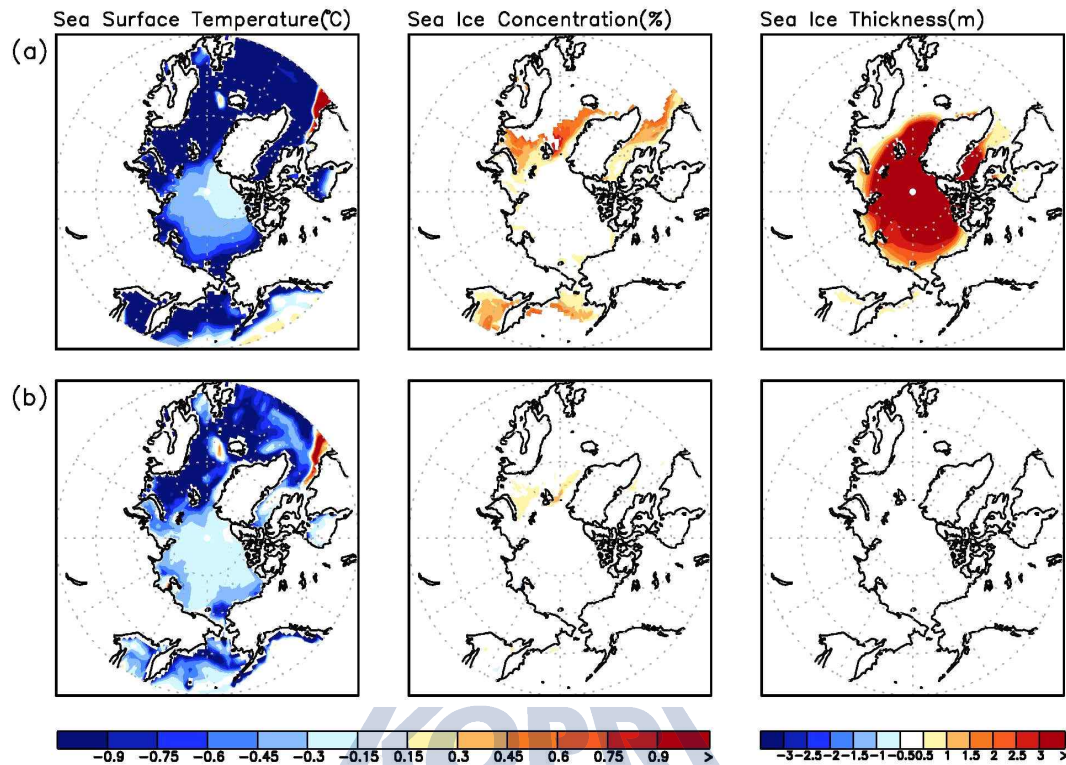


그림 15. 모형과 재분석 자료의 평균장 차이(Bias). 규준실험(a)과 해빙 초기화 시스템 버전1(b) 결과의 해수면 온도(왼쪽), 해빙 농도(가운데), 해빙 두께(오른쪽)

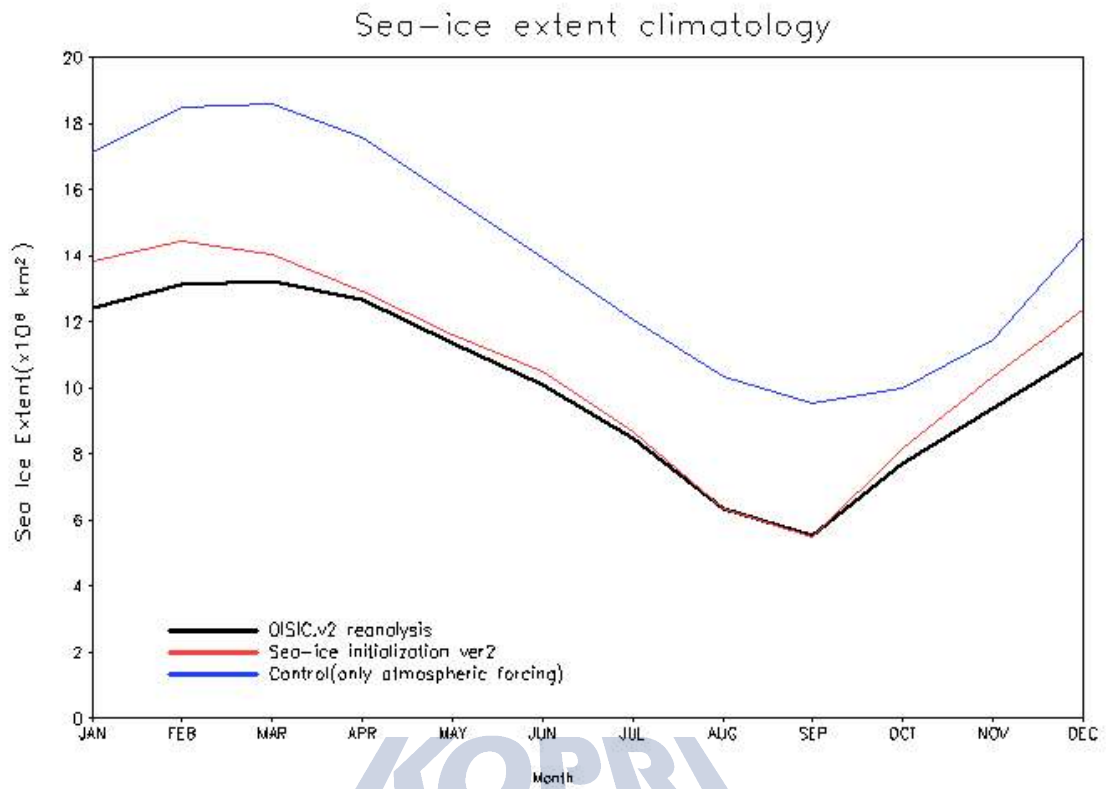


그림 16. 북극 해빙 면적(10^6 km^2) 기후장 시계열. 검정색 선은 재분석 자료 (OISIC.v2), 파란색 선은 규준실험, 그리고 빨간색 선은 해빙 초기화 시스템 버전1의 결과를 표시. Period: 1990.01.01~2008.12.31

제 4 절. 해빙 자료동화 시스템 버전1을 이용한 과거 예측 실험 수행

이전 3절에서 너징 기반의 해빙 자료동화 시스템 버전1이 성공적으로 구축된 것을 확인하였다. 기준실험에 비해 재분석 자료와의 상관성이 증가됨을 보았고(그림 13, 14), 평균장 차이(Bias)도 유의미한 수준으로 감소함을 확인하였다(그림 15). 또한 북극 해빙 면적의 기후장을 시계열로 분석한 결과 기준실험에 비해 초기화 수행 결과가 재분석 자료와 비슷한 결과가 나타남을 확인하였다(그림 16). 즉 이는 구축된 자료동화 시스템이 각 변수별 초기화 시스템보다 현실적인 초기조건을 생성함을 의미하고, 향상된 예측성을 보장할 수 있음을 말한다. 따라서 해빙 자료동화 시스템 버전1을 통해 생성된 초기조건으로 전 지구 해빙 역학 모형(CICEv5.1)이 예측할 수 있는 정도를 파악하기 위한 연구를 수행하였다.

그림 17은 해빙 자료동화 시스템에서 생성된 초기조건을 이용한 과거 예측실험(Hindcast)의 개요를 도식화로 나타낸 것이다. 즉, 대기 강제력(COREv2)은 1990년부터 2008년까지의 기후장(Climatology)을 처방하고, 해빙 초기조건은 너징 기반의 해빙 자료동화 시스템을 이용하여 생성된 초기자료를 사용한 예측실험이다. 예측 기간은 1990년부터 2008년이고, 매년 9월 1일부터 다음해 8월 31일까지 1년 적분된 모형 예측 결과를 생산하였다. 예측실험을 통한 예측 성능은 해빙 재분석 자료와의 상관관계(Correlation skill)를 이용하여 평가하였다.

먼저 그림 18은 재분석 자료인 OISIC.v2와 예측실험 모형적분의 북반구 해빙 농도 상관관계 맵을 나타낸 것이다. 예측 시작 시기인 9월부터 6개월 후인 2월까지 나타났다. 9월부터 2월까지 전반적인 양의 관련성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 동 시베리아 해(East Siberian Sea)나 보퍼트 해(Beaufort Sea) 등의 지역에서 0.5 이상의 높은 관련성이 유지되는 반면, 그린란드 북부나 캐나다 다도해 지역(CAP, Canadian Archipelago)에서 관련성이 낮은 것을 확인할 수 있다. 즉 지역적인 예측성 차이가 나타나는 것을 보인다.

이에 따라 지역적인 예측성 차이를 보고자, 각 해역 별로 지수(Index)를 정하여 상관관계 분석을 통한 예측성(Correlation skill)을 평가하였다(그림 19). 그림 19는 북극의 각 해역별로 재분석 자료와 예측 결과의 상관관계를 비교한 것이다. 파란색 선은 기준실험, 빨간색 선은 초기화 예측 시스템의 결과이다. 모든 해역에서 예측 초기에 초기화 예측 시스템의 상관관계수가 높은 것을 확인할 수 있고, 보퍼트 해나 동 시베리아 해는 예측시작으로부터 4개월 후인 12월까지 0.5이상의 관련성이 유지되는 반면, 다른 해역에선 3개월 후부터 0.5이하로 낮아지는 결과를 확인할 수 있다. 9월에 해빙 면적이 최저점을 기록하여 해빙이 거의 존재하지 않는 카라 해 등에서는 관련성이 없는 것을 확인할 수 있다. 이를 통하여 각 해역에 대한 예측성이 서로 다르게 나타날 수 있음을 의미한다.

이에 더하여, 북극 지역의 총 해빙 면적(Sea-ice area)의 상관관계 분석을 통한

예측성을 평가하였다(그림 20). 그림 20은 북극 해빙 면적(SIA)의 상관관계 분석을 통한 예측성 평가(Correlation)를 나타낸 결과이다. 얇은 검정 실선은 영선(Zero line), 굵은 검정 점선은 0.5선을 나타낸 것이다. 분석 결과, 초기화 예측 시스템이 규준실험에 비해 전반적으로 예측성이 향상된 것을 확인할 수 있다. 또한, 초기화 예측 시스템의 결과 예측시작으로부터 2개월 후인 10월까지 0.6 이상의 예측성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 3개월 후인 11월부터는 0에 가까운 상관계수를 나타내면서 예측성이 낮아짐을 보인다. 즉, 해빙 초기화 시스템의 결과 북극 해빙 면적에 대한 예측성을 9월 해빙 초기조건을 이용하였을 때 약 2개월 정도 담보할 수 있음을 의미하고, 이는 해빙 초기화가 해빙 면적 예측성 향상에 있어 중요하다는 것을 의미한다.



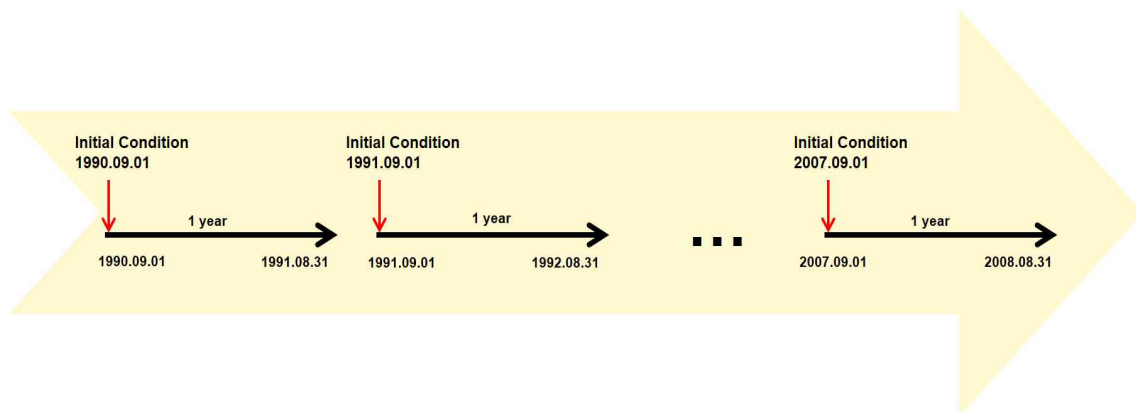


그림 17. 과거 예측실험 수행의 개요. 예측기간: 1990.01.01~2008.08.31. 적분기간: 1년(매년 9월 1일~다음해 8월 31일).



SIC Correlation coefficient

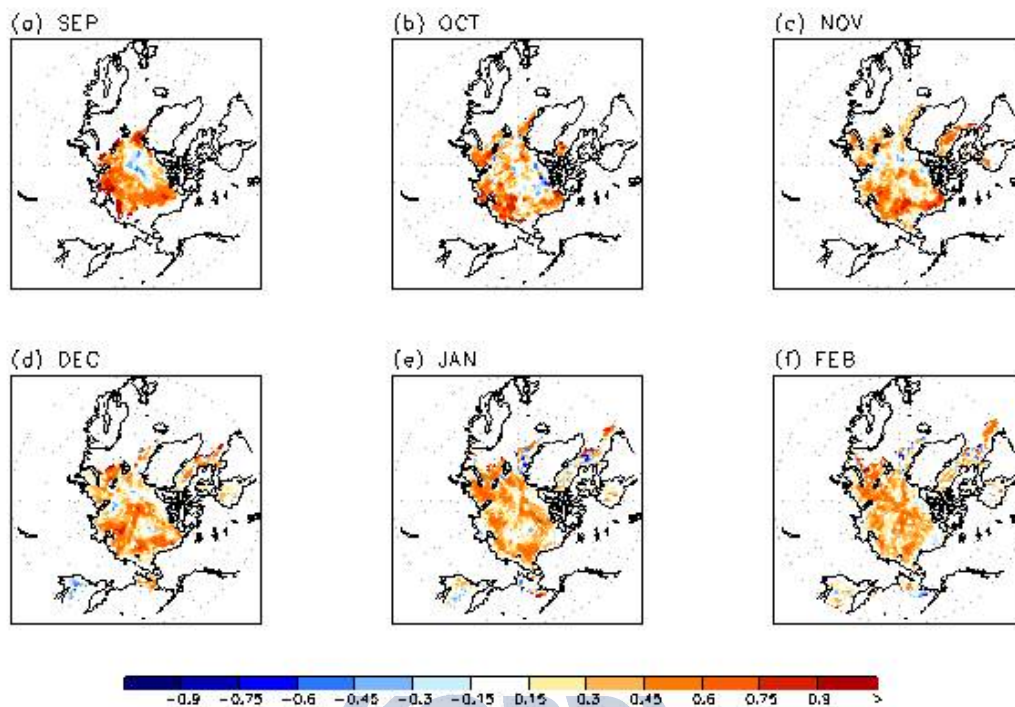


그림 18. 해빙 농도 재분석 자료(OISIC.v2)와 예측실험 모형적분 간 북반구 해빙 농도 상관관계 맵. 분석기간: 1990.09.01.~2008.08.31. 매해 1년씩 적분된 값을 평균.

SIC Correlation for each seas

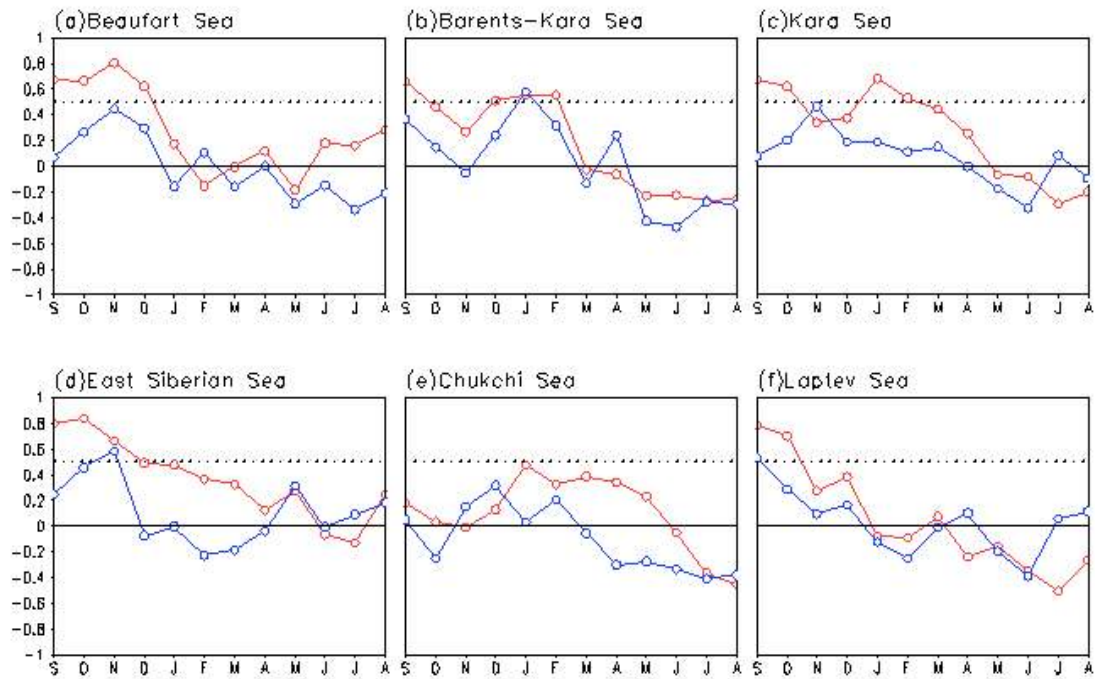


그림 19. 북극의 각 해역에 대한 상관관계 분석을 통한 예측성 평가 결과 (Correlation skill). 빨간색은 해빙 초기화 예측 시스템 결과이고, 파란색은 규준실험의 결과를 나타냄.

극지연구소

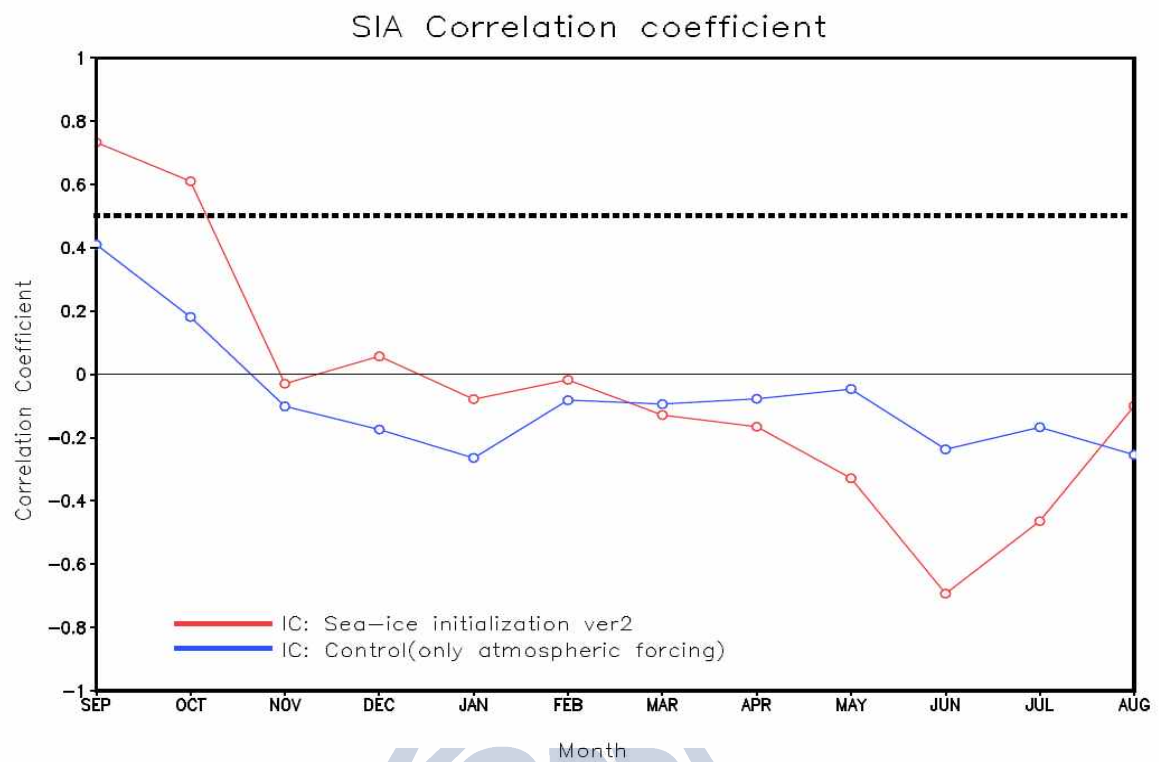


그림 20. 예측실험 모형적분과 재분석 자료(OISIC.v2) 간 북반구 해빙 면적(Sea-ice area) 상관관계 시계열. 초기화 예측 시스템의 결과(빨간색)와 기준실험의 결과(파란색)를 나타냄. 분석기간: 1990.09.01.~2008.08.31. 매해 1년씩 적분된 값을 평균.

제 5 절. 장기 적분을 통한 해빙 주요 변수들의 배경 공분산장 산출

Ensemble Optimal Interpolation (EnOI) 개발을 위한 배경 오차 공분산장 (Background error covariance) 계산을 위해 1990년부터 2008년까지 대기 강제력을 이용하여 적분된 해빙 모형의 적분 결과를 이용하였다. 배경 오차 공분산장 행렬은 NMC방법을 사용하여 생성되었으며, 섭동을 정의하기 위한 두 상태벡터(State vector) 간의 차이는 5일 간격을 이용하였다. 추후 섭동을 정의하기 위한 시간 차이에 대한 민감도 실험을 통해, 시간 차이가 해빙 자료 동화 결과에 주는 영향을 실험할 것이다. 또한, 각 월별로 별도의 배경 오차 공분산장 행렬을 생성하기 위하여 각 계절별로 별도의 계산을 수행하였는데, 월별로 별도의 계산을 수행한 이유는 해빙 변수의 경우 계절별로 평균장이 매우 다른 모습을 보이며, 해빙이 완전히 녹은 경우와 완전히 녹지 않은 경우가 한 그리드 포인트에서 계절별로 공존하는 모습을 보이기 때문에 모든 계절을 함께 사용할 경우 자료 동화 기법의 가장 기본이 되는 배경 오차 공분산장 행렬을 구성하는 변수의 분포가 가우시안 분포가 되지 않기 때문이다.

특정 지역의 해빙 농도와 전 지구 해빙 농도 간의 배경 오차 공분산장은 특정 지역을 중심으로 높은 상관성을 보이며, 공간적으로 멀리 떨어질수록 관련성이 떨어지는 모습을 보인다(그림 21). 150E, 55N과 같은 아극지역 공간적인 분포는 대략 위경도 10도 내에서만 높은 상관성을 보이고, 그 외의 지역은 거의 관련이 없는 모습을 보인다. 이는 특정 지역의 해빙 관측이 근처 위경도 10도 내의 지역에만 영향을 줄 수 있음을 암시한다. 이를 통해 해빙 농도 관측의 관련성이 지역적으로 크지 않을 수 있음을 알 수 있으며, 이는 해빙의 정확한 예측을 위해서는 해빙 농도의 관측이 굉장히 조밀하게 분포하고 있어야 함을 암시한다. 반면 극 지역으로 향할수록 한 지역의 해빙 농도와 더 넓은 지역에 걸쳐 상관성이 나타나며, 동시에 양의 관련성뿐만 아니라 음의 관련성 또한 나타남을 확인할 수 있다. 향후, 전 지구적인 분포를 심층 분석하여 관측이 가장 효율적으로 예측성을 높일 수 있는 지역에 대한 연구와 이를 활용한 자료 동화 기법 개발을 수행할 것이다.

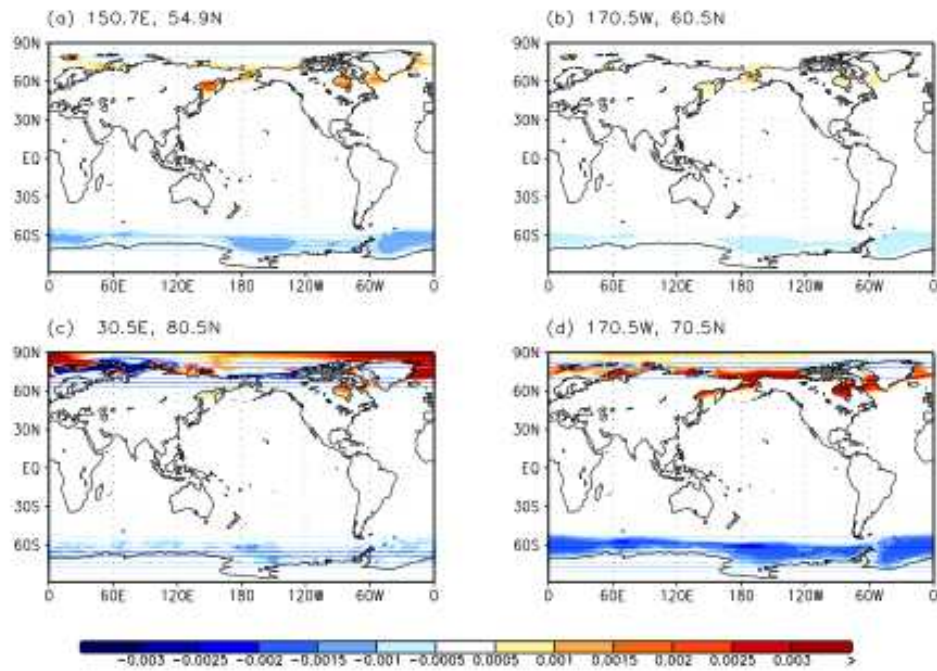
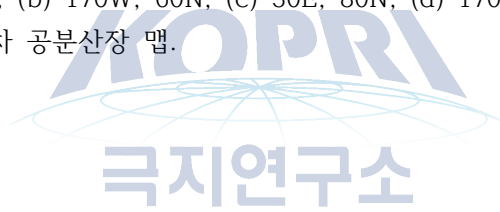


그림 21. (a) 150E, 55N, (b) 170W, 60N, (c) 30E, 80N, (d) 170W, 70N 지역과 전 지구 해빙 농도 간의 배경 오차 공분산장 맵.



제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

본 당해 연도 연구에서는 너징 기법에 기반을 둔 해빙 면적 변수의 초기화 기법을 개발하고, 최적 내삽(EnOI) 기법을 개발하기 위한 해빙 변수의 특성을 파악하기 위해 배경 공분산장을 산출하고자 하였다. 당해 연도에서 수행한 세부 연구 내용은 다음 표와 같다. 또한 한국 기상학회 2017년 봄 학술대회에서 이정길 연구원이 ‘중장기 북극 해빙 예측을 위한 해빙 역학 모형의 너징 기반 초기화기법 개발’이라는 제목으로 포스터 발표를 통하여 해빙 역학 모형을 이용한 해빙 변수 초기화의 중요성을 논하고, 북극 해빙 예측성 및 극 지역, 중위도 지역 기후 예측성 향상에 대한 방향을 제시하기도 하였다.

당해 연도 연구개발 목표	세부 연구개발 내용	달성도(%)
너징 기법에 기반한 해빙 면적 변수 초기화 기법 개발	전 지구 해빙 역학 모형 CICE5 구축	100%
	해빙 농도 및 해빙 두께 변수의 재분석 자료 확보	100%
	너징 기법에 기반을 둔 일 평균 해빙 농도 및 두께 변수의 초기화 기법 개발	100%
EnOI 기법 개발을 위한 해빙 변수 특성 파악 및 배경 공분산장 산출	해빙 모형 내 예단 변수들 파악	100%
	해빙 농도, 두께 등 해빙 주요 변수들의 확률 분포도 산출	100%
	해빙 모형 내 주요 변수들의 계절적 특성 파악	100%
	장기 적분을 통한 해빙 주요 변수들의 배경 공분산장 산출	100%

제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통하여 개발될 해빙 초기화 기법은 국내의 연구자들이 국제적으로 해빙 예측성에 대한 연구를 선도할 수 있는 필요조건이 될 수 있음과 동시에 이를 기반으로 북극해의 중장기 예측성, 북극 항로 예측에도 활용할 수 있다는 장점이 있다. 최종적인 본 연구개발 결과의 활용방안은 다음과 같다.

- 국내 독자적인 북극 해빙 예측 기술력 확보
- 북극해 기후 변동성 예측 시스템 개발을 통한 북극 기상 예측 선진화에 도움
- 북극해 해빙 예측성 확보를 통한 중위도 기후 예측성 증대, 이를 활용한 북극해 중요도 홍보 및 이해 증진
- 북극해빙 중장기 예측 시스템을 활용하여, 상업적 활용이 가시화되고 있는 북극 항로의 최적항로 개척과 안전한 항행을 위한 체제에 응용
- 안전성과 경제성을 확보할 수 있는 항로 개척을 위한 극한기후, 해빙의 변화에 대한 예측 정보 제공
- 20년 이상 장기간의 북극해 재분석 자료 생산을 통한 국제 연구 주도
- 북극해 예측 시스템 개발을 통한 북극해 지역 해빙 예측성 향상
- 북극해 항로 개발 시스템 구축을 통해 국가 산업 및 경제에 기여

극지연구소

제 6 장. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

역학 모형을 초기화하여 해빙 및 기후 예측성 향상을 도모하는 연구는 국제적으로 세계 여러 기관에서 활발하게 진행되고 있다.

○ 워싱턴 대학 극지 과학센터(Polar Science Center)

: 너징 기법을 이용하여 해빙 변수의 초기화 기법을 개발함. 해빙 농도와 해빙 속력(Ice-velocity) 변수를 독립적으로 초기화 함. 해빙 농도 변수만 초기화 한 실험보다 해빙 속력을 함께 초기화 한 실험에서 예측성 향상을 보임.

○ 막스 플랑크 기상 연구소(Max Planck Institute for Meteorology)

: 너징 기법을 이용하여 해빙 농도 변수의 초기화 기법을 개발하였고, 변수의 다변량(Multivariate) 특성으로 해빙 두께 변수 초기화를 시도함. 해빙 두께 초기화 수행을 통한 예측성 향상이 나타남을 확인하였음.

○ 베르겐 대학 난센 환경 및 원격탐사 센터(Nansen Environmental and Remote Sensing Center)

: 앙상블 칼만 필터(EnKF) 기법을 이용하여 해빙 농도 변수의 초기화 기법을 개발하였고, 또한 해빙 두께 변수의 위성 관측 자료 시범적인 초기화 기법을 개발함. 해빙 두께 초기화의 경우 이용 자료의 타당성에 개의치 않고, 해빙 두께 초기화의 실현가능성(Practical)을 보임. 또한 해빙 두께 초기화가 해양 변수 및 해빙 변수에 미치는 영향 등을 분석하여 해빙 두께 초기화의 중요성을 제시함.

○ 루벤 카톨릭 대학 조르주 르메르트 지구 기후 연구 센터(Georges Lemaître Centre for Earth and Climate Research)

: 앙상블 칼만 필터(EnKF) 기법을 이용하여 해빙 농도 변수의 위성 관측 자료 초기화 기법을 개발함. Multivariate 특성으로 해빙 두께 변수 초기화 수행.

○ 일본 기상청 기상 연구소(Japan Meteorological Agency)

: 3차원 변분법(3D-Var)을 이용하여 해빙 농도 변수의 초기화 기법을 개발함. 북반구와 남반구 해빙 농도의 향상된 모형 재현 확인.

제 7 장. 참고문헌

- Bekkers, E., J.F. Francois, and H. Rojas-Romagosa (2015) Melting Ice Caps and the Economic Impact of Opening the Northern Sea Route. CPB Discussion Paper, 307, Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis. 1-44.
- Bitz, C.M., M.M. Holland, A.J. Weaver, and M. Eby (2001) Simulating the ice-thickness distribution in a coupled climate model. *Journal of Geophysical Research*, 106, 2441-2463.
- Chevallier, M., D. Salas-Mélia, A. Voldoire, M. Déqué, and G. Garric (2013) Seasonal Forecasts of the Pan-Arctic Sea Ice Extent Using a GCM-Based Seasonal Prediction System. *Journal of Climate*, 26, 6092-6104.
- Francis, J.A., and S.J. Vavrus (2012) Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical Research Letters*, 39, L06801.
- Gloersen, P., W.J. Campbell, D.J. Cavalieri, J.C. Comiso, C.L. Parkinson, and H.J. Zwally (1993) Arctic and Antarctic Sea Ice, 1978-1987: Satellite Passive Microwave Observations and Analysis. National Aeronautics and Space Administration, NASA-SP-511, 290pp.
- Hoke, J., and R. Anthes (1976) The initialization of numerical models by a dynamic relaxation technique. 104, 1551-1556.
- Hunke, E.C., W.H. Lipscomb, A.K. Turner, N. Jeffery, and S. Elliott (2015) CICE: the Los Alamos sea ice model documentation and software user's manual version 5.1. Los Alamos National Laboratory Tech, Rep. LA-CC-06-012, 1-116
- Kistler, R.E. (1974) A study of data assimilation techniques in an autobarotropic primitive equation channel model. MS Thesis, Dept of Meteorology, Penn State University.
- Krishfield, R.A., and D.K. Perovich (2005) Spatial and temporal variability of oceanic heat flux to the Arctic ice pack. *Journal of Geophysical Research*, 110, C07021.

- Large, W.G., and S.G. Yeager (2004) Diurnal to Decadal Global Forcing For Ocean and Sea-Ice Models: The Data Sets and Flux Climatologies. Technical Report TN-460+STR, NCAR, 105pp
- Lindsay, R.W., and J. Zhang (2005) Assimilation of Ice Concentration in an Ice-Ocean Model. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23, 742-749.
- Lisæter, K.A., G. Evensen, and S. Laxon (2007) Assimilating synthetic CryoSat sea ice thickness in a coupled ice-ocean model. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 112, C07023.
- Massonnet, F., T. Fichefet, and H. Goosse (2015) Prospects for improved seasonal Arctic sea ice predictions from multivariate data assimilation. *Ocean Modelling*, 88, 16-25.
- Mathiot, P., C. König Beatty, T. Fichefet, H. Goosse, F. Massonnet, and M. Vancoppenolle (2012) Better constraints on the sea-ice state using global sea-ice data assimilation. *Geoscientific Model Development*, 5, 1501-1515.
- Overland, J.E., and M. Wang (2010) Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice. *Tellus A*, 62A, 1-9.
- Reynolds, R.W., N.A. Rayner, T.M. Smith, D.C. Stokes, and W. Wang (2002) An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate. *Journal of Climate*, 15, 1609-1625.
- Sigmond, M., J.C. Fyfe, G.M. Flato, V.V. Kharin, and W.J. Merryfield (2013) Seasonal forecast skill of Arctic sea ice area in a dynamical forecast system, *Geophysical Research Letters*, 40, 529-534.
- Stroeve, J., M.M. Holland, W. Meier, T. Scambos, and M. Serreze (2007) Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophysical Research Letters*, 34, L09501.
- Tietsche, S., D. Notz, J.H. Jungclaus, and J. Marotzke (2013) Assimilation of sea-ice concentration in a global climate model-physical and statistical aspects. *Ocean Science*, 9, 19-36.

- Tietsche, S., J.J. Day, V. Guemas, W.J. Hurlin, S.P.E. Keeley, D. Matei, R. Msadek, M. Collins, and E. Hawkins (2014) Seasonal to interannual Arctic sea ice predictability in current global climate models. *Geophysical Research Letters*, 41, 1035–1043.
- Toyoda, T., Y. Fujii, T. Yasuda, N. Usui, K. Ogawa, T. Kuragano, H. Tsujino, and M. Kamachi (2016) Data assimilation of sea ice concentration into a global ocean–sea ice model with corrections for atmospheric forcing and ocean temperature fields. *Journal of Oceanography*, 72, 235–262.
- Wang, W., M. Chen, and A. Kumar (2012) Seasonal Prediction of Arctic Sea Ice Extent from a Coupled Dynamical Forecast System, *Monthly Weather Review*, 141, 1375–1394.
- Yang, Q., S.N. Losa, M. Losch, J. Liu, Z. Zhang, L. Nerger, H. Yang (2015) Assimilating summer sea-ice concentration into a coupled ice–ocean model using a LSEIK filter. *Annals of Glaciology*, 56, 38–44.
- Zhang, J., and D.A. Rothrock (2003) Modeling Global Sea Ice with a Thickness and Enthalpy Distribution Model in Generalized Curvilinear Coordinates. *Monthly Weather Review*, 131, 845–861.

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.