TSPE16010-001-12

남북극해빙의 시공간 변화 패턴 관련 극지역 대기 대순환 변동 통계 모델링

Statistical analysis and modelling of large-scale atmospheric circulation associated with spatio-temporal changes in Antarctic and Arctic sea ice

KOPRI
극지연구소

전남대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “과거, 현재의 극지기후 관측과 재현을 통한 기후변화 메커니즘 규명” 과제의 위탁연구 “남북극해빙의 시공간 변화 패턴 관련 극지역 대기 대순환 변동 통계 모델링” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 1. 31

(본과제) 총괄연구책임자 : 김성중

위탁연구기관명 : 전남대학교

위탁연구책임자 : 정지훈

위탁참여연구원

“ : 심태현

“ : 정의현

“ : 최자현

“ : 김경민

“ : 김종호

“ : 고영대

“ : 정지윤

“ : 김민석

보고서 초록

<table>
<tr><td>위탁연구과제명</td><td colspan="5">남북극해빙의 시공간 변화 패턴 관련 극지역 대기 대순환 변동 통계 모델링</td></tr>
<tr><td>위탁연구책임자</td><td>정지훈</td><td>해당단계
참여연구원수</td><td>9명</td><td>해당단계
연구비</td><td>70,000,000원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">전남대학교 지구환경과학부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 :　　상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약</td><td>보고서
면수</td><td>32</td></tr>
<tr><td colspan="6">당해연도에는 남북극 해빙의 시공간 변화 패턴을 탐지하고 이와 관련된 극지역 대기 변동을 통계 모델링을 통해 재현하여 상호변동 메커니즘을 연구하였음

현재-근미래 기후에서의 남북극 해빙 변화 특성 연구:
• 남북극해빙의 시공간적 변화 특성을 SEOF를 활용하여 객관적으로 탐지하였음
• SEOF 주 성분 시계열로부터 2000년대 이후 남북극해빙의 급격한 변화 시기를 탐지하고 변화기간 동안 해빙의 시공간적 변화 특성을 진단함
• 현재-미래기후에서 대기-해양 상호작용에 의한 해빙 주요 변동성 분석을 통해 여름철 급격한 해빙의 변화 메커니즘이 대기순환 변화에 기인한 것으로 파악함

남북극해빙의 시공간 변동성 분석 연구:
• CMIP5 미래기후 실험결과에 나타나는 남북극해빙 변화 및 극지 기후변동성 분석하고 그 영향을 정량화하고 관측과 유사한 급격한 해빙변화를 탐지함
• 남북극 해빙의 SEOF 분석을 활용하여 근 미래 해빙 감소 추이에 의한 남북극 기후변동성을 예측함
• 수치모델링을 활용하여 SEOF 기반 각 모드와 관련된 대기순환장을 분석함</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">남북극해빙, 해빙감소, SEOF, 기후변화, 대기순환, 기후모델링</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Arctic & Antarctic Sea ice, sea ice reduction, SEOF, climate change, atmospheric circulation, climate modelling</td></tr>
</table>

KOPRI 극지연구소

요 약 문

Ⅰ. 제 목

남북극해빙의 시공간 변화 패턴 관련 극지역 대기 대순환 변동 통계 모델링

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

남북극해빙의 최근 시공간 패턴의 변화를 객관적인 방법을 통해 탐지하고, 이와 관련된 극지 및 중/고위도 지역의 대기대순환 변동을 모델링하여, 특히 기후변화과정에서 북극해빙 변화에 따른 북극-중위도 대기대순환 상호작용 메커니즘을 이해한다.

이를 통해 본과제인 과거, 현재 극지기후 재현 및 예측을 통한 기후변화 메커니즘 규명에 기여할 수 있으며, 급격한 기후변화 시기에 기후변동성 예측의 정확도를 향상시킬 수 있다.

KOPRI 극지연구소

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1. 현재-근 미래기후에서의 남북극해빙 변화 특성 연구
   - 현재로부터 근미래(~10년) 및 미래(~21세기) 기후에서 남북극해빙 변화 특성 탐지
   - 남북극해빙의 급격한 변화시기를 탐지, 변화기간동안 해빙의 시공간적 변화 특성 진단
   - 현재-미래기후에서 대기-해양 상호작용에 의한 해빙 주요 변동성 변동 연구

2. 남북극해빙의 시공간 변동성 분석 연구
   - CMIP5 기후 실험결과에 나타나는 남북극해빙 변화, 극지 기후변동성 탐지
   - 남북극해빙/해수면 온도 SEOF 분석, 근미래 해빙감소세에 의한 남북극 기후변동성 예측
   - 수치모델링을 이용한 북극해빙 주변동성과 관련된 대기순환장 연구

Ⅳ. 연구개발결과

1. SEOF를 활용한 남북극해빙의 시공간 변화 특성 객관적 탐지
2. 관측자료 및 미래기후 모델자료에서 해빙의 급격한 변화 시기를 탐지 및 영향 정량화
3. 여름철 대기순환에 의한 해빙의 급격한 변화 메커니즘 분석
4. SEOF를 활용한 남북극 해빙의 근 미래 통계적 예측 방안 수립
5. 해빙 변화와 관련된 대기순환 수치모델링

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

1. 북극해빙과 동아시아 겨울몬순의 상호변동성 메커니즘 파악을 통한 동아시아 겨울몬순의 중, 장기예측성 향상
2. 기후모형의 해양-대기 상호작용, 해빙과 관련된 기후 피드백을 파악하여 오차 및 예측성을 개선
3. 기후모형들이 모의하는 미래 북극해빙 변화, 동아시아 겨울몬순 변화 특성을 객관적으로 파악하고 CMIP5 기후모형들의 비교 분석을 통해 모델의 개선 방향성 제시
4. 한파 및 폭설의 중, 장기예측성 향상에 기여 및 미래 이상한파 발생 변화 예측의 이론적 배경으로 활용

KOPRI 극지연구소

S U M M A R Y

I. Title

Modelling the impacts of recent change in Arctic sea ice on wintertime atmospheric circulation over mid- to high-latitudes

II. Purpose and Necessity of R&D

Recent changes in Arctic & Antarctic sea ice are determined based on objective, statistical methodology, and the associated changes in atmospheric circulation over polar and mid- to high-latitudes are modelled by global climate model experiments. This is for understanding the interaction mechanism of polar(especially, Arctic)-extratropic teleconnection associated with sea ice changes under climate warming.

The results will contribute to our better understanding of climate change mechanism through reproducing and predicting the past and future climate, and will enhance the climate predictability during a rapid climate change period.

III. Contents and Extent of R&D

1. Study on the characteristics of Arctic and Antarctic sea ice change in current, near-future climate

- Detecting the characteristics of the Antarctic and Arctic sea ice change from the present to the near future (~ 10 years) and future (~

21st century) climate

- Detecting the timing of rapid change of sea ice in the Antarctic and Arctic, and diagnosing the time-space change characteristics of sea ice during the change period
- Study on changes in sea-ice variability associated with atmospheric-oceanic interactions in present-future climate

2. Analysis of Spatio-temporal variability of Arctic an Antarctic sea ice

- Detection of Arctic and Antarctic sea ice changes and polar climate variability in CMIP5 simulations
- SEOF analysis of Antarctic and Arctic sea-ice/sea-surface temperature, and estimation of climate variability of South-North Pole due to declining sea ice in the near future
- Modelling study on large-scale atmospheric circulation associated with Arctic sea ice variabilities

IV. R&D Results

KOPRI 극지연구소

1. Investigation of characteristics on spatio-temporal variability of Arctic and Antarctic sea ice using SEOF
2. Detection and quantification of impacts on rapid changes in sea ice from observed and CMIP5 data
3. Machanism of sudden change in sea ice due to atmospheric circulation in summer
4. Finding forecasting method of Arctic and Antarctic sea ice in near-future using SEOF statistics
5. Research of Simulated atmospheric circulation associated with sea ice variability

V. Application Plans of R&D Results

1. Better understanding of Arctic sea ice and East Asian winter monsoon

co-variability will enhance the predictability of extended to long-range forecast of East Asian winter monsoon.

2. Better understanding of air-sea/ice interaction and associated climate feedbacks. will improve climate models' performance.
3. Investigation of the future changes in Arctic sea ice and East Asian winter monsoon predicted by climate models (CMIP5 models) will contribute to improve climate models' performances.
4. Results will contribute to enhance the predictability of cold surge and heavy snowfall and their future changes.

KOPRI
극지연구소

목 차

제 1 장 서론 9

제 2 장 국내외 기술개발 현황 10

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 11

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 26

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 28

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 29

제 7 장 참고문헌 30

KOPRI
극지연구소

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

당해연도 연구에서는 총괄과제의 연구목표의 하나인 극지(해빙)-중고위도 대기순환 변동 메커니즘 파악을 위해, 남북극 해빙의 시공간 변화 패턴을 탐지하고, 이와 관련된 극지역 및 중고위도 대기 변동을 통계모델링을 통해 재현하려 하였다. 특히 급격한 남북극 해빙 변화와 관련된 대기순환 변동 및 그 영향을 객관적으로 파악하려 하였다.

2. 연구개발의 필요성

해빙의 감소 및 변동은 대기-해양 에너지 흐름의 변화를 초래하여 극지역의 해양뿐만 아니라 대기순환에도 큰 변화를 가져온다. 이러한 대기순환 변화는 극지방에만 국한된 것이 아니라 원격전달 메커니즘을 통해 중, 고위도에 걸쳐 광범위하게 나타날 수 있다(e.g., Honda et al., 2009; Kim et al., 2014). 최근 연구결과들에 의하면 해빙의 특정 지역 혹은 특정 패턴의 변화가 북극진동(Arctic oscillation; Thompson and Wallace, 1998) 등과 같은 주요 대기 변동성, 그리고 더 나아가 동아시아 겨울몬순 등과 같은 지역 기후 변동성에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다(e.g., Francis et al., 2009; Honda et al., 2009; Overland and Wang, 2010). 하지만 전반적인 해빙면적 감소 추세 과정에서도 해빙과 관련된 극 및 중/고위도 지역의 대기순환 변동 패턴은 매해 상이하게 나타나고 있다. Semenov and Latif (2015)는 해빙 감소에 따른 대기순환 변동은 매우 큰 비선형성을 나타낸다고 제시하고 있으며, Kug et al. (2015)은 해빙감소에 따른 대기순환 변동은 해빙 감소지역에 따라 매우 상이하게 나타난다고 하였다. 따라서 극지기후 변화와 관련된 기후변동을 정확히 이해하고, 예측하기 위해서는 극지역 해빙 변동을 공간적으로 매우 상세히 파악하고, 수치모델링을 통해 지역별 원격상관 메커니즘을 파악하는 통계-수치모델링 작업이 필요하다. 이는 극지뿐아니라 전구 기후변화 메커니즘 규명을 위해서도 매우 중요한 연구이다.

KOPRI 극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 미국 및 유럽의 과학자들은 극지방의 해빙 변화가 고위도 및 중위도 지역의 대기변동성을 조절한다는 관측 및 모델 실험결과를 제시하고 있음(e.g., Francis et al., 2009; Overland and Wang, 2010; Honda et al., 2009; Francis and Vavrus, 2012; Liu et al., 2012; Tang et al., 2013).

- 이러한 연구들은 대부분 2000년대 이후 나타나는 해빙의 선형 감소세와 관련된 대기 변화에 대한 연구들임. 하지만 최근 해빙의 변화는 선형 변화 뿐 아니라 강한 경년 변동성을 나타내며, 해빙의 수평적 변동성도 매우 크게 나타나고 있음(1차년도 연구결과).

- 해빙감소에 따른 대기순환 변동 연구는 대부분 전체 북극해 혹은 남극해 지역의 해빙의 선형 감소세를 모델에 강제하여 그 민감도를 조사하는 연구가 대부분이나, 최근 연구들은 (e.g., Semenov and Latif, 2015) 이때 대기의 반응에 비선형성이 매우 강하다고 제시하고 있음.

- 남극의 해빙변화에 의한 중-고위도 기후변동성 연구는 국내외적으로도 거의 이루어지지 않고 있음

- 북극해빙 변화에 의한 중-고위도 지역의 전반적 기후변동성에 대한 연구는 상당히 진행된 반면(e.g., Kug et al., 2015), 동아시아 겨울 몬순 및 한파와의 관련성은 아직 연구가 부족한 실정임.

KOPRI 극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 연구개발수행 방법 및 내용

당해연도에는 남북극해빙의 최근 변화와 관련되어 나타나는 시공간 변화 패턴을 탐지하고 이와 관련된 극 및 고위도 지역 대기 변동을 통계 모델링을 통해 재현하여 상호변동 메커니즘 규명 연구를 수행하였다.

연구개발 세부목표에 따른 각 연구수행 방법 및 내용은 아래와 같다.

세부목표1: 현재-근 미래기후에서의 남북극 해빙 변화 특성 연구

- 현재로부터 근미래(~10년) 및 미래(~21세기)기후에서 남북극 해빙 변화의 특성을 객관적 방법(SEOF)을 도입하여 탐지
- 해빙관측자료 및 모델링 결과의 SEOF 분석으로부터 남북극해빙의 급격한 변화시기를 탐지하고 변화기간동안 해빙의 시공간적 변화의 특성을 진단
- 현재-미래기후에서 대기-해양 상호작용에 의한 해빙 주요 변동성의 변화 분석: 대기순환 변화에 의한 여름철의 급격한 해빙변화 메커니즘을 확인

세부목표2: 남북극해빙의 시공간 변동성 분석에 관한 연구

- CMIP5 기후 실험결과에서 나타나는 남북극해빙의 변화 탐지 및 관측결과와의 비교: 대기순환에 미치는 영향을 정량화
- 남북극 해빙의 SEOF 분석에 의한 근미래 해빙감소의 통계적 예측 방안 수립: 남북극 기후 변동성 예측 가능
- 수치모델링을 이용한 북극해빙 주변동성과 관련된 대기순환장 연구

KOPRI 극지연구소

제 2 절 연구개발수행 결과

1. 현재-근미래 기후에서의 남북극 해빙 변화 특성 연구

남북극 해빙(농도)의 시공간 변화 특성을 객관적으로 파악하기 위해 SEOF 분석을 수행하였다(그림 1~4). 해빙자료에 대한 SEOF 분석방법론은 1차년도 보고서에 자세히 기술되어있다.

[그림 1; 남극해빙 분석] 먼저 남극해빙의 SEOF 첫 번째 모드는 남극반도 서쪽 Bellingshausen 해와 Amundsen 해 영역을 제외한 남극해 전 지역에서, 1990년대 후반이후 모든 계절에서 해빙의 농도가 전반적으로 증가하는 패턴을 나타낸다. 두 번째 모드는 Weddell 해와 Ross 해를 중심으로 하는 시소패턴을 나타내며, 주로 연변동성을 나타내 분석기간 동안 특별한 trend는 탐지되지 않는다. 세 번째 모드는 두 번째 모드와 같이 주로 연 변동성을 나타내며 북 Weddell 해에서 아프리카 남해안 - 남극반도 주변간의 시소를 나타내고 있다.

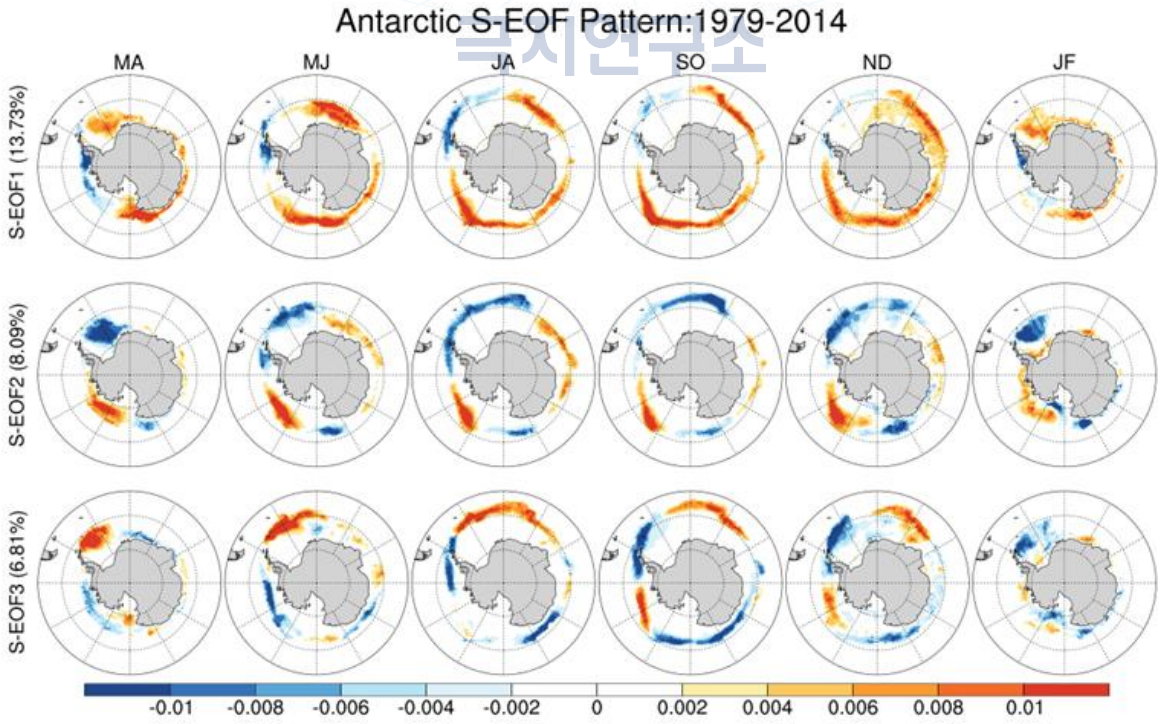

그림 1. 남극 해빙의 SEOF 분석에 의한 시공간 주 변동 모드

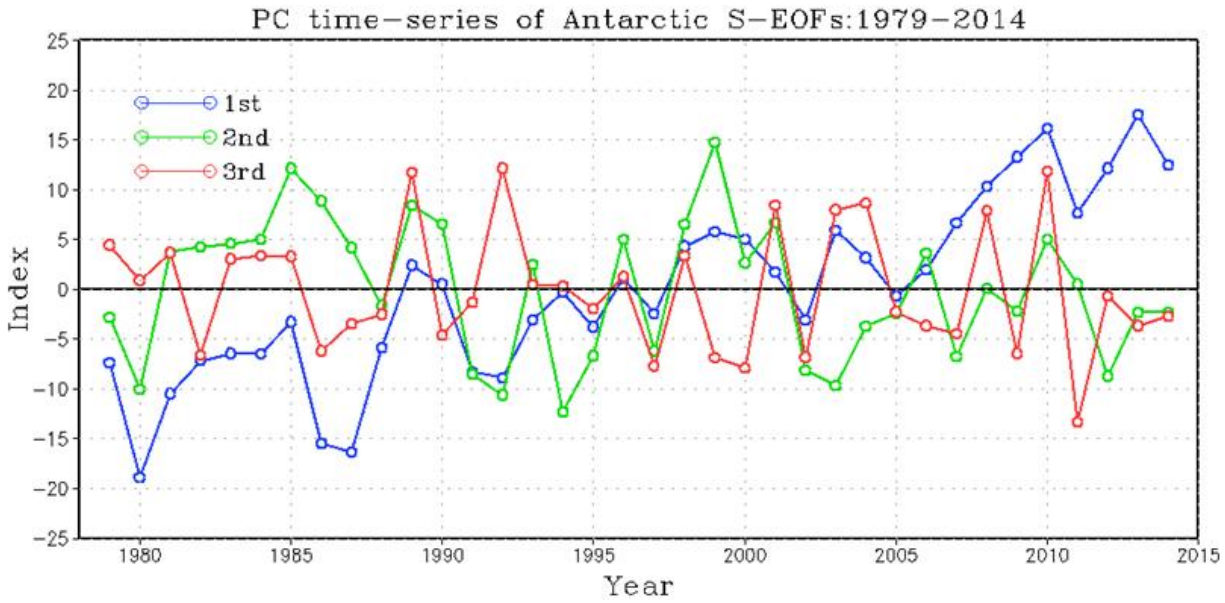

그림 2. 남극해빙의 SEOF 주 성분 모드의 시계열

KOPRI 극지연구소

[그림 3; 북극해빙 분석] 당해연도에는 북극해빙에 대한 SEOF 분석을 SSMI/SSMIS 위성산출 해빙자료를 이용하여 업데이트하였다. 기존 결과와 거의 같은 시공간패턴을 얻었으나, 위성자료를 사용하여 보다 자세한 공간패턴을 산출하였다. SEOF 첫 번째 모드는 권역 전체 변동 모드로 지구 온난화와 관련된 해빙 감소 추세를, 두 번째와 세 번째 모드는 각각 동서모드와 남북모드를 잘 나타내고 있다.

특히 첫 번째 모드의 시계열은 2007, 2012, 2015년과 같은 특이해와 2000년 이후 급격한 해빙감소세를 잘 드러내고 있어 북극 지역의 RILE(Rapid Ice Loss Events; Vavrus et al., 2011) 탐지에 효과적으로 미래기후변화시기의 RILE 탐지에 응용될 수 있다. 세 번째 모드의 시계열의 경우 2009-2014년 기간 동안 급격히 감소하였던 바렌츠-카라해의 해빙감소와 상대적으로 덜 감소하였던 동시베리아-척치해 간의 시소 변동 패턴을 잘 나타내고 있다.

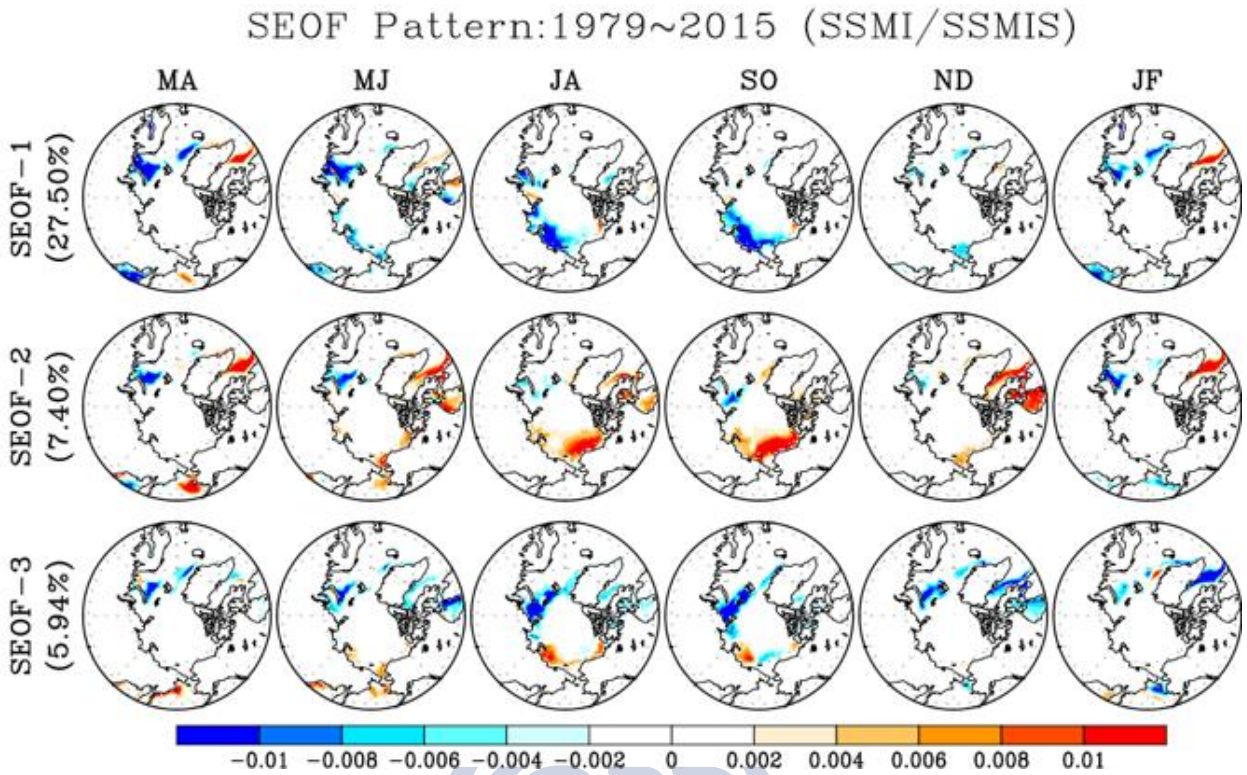

그림 3. 북극 해빙의 SEOF 분석에 의한 시공간 주 변동 모드

KOPRI 극지연구소

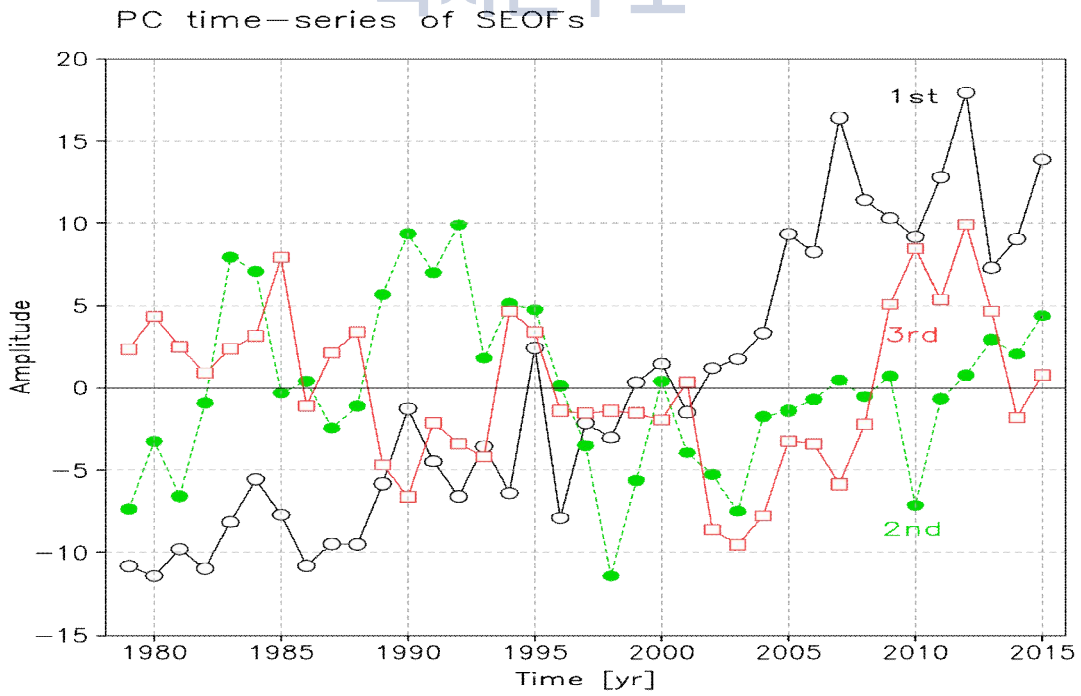

그림 4. 북극해빙의 SEOF 주 성분 모드의 시계열

해빙의 변동성은 대기-해양 상호작용에 의해 많은 영향을 받는다. 특히 최근 여름철에 자주 발생하는 북극해 지역의 anomalous한 고기압성 순환은 해빙의 급격한 감소를 이끌고 있다고 알려져 있다. 2007년의 해빙 극소기가 가장 좋은 예이다(Zhang et al., 2008). 그림 5는 9월 북극해빙전체면적(Arctic sea ice extent)에 회귀된 여름철 해빙농도, 온도, 해수면기압 변동패턴을 나타낸다. 북극해빙면적은 여름철 북극해 전반의 기온상승과도 관련되어있지만, Canadian Basin에 중심을 두는 북극해 고기압성 어노말리와 유라시아의 저기압성 어노말리 형성과도 뚜렷한 관련성이 나타난다. 이는 Zhang et al. (2008)이 제시한 북극횡단류의 강화로 인한 해빙의 추가적인 감소 형태를 잘 나타난다(그림 5).

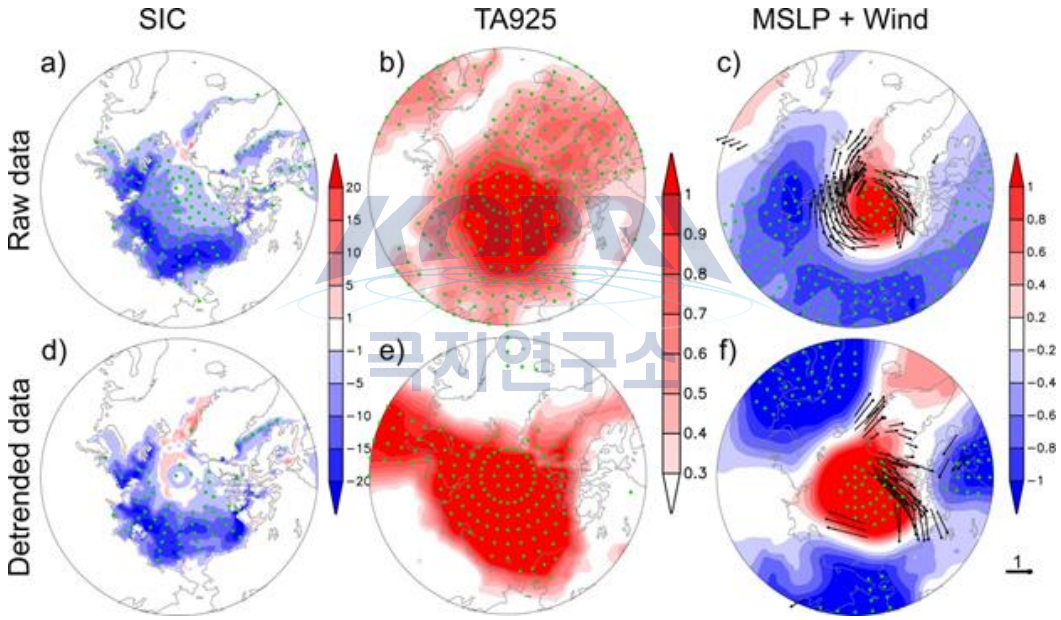

그림 5. 9월 북극해빙면적(Hadley centre자료)에 회귀된 여름철 해빙농도, 온도, 해면기압 및 바람장 (ERA-interim 자료) anomaly

그림 6a는 1979-2014년 기간 동안 관측된 북극해빙의 감소 trend를 나타낸다. 간단한 회귀 분석을 통해 이 trend 중에서 이 기간 동안의 북극해의 온도변화와 관련된 trend와 해수면기압 변화와 관련된 trend를 살펴보았다. 그 결과, 전체 해빙 감소의 약 15% 정도는 대기순환의 변화와 관련된 것으로 나타난다.

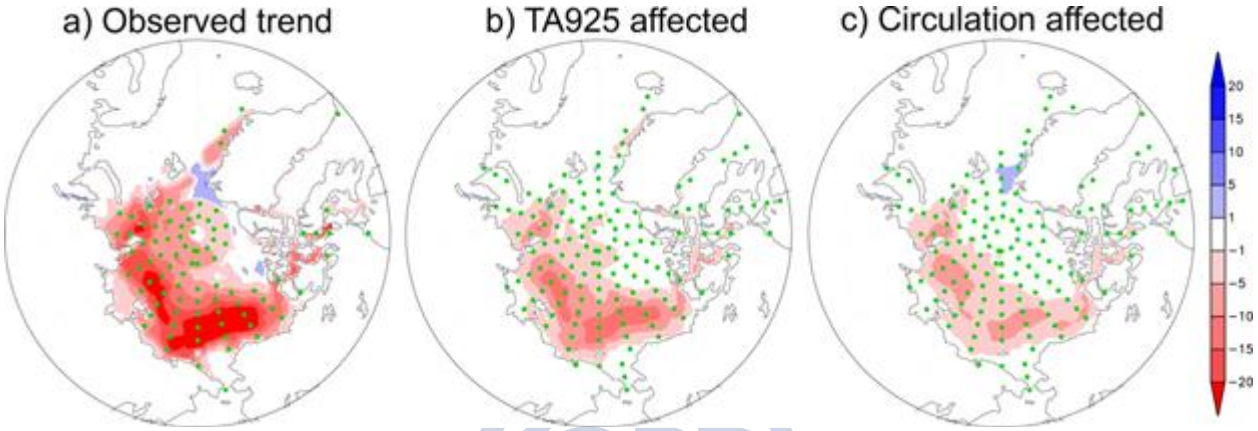

그림 6. 1979-2014년 기간동안의 9월 북극해빙 농도의 선형 trend a), 이 통계적으로 지면근처 온도(925hPa) 변화와 관련된 trend b), 대기순환(해수면 기압) 변화와 관련된 trend c)

KOPRI 극지연구소

2. 남북극해빙의 시공간 변동성 분석 연구

미래기후모델 CMIP5 CGCMs 40개 모델의 1979-2014 기간의 해빙 모의 결과를 이용하여 온실가스 강제력 증가 시나리오에 따른 남북극해빙의 변화를 분석하였다. 각 모델에서 모의하는 해빙농도 및 해빙면적의 변화, 관련된 기온, 대기순환장의 변화등을 조사하였다. 본 보고서에서는 앞 절의 연장선에서 모델에서 나타나는 대기-해양 상호작용과 관련된 해빙 변동성에 집중하여 분석을 진행하였다.

관측자료 분석에서와 같이, 모델이 모의하는 9월 해빙면적에 대한 해면기압 및 바람장 회귀결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 5의 해면기압(바람장)과 유사한 대기-해양 상호작용 패턴을 모의하는 모델이 몇몇 존재하나 상당수의 모델은 관측에서 나타난 수평패턴을 모의하는데 실패하고 있다.

그림 8은 모델과 관측에서 나타나는 해빙 감소세를 비교하고 있다. 모델에서의 해빙 trend는 모델에 따라 매우 다르게 나타나는데, 흥미롭게도 그림 7에 나타나는 패턴이 관측에서의 패턴과 유사할수록, 즉, 모델이 관측에서 나타나는 북극해빙관련 대기-해양 상호작용을 정확히 모의 할수록 관측된 해빙 감소세와 유사한 감소세를 나타내고 있다(별표된 12개 모델). 이는 미래 북극해빙 혹은 기후의 정확한 모의를 위해서는 모델이 대기-해양 상호작용의 정확한 모의가 중요함을 나타낸다.

그림 9는 북극해빙의 감소에 매우 중요한 역할을 하는 대기패턴인 북극해 anomalous high 패턴(그림 5c)의 장기변화를 나타낸다. 모델은 최근 수십 년간 관측에서 나타나는 이 high pressure의 강화현상을 매우 약하게 모의하고 있다(위에서 나타난 12개의 good 모델들은 비교적 이 high pressure의 강화를 강하게 모의하고 있다). 비록 관측에 비해 매우 약한 강도이나 모델 앙상블 결과는 21세기동안 이 high-pressure가 꾸준히 강화될 것으로 예상하고 있다. 따라서 모델결과는 anthropogenic forcing에 의해 근미래의 경우 여름철 북극해 high-pressure 강화 – 해빙의 dynamical 감소가 지속되는 것으로 나타난다.

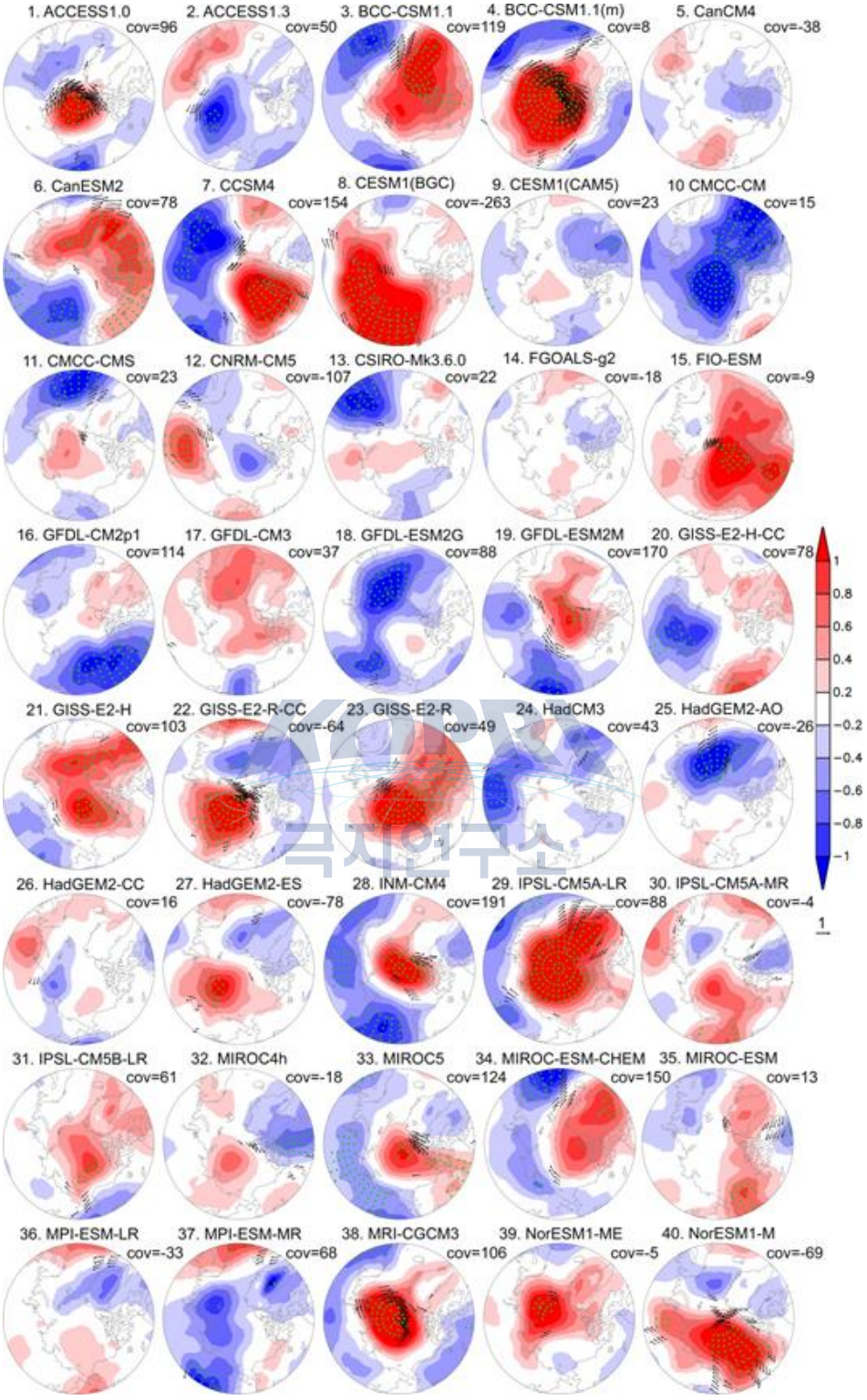

그림 7. CMIP5 40개 기후모델에서 나타나는 9월 해빙면적의 해면기압 및 바람장 회귀 결과. 여기서 cov는 관측에서 나타나는 패턴 (그림 5c)와의 패턴 covariance를 나타냄.

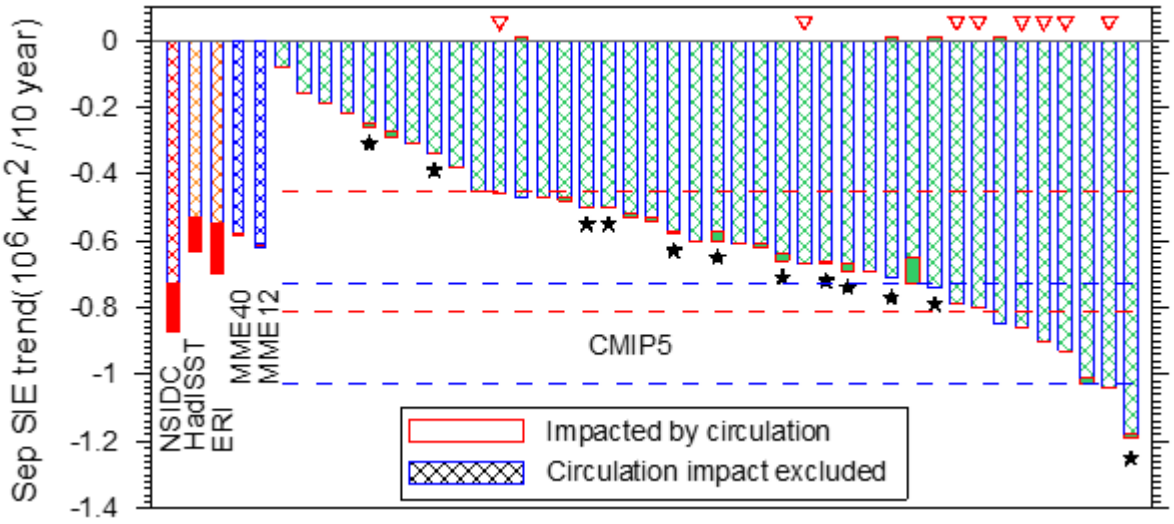

그림 8. CMIP5 40개 모델이 모의하는 1979-2014년 기간의 북극해빙 감소 trend. NSIDC/HadISST는 관측자료에서 나타나는 trend. MME40는 40개 모델 평균 trend. MME12는 그림 7의 cov가 가장 높은 12개 모델을 나타냄(상위 30%).

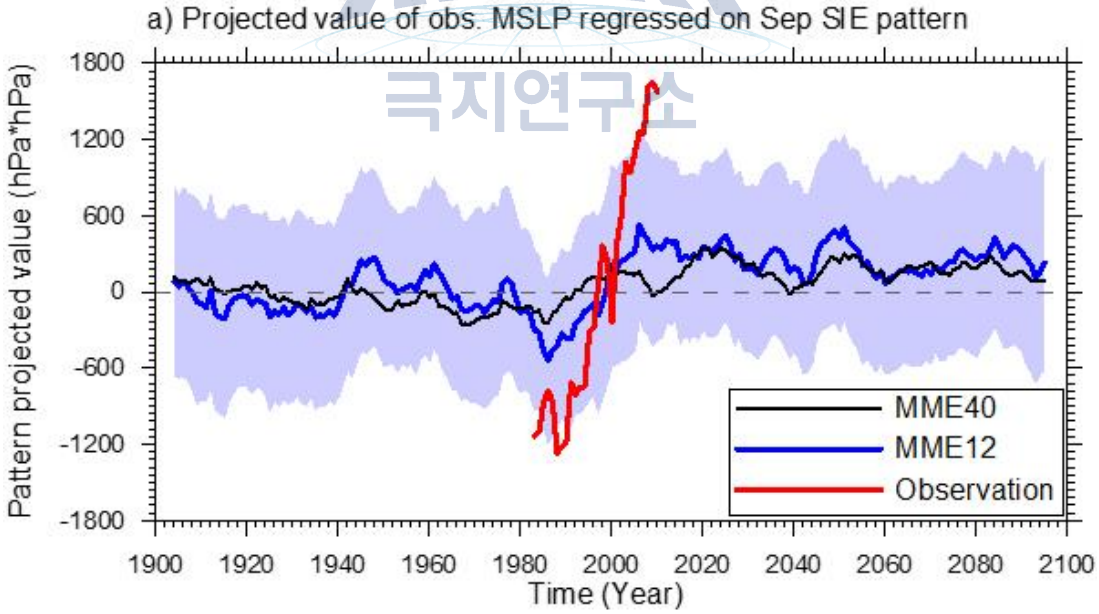

그림 9. CMIP5 기후모델이 모의하는 북극해빙 감소와 관련된 북극지역(>=60˚N) 해면기압 변화 정도(pattern projection coefficient)의 시계열

KOPRI 극지연구소

3. 해빙의 시공간 변동 모드에 따른 수치모델링 결과

a. 관측자료 분석

북극 해빙의 3개의 SEOF 주성분 시계열을 앞서 그림 3에 제시하였다. 첫 번째 성분은 Arctic amplification을 대표하고 두 번째와 세 번째 성분은 각각 동서모드와 남북모드이다. 이러한 대표적인 북극해빙 변동패턴과 관련되어 있는 대기변동성을 살펴보기 위해, 3개 주성분 시계열에 대한 지위고도, 기온, 해면기압(바람장) 및 열속(latent heat flux + sensible heat flux)의 회귀결과를 아래 그림 10, 12, 13에 각각 나타내었다. 이를 통해 극-중위도 원격상관의 역학적 메커니즘을 살펴 볼 수 있다. 자료는 ECMWF의 ERA-Interim 재분석자료와 Met Office의 HadISST 해빙농도를 사용하였다.

첫 번째 성분은 전형적인 Arctic amplification 형태를 나타낸다. 해빙 극소기인 9월~10월부터 극대기인 3월~4월까지 북극해 주변 지상기온은 강한 양의 어노말리를 나타낸다. 한정적으로 1~2월에만 유라시아 대륙에서 전형적인 Warm-Arctic vs. Cold-Continent (WACC) pattern을 형성하지만 해빙 감소 추세와 관련하여 대부분의 계절에서 북반구는 양의 기온 아노말리를 나타낸다. 겨울철 11월~2월 북반구 500hPa 지위고도의 회귀결과도 지상기온의 WACC의 패턴과 consistent하여 positive-negative 패턴을 나타낸다. 이것은 해면기압의 패턴과도 quasi-equivalent barotropic한 형태를 보이며, 이는 대체적으로 음의 극진동 패턴을 형성하여 유라시아의 강한 겨울몬순과 연관되어있다고 알려져있다(Kim *et al.*, 2014). 1월~2월에는 우랄 블로킹(Ural blocking High) 형태가 어노말리가 나타나고 풍하측(시베리아 및 동아시아)에서 저압성 순환이 유도(Rossby wave propagation)되는데, 이는 동아시아 상층 기압골 발달과 북미의 상층 blocking 발생 회수 증가 등 각 지역의 한파를 한층 강화하는 기작으로 작용할 수 있다(Zhang et al., 1997; Renwick and Wallace, 1996).

여름철인 5월~8월 해면기압의 경우 북극해 중심으로 고압성 흐름이 존재한다. 이것은 유라시아 대륙의 저기압성 흐름과 맞물려 강한 북극해 횡단류를 형성하고 해빙의 감소를 가속화하는 역할(sea ice loss due to wind stress)을 담당한다. 이는 앞서 언급한 그림 5의 설명과 일치한다.

KOPRI 극지연구소

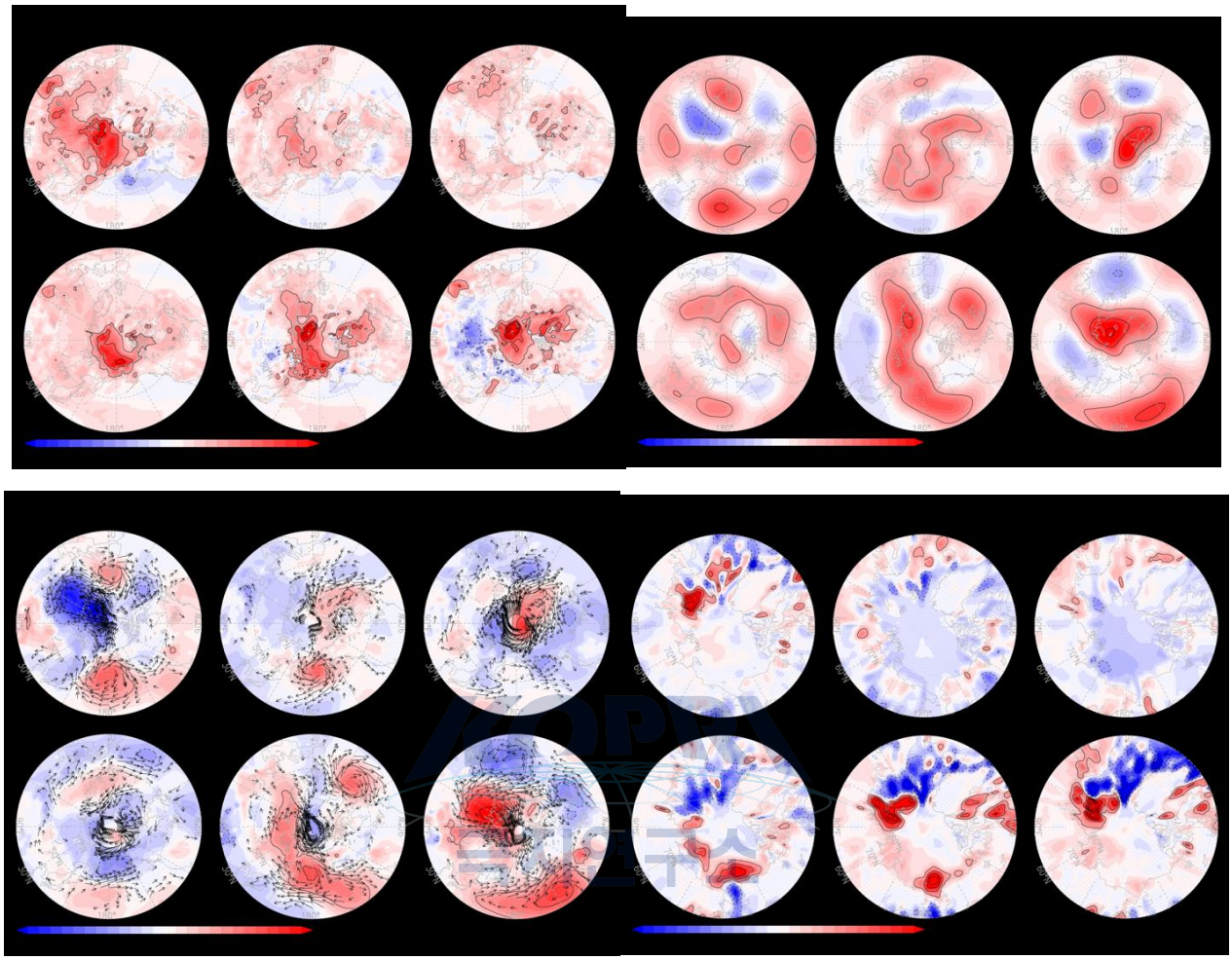

그림 10. SEOF 첫 번째 성분에 대한 지상기온, 지위고도, 해면기압(바람장) 및 열속의 회귀결과

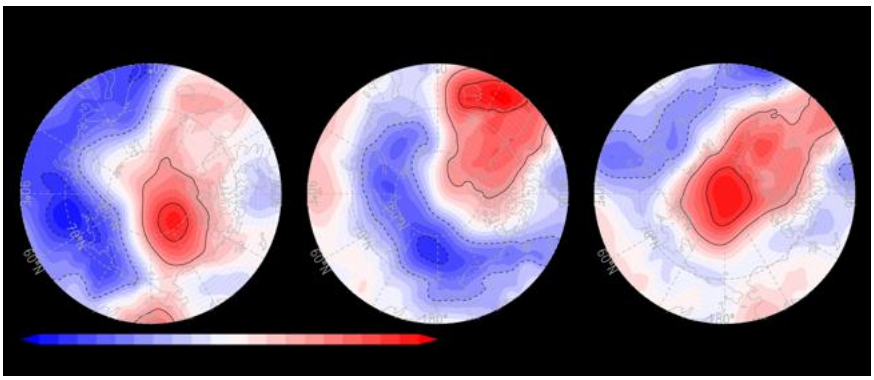

그림 11. 최근 해빙 극소기(2007년, 2012년, 2015년)의 5월~8월 평균 해면기압 패턴

해빙의 극소기를 대표하는 2007년, 2012년 그리고 2015년의 여름철 해면기압을 그림 11에 그 예로 제시하였다. 이 예들은 첫 번째 해빙성분의 여름철 해면기압 회귀결과와 상당히 유사하다.

첫 번째 모드와 관련된 열속의 변동을 보면, 늦가을부터 이른 봄까지 바렌츠-카라해에서 강한 양의 열속(해양에서 대기로 에너지 유입)이 지속적으로 나타나며 척치해의 경우 늦가을에만 양의 열속이 형성되었다.

동서모드인 두 번째 성분의 회귀결과를 그림 12에 나타내었다. 겨울철 지상기온의 경우 유라시아 양의 어노말리와 북미(특히 캐나다와 그린란드) 음의 어노말리가 동서방향으로 쌍을 이루며 나타난다. 모든 계절에 걸쳐 북극해 중심에서 저기압성 흐름이 존재하고 대기 상층에서 양의 극진동과 유사한 형태의 구조를 형성한다. 열속은 겨울철 바렌츠-카라해에서 큰 양의 값을 나타낸다.

남북모드인 세 번째 성분의 회귀결과를 그림 13에 제시하였다. 겨울철 500hPa 지위고도에서 나타나는 우랄 블로킹과 유라시아 상층 저기압 형성은 시베리아 고기압의 강화와 동아시아 겨울 한파와 연관지어 발생한다. 11월부터 4월까지 동아시아는 음의 지상기온 어노말리를 나타낸다. 해면기압의 경우 강한 우랄 블로킹이 1월~2월에 형성되어 북극의 찬 공기를 대륙으로 끌어오는 역할을 한다. 이는 상층과 구조적으로 연결되어 음의 극진동을 나타낸다. 열속은 11월~12월에 바렌츠-카라해에서 최대로 나타나 해양에서 대기로 다량의 에너지를 수송하고 동아시아 추운 겨울 형성에 기여한다(Kim et al., 2014; Kug et al., 2015). 즉, 척치해와는 다른 바렌츠-카라해의 급격한 해빙은 감소(남북모드)는 대기순환을 조절하는 강제력으로 작용하며, 특히 유라시아 및 동아시아 겨울철 기후 감시에 가장 중요한 역할을 담당한다.

KOPRI 극지연구소

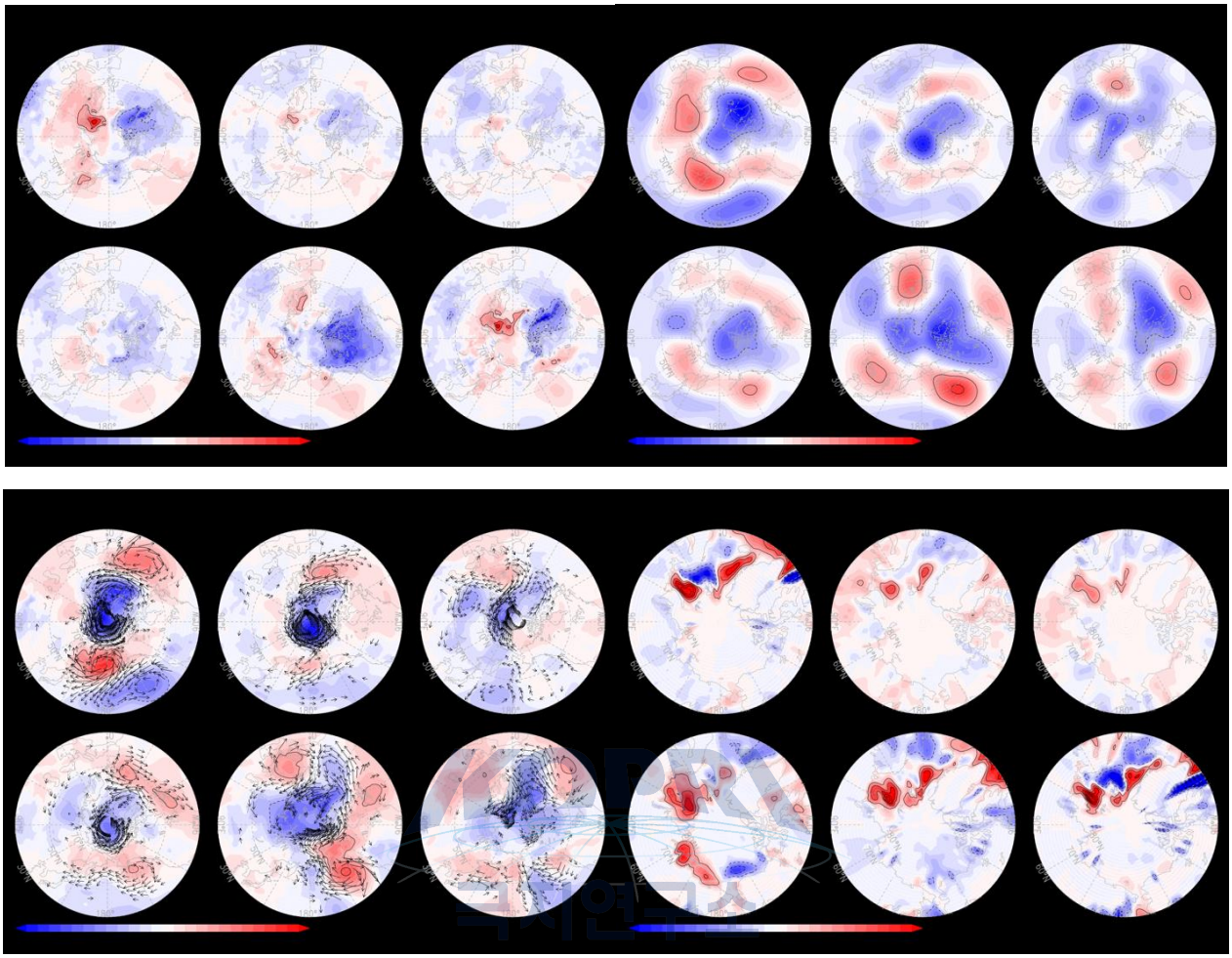

그림 12. SEOF 두 번째 성분(동서모드)에 대한 지상기온, 지위고도, 해면기압(바람장) 및 열속의 회귀결과

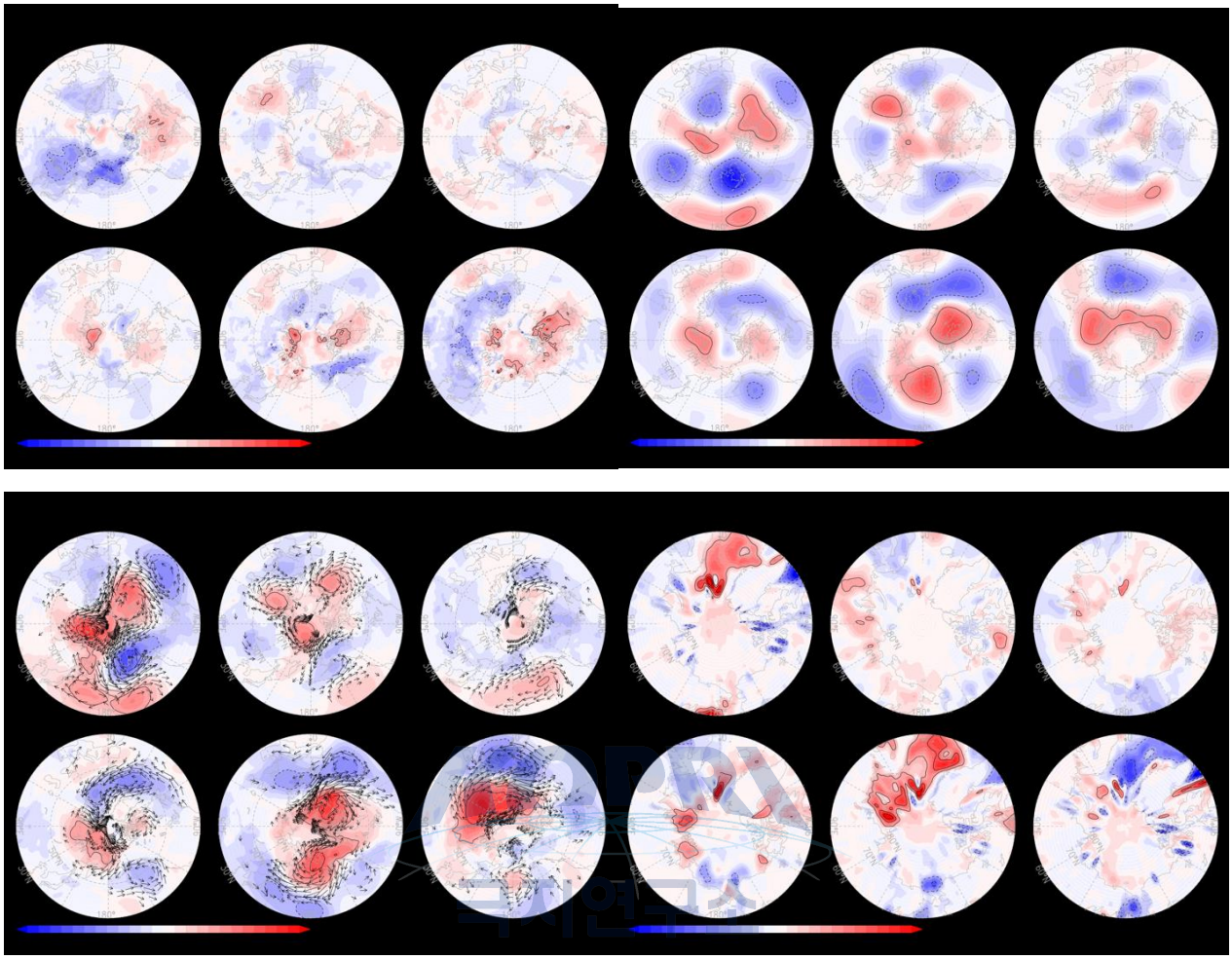

그림 13. SEOF 세 번째 성분(남북모드)에 대한 지상기온, 지위고도, 해면기압(바람장) 및 열속의 회귀결과

북극 해빙 변화와 관련된 북반구 눈덮임의 변화를 확인하기 위해 SEOF 첫 번째와 세 번째 성분에 대한 눈덮임의 회귀결과를 그림 14에 나타내었다. 전반적이 해빙 감소 추세를 대표하는 첫 번째 모드는 온난화와 관련되어 유라시아 가을 및 겨울철 눈덮임 감소를 초래하는 것으로 나타났다. 반면 세 번째 모드에서는 최근 2000년대 해빙 감소와 추세와 연결되어 11월~2월 눈덮임의 증가가 뚜렷하게 보인다. 이는 시베리아 고기압의 강화를 초래하며 유라시아 추운 겨울과도 연관지어 볼 수 있다.

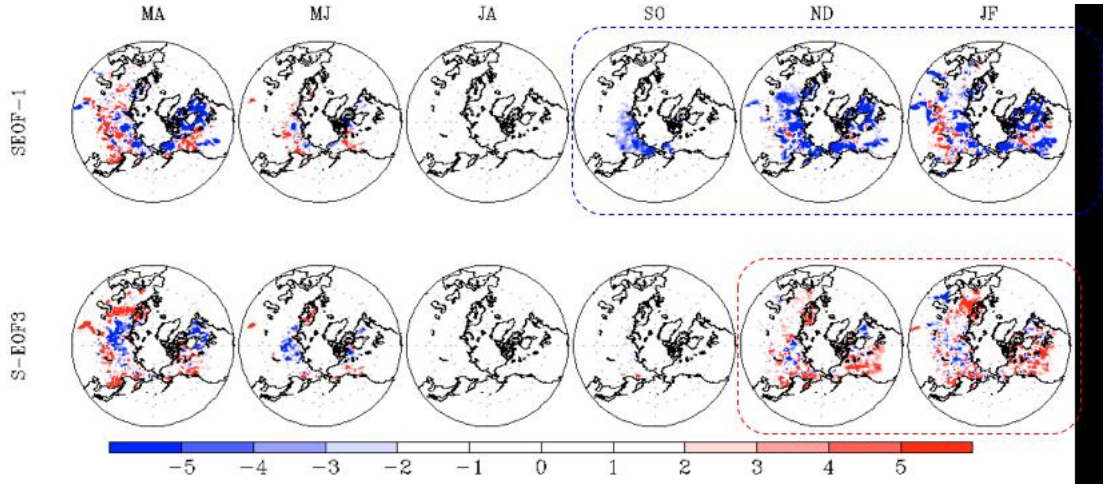

그림 14. 북극 해빙 변화와 관련된 유라시아 눈덮임 변화

b. 모델링 결과 분석

기후모델을 이용하여 북극 해빙의 SEOF 주 성분과 연관된 대기순환 특성을 연구하였다. CESM1.2를 이용하여 앞서 언급한 3개의 해빙 SEOF 패턴에 대한 민감도 실험을 수행하여 해빙 주 변동패턴을 강제하였을 때의 대기반응을 모의하였다. SEOF1~3 실험과 비교군인 CTRL 실험에 대하여 100년간 모델을 적분하여 앞의 20년을 제외한 나머지 80년(80개 앙상블)만을 분석에 활용하였다. SEOF1-3 실험의 경우 주성분시계열의 1 표준편차값을 SEOF 패턴에 곱하여 각각 해빙 경계조건 어노말리를 산출하였다.

관측 분석과 동일하게 지상기온, 지위고도(500hPa), 해면기압(바람장) 그리고 열속에 대하여 CTRL과의 차이를 계산하여 아래 그림 15, 16에 나타내었다. 먼저 SEOF1-CTRL의 경우 지상기온은 북반구 대부분에서 양의 값을 나타낸다. 관측 1월~2월에 보이던 유라시아 음의 어노말리 대신 가을철에 warm Arctic – cold continent의 구조를 보여주었다. 기온 극값의 크기는 관측의 절반정도로 모의되었다. 관측보다는 시기적으로 늦지만 7월~12월 북극해 중심에서 강한 고압성 순환이 발견되었다. 따라서 첫 번째 성분의 실험에서 지상 바람장으로 인한 해빙의 감소가 가속화되는 과정이 수치모델링에서도 탐지되는 것으로 보인다. 다만 쌍이 되는 유라시아 대륙의 저기압성 순환이 약하게 나타나 북극 횡단류의 강도는 관측보다 작게 모의되었다. 500hPa 지위고도장은 해면기압과 barotropic한 구조를 유지하고 있으며 한겨울에는 강한 양의 극진동 패턴을 나타낸다. 열속은 베링해를 제외한 대부분의 북극해에서 양의 값을 갖으며, 바렌츠-카라해 보다 북대서양 그린란드 부근에서 강한 열속을 방출한다.

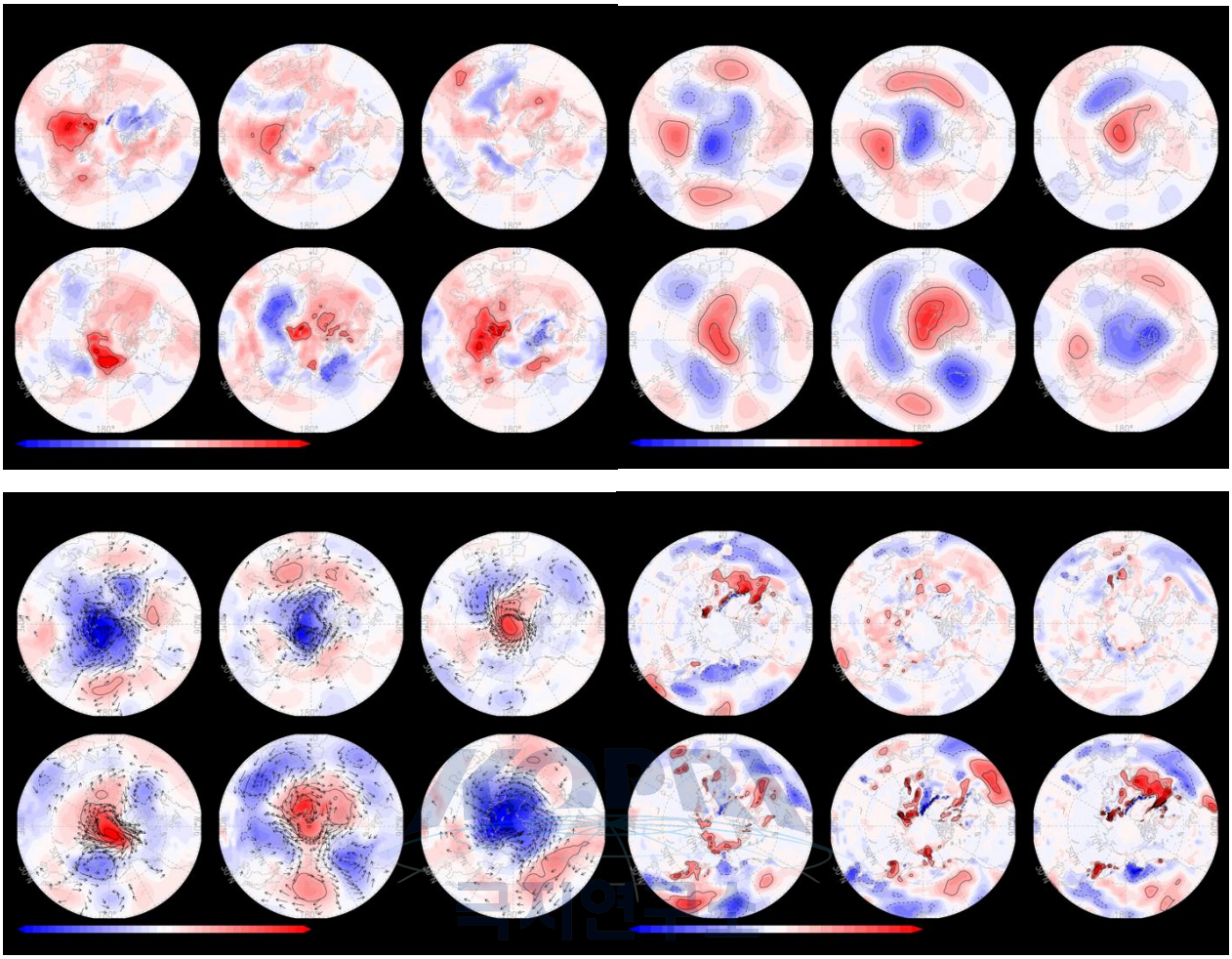

그림 15. SEOF1 실험에 대한 지상기온, 지위고도, 해면기압(바람장) 및 열속의 회귀결과

이 결과는 해빙 첫 번째 모드중 겨울철 WACC와 관련된 변동성, 여름철 극고기압 강화와 관련된 변동성의 상당부분은 해빙자체의 강제력으로 형성될 수 있음을 나타낸다.

두 번째 모드의 경우 최근 십여년간 그 변동성이 낮아, 세 번째 SEOF 모드에 대한 실험결과를 분석하였다. 세 번째 남북모드의 실험에서는 관측보다는 약하지만 500hPa 지위고도장에서 늦가을 우랄 블로킹 형태의 패턴이 나타나고 그 풍하측에 기압골이 발달하면서 지상에서는 시베리아 고기압이 발달할 수 있는 조건이 형성되었다. 그 결과 지상기온은 12월까지 음의 어노말리를 나타낸다. 하지만 12월 이후 이 구조는 급격히 무너져 1월~2월에는 음의 극진동이 양의 극진동으로 전환되어 유라시아는 오히려 양의 기온 아노말리를 나타낸다. 이러한 결과는 모델 실험의 한계로 보이는데, 열속 분석에서 나타나는바와 같이, 바렌츠-카라해에서의 강한 열속 방출을 모델이 충분히 모의하지 못하기 때문으로 보인다.

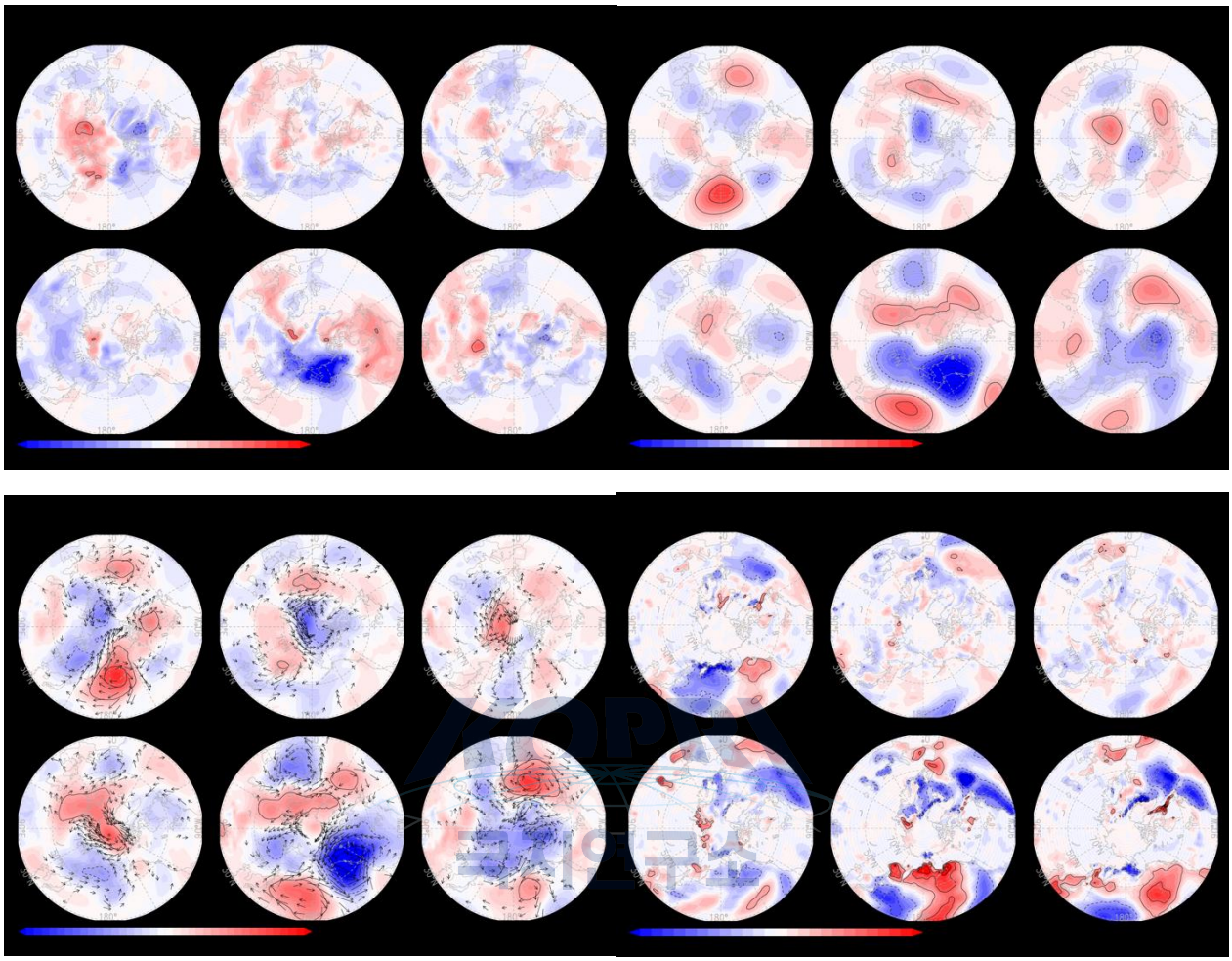

그림 16. SEOF3 실험에 대한 지상기온, 지위고도, 해면기압(바람장) 및 열속의 회귀결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

당해연도 설정했던 연구개발 목표에 따라 현재-근 미래기후에서의 남북극 해빙 변화의 특성을 분석하고 남북극해빙의 시공간 변동성 분석 연구를 수행하였다. 연구결과는 학술회의 및 논문 출판을 통해 발표되었으며, 목표한 연구개발 실적을 대부분 달성하였다.

대외적으로 본 연구결과는 남북극 해빙의 최근 시공간 변화 패턴을 이해하고 근 미래의 해빙 추이를 예측하여, 남북극 지역의 해빙 변화 탐지가 향후 기후 변동성 이해를 위해 반드시 필요한 핵심 요소임을 제시하고 있다. 또한 최근 동아시아와 북미 지역에 빈발하고 있는 극심한 한파 현상이 최근 급속한 해빙감소에 의한 북극 온난화에 의한 결과임을 규명함으로써 기후예측에 있어서 해빙 변동성의 중요성을 제시하였다.

연구개발목표에 따른 달성도와 정량적 연구성과는 아래와 같다.

표 1. 연구개발목표 및 달성도

연구목표	달성 주요내용	달성도(%)
현재-근 미래기후에서의 남북극 해빙 변화 특성 연구	- 현재로부터 근미래(~10년) 및 미래(~21세기) 기후에서 남북극해빙 변화 특성 탐지 - 남북극해빙의 급격한 변화시기를 탐지, 변화기간동안 해빙의 시공간적 변화 특성 진단 - 현재-미래기후에서 대기-해양 상호작용에 의한 해빙 주요 변동성 변동 연구	- 분석결과제시 - 학술회의발표 (100%)
남북극해빙의 시공간 변동성 분석 연구	- CMIP5 기후 실험결과에 나타나는 남북극해빙 변화, 극지 기후변동성 탐지 - 남북극해빙/해수면 온도 SEOF 분석, 근미래 해빙감소세에 의한 남북극 기후변동성 예측 - 북극해빙관련 동아시아 이상한파 증감을 확인하기 위한 대기대순환 모델의 민감도 실험을 수행하였음	- 분석결과제시 - SCI 논문 심사중 - 학술회의발표 (100%)

KOPRI 극지연구소

정량적 연구개발 성과

논문성과 :

Ou et al. (2016), Observed and modeled contribution of summer atmospheric circulation to the Arctic sea ice loss during 1979-2014: implications for future projections. *J. Geophys. Res.*, (in revision).

학술회의 발표 :

김종호, 정지훈, 김영미 (2016), 통계적 방법을 이용한 북극 해빙 농도의 중장기 예측. 2016년 기상학회 봄 학술대회.

Jee-Hoon Jeong, J. Kim, B.-M. Kim, J. Shin (2016), Statistical Prediction of Sea-Ice Concentration over the Arctic based on Season-reliant EOFs. The 7th Asia-Oceania/2nd AMS-Asia/2nd KMA Meteorological Satellite User's Conference.

Choi, J., T.-W. Park, and J.-H. Jeong (2015), Two distinct types of cold surges over East Asia and their predictability. AGU 2015 Fall Meeting.

Kim, Jongho, J.-H. Jeong, B.-M. Kim, J. Shin (2016), Statistical Prediction of Sea-Ice Concentration over the Arctic based on Season-reliant EOFs. 2016년 기상학회 가을 학술대회.

KOPRI 극지연구소

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 연구를 통해 파악된 남북극해빙과 극-중/고위도 대기순환의 상호변동성 메커니즘은 기후 장기예측에 이용될 수 있다. 특히 겨울철 한파 및 폭설의 중장기 예측성을 높이는데 기여할 수 있으며, 미래 이상한파 발생 변화 예측의 이론적 배경이 된다.

- 본 연구에서 사용된 SEOF 방법론은 남북극해빙의 시공간적 변동성을 통계적으로 접근하는 방법으로 예측의 효율성이 높다.

- 특히 해빙감소로 대표되는 북극지역의 극심한 기후변화가 우리나라 기후에도 직접적인 영향을 미치고 있음을 다수의 해외 연구와 당해연도 과제에서 제시하고 있기 때문에 남북극기후변화 연구는 매우 중요하다. 따라서 본과제인 극지기후 재현, 그리고 극지역의 기후 모니터링을 통한 동아시아 계절예측과 미래 기후예측 분야에서 당해연도 연구결과가 활용될 가치가 높다.

- 당해연도 연구결과는 전년도 과제 수행을 바탕으로 CMIP5 실험이나 수치모델의 이론적 실험설계에 의한 것으로 실제 극-고위도 및 중위도 예측에 응용되기 위해서는 실제 장기기후예측에 사용되는 기후예측시스템의 예측결과에서 결과를 분석할 필요가 있다.

- 따라서 향후 기상청 GloSea5 예측시스템 결과나 NCEP CFS(Climate Forecast System)의 예측 결과를 분석하여 연구를 확장할 필요가 있다.

KOPRI 극지연구소

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 중 중요한 부분의 하나로서 선진국 기후예측모델에서 현재 해빙과정이 어떻게 초기화 되어있는지 다음 표에 정리하였다.

표 2. 주요 선진 기후예측 모델의 해빙 초기화 방안

유럽중기예측센터 (ECMWF)	• system4	• 해빙 초기화 하지 않고 있음 • 과거 5년 데이터에서 random sampling 하고 있음
일본 JMA seasonal EPS 모델		• 해빙 초기화 하지 않고 있음 • 기후값(climatology)를 처방하고 있음
미국 NCEP CFS 예측시스템	• ver. 2	• 해빙을 간접적으로 초기화 하고 있음 • 대기-지면-해빙 결합 초기화 기법, data assimilation 기법을 활용하여 초기화 하고 있음
영국 기상청 Hadley Centre	• GloSea4 • GloSea5	• 해양 자료동화 기법을 통해 초기화 하고 있음 • 대기-해양-지면 결합초기화 방안 개발중

KORI 극지연구소

제 7 장 참고문헌

Comiso, J. C. (2012), Large Decadal Decline of the Arctic Multiyear Ice Cover. *J. Climate*, **25(4)**, 1176-1193.

Folland, C. K., J. Knight, H. W. Linderholm, D. Fereday, S. Ineson, and J. W. Hurrell (2009), The Summer North Atlantic Oscillation: Past, Present, and Future, *J Climate*, **22**(5), 1082-1103.

Francis, J. A., and S. J. Vavrus (2012), Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, **39(6)**, L06801.

Francis, J. A., W. Chan, D. J. Leathers, J. R. Miller, and D. E. Veron (2009), Winter Northern Hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent. *Geophys. Res. Lett.*, **36(7)**, L07503.

Honda, M., J. Inoue, and S. Yamane (2009), Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36(8)**, L08707.

Kim, B.-M., S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and J.-H. Yoon (2014), Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nature Commun.*, **5**, 4646.

Kug, J.-S., J.-H. Jeong, Y.-S. Jang, B.-M. Kim, C. K. Folland, S.-K. Min, and S.-W. Son (2015), Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nature Geosci.*, **8**, DOI: 10.1038/NGEO2517.

Liu, J., J. A. Curry, H. Wang, M. Song, and R. M. Horton (2012), Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.

Overland, J. E., and M. Wang (2010), Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice, *Tellus A*, **62(1)**, 1-9.

Overland, J. E., K. R. Wood, and M. Wang (2011), Warm Arctic—cold continents: climate impacts of the newly open Arctic Sea. *Polar Research,* **30**, 15787, DOI: 10.3402/polar.v30i0.

Park, T.-W., et al. (2015), A new dynamical index for classification of cold surge types over East Asia. *Climate Dyn.*, **45(9)**, 2469-2484.

Renwick, J. A. and J. M. Wallace (1996), Relationships between North Pacific wintertime blocking, El Nino, and the PNA pattern. *Mon. Weath. Rev.*, **124**, 2071-2076.

Screen, J. A. and I. Simmonds (2013), Exploring links between Arctic amplification and

KOPRI 극지연구소

mid-latitude weather. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 959-964.

Semenov, V. A., and M. Latif (2015), Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966-2012, *Environ Res Lett,* **10**(5), 054020.

Stroeve, J., M. M. Holland, W. Meier, T. Scambos, and M. Serreze (2007), Arctic sea ice decline: Faster than forecast, *Geophys. Res. Lett.*, **34(9)**, L09501.

Tang, Q., Z. Xuejun, Y. Xiaohua, and A. F. Jennifer (2013), Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss, *Environ. Res. Lett.*, **8(1)**, 014036.

Vavrus, S., M. Holland, and D. Bailey (2011), Changes in Arctic clouds during intervals of rapid sea ice loss, *Clim Dynam,* **36**(7), 1475-1489.

Wang, B., Z. Wu, C.-P. Chang, J. Liu, J. Li, and T. Zhou (2010), Another Look at Interannual-to-Interdecadal Variations of the East Asian Winter Monsoon: The Northern and Southern Temperature Modes. *J. Climate* **23(6)**, 1495-1512.

Zhang, Y., K. R. Sperber, J. S. Boyle (1997), Climatology and interannual variation of the East Asian Winter Monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR Reanalysis. *Mon. Weath. Rev.*, **125**, 2605-2619.

Zhang, J. L., R. Lindsay,M. Steele, and A. Schweiger (2008), What drove the dramatic retreat of arcticsea ice during summer 2007, *Geophys. Res. Lett.,* 35, L11505,doi:10.1029/2008GL034005.

KOPRI 극지연구소

○ **이 연구는 극지연구소의 지원을 받아 수행되었습니다. (PE16010)**

주 의

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

KOPRI 극지연구소