준계절/계절예측 모델의 북극-중위도 원격상관 예측 성능 평가를 위한 진단 매트릭스의 개발과 활용

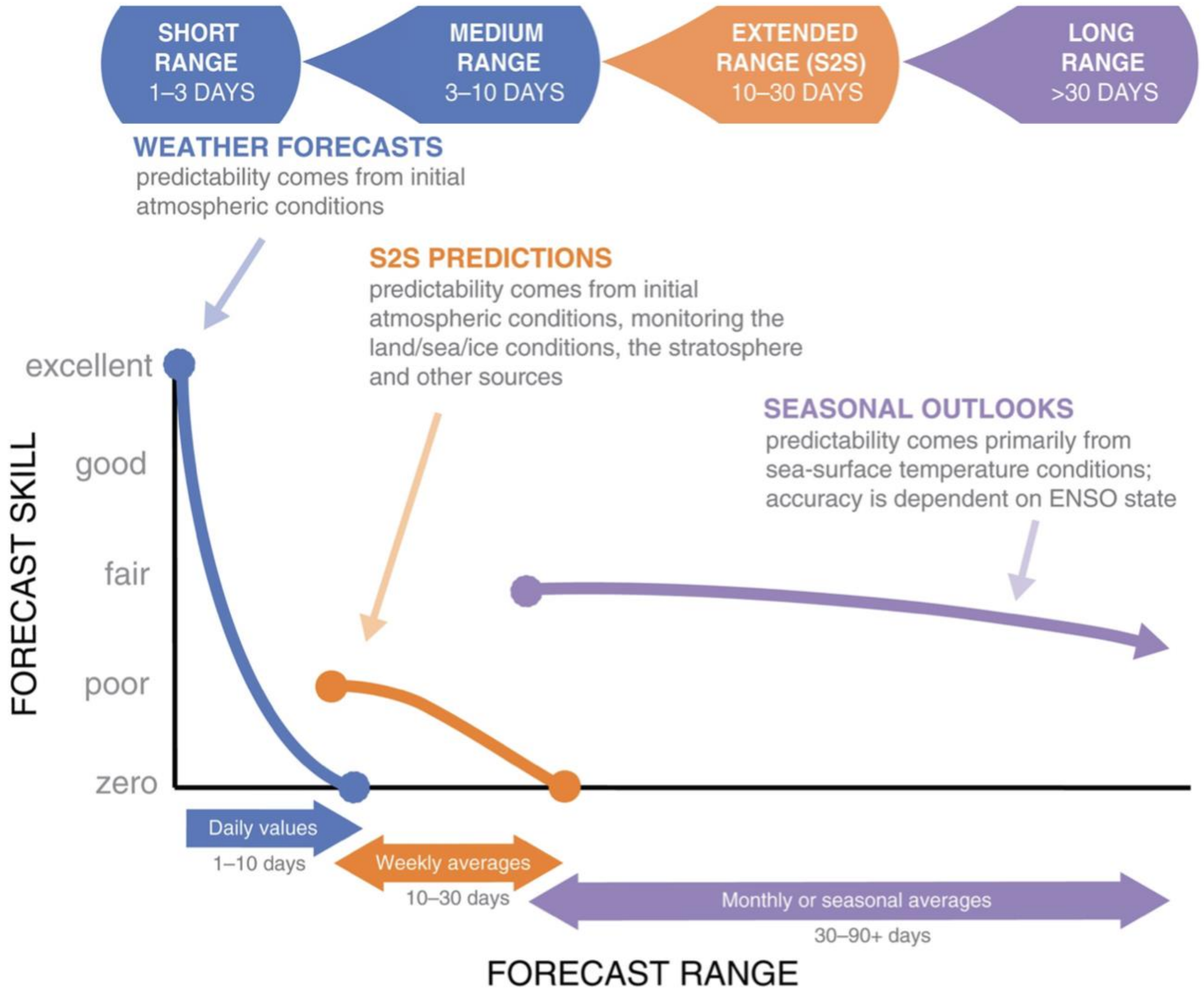
김백민[1] ▪ 심지한[1] ▪ 김하림[2]
구호영[1] ▪ 문자연[3] ▪ 김기영[3]

[1]부경대학교 환경대기과학과
[2]이화여자대학교 대기과학공학과
[3](주)포디솔루션

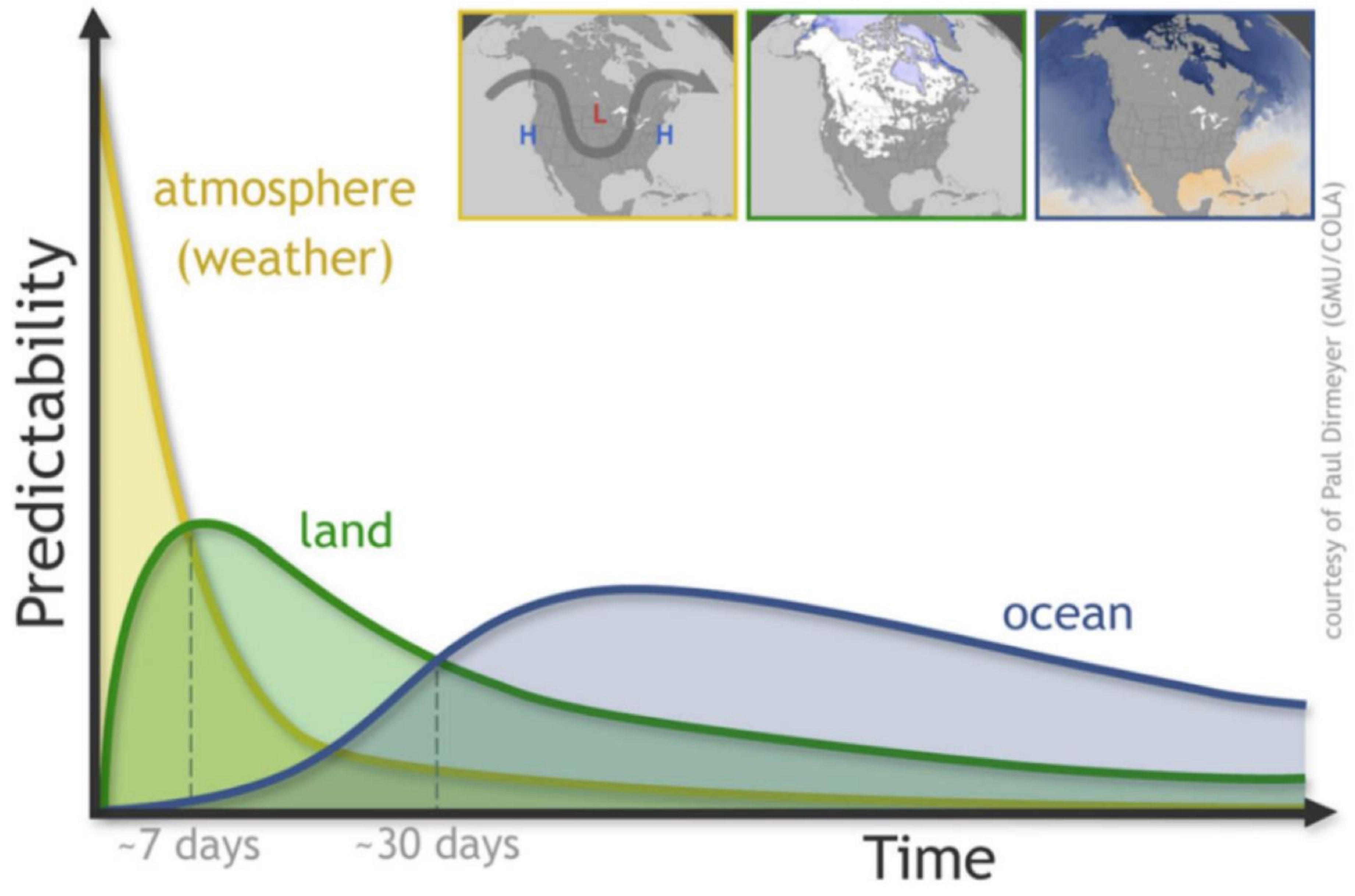
1. 서론 | 연구 배경

▪ 준계절-계절 시간 규모에서의 예측 및 진단 평가 연구의 필요성

시간 규모에 따른 예측 성능 차이



예측 시간 규모에 따른 불확실성 요인

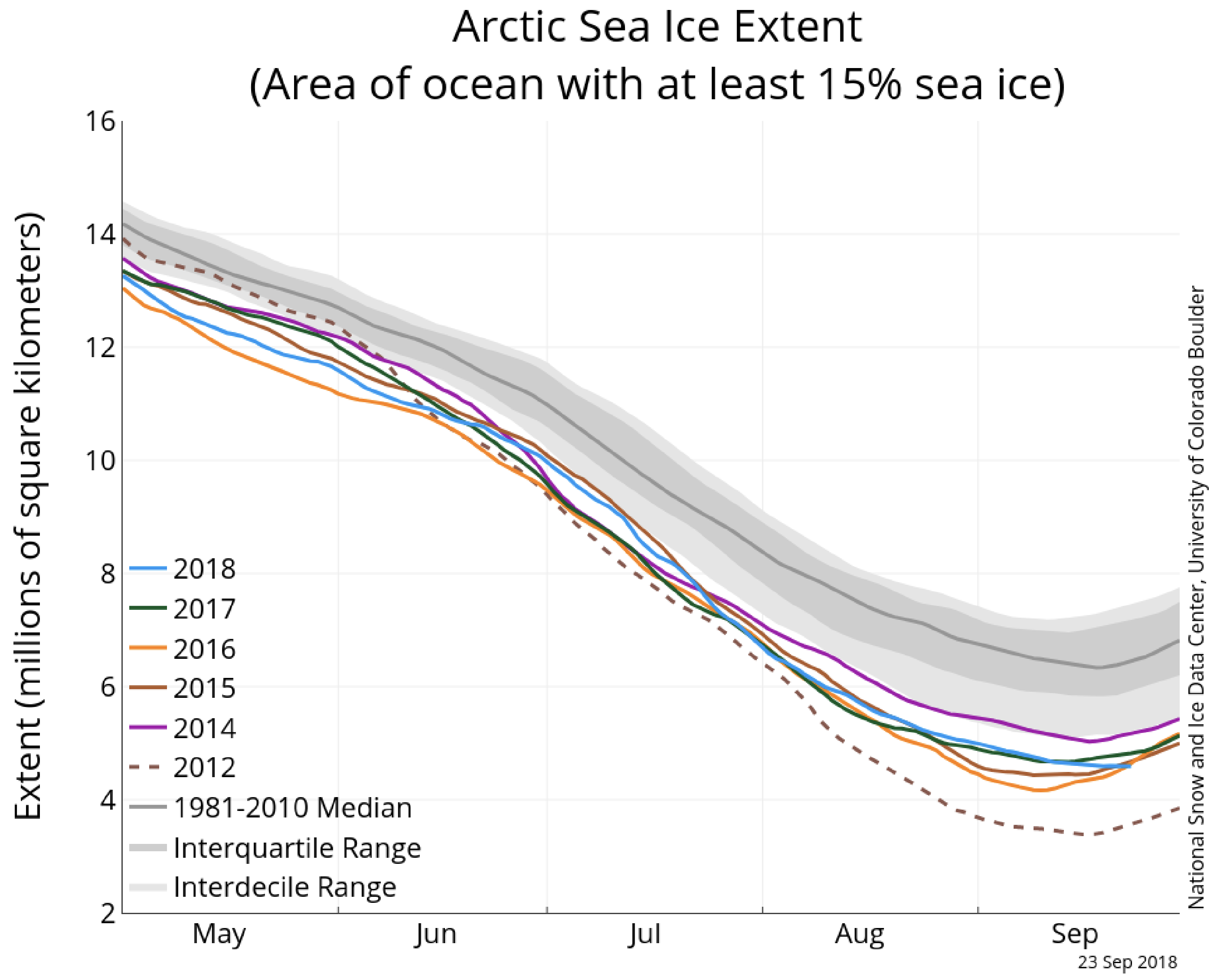


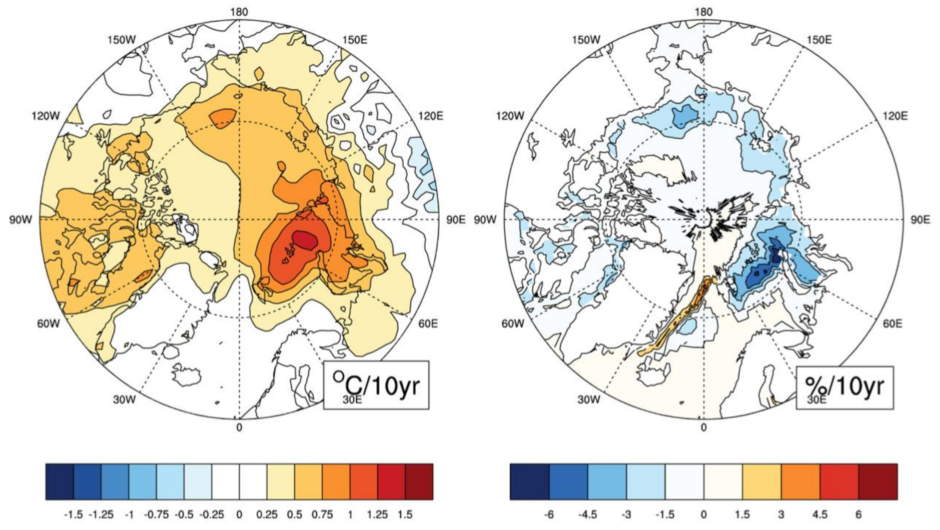
- **준계절-계절 시간 규모는** 대기 초기 조건 및 경계조건이 영향을 미치는 구간 모두를 포함하여 **복잡한 예측 구간으로 주요한 예측 구간임에도 불구하고 정확한 예측 몇 진단 평가 연구가 적은 편**임.
- 하지만, 최근 전 세계적으로 이상기상 및 기후 현상으로 인한 피해 경감을 위해 **준계절-계절 예측의 연구 및 기술 향상의 필요성을 인식하고 이음새 없는 예보 체계로 전환이 진행**되고 있음.

1. 서론 | 연구 배경

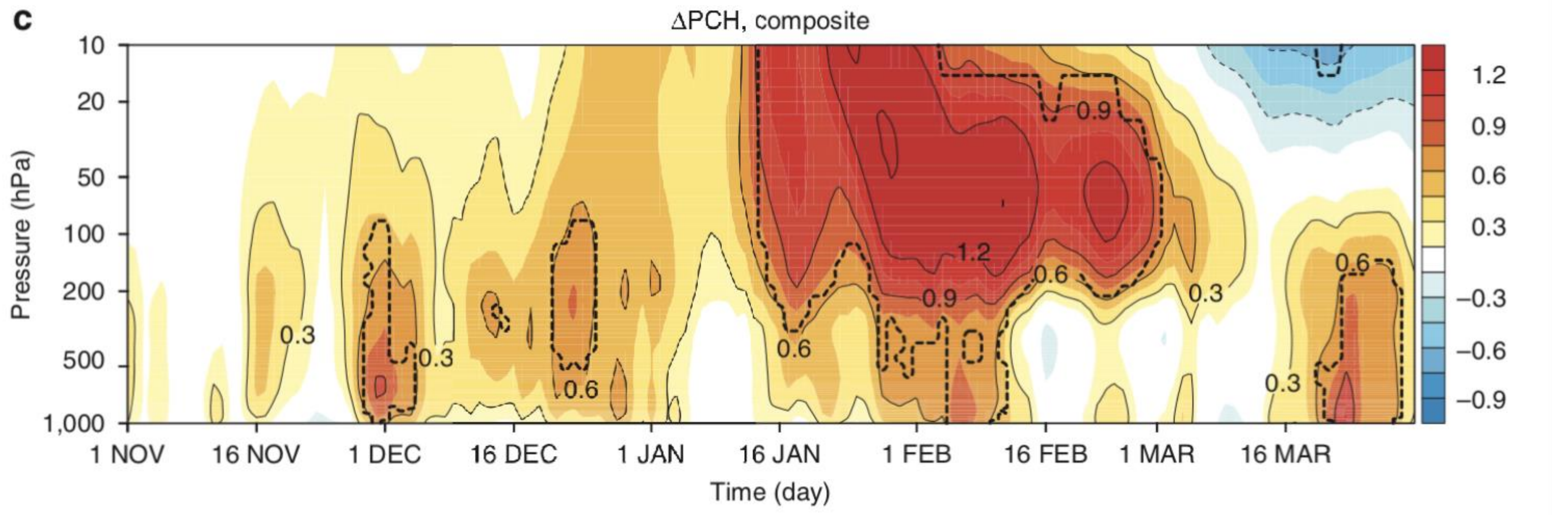
▪ 북극-중위도 원격상관성

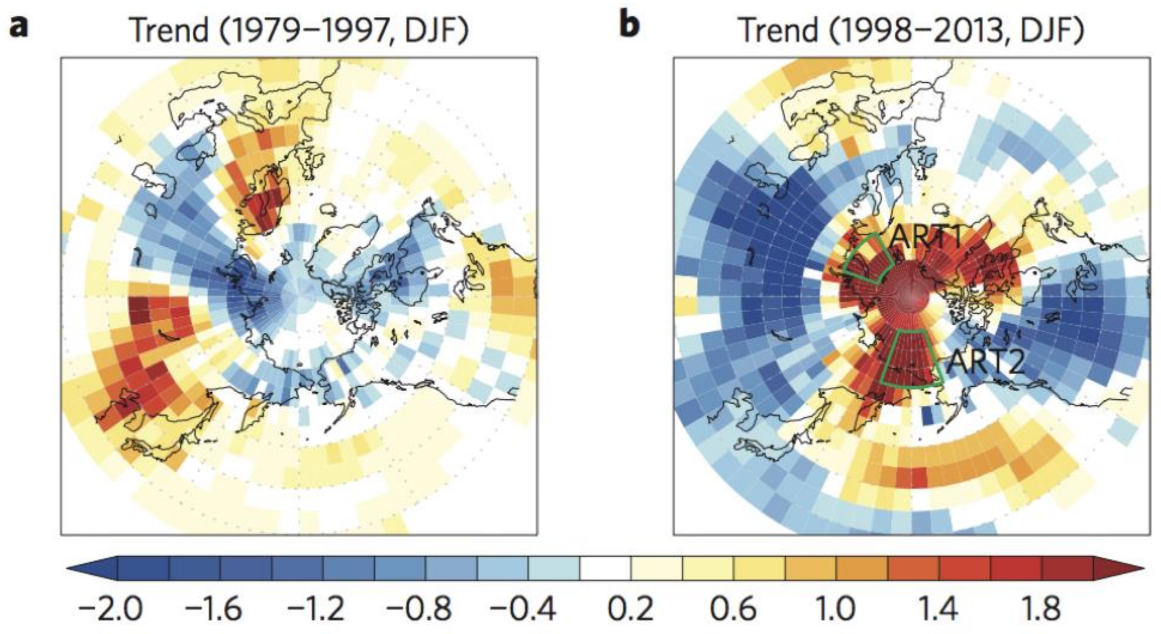
겨울철 북극 지표온도/해빙의 변화 양상

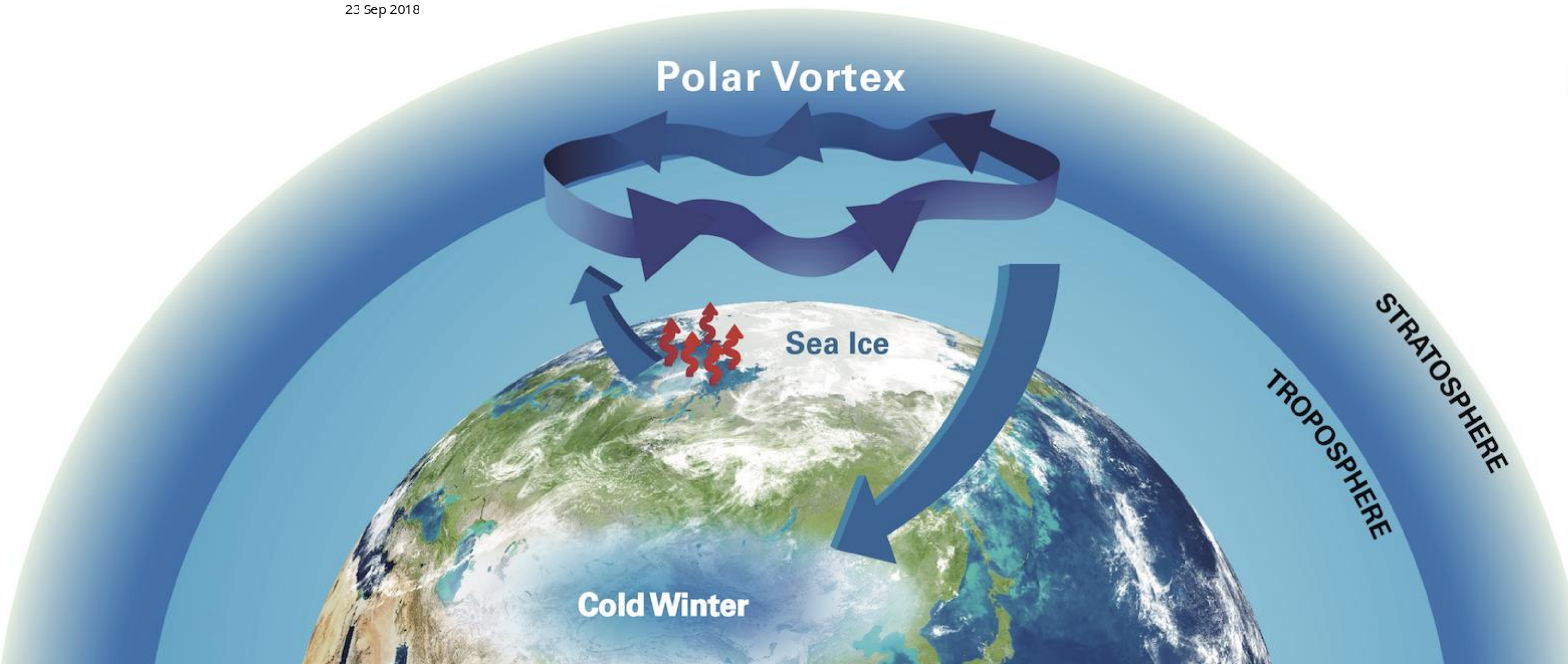




겨울철 북극-중위도 원격상관성







- 여름철 보다 **겨울철 북극의 경우 지표 온도의 변화 및 해빙의 변화 폭이 상대적으로 더 크게** 나타나며, 이러한 겨울철 북극 기후 시스템의 변화는 **원격 상관을 기반으로 중위도 기후 변화와 밀접한 연관이 있음을 시사**함.
- **대표적으로, 북극 해빙의 변화에 따른 북극해 지표 온도의 변화와 중위도 대륙 지역의 지표 온도의 변화의 연관성을 기반으로 한 'Warm Arctic Cold Eurasia (WACE)' 패턴**을 통해 '북극-중위도 원격상관' 메커니즘을 이해할 수 있음.

1. 서론 | 연구 배경

▪ 북극-중위도 원격상관성 및 예측성 선행 연구

북극-중위도 원격상관 기반의
겨울철 계절 예측 연구 (Jung et al., 2021)


Environmental Research Letters

LETTER

Impacts of the Arctic-midlatitude teleconnection on wintertime seasonal climate forecasts

Euihyun Jung, Jee-Hoon Jeong, Sung-Ho Woo, Baek-Min Kim, Jin-Ho Yoon and Gyu-Ho Lim

북극 해빙 변화에 따른 성층권
극소용돌이 변화 연구 (Kim et al., 2014)


nature COMMUNICATIONS

ARTICLE

Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss

Baek-Min Kim, Seok-Woo Son, Seung-Ki Min, Jee-Hoon Jeong, Seong-Joong Kim, Xiangdong Zhang, Taehyoun Shim & Jin-Ho Yoon

준계절 시간 규모 내에서 북극 변화에 따른 중위도
예측성 연구 (Jung et al., 2014)


AGU PUBLICATIONS

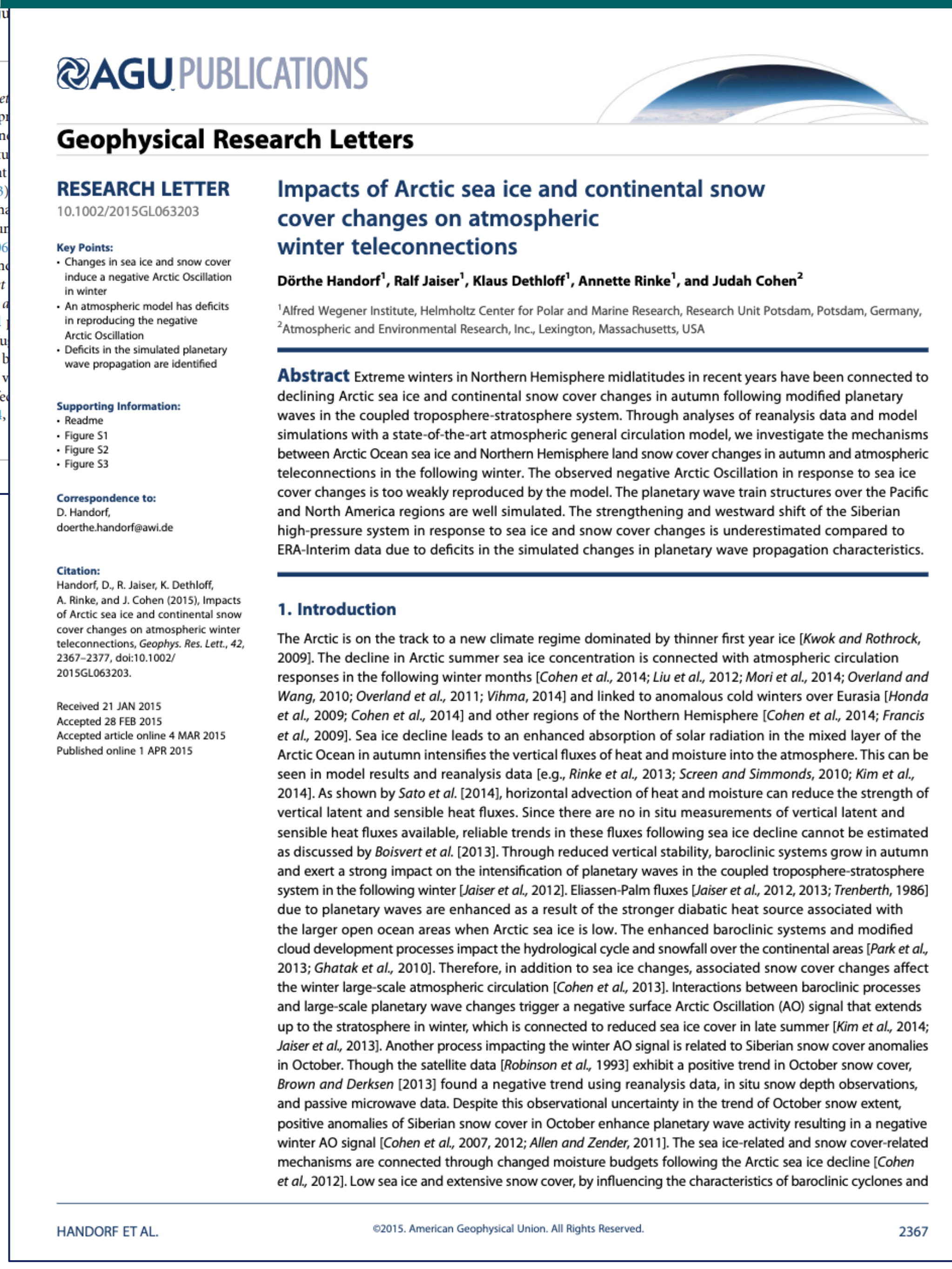
Geophysical Research Letters

RESEARCH LETTER

Arctic influence on subseasonal midlatitude prediction

Thomas Jung, Marta Anna Kasper, Tido Semmler, and Soumia Serrar

북극 해빙 및 눈덮임 변화에 따른
겨울철 원격상관 연구 (Handorf et al., 2015)


AGU PUBLICATIONS

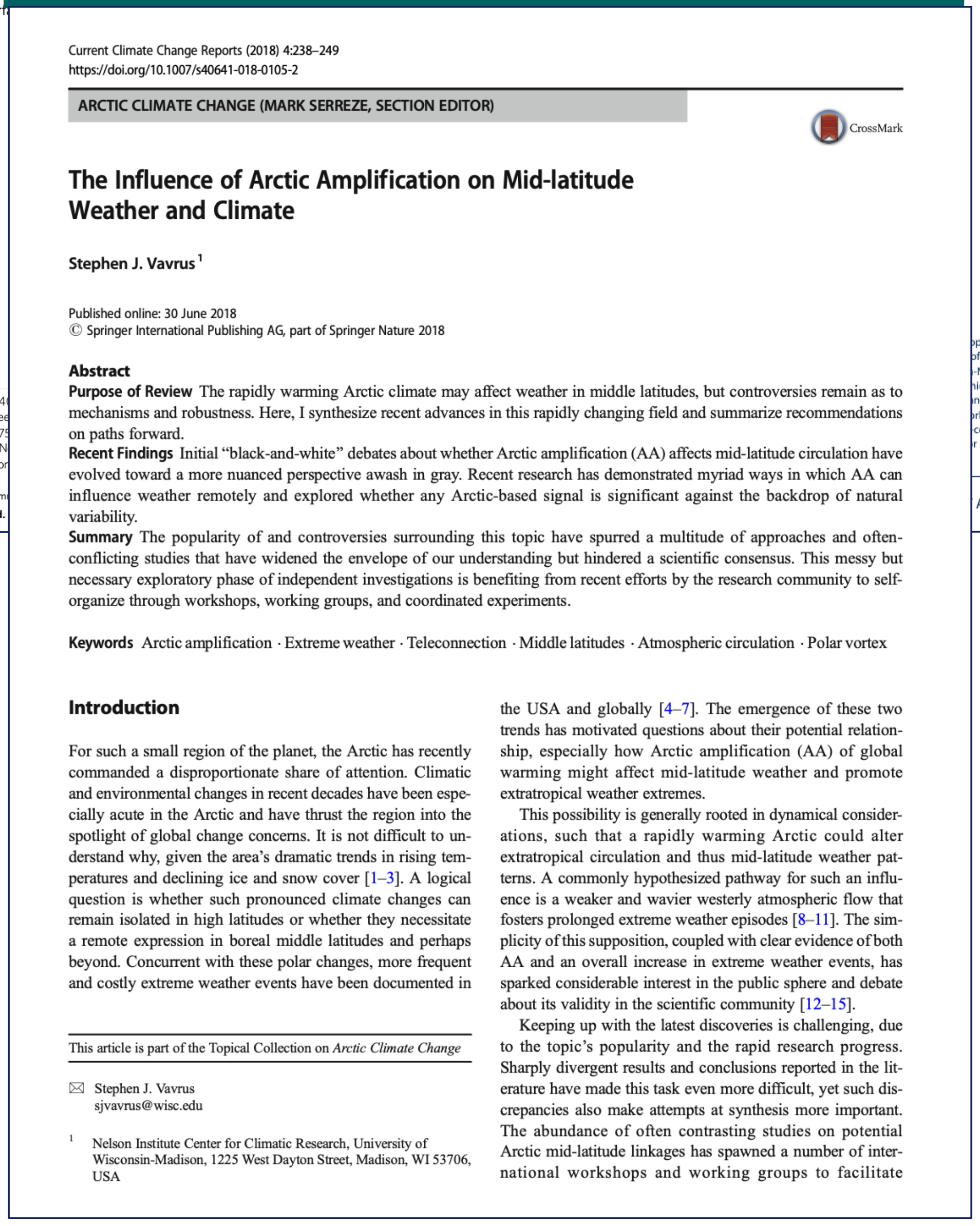
Geophysical Research Letters

RESEARCH LETTER

Impacts of Arctic sea ice and continental snow cover changes on atmospheric winter teleconnections

Dörthe Handorf, Ralf Jaiser, Klaus Dethloff, Annette Rinke, and Judah Cohen

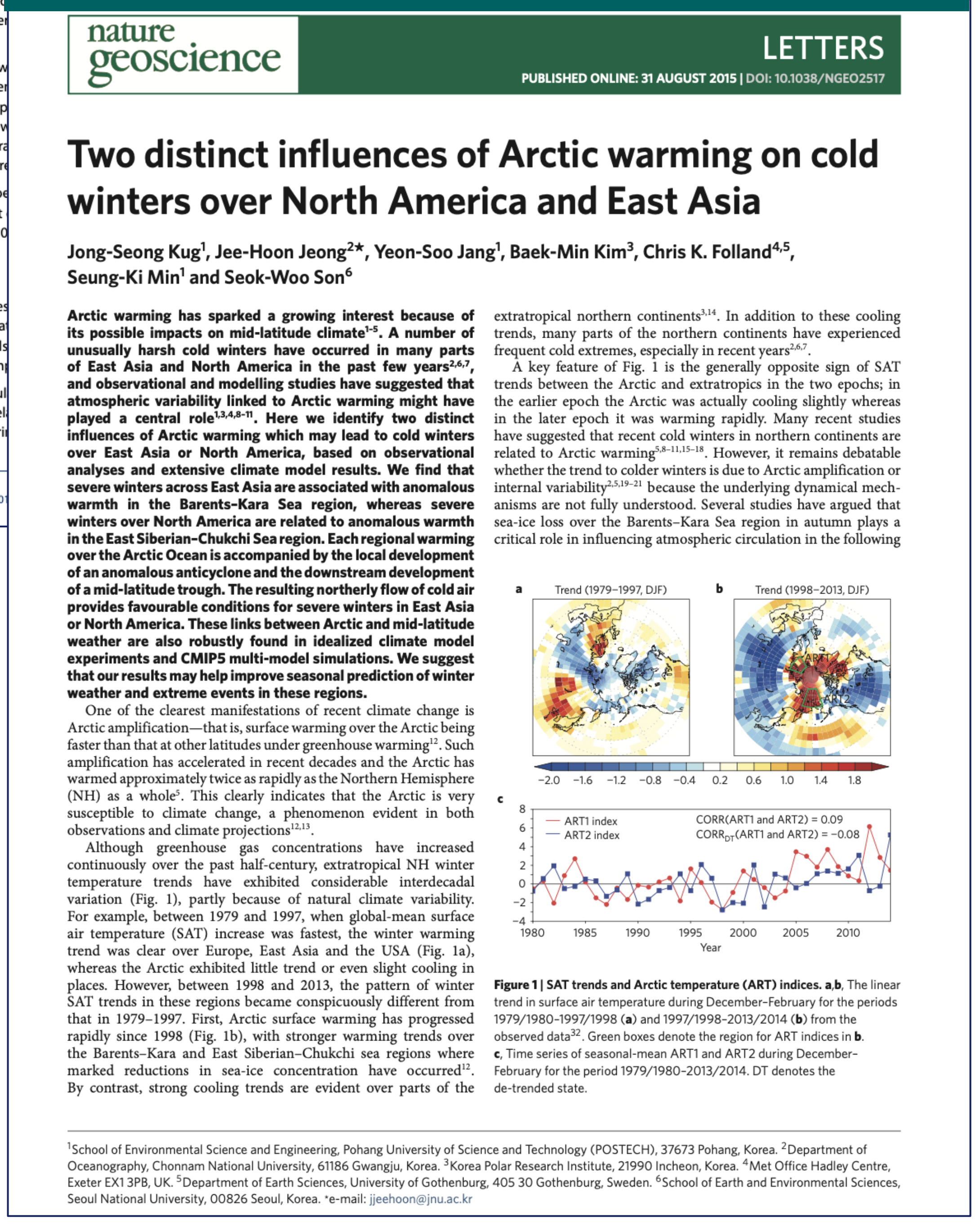
북극 온도 변화에 따른
중위도 기후 및 날씨 변화 연구 (Vavrus 2018)


ARCTIC CLIMATE CHANGE (MARK SERREZE, SECTION EDITOR)

The Influence of Arctic Amplification on Mid-latitude Weather and Climate

Stephen J. Vavrus

겨울철 북극 지표 온도 변화와 북미/동아시아 지표
온도 변화 연관성 연구 (Kug et al., 2015)


nature geoscience

LETTERS

Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia

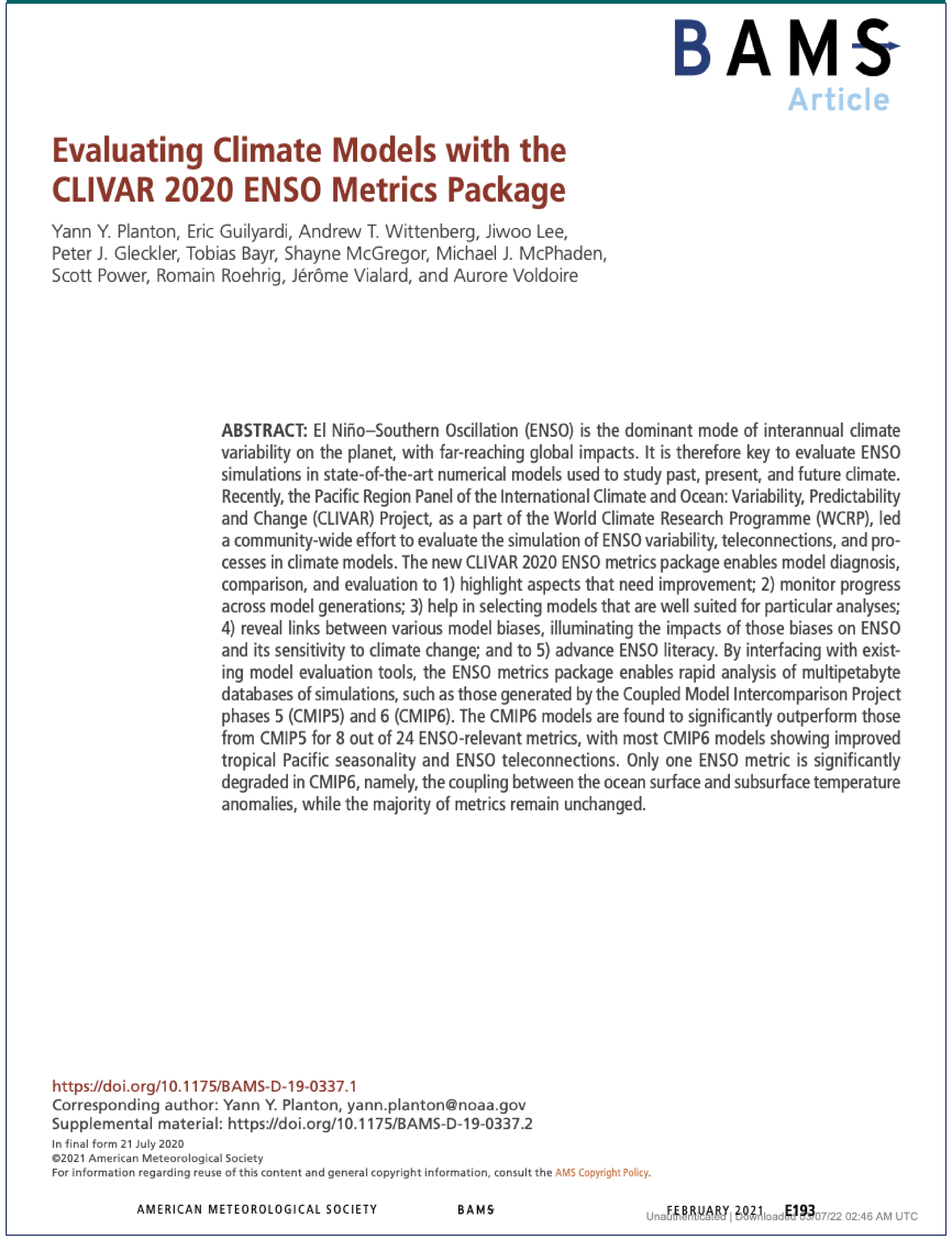
Jong-Seong Kug, Jee-Hoon Jeong, Yeon-Soo Jang, Baek-Min Kim, Chris K. Folland, Seung-Ki Min and Seok-Woo Son

- **겨울철 북극-중위도 원격상관 메커니즘 이해를 위한 다양한 연구들이** 진행되어 왔으며, 비교적 최근 이러한 상호작용 및 물리기작에 대한 이해를 기반으로 준계절-계절 시간 규모에서 예측 연구가 진행되고 있음.
- 북극-중위도 원격상관성에 대한 명확한 이해는 극지역 뿐만 아니라 중위도 예측성 향상에 큰 도움이 될 수 있으며, 이를 위해 **예측성을 정확히 진단하고 평가할 수 있는 도구를 구축하는 것이 필수**적임.

1. 서론 | 연구 배경

▪ 예측 성능 평가 및 진단을 위한 진단 매트릭스 구축의 필요성

기후 모델의 ENSO 예측성 진단 및 평가를 위한 진단 매트릭스 구축 연구
(Planton et al., 2021, BAMS)



BAMS
Article

Evaluating Climate Models with the CLIVAR 2020 ENSO Metrics Package

Yann Y. Planton, Eric Guilyardi, Andrew T. Wittenberg, Jiwoo Lee, Peter J. Gleckler, Tobias Bayr, Shayne McGregor, Michael J. McPhaden, Scott Power, Romain Roehrig, Jérôme Vialard, and Aurore Voldoire

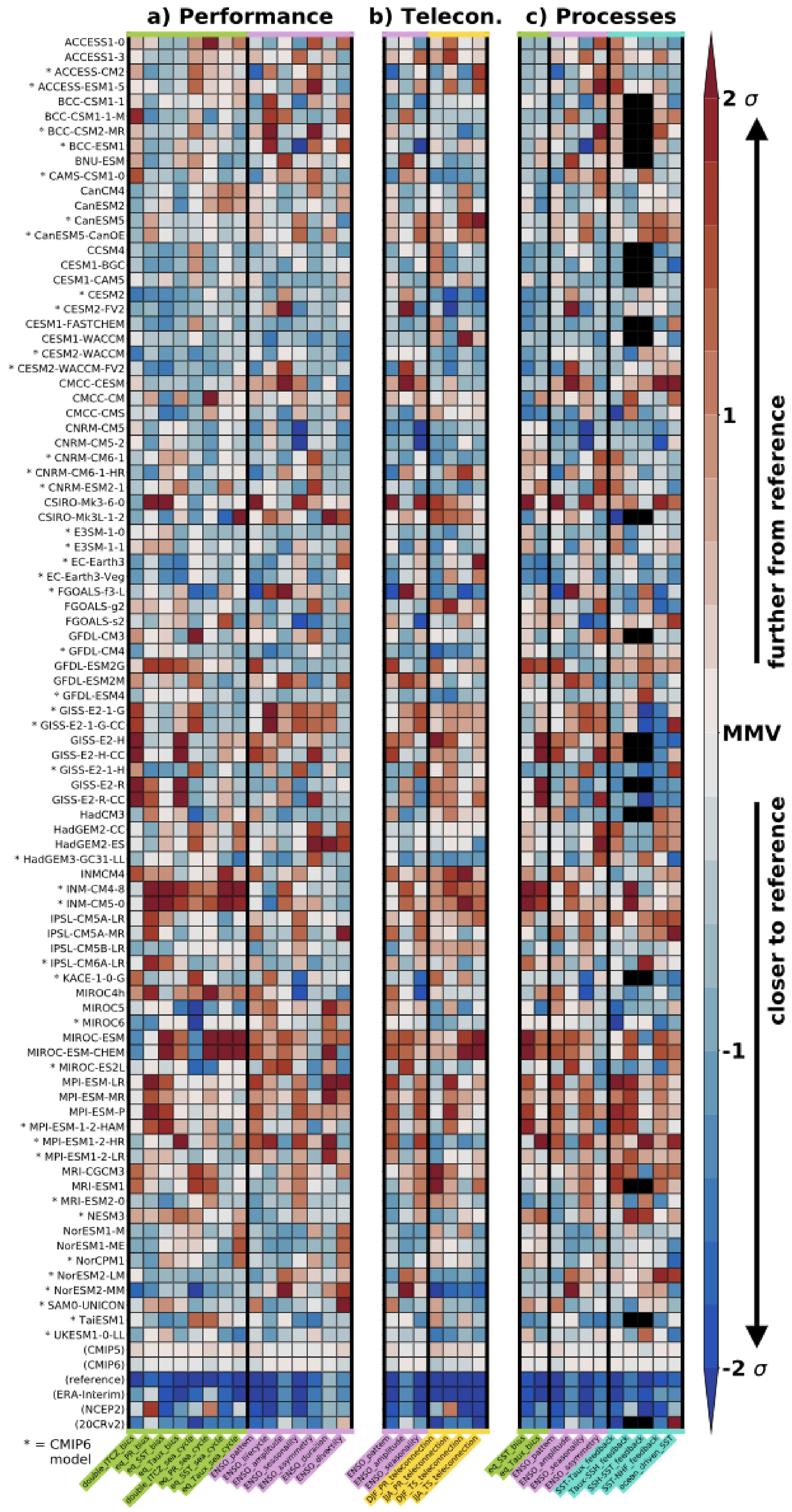
ABSTRACT: El Niño–Southern Oscillation (ENSO) is the dominant mode of interannual climate variability on the planet, with far-reaching global impacts. It is therefore key to evaluate ENSO simulations in state-of-the-art numerical models used to study past, present, and future climate. Recently, the Pacific Region Panel of the International Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change (CLIVAR) Project, as a part of the World Climate Research Programme (WCRP), led a community-wide effort to evaluate the simulation of ENSO variability, teleconnections, and processes in climate models. The new CLIVAR 2020 ENSO metrics package enables model diagnosis, comparison, and evaluation to 1) highlight aspects that need improvement; 2) monitor progress across model generations; 3) help in selecting models that are well suited for particular analyses; 4) reveal links between various model biases, illuminating the impacts of those biases on ENSO and its sensitivity to climate change; and to 5) advance ENSO literacy. By interfacing with existing model evaluation tools, the ENSO metrics package enables rapid analysis of multipetabyte databases of simulations, such as those generated by the Coupled Model Intercomparison Project phases 5 (CMIP5) and 6 (CMIP6). The CMIP6 models are found to significantly outperform those from CMIP5 for 8 out of 24 ENSO-relevant metrics, with most CMIP6 models showing improved tropical Pacific seasonality and ENSO teleconnections. Only one ENSO metric is significantly degraded in CMIP6, namely, the coupling between the ocean surface and subsurface temperature anomalies, while the majority of metrics remain unchanged.

https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0337.1
Corresponding author: Yann Y. Planton, yann.planton@noaa.gov
Supplemental material: https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0337.2
In final form 21 July 2020
©2021 American Meteorological Society
For information regarding reuse of this content and general copyright information, consult the AMS Copyright Policy.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY BAMS FEBRUARY 2021 E193

Unauthenticated | Downloaded 03/07/22 02:46 AM UTC

CMIP 모델들을 활용한 ENSO의 예측성 진단
매트릭스 구축 및 표출
'Performance, Teleconnection, Process'



- 기존 연구인 Planton et al (2021) 연구에서는 CMIP 모델들을 활용하여 ENSO예측성을 평가하였으며, 보다 정밀하고 정확한 예측성 평가를 위해 'Performance', 'Teleconnection', 'Process'로 ENSO 발생 및 기작을 세분화하여 예측성을 진단하고 평가하였음.

- 이렇게 분석한 **예측 결과를 하나의 진단 매트릭스로 구축하여 ENSO와 연관된 다양한 대기장 패턴 및 원격상관성의 예측 정보를 표출**하였음.

1. 서론 | 연구 목표

- 국내 현업기후모델인 GloSea5를 활용하여 **겨울철 북극-중위도 원격상관성을 기반으로 모델의 예측성 및 구조적 오차를 평가하여 진단 매트릭스로 표출**하고자 함.

- 모델의 **예측 성능 평가는 재분석 자료 및 미국 현업에서 활용되는 국립환경예측센터(NCEP Climate Forecast System)의** 예측 자료와 **비교 분석을 통해 진행**하며, 진단 매트릭스는 ‘북극-중위도 원격 상관성’을 나타내는 변수 및 물리 기작의 예측 성능으로 표출하고자 함.

2. 연구 분석 방법 및 자료 | 분석 자료

▪ 모델 자료 및 재분석 자료 정보

- 현업기후모델(GloSea5)의 예측성 및 구조적 오차 평가를 위해 미국 현업에서 활용되는 **국립환경예측센터 (NCEP Climate Forecast System)의 예측 자료와 비교 분석**을 통한 예측성 진단 및 오차 평가
- **늦가을(ON), 초겨울(DJ), 늦겨울(FM)**로 세분화하여 계절내 예측인자의 원격상관 분석

재분석 자료

JRA-55

- 자료 기간: 1991 – 2016
- 시간 규모: Daily (from hourly)
- 해상도: 0.25 x 0.25

- 분석 변수: T2M, TEMP, GPH
- SIC: SSMIS Sea Ice Concentration

VS

국내 현업 기후모델

GloSea5

- 자료 기간: 1991 – 2016
- 초기장: 10/01, 12/01, 02/01
- 시간 규모: Daily
- 예측 기간: 2 months
- 앙상블: 3

- 분석 변수: T2M, TEMP, GPH, SIC

⟷

미국 현업 기후모델

NCEP CFS

(version 1·2)

- 자료 기간: 1991 – 2016
- 초기장: 10/01, 12/01, 02/01
- 시간 규모: Daily (from hourly)
- 예측 기간: 2 months
- 앙상블: 15(ver.1) / 24(ver. 2)

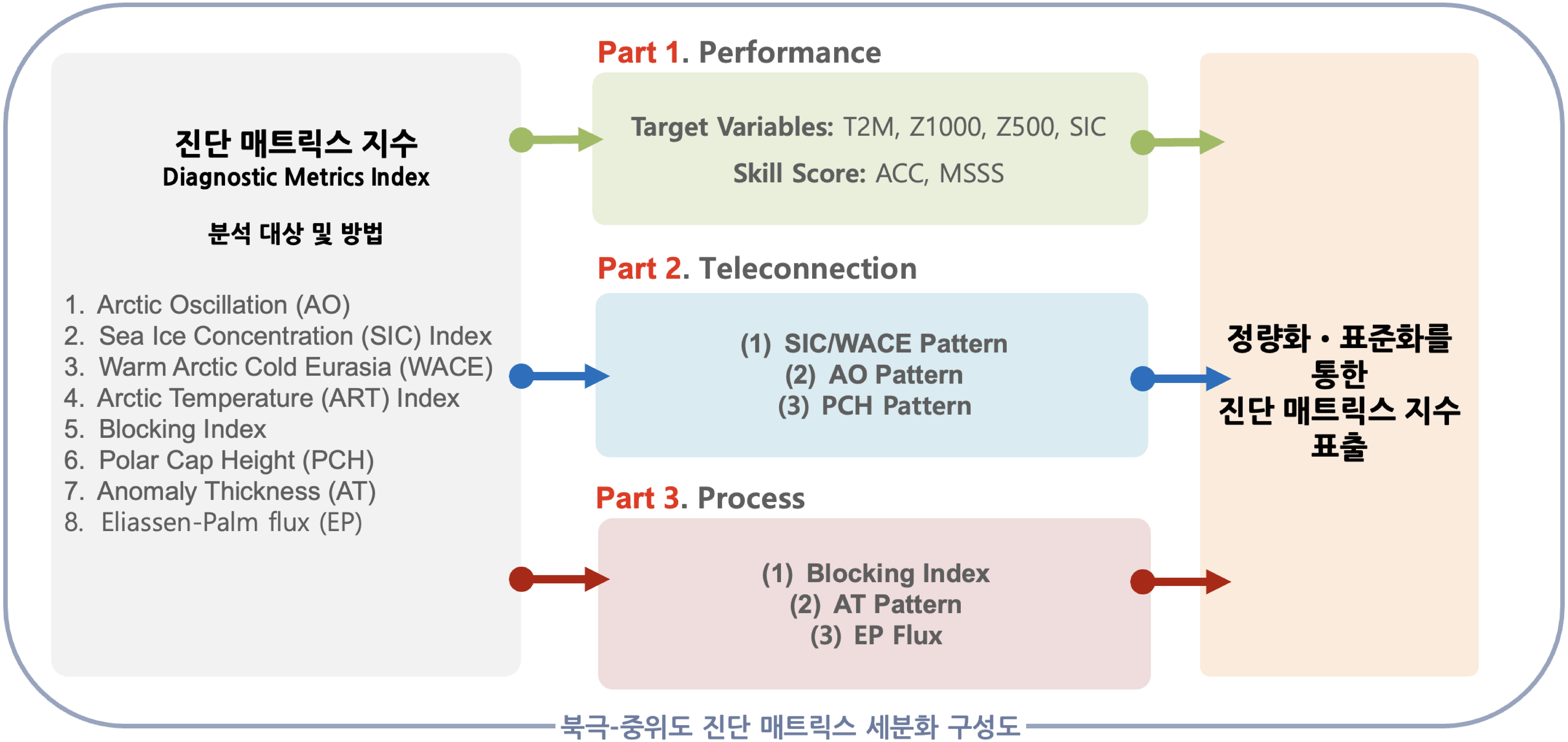
- 분석 변수: Available
- 비교 사항: CFSv1 1999-2010 /CFSv2 2011 - present

분석 자료 및 모델 정보

2. 연구 분석 방법 및 자료 | 진단 매트릭스 구성

▪ 북극-중위도 진단 매트릭스 구성

- 기존 북극-중위도 진단 매트릭스 지수(Index)를 1. Performance, 2. Teleconnection, 3. Process 로 세분화하여 평가



진단 매트릭스 지수
Diagnostic Metrics Index

분석 대상 및 방법

1. Arctic Oscillation (AO)
2. Sea Ice Concentration (SIC) Index
3. Warm Arctic Cold Eurasia (WACE)
4. Arctic Temperature (ART) Index
5. Blocking Index
6. Polar Cap Height (PCH)
7. Anomaly Thickness (AT)
8. Eliassen-Palm flux (EP)

Part 1. Performance

Target Variables: T2M, Z1000, Z500, SIC
Skill Score: ACC, MSSS

Part 2. Teleconnection

(1) SIC/WACE Pattern
(2) AO Pattern
(3) PCH Pattern

Part 3. Process

(1) Blocking Index
(2) AT Pattern
(3) EP Flux

정량화 • 표준화를 통한 진단 매트릭스 지수 표출

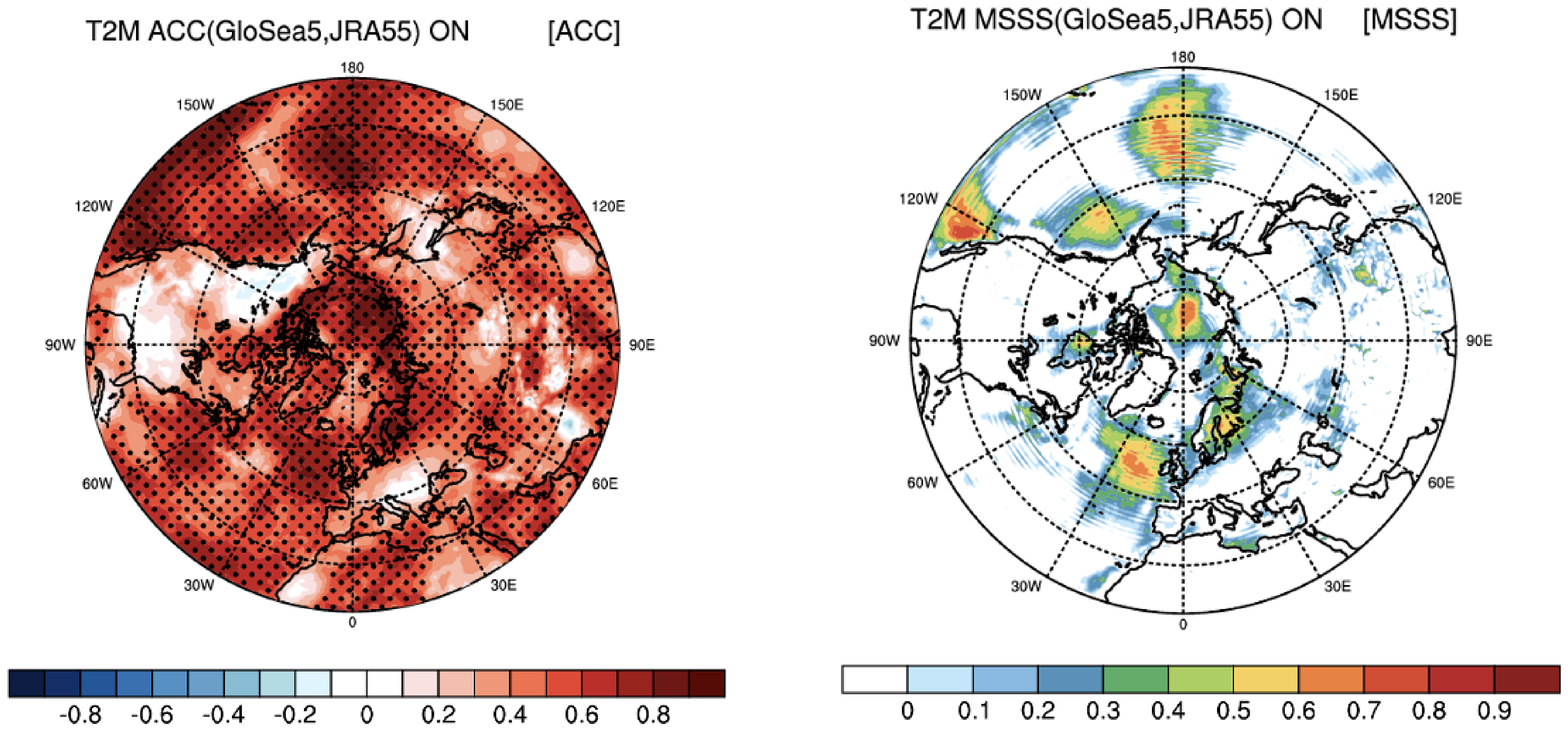
북극-중위도 진단 매트릭스 세분화 구성도

3. 연구 결과 | I. Performance

▪ Part 1. Performance Metric 분석 목적 및 방법 (Choi et al., 2015)

- 북반구 원격 상관 평가에 활용되는 대표적인 예측 인자를 선정하여 기본적인 예측성 평가 및 모델의 구조적 오차 파악을 통해 진단 평가 지수 제공
- 예측성 평가를 위해 이상상관계수(Anomaly Correlation Coefficient; ACC), 평균제곱근예측성(Mean Squared Skill Score; MSSS)을 활용하고, 모델의 구조적 오차 파악을 위해 평균제곱근오차(Root Mean Squared Error; RMSE), 표준 오차(% of Error)를 활용하여 분석

● **Performance 분석 예시: ACC, MSSS**



T2M ACC(GloSea5,JRA55) ON [ACC]

T2M MSSS(GloSea5,JRA55) ON [MSSS]

$$(1)\ \mathrm{ACC} = \frac{1}{N-1}\frac{\sum(M-\bar{M})(O-\bar{O})}{\sigma_M\sigma_O}$$

이상상관계수

$$(2)\ \mathrm{MSSS} = 1 - \frac{MSE}{MSE_c}$$

평균제곱근예측성

$$(3)\ \mathrm{RMSE} = \left[\sum_{i=1}^{N}\frac{(M-O)^2}{N}\right]^{1/2}$$

평균제곱근오차

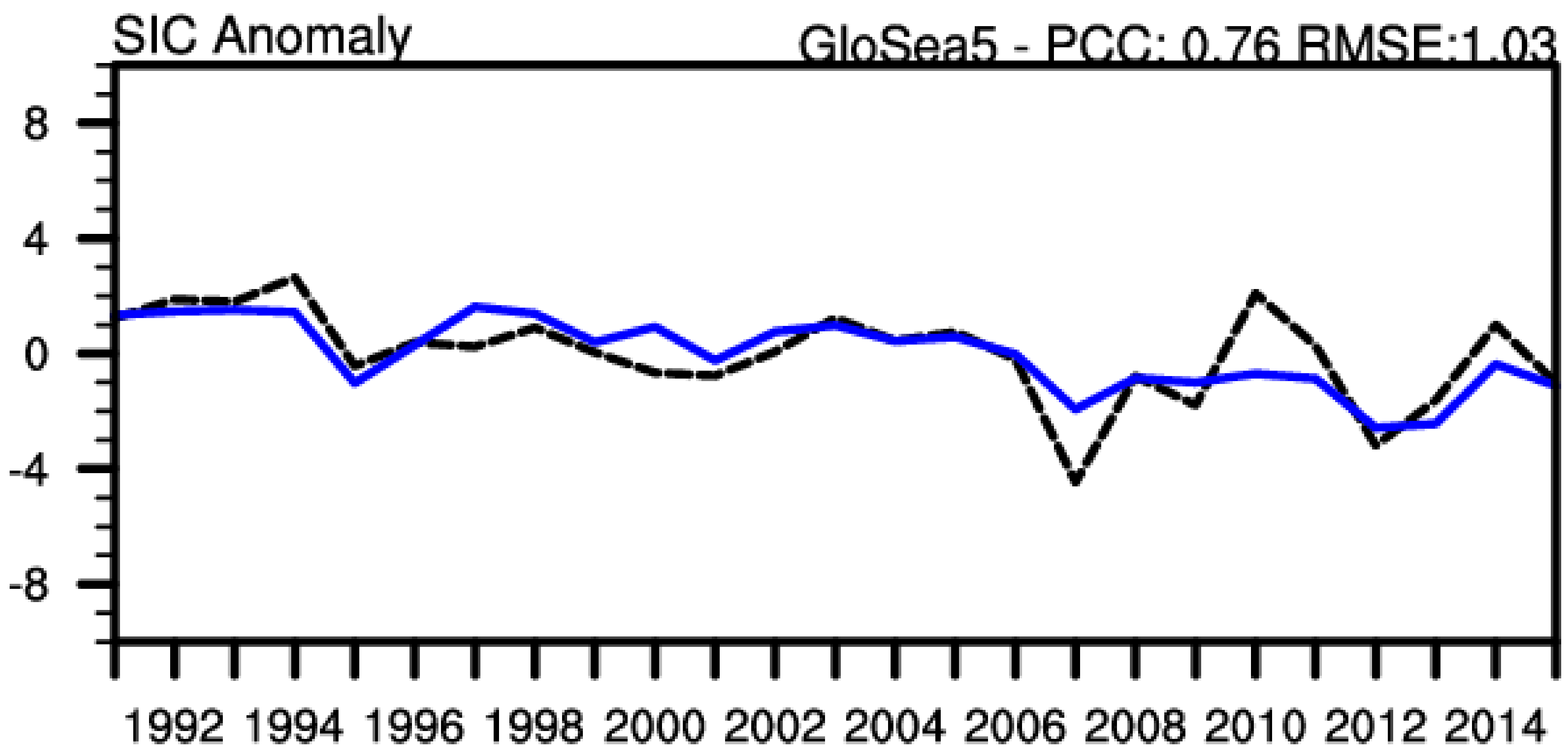
$$(4)\ \%\ \text{of Error} = \mathrm{abs}\left(\frac{M-O}{\mathrm{ref}}\right) * 100$$

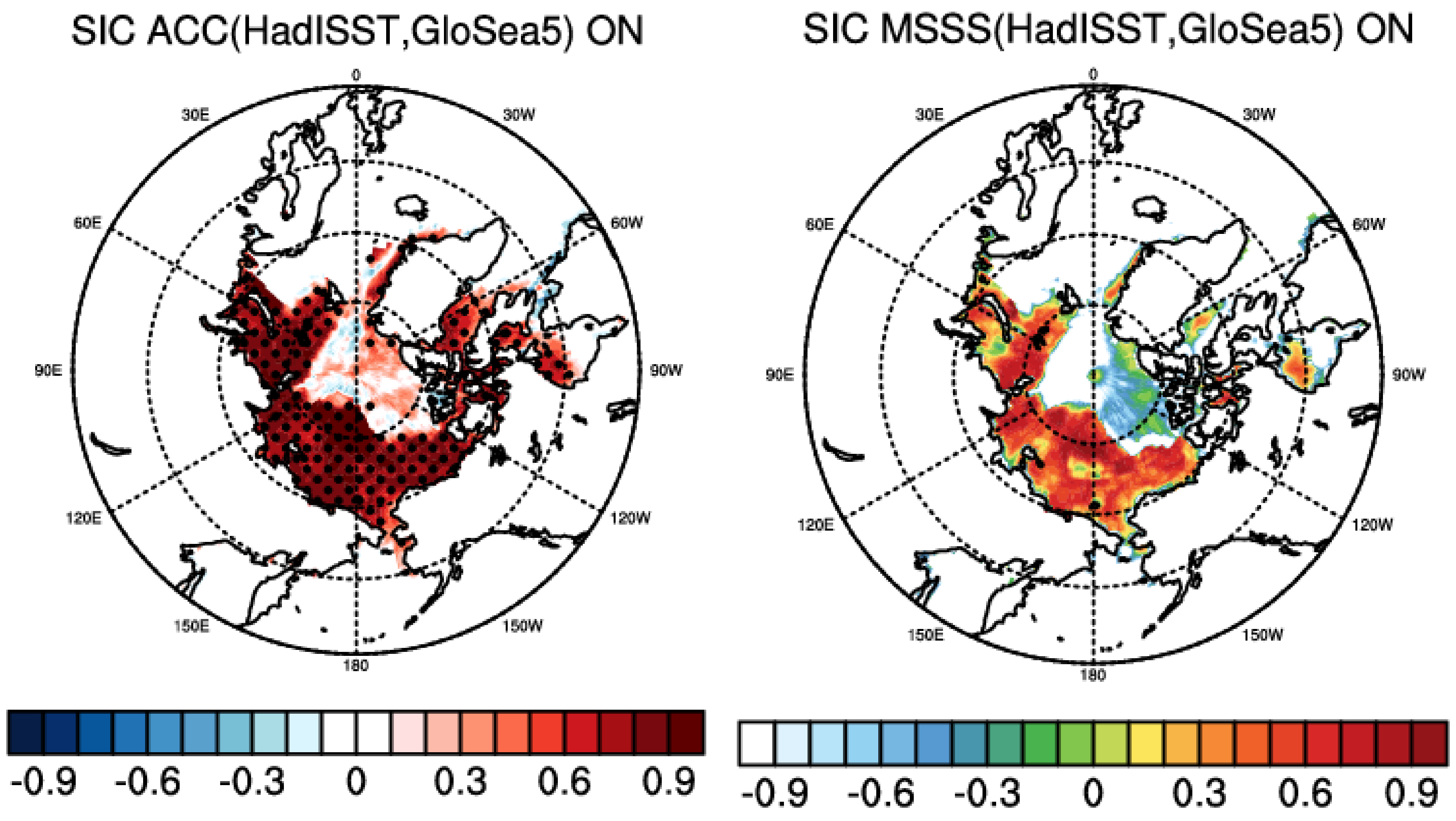
표준 오차

3. 연구 결과 | I. Performance

▪ Part 1. Performance 예측성 분석 결과

Performance | 해빙 예측성 분석 결과 (GloSea5 only, ON)

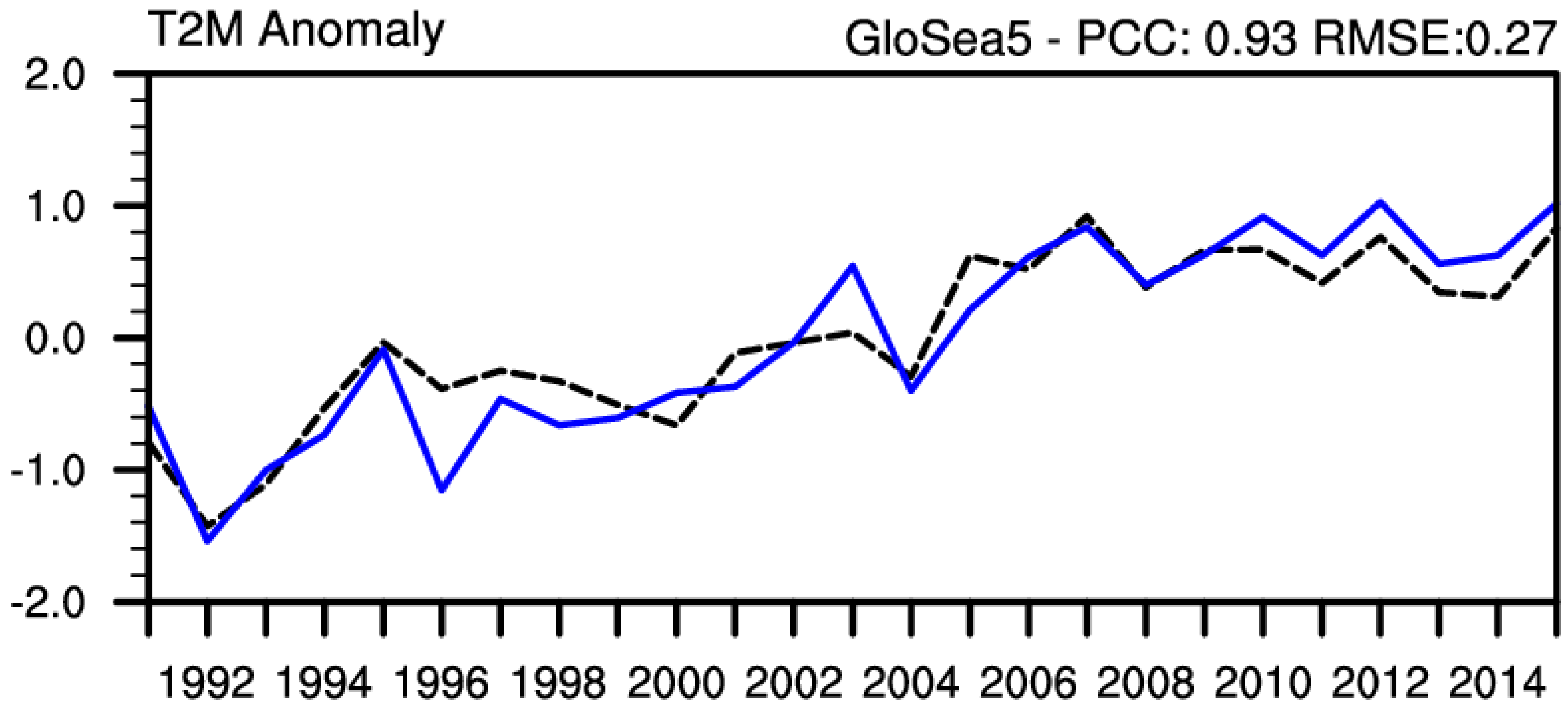




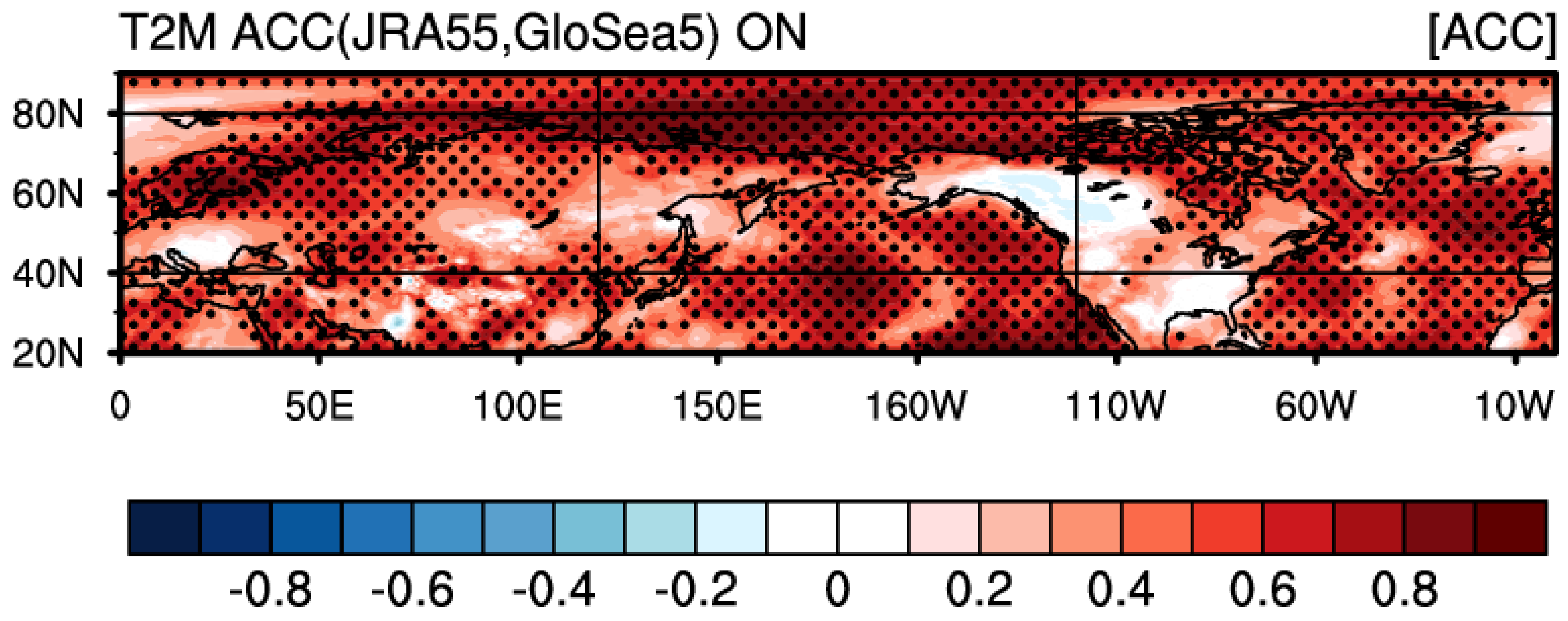
3. 연구 결과 | I. Performance

- Part 1. Performance 예측성 분석 결과

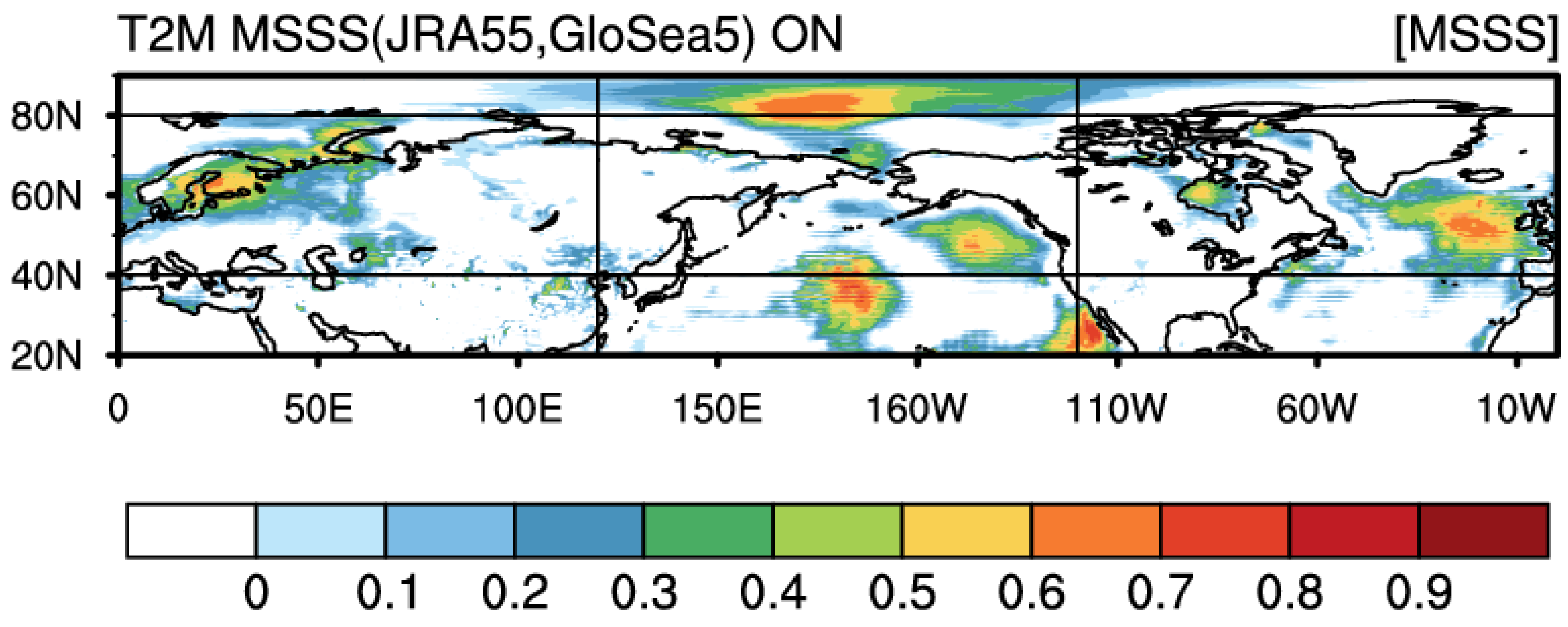
Performance | T2M 예측성 분석 결과 (GloSea5 only, ON)


T2M Anomaly

GloSea5 - PCC: 0.93 RMSE:0.27


T2M ACC(JRA55,GloSea5) ON

[ACC]

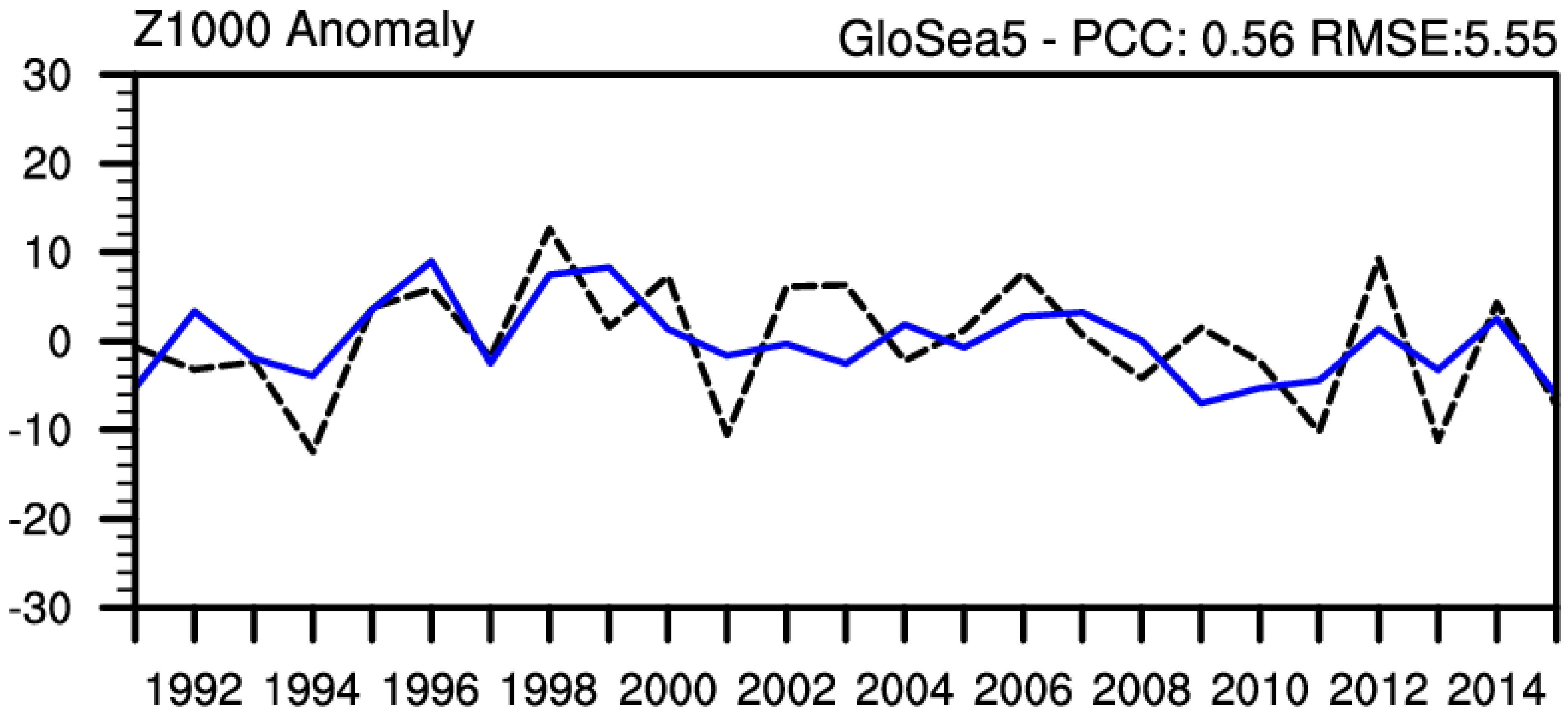

T2M MSSS(JRA55,GloSea5) ON

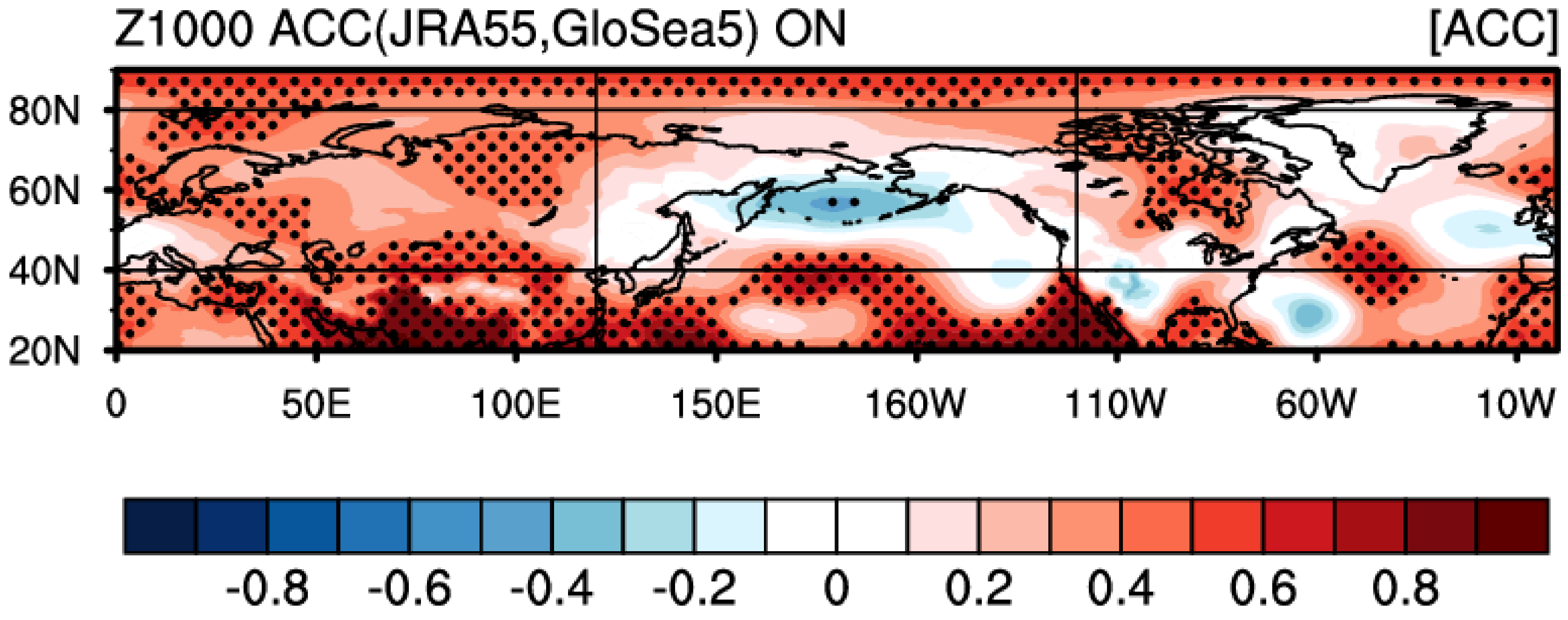
[MSSS]

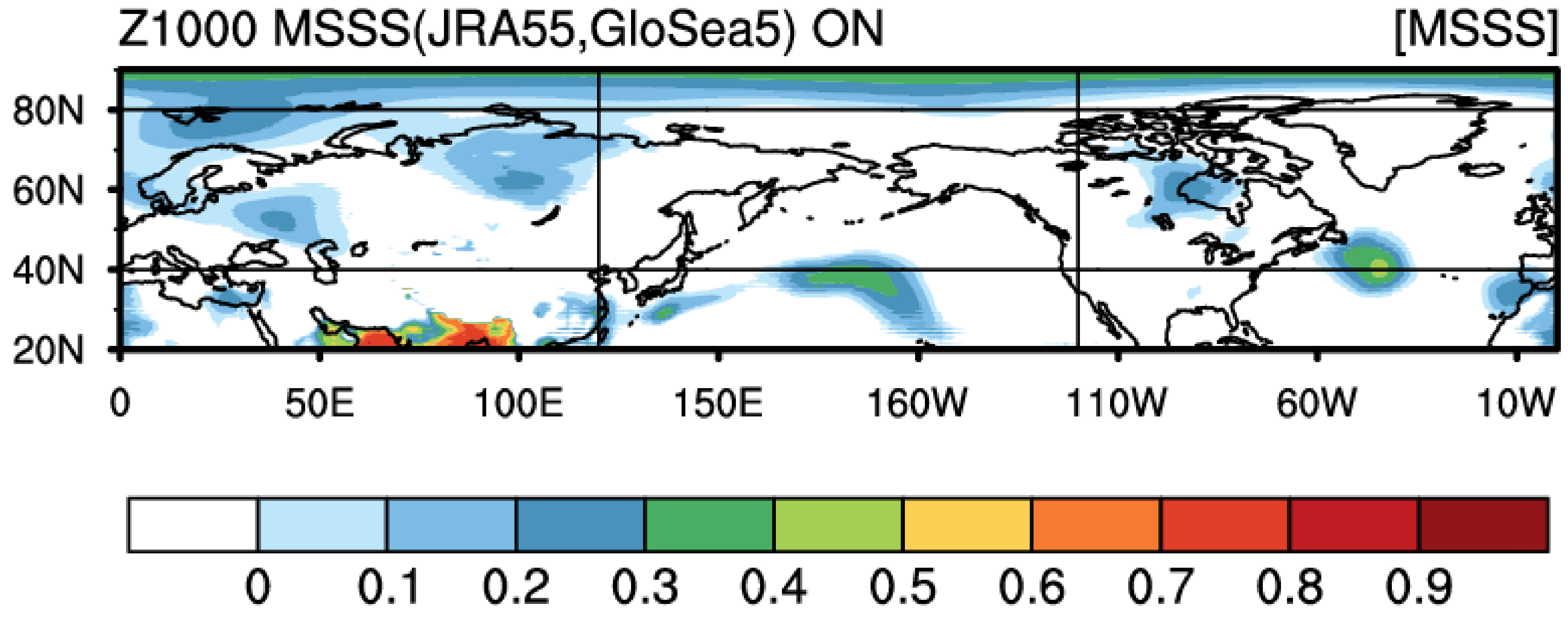
3. 연구 결과 | I. Performance

▪ Part 1. Performance 예측성 분석 결과

Performance | Z1000 예측성 분석 결과 (GloSea5 only, ON)



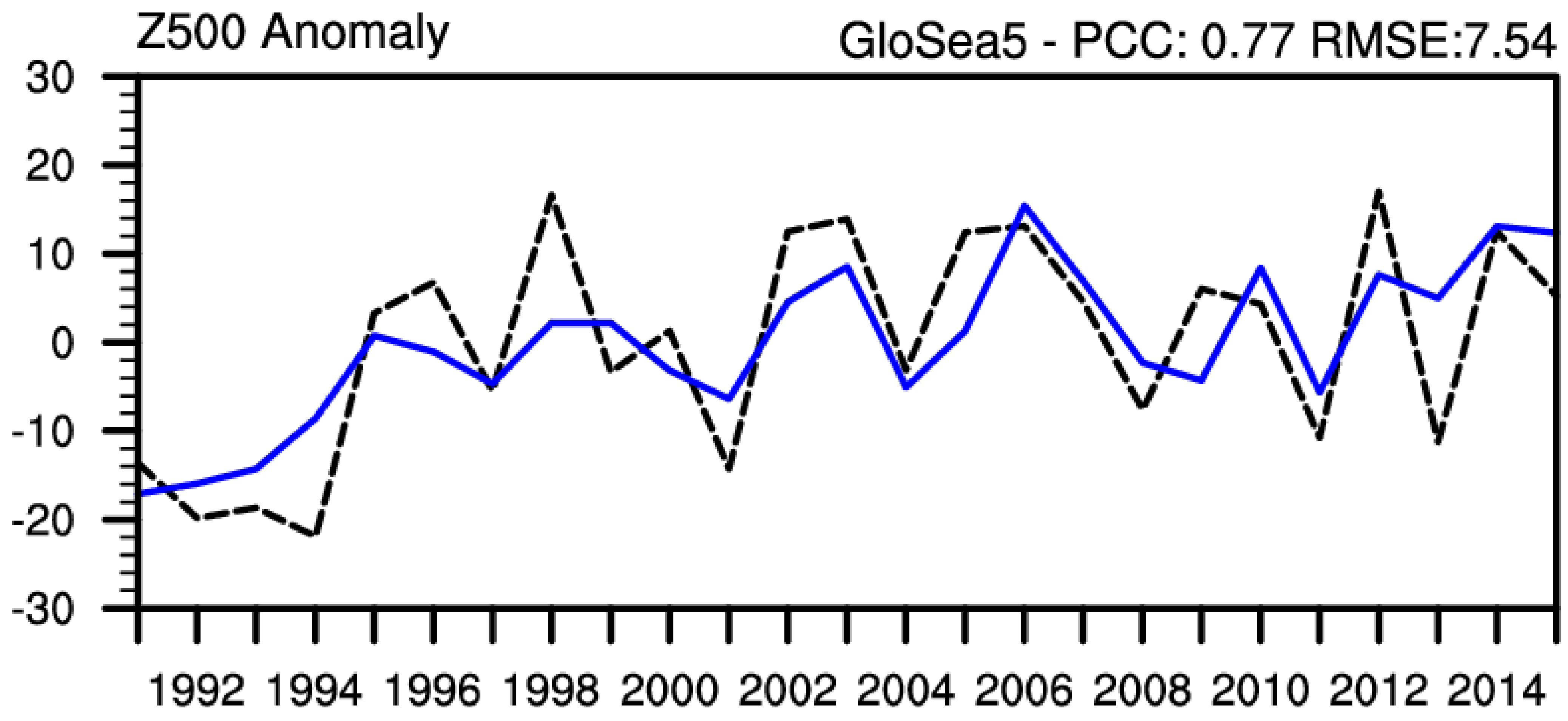


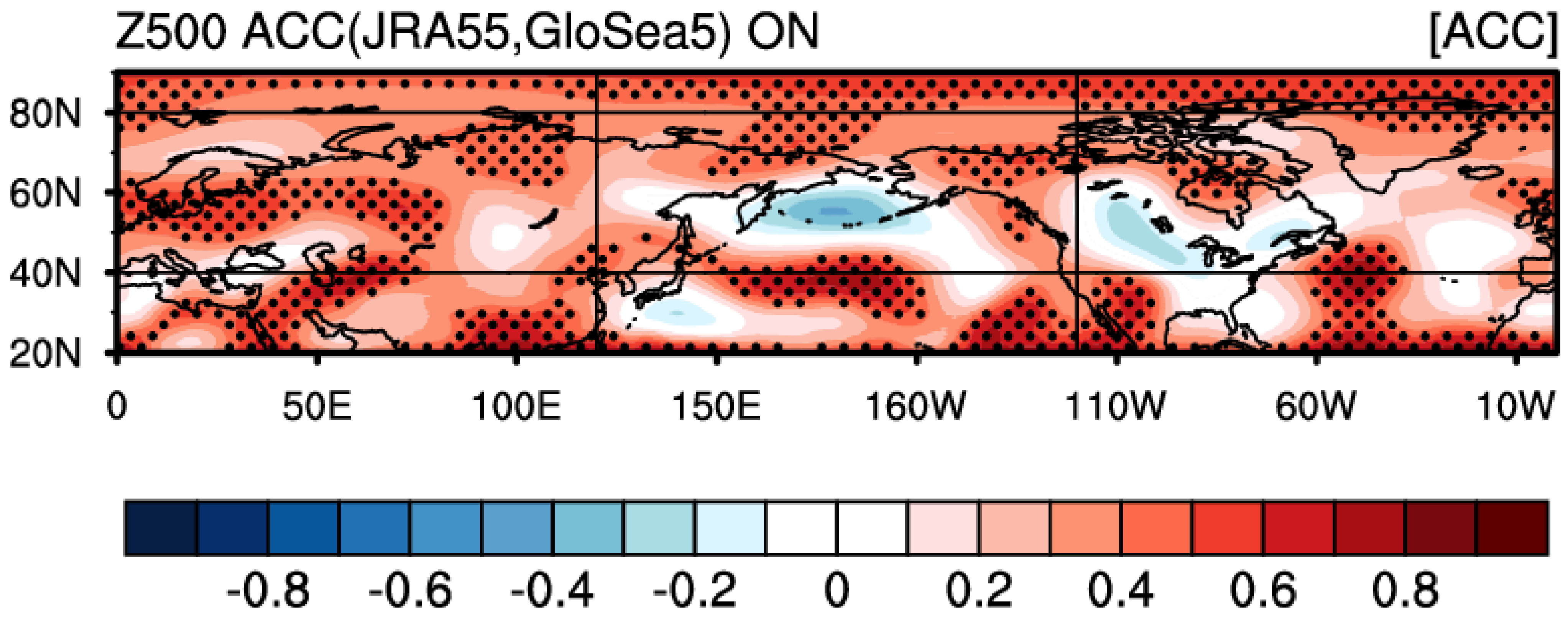


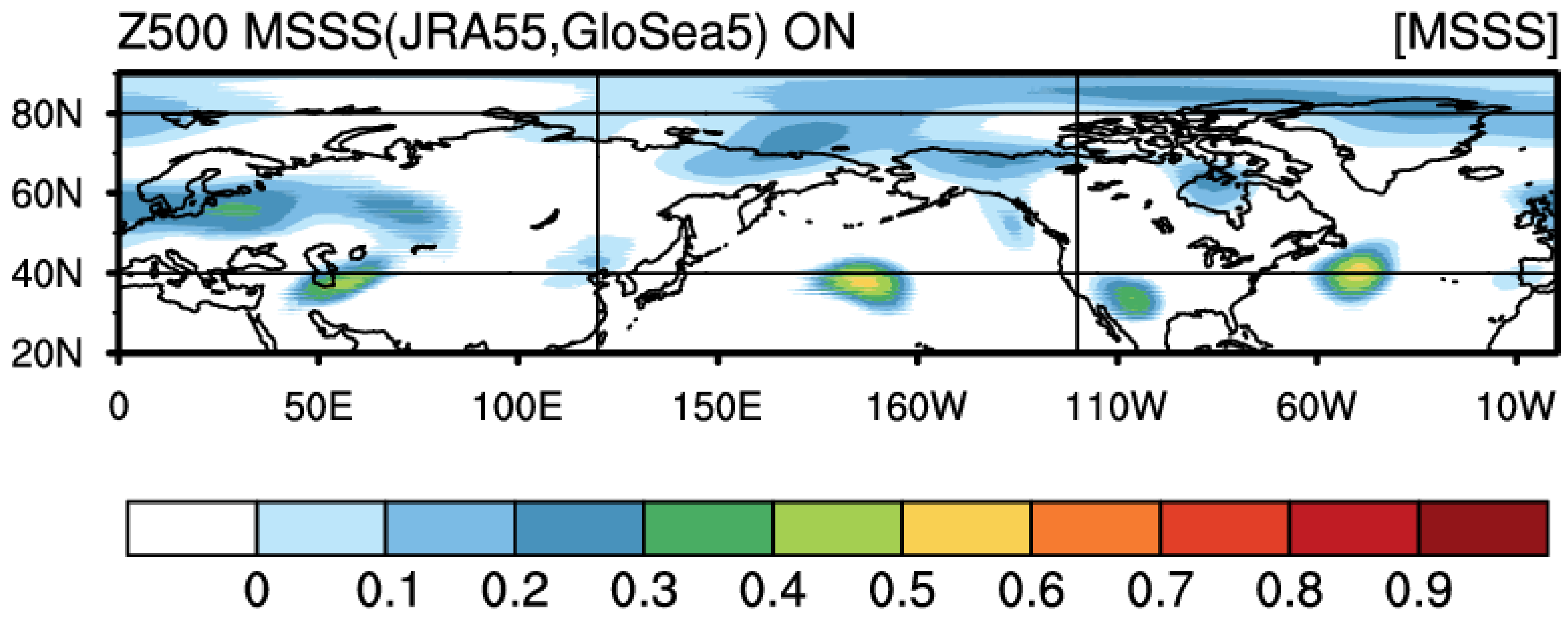
3. 연구 결과 | I. Performance

▪ Part 1. Performance 예측성 분석 결과

Performance | Z500 예측성 분석 결과 (GloSea5 only, ON)







3. 연구 결과 | II. Teleconnection

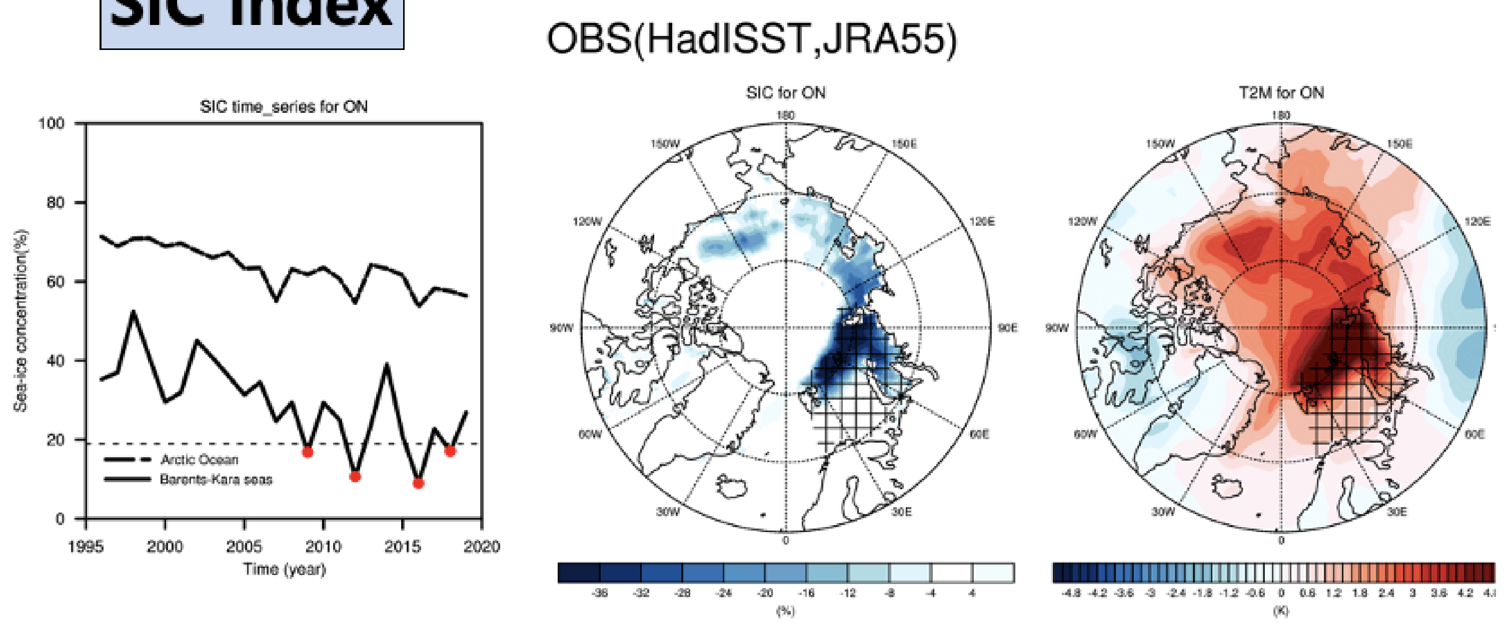
▪ Part 2. Teleconnection: SIC/WACE 예측성 분석 목적 및 방법

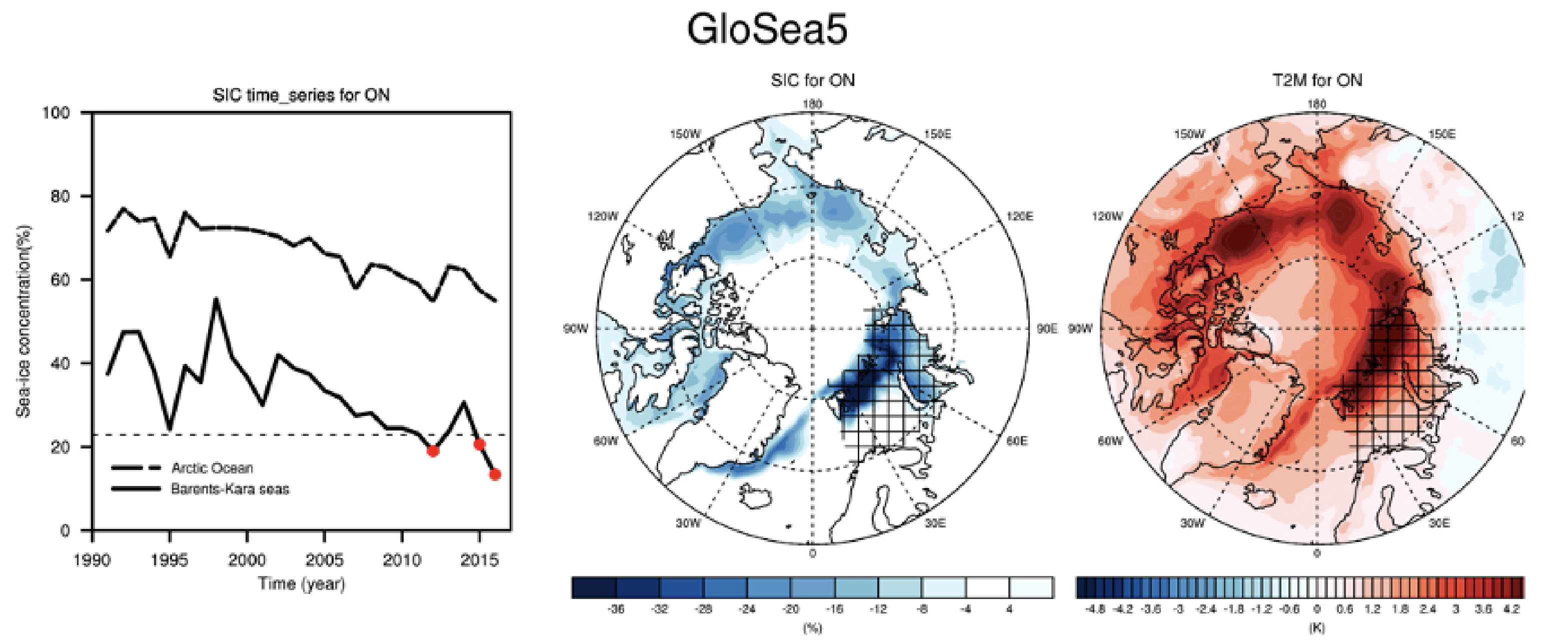
(1) Sea Ice Concentration (SIC) Index/Warm Arctic Cold Eurasia (WACE) 분석
(Kim et al., 2014; Kug et al., 2015)

- 해빙 감소 기간에 따른 중위도 기온 원격 상관(북극 고온-중위도 저온) 성능 평가
- 해빙 농도 시계열 (SIC Index)을 바탕으로 해빙 감소 기간 선정 및 해당 기간 온도 합성장의 패턴 상관계수 또는 북극 기온 지수 기법 (Arctic Temperature Index; ART Index) 을 활용하여 지수화

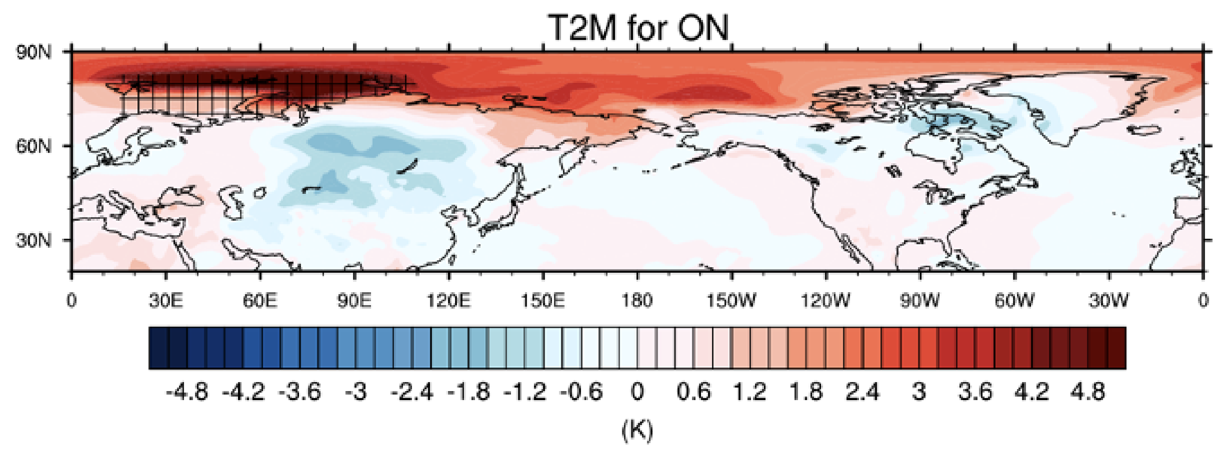
● Teleconnection 분석 예시: SIC Index & WACE/ART Index

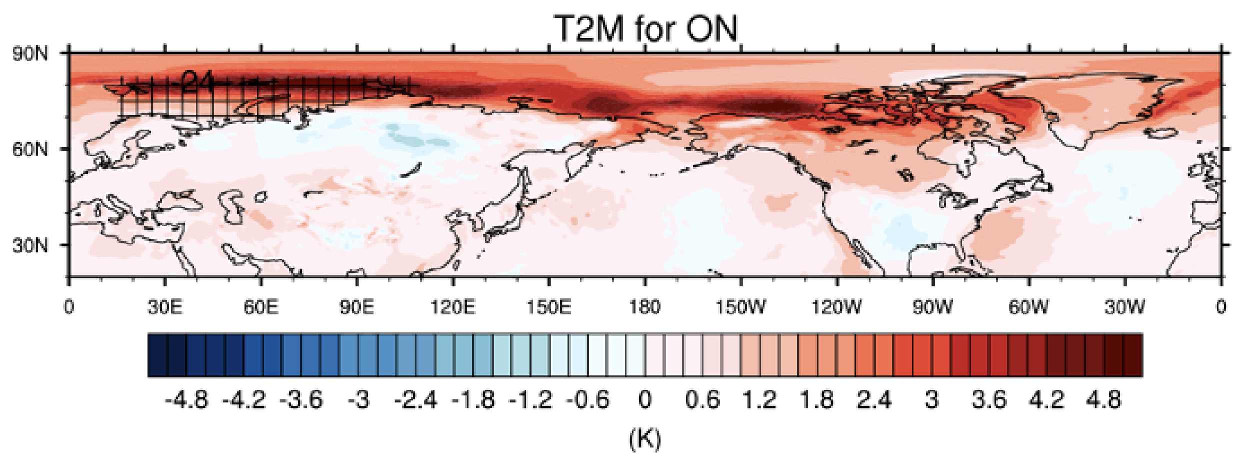
SIC Index


OBS(HadISST,JRA55)


GloSea5

WACE Pattern/ ART Index

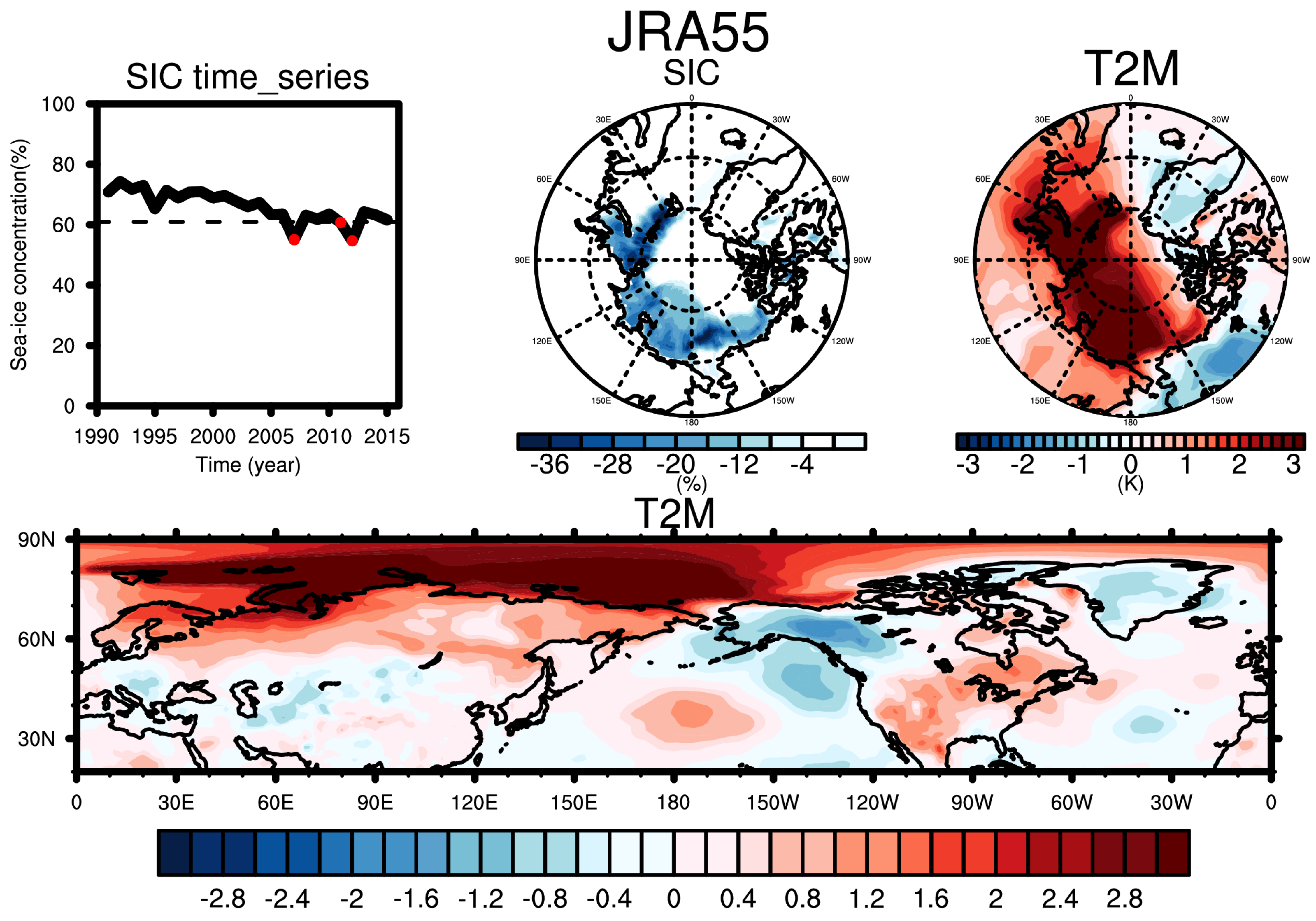


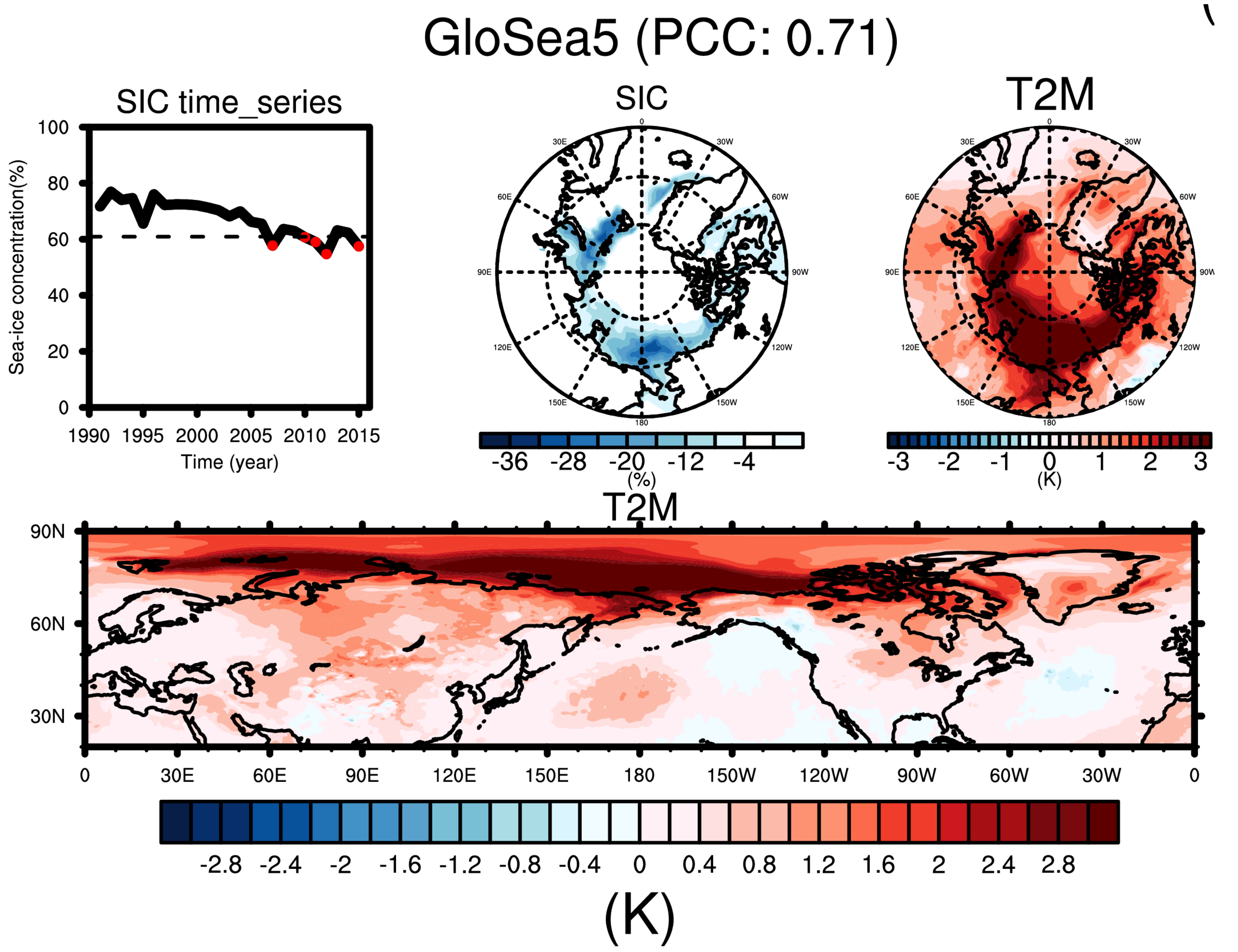


3. 연구 결과 | II. Teleconnection

▪ Part 2. Teleconnection: SIC/WACE 예측성 분석 결과

Teleconnection | SIC/WACE 예측성 분석 결과 (GloSea5 only, ON)





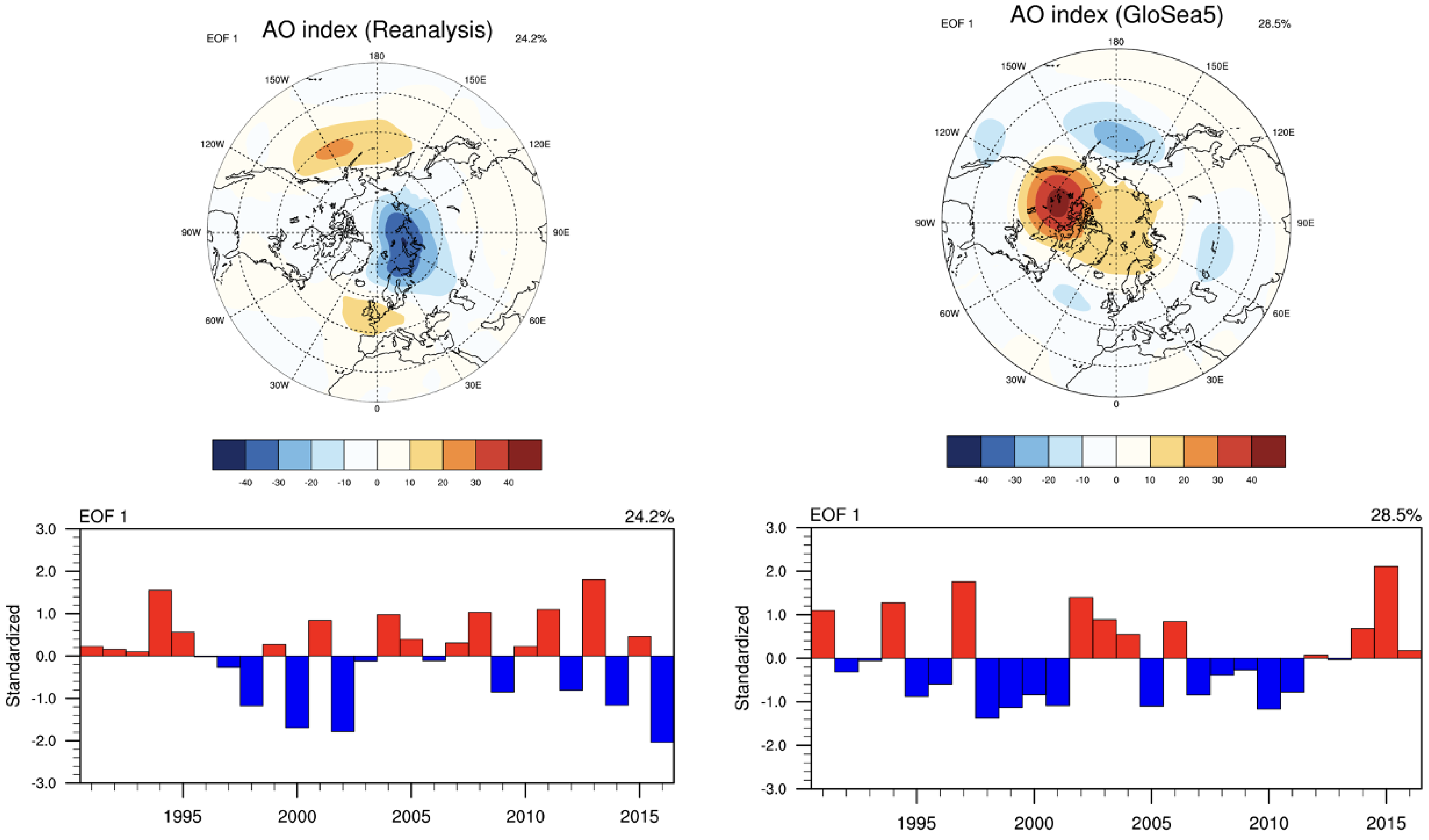
3. 연구 결과 | II. Teleconnection

▪ Part 2. Teleconnection: AO 예측성 분석 목적 및 방법

(2) Arctic Oscillation (AO): 북극진동 분석 (Higgins et al., 2000; Wallace & Hobbs et al., 1998; 2000)

- 중위도 한파와 밀접한 연관이 있는 북극진동 모의 성능 평가
- EOF(Empirical Orthogonal Function) 기법을 이용하여 산출된 북극진동 모드의 패턴 상관계수(Pattern Correlation) 또는 주성분 시계열 상관계수(Principal Component Timeseries Correlation)를 활용하여 지수화

● Teleconnection 분석 예시: AO Pattern/Index



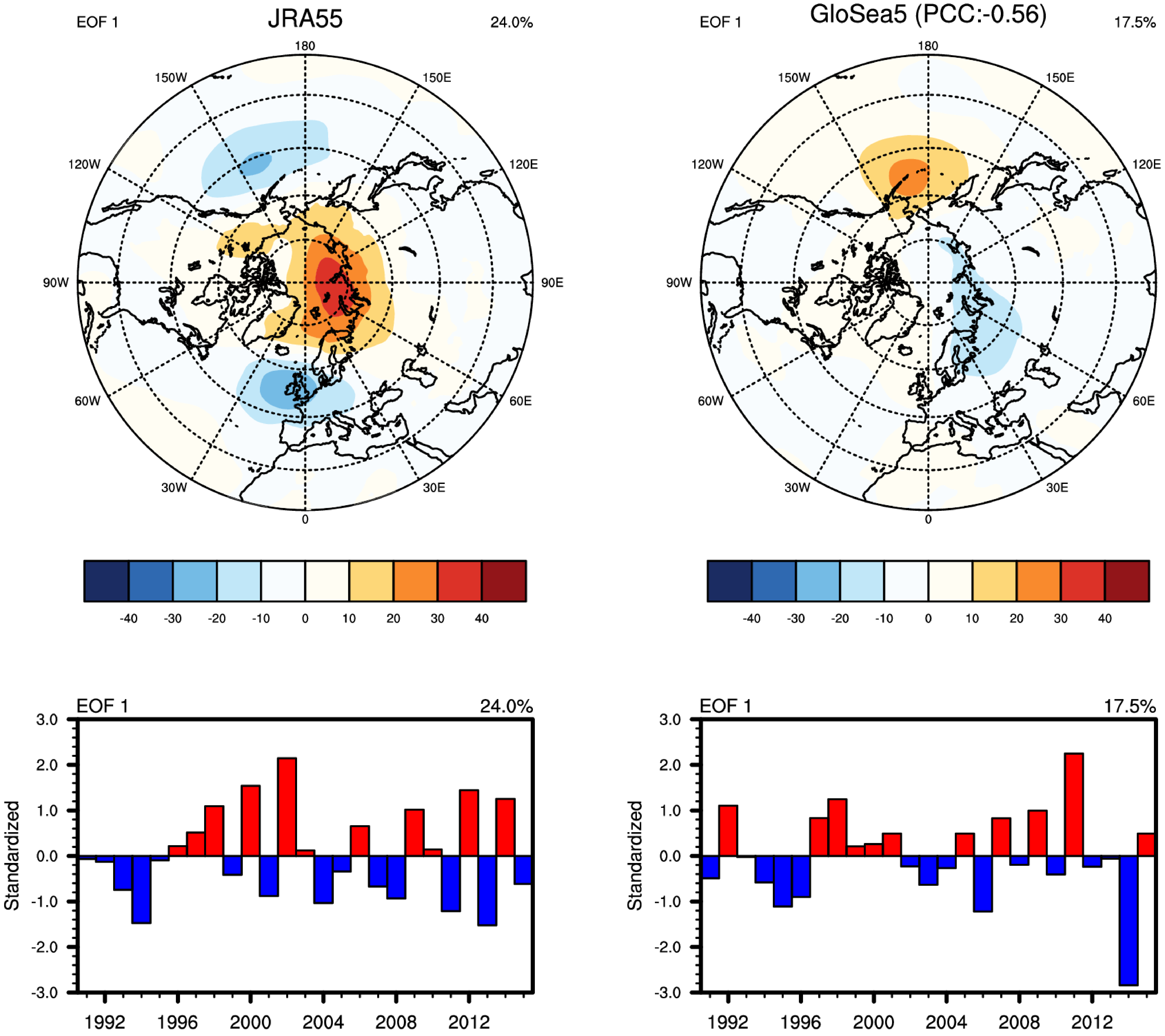
지수화 방안

○ 북극진동 모드의 패턴 상관계수
○ 주성분시계열 상관계수
○ 북극진동지수 활용 (Wallace & Hobbs., 1998; 2020)

3. 연구 결과 | II. Teleconnection

▪ Part 2. Teleconnection: AO 예측성 분석 결과

Teleconnection | AO 예측성 분석 결과 (GloSea5 only, ON)



JRA55 : 2007, 2011, 2012
GloSea5 : 2007, 2010, 2011, 2012, 2015

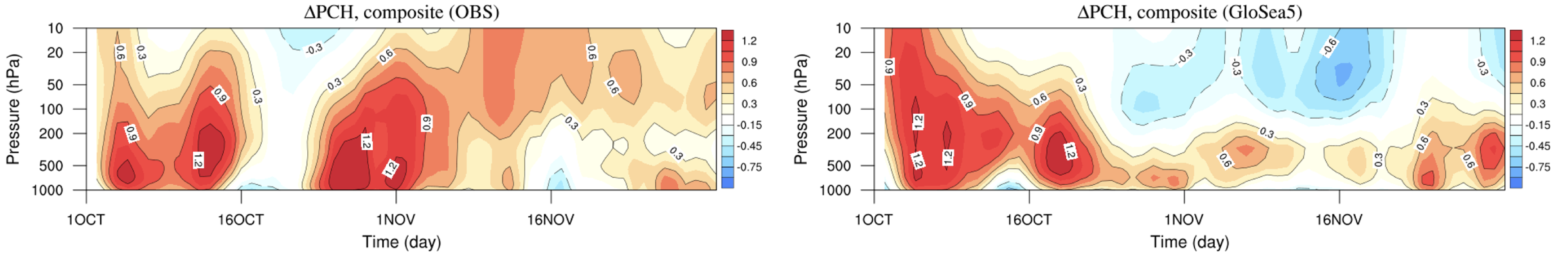
3. 연구 결과 | II. Teleconnection

▪ Part 2. Teleconnection: PCH 예측성 분석 목적 및 방법

(3) Polar Cap Height (PCH) 분석 (Kim et al., 2014)

- 해빙 감소 기간에 따른 극소용돌이 변동성 (대류권-성층권 극소용돌이 변동성의 상호 연관성) 평가
- 해빙 감소 기간에 따른 극지역 지위고도 아노말리 합성장의 패턴 상관계수를 활용하여 지수화

● Teleconnection 분석 예시: PCH



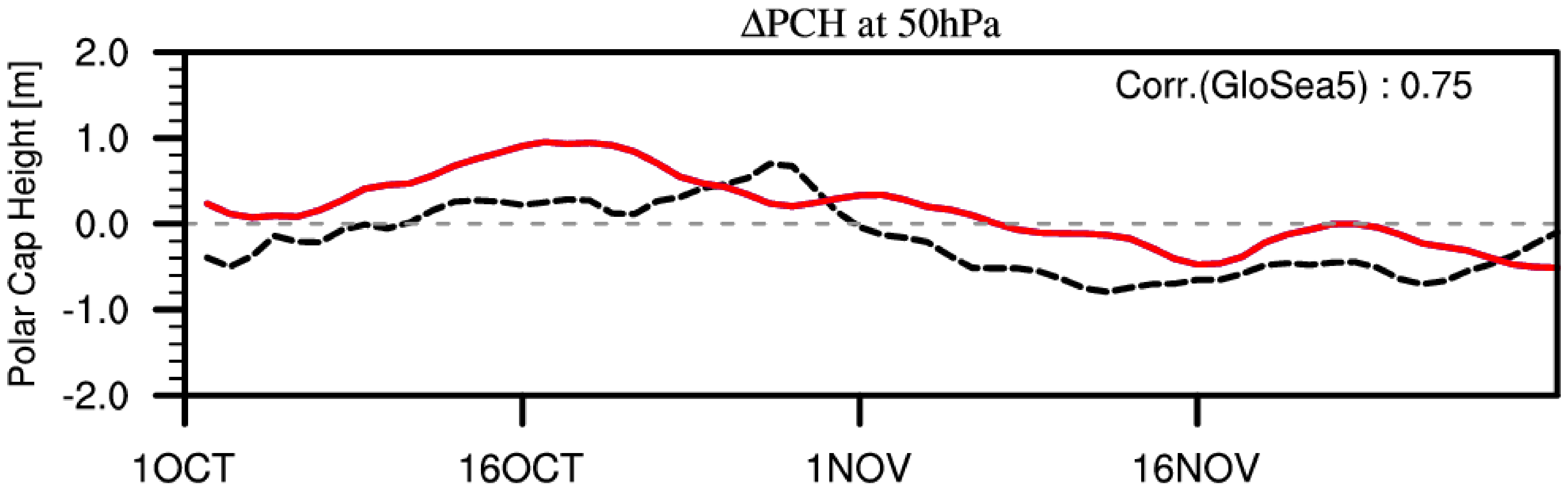
지수화 방안

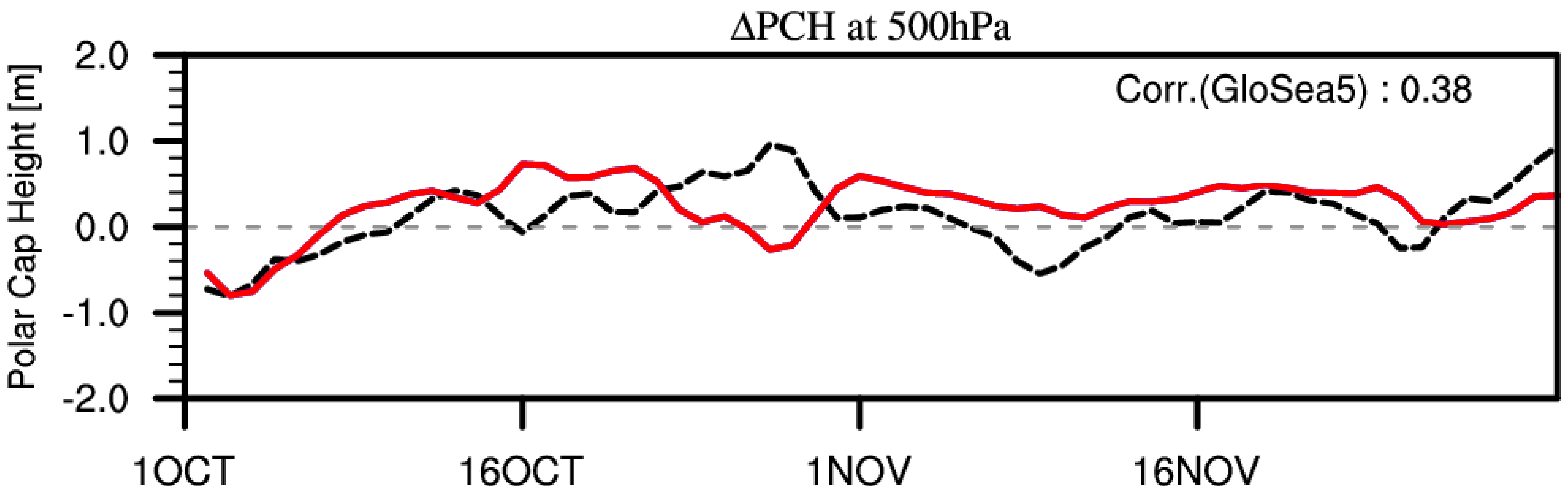
○ SIC Index를 기반으로 해빙 감소 기간 선정 및 극지역 지위고도 아노말리 합성장의 패턴 상관계수 또는 AO Index와의 상관계수를 활용하여 지수화 (Courtesy of NOAA CPC: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/hgt.shtml)

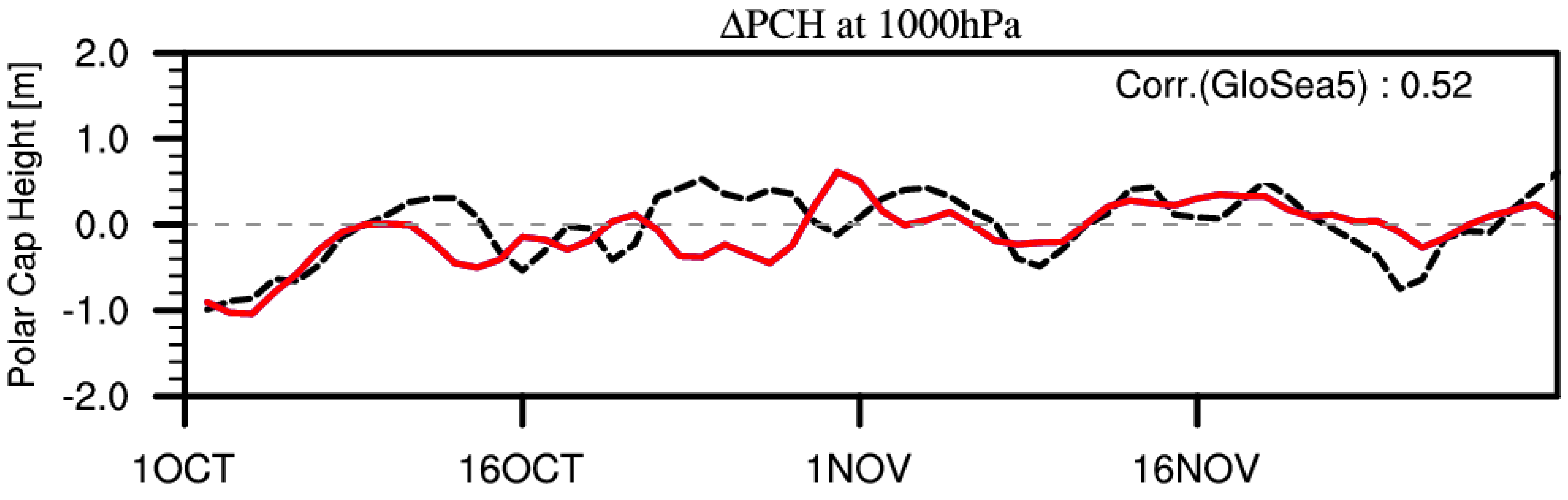
3. 연구 결과 | II. Teleconnection

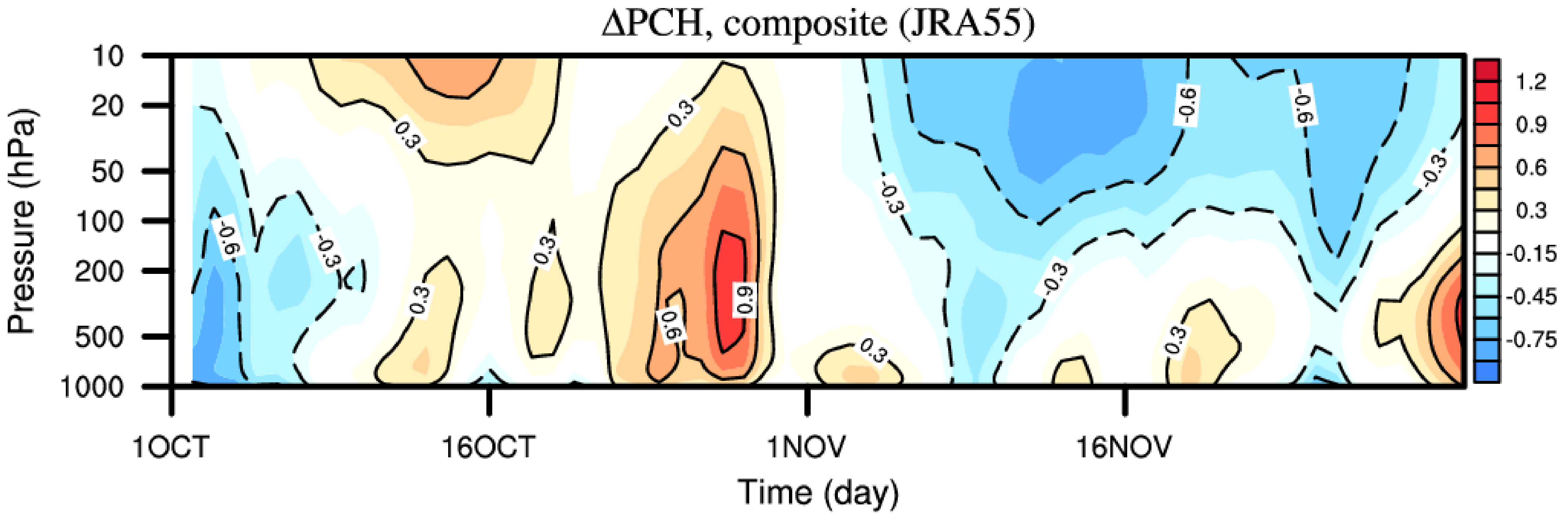
▪ Part 2. Teleconnection: PCH 예측성 결과

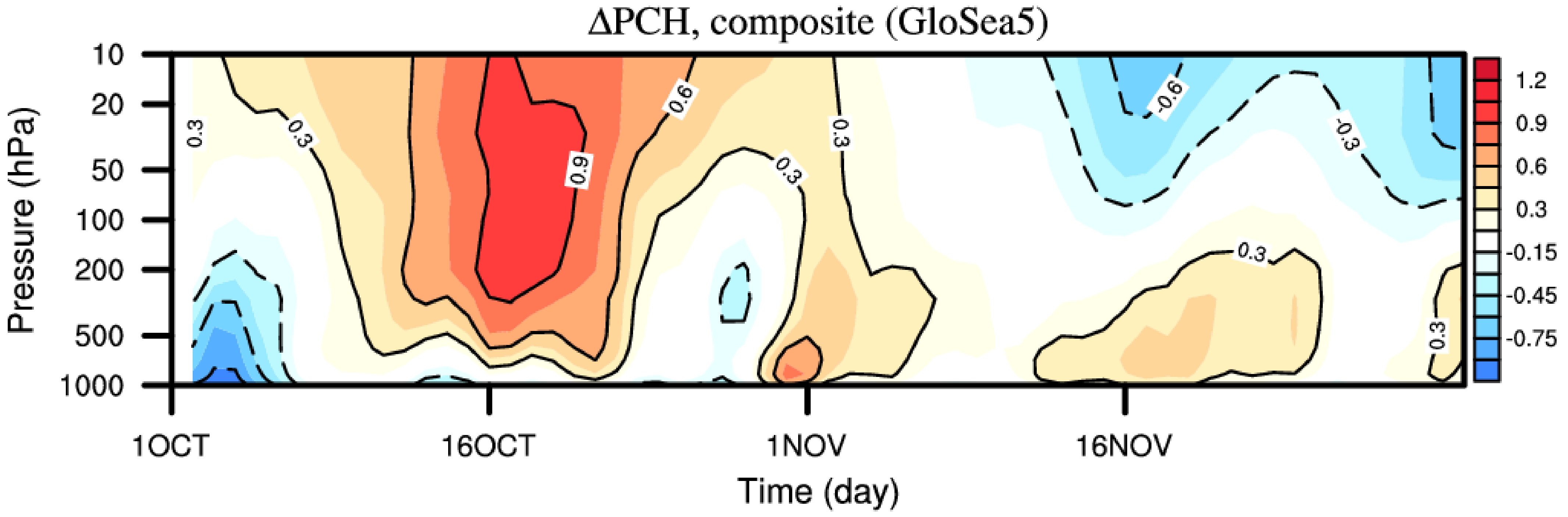
Teleconnection | PCH 예측성 분석 결과 (GloSea5 only, ON)


ΔPCH at 50hPa


ΔPCH at 500hPa


ΔPCH at 1000hPa


ΔPCH, composite (JRA55)


ΔPCH, composite (GloSea5)

3. 연구 결과 | III. Process

▪ Part 3. Process: Blocking Index 예측성 분석 목적 및 방법

(1) Blocking Index 분석 (Tibadli & Molteni, 1990)

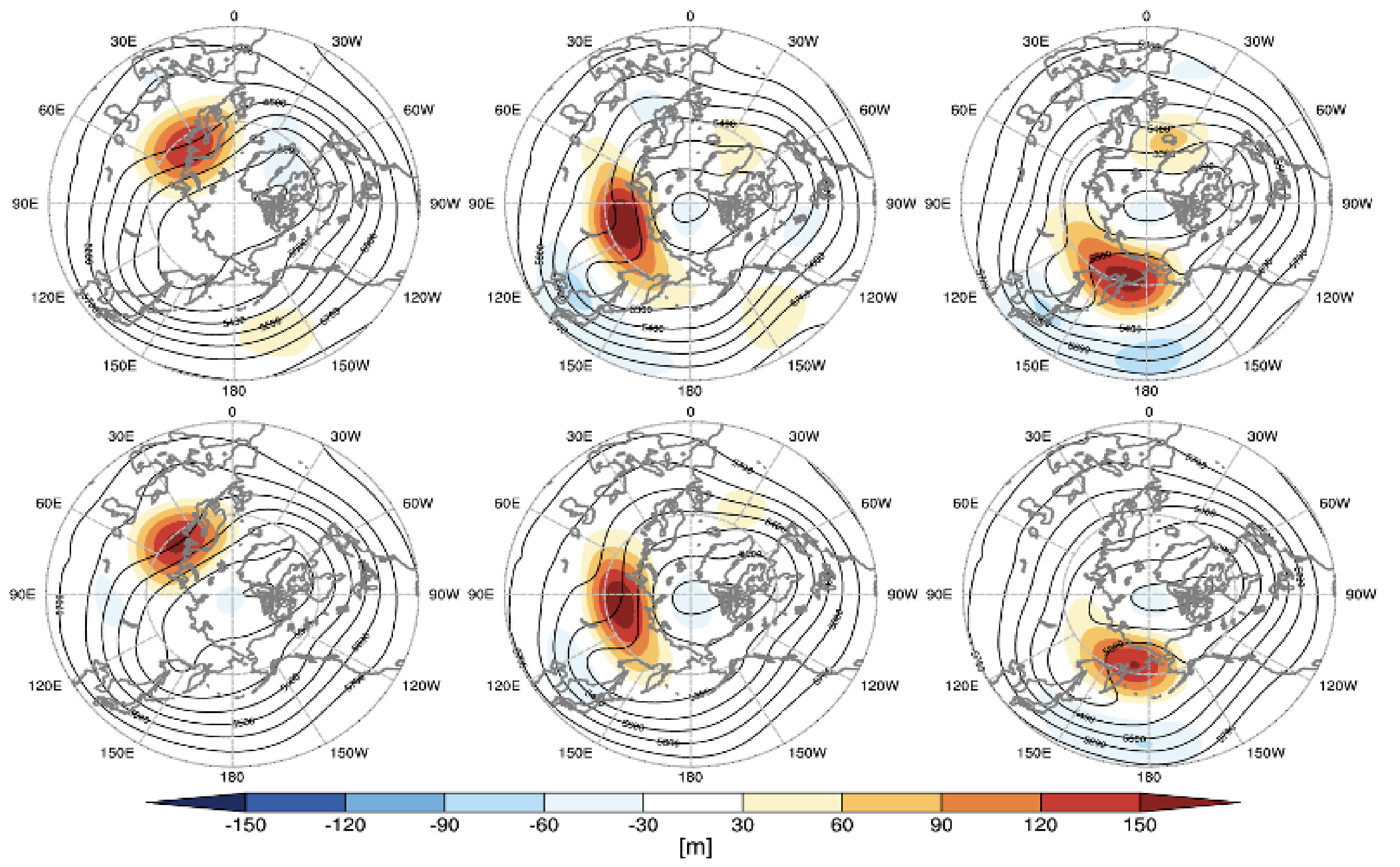
- 중위도 기압계 및 기온 날씨와 밀접한 연관이 있는 대표적인 Blocking의 강도, 빈도, 지속기간 평가

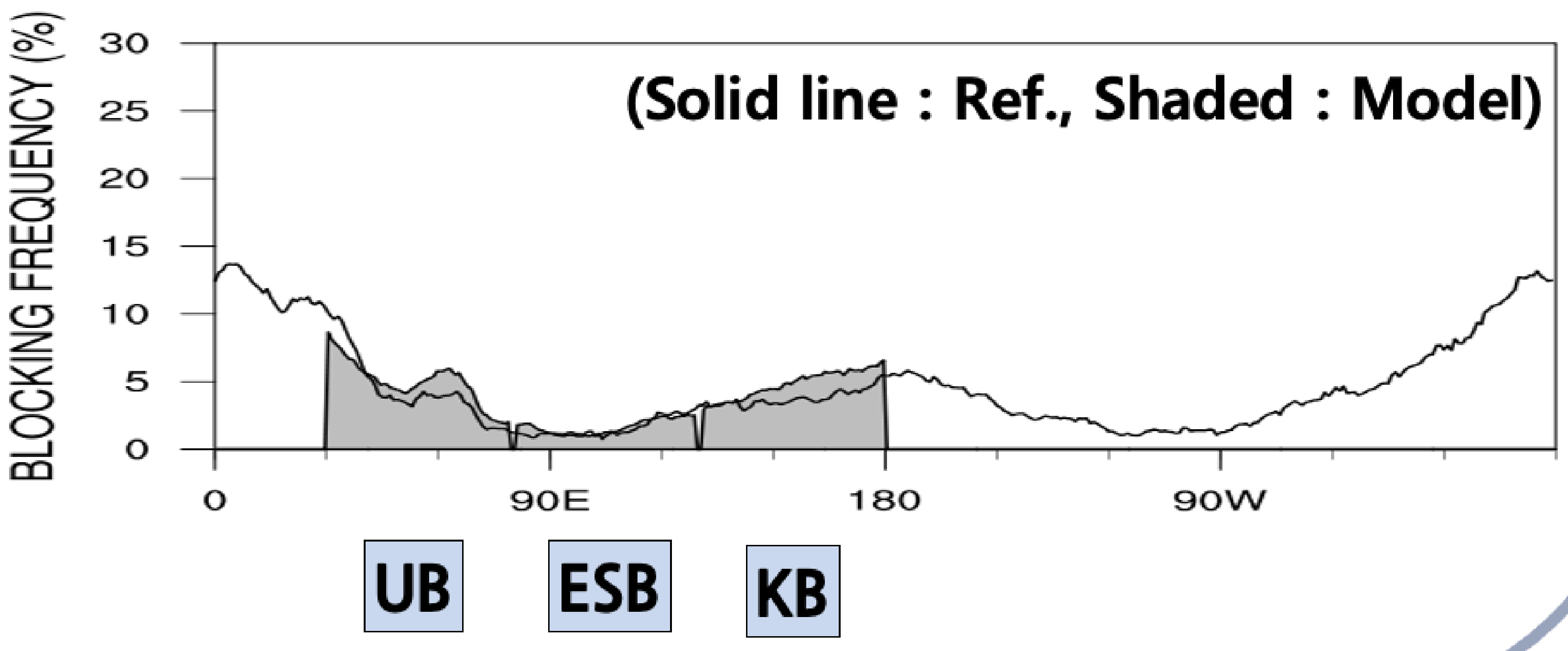
● Process 분석 예시: Blocking Index

Blocking 분석 정의 및 기법

Region	**UB**	Ural Blocking (30°E-80°E)
	ESB	East Siberia Blocking (80°E-130°E)
	KB	Kamchatka Blocking (130°E-180°E)
Index	**Mean Amplitude**	[모델-재분석 자료] (블로킹 발생 기간 내 지역별 평균 500hPa 지위고도 합성장 아노말리)
	Frequency	[모델-재분석 자료] ($\frac{\text{총 블로킹 일수}}{\text{총 분석기간}}$)*100(%)
	Duration	[모델-재분석 자료] ($\frac{\text{총 블로킹 일수}}{\text{총 블로킹 발생횟수}}$)

계절(OND)		Strength	Pattern Correlation	Frequency	Duration
Region	UB	18.9	0.98	0.52	-1.00
	ESB	-0.22	0.92	0.08	0.29
	KB	-26.5	0.92	1.03	0.10



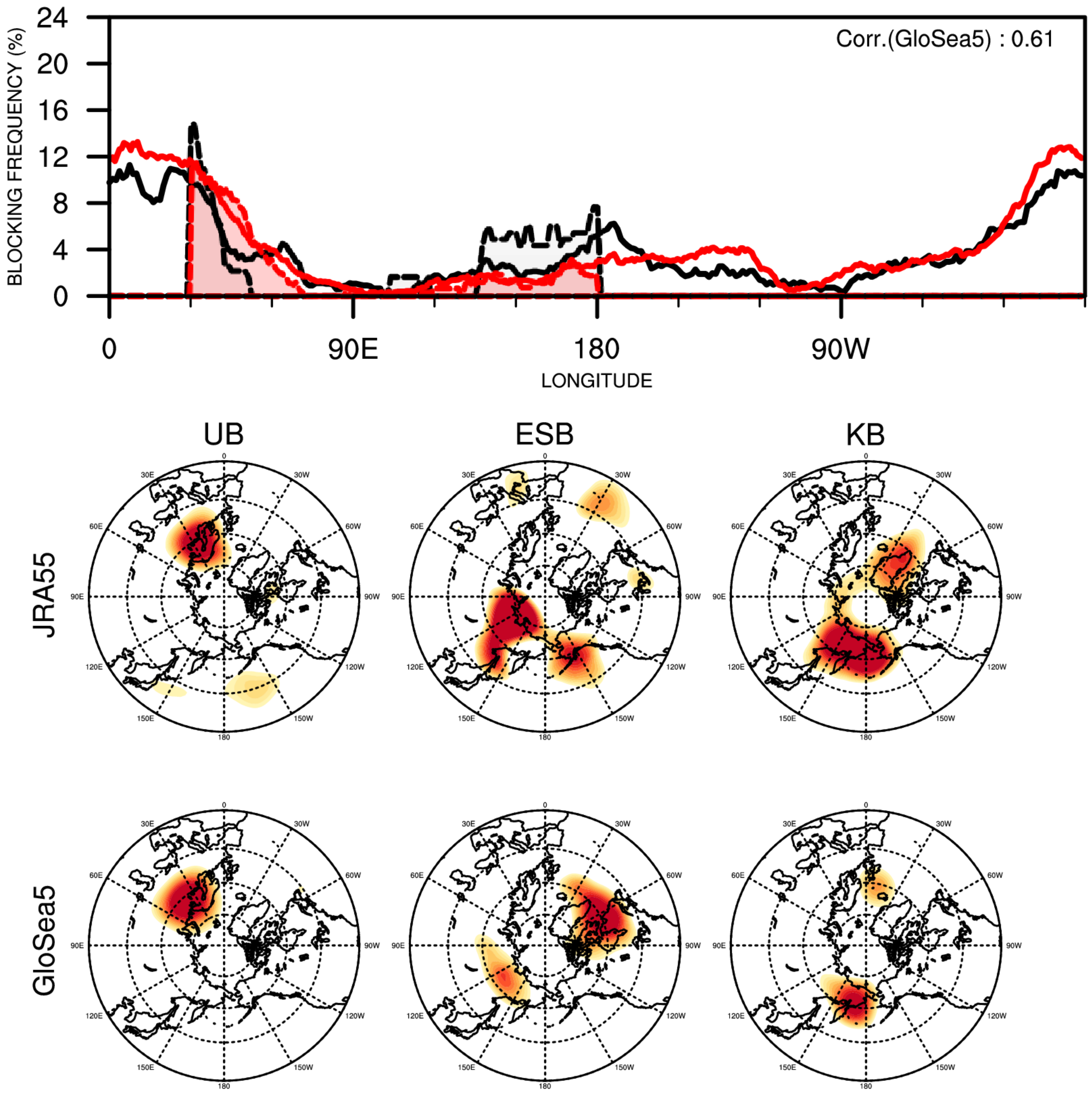


(Solid line : Ref., Shaded : Model)

3. 연구 결과 | III. Process

▪ Part 3. Process: Blocking Index 예측성 분석 결과

Process | Blocking Index 예측성 분석 결과 (GloSea5 only, ON)



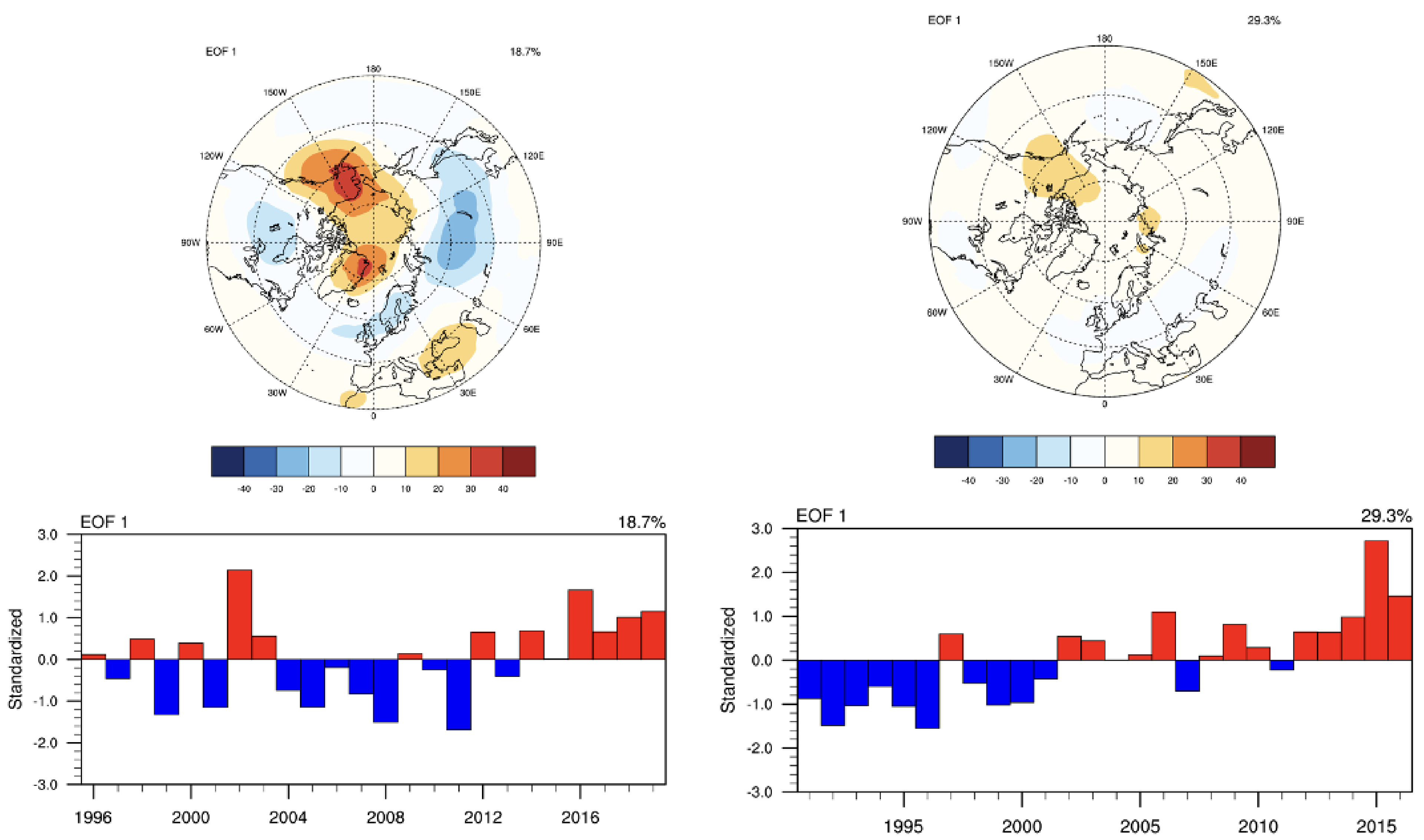
3. 연구 결과 | III. Process

▪ Part 3. Process: Anomaly Thickness 예측성 분석 목적 및 방법

(2) Anomaly Thickness (AT) 분석 (Wu, B., & Francis, J. A., 2019)

- 대기 연직 층후 (1000-500hPa Anomaly Thickness)를 통한 중위도 열적 구조 평가
- 중위도 대기에서 하부의 열적 구조(얇은 층후: 찬 공기/두꺼운 층후: 따뜻한 공기)와 동시에 장마, 비, 눈 예보 경계 판단에 대한 정보 제공
- 지위고도장의 1000hPa과 500hPa 차이로 나타낸 층후의 EOF 분석을 통한 모드 별 패턴 상관계수 또는 주성분시계열 상관계수를 활용하여 지수화

● Process 분석 예시: AT



지수화 방안

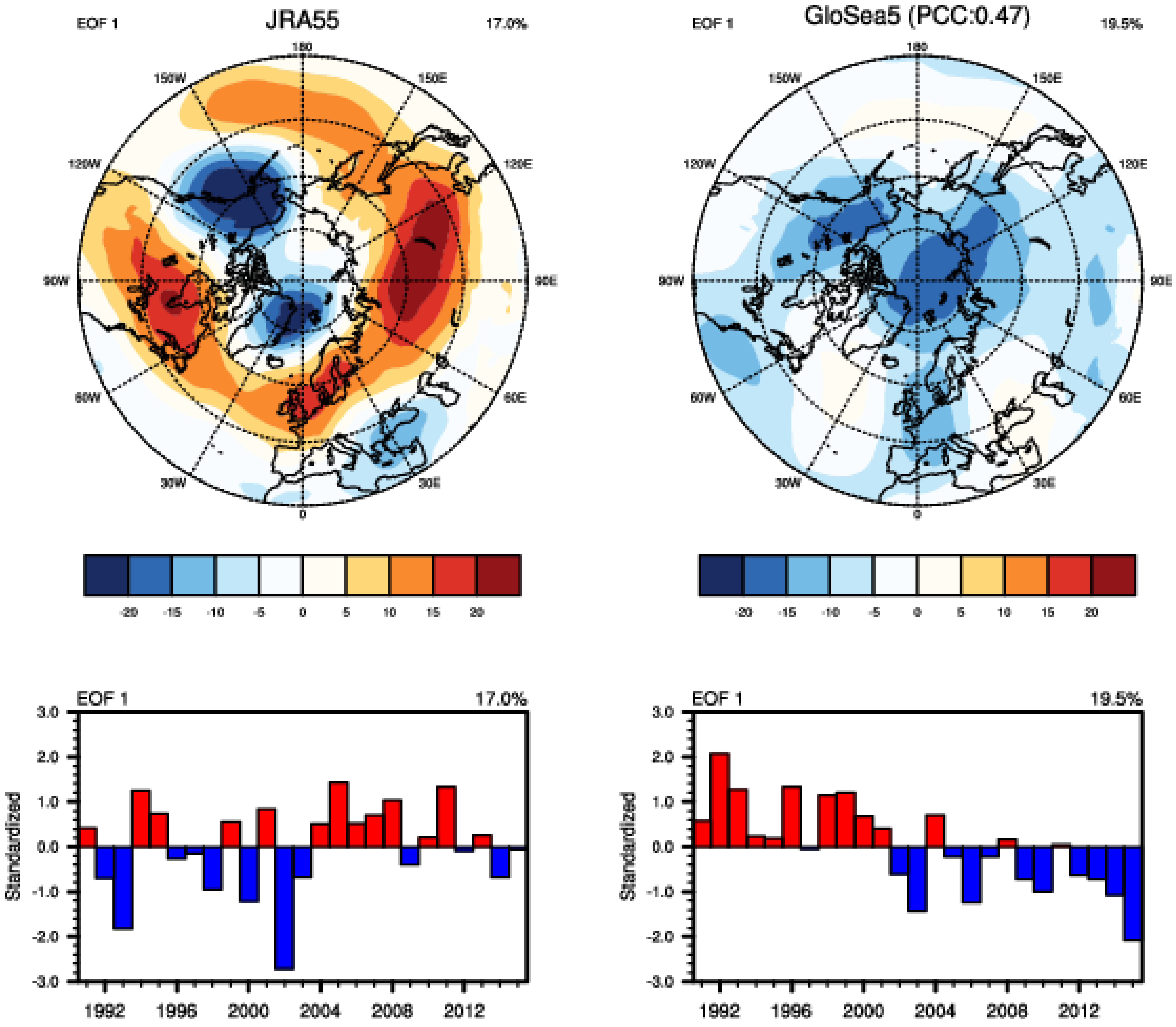
○ 층후 EOF 모드의 패턴 상관계수

○ 주성분시계열 상관계수

3. 연구 결과 | III. Process

▪ Part 3. Process: Anomaly Thickness 예측성 분석 결과

Process | Anomaly Thickness 예측성 분석 결과 (GloSea5 only, ON)



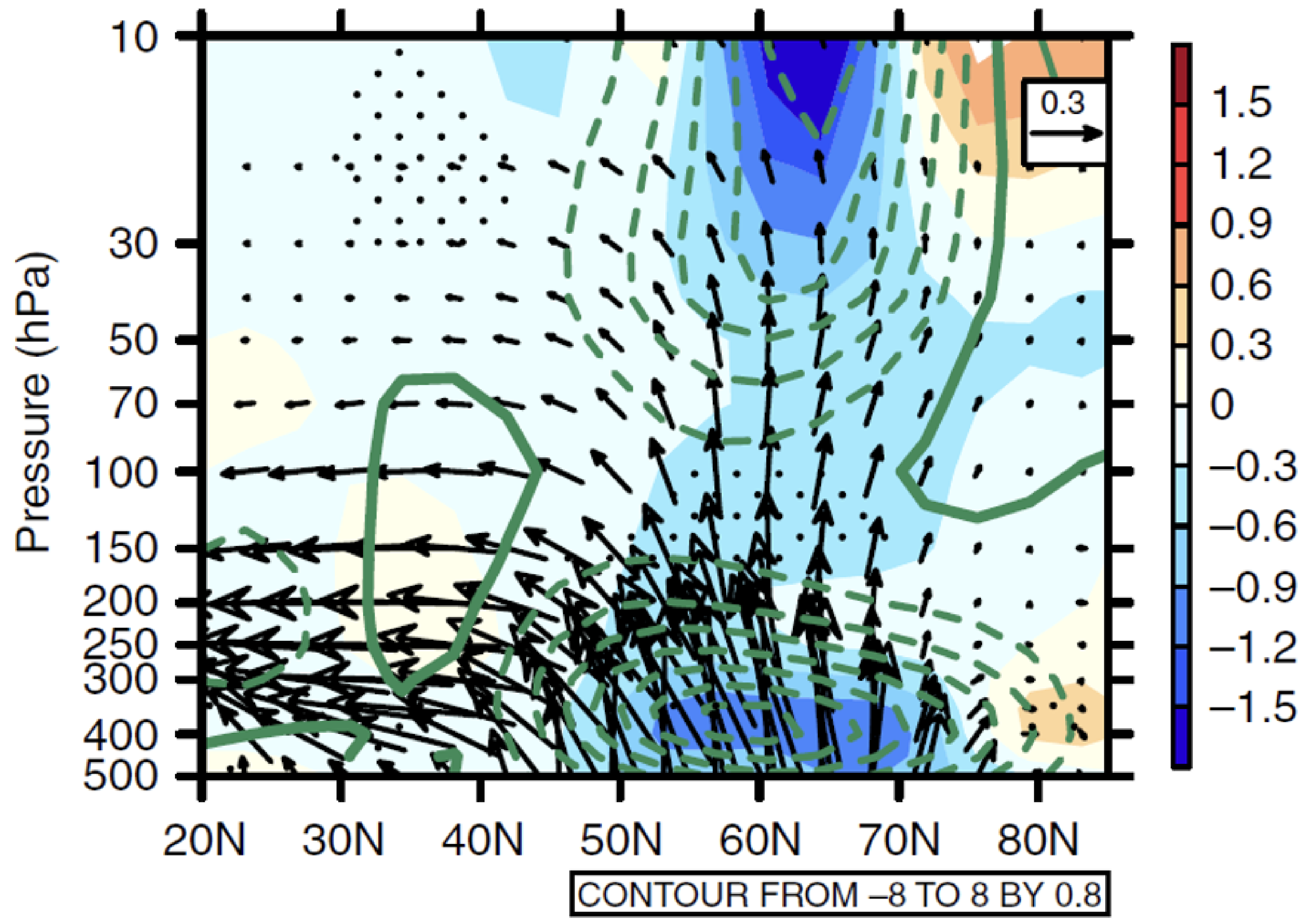
3. 연구 결과 | III. Process

▪ Part 3. Process: E-P Flux 예측성 분석 목적 및 방법

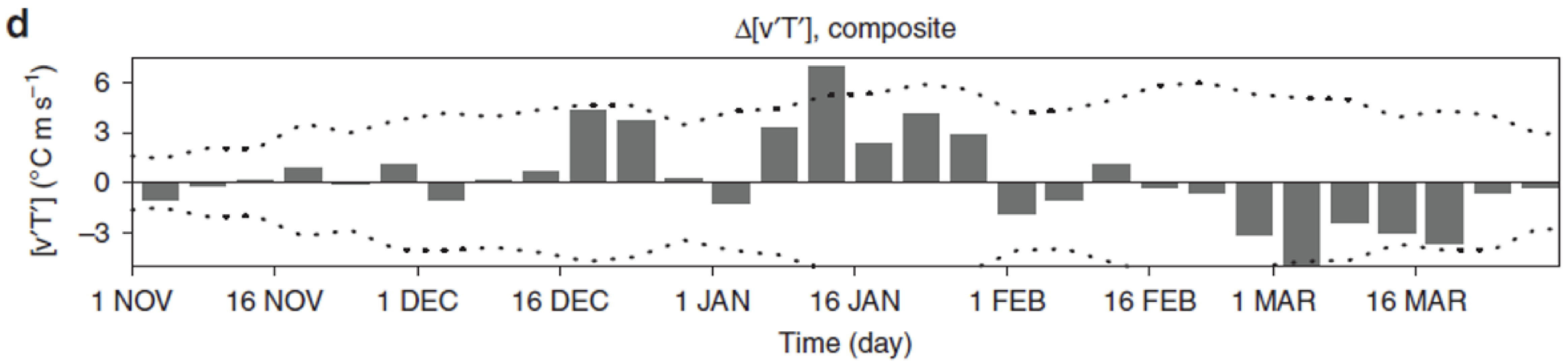
(3) Eliassen-Palm (EP) Flux 분석 (Hu, D., 2018; Kim et al., 2014)

- EP Flux 분석을 통한 대류권과 성층권 사이 Wave 전파 과정 평가
- 해빙감소 기간에 따른 EP Flux 아노말리 합성장의 시계열 분석을 통한 Wave 전파 과정 평가
- EP Flux의 Pressure/latitude 분포장의 패턴 상관계수 또는 EP Flux의 시계열 상관 계수를 활용하여 지수화

● Process 분석 예시: EP Flux



The trends in the Eliassen–Palm (EP) flux vectors (arrows with units of $10^4 \mathrm{kg\,s^{-2}decade^{-1}}$ for vertical vectors, and $10^6 \mathrm{kg\,s^{-2}decade^{-1}}$ for horizontal vectors) and the EP flux divergence (shading) (Hu, D., 2018)



5-day averaged composite poleward heat flux anomalies at 100 hPa from ERA-Interim data. (Kim et al., 2014)

지수화 방안

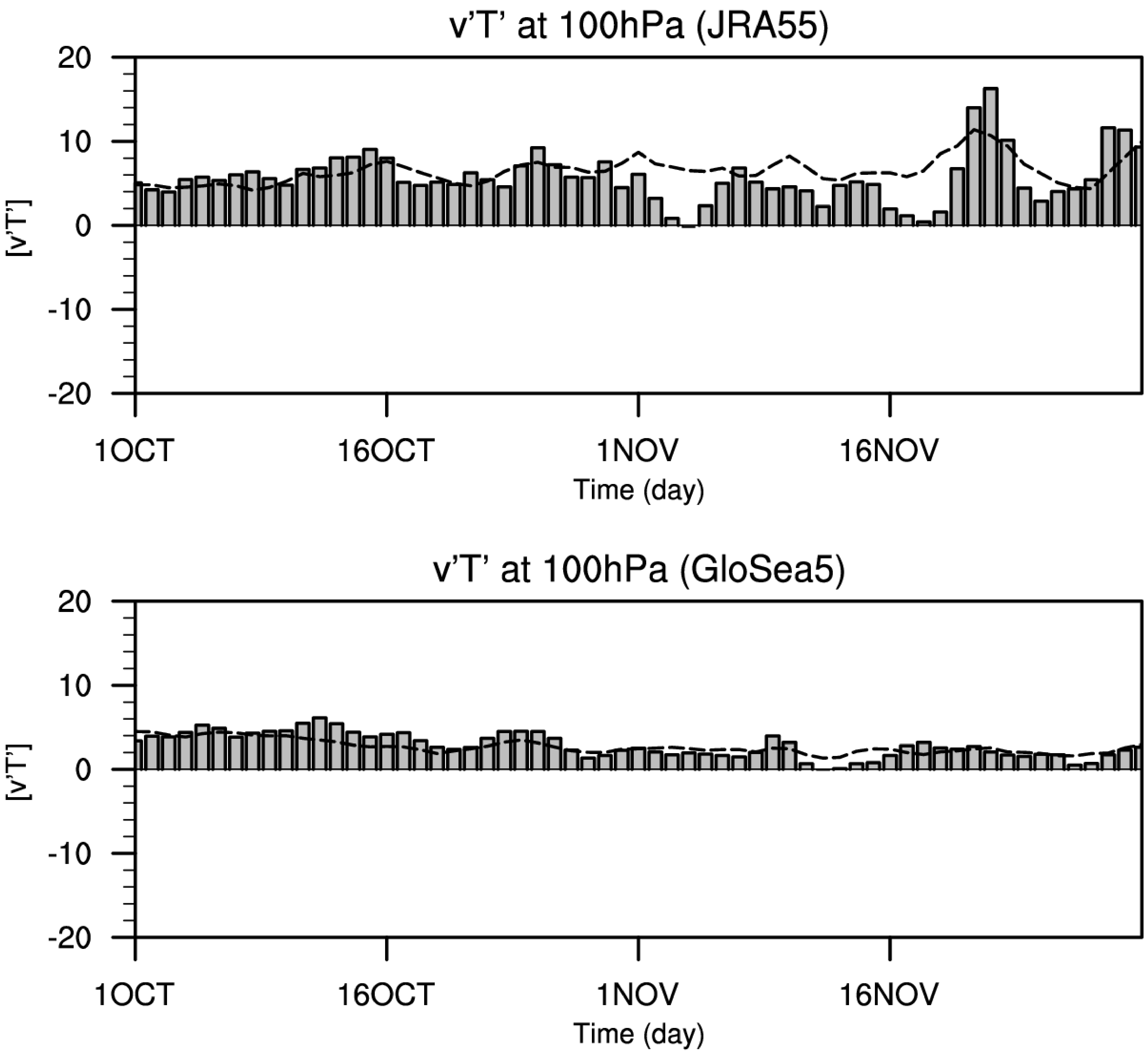
○ EP Flux의 Pressure/latitude 분포장의 패턴 상관계수

○ EP Flux 아노말리 합성장 시계열 상관계수

3. 연구 결과 | III. Process

- Part 3. Process: E-P Flux 예측성 분석 결과

Process | E-P Flux ([v'T']) 예측성 분석 결과 (GloSea5 only, ON)



3. 요약

- 본 연구에서는 준계절-계절 예측 모델의 '북극-중위도 원격상관' 메커니즘을 기반으로 예측 성능 평가 및 진단을 진행하여 진단 매트릭스로 표출하였음.
- 진단 매트릭스는 북극-중위도 원격상관 메커니즘과 밀접하게 연관된 변수 및 기작을 선정하여 예측성을 평가하고, 'Performance, Teleconnection, Processes'로 세분화하여 매트릭스를 구성하였음.
- Performance 예측 성능

  - GloSea5의 ON(늦가을) 기간 해빙의 예측성은 2006년까지는 높은 예측성능을 보였지만, 이후 해빙의 변동성 모의는 성능이 감소함 (해빙감소기간: '07,'11, '12).
- Teleconnection / Processes 예측 성능

  - Blocking index 예측성능: 관측자료의 해빙감소의 합성장 분석을 통한 블로킹 분석은 UB(Ural Blocking), KB(Kamchaka Blocking)의 빈도(Frequency)가 증가하는 것을 확인할 수 있었으나, GloSea5에서는 낮은 모의 능력을 보임.

  - WACE 예측성능: 관측의 WACE 패턴에서 보이는 유라시아, 알래스카 지역의 음의 아노말리 (북극 고온-중위도 저온)는 GloSea5의 모의 결과, 관측에 미치지 못하는 낮은 상관성을 확인할 수 있음.

  → 이는 WACE 패턴 발생 메커니즘과 연관된 블로킹의 모의능력이 낮기 때문에 WACE 패턴 또한 낮게 모의된 것으로 보임.
- 본 연구에서 구축한 진단 매트릭스를 통해, 북극-중위도 원격상관 패턴을 기반으로 북극 기인의 Performance, Teleconnection, Processes에 영향을 미치는 요소 및 기작을 함께 표출함으로써, 이를 통해 모델의 북극-중위도 원격상관 예측 성능 및 모델의 구조적 오차 원인을 파악할 수 있을 것으로 판단 됨

감사합니다.