



---

# PREFACE

It is our pleasure to present this report on the APEC Climate Center (APCC)'s research activities in 2013, which has been a very productive year for our Center.

APCC has expanded its research scope, in response to regional societal and scientific needs. While building expertise in climate prediction remains a priority, we are extending our reach to include policy-relevant climate applications and value-added climate information products.

APCC has accelerated efforts to better our service to the region. As one of the main services provided by APCC, the MME 3-month prediction information has been productively applied by scientists in developing countries that are unable to produce their own prediction information. Furthermore, in order to better prepare for climate-related hazards in a timely manner, APCC launched its 6-month MME prediction service in September 2013. We also began to release forecasts of the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO), starting from July 2013, as the world's first operational BSISO forecast service. Our researchers also achieved great success in publishing their papers in noted academic journals. Dr. Ok-Yeon Kim, for example, published a paper in *Climate Dynamics* and her research was later selected as one of the Research Highlights by another distinguished journal, *Nature Climate Change*. The following research report provides more information about our research outcomes from 2013.

We will continue to promote the best use of our research outcomes in various scientific and application areas. Our successes and achievements would not have been possible without the support of our valued partners. In this regard, I extend my thanks to you and I hope you enjoy this 2013 Research Report.

Chin-Seung Chung  
Director, APEC Climate Center

---

# CONTENTS

---

## 다중모형앙상블을 이용한 AO의 계절예측성 평가와 동아시아 겨울몬순에 미치는 영향 연구

■ 김가영 | 기후예측팀

1. 서론	38
2. 자료 및 분석방법	41
2.1 자료	41
2.2 분석 방법	41
3. 북반구 겨울철 해면기압의 변동성	43
4. AO의 예측성 평가	46
4.1 개별모델의 AO 예측성	46
4.2 모형 평가 및 최적의 모형 선정	48
5. AO가 북반구 겨울철에 미치는 영향	52
5.1 AO와 관련된 북반구 순환장	52
5.2 AO와 관련된 동아시아 겨울 몬순의 예측성 평가	53
6. 결론 및 토의	58



APCC

RESEARCH REPORT 2013-03

---

# 다중모형앙상블을 이용한 AO의 계절예측성 평가와 동아시아 겨울몬순에 미치는 영향 연구

---

김가영 | 기후예측팀

**ABSTRACT**

The Arctic Oscillation (AO) is well known as the most dominant mode in the Northern Hemisphere. AO is one of the factors which affects the East Asian winter monsoon (EAWM). In this study, we examine the predictability of winter AO using seasonal prediction models from the APEC Climate Center and WMO Lead Centre for Long-Range Forecast Multi-Model Ensemble. Also, we show whether or not the climate models can predict the impact of AO on EAWM.

To represent the prediction skill of climate features in the boreal winter, the climatological means and standard deviations of sea-level pressure (SLP) for observation and individual models were compared. The observed climatology shows the Siberian high and Aleutian low around East Asia. It is the most important pressure pattern which determines the intensity of EAWM. The temperature over the Eurasian continent is relatively cool due to the differential heating between the land and ocean. The anticyclonic flow at the surface, which is induced by the Siberian high, leads predominant cold temperature advection in East Asia. Each model has biases from its own systematic errors, etc. There are positive biases in the Arctic region surrounded by negative biases in most models. Other models have dominant positive biases. In the observed monthly variation during the DJF season, there is more than 5hPa of standard deviation in the North Pacific, Tibetan Plateau, and between the Arctic and Greenland Sea. This means that the monthly variations over these regions are relatively large. The ranges of standard deviation for most of the models are similar with those of the observations, but a few models differ. The variations over the Tibetan Plateau are smaller than those of over the North Pacific or Greenland Sea.

Observations and models represent the AO mode as the first of the EOF modes of wintertime SLP over the Northern hemisphere. The observed AO explains 25.2% of the total variance, however the models have much larger variances than the observations. Models can predict AO patterns for not only the annular mode of AO, but also the three centers of action over the North Pacific, Arctic region and North Atlantic, as well. While only 5 models have significant temporal correlation between the observed and simulated AO indices, the others cannot predict the variability of AO indices well. This means that current seasonal climate models can predict the AO patterns but not the sub-seasonal variabilities of AO indices well.

Thus, the 4 best models were selected based on the PCCs (pattern correlation coefficients) and TCCs (temporal correlation coefficients) for the AO patterns and indices. The first mode of the EOF using the best models' MME (BMME) explains 47.5% of the total variance. However, it is still around twice as large as the observed variance. The intensities of the centers of action over the Arctic and North Atlantic are weaker than those in the observations, while the intensity of the North Pacific is similar to the observations. The TCC of the AO index between those observed and simulated by BMME is 0.70, which exceeds a 99% confidence level. The PCC and TCC of BMME are higher than not only the mean of the prediction skill of the individual models, but also the mean of the skill of the best models.

We then assessed how well BMME predicts the circulation features associated with AO by regressing both the temperature at 850hPa and zonal wind at 200hpa onto the AO index compared to observations. The observed regression field shows the opposite temperature corresponding



to the AO phase over Eurasia and North America. BMME represents these features well but the magnitudes are smaller than those of the observations. The jet stream over the North Pacific is weak associated with AO in both the observations and BMME. The weakening of the jet stream in BMME is also smaller than in the observations. Nevertheless, BMME captures the circulation over the Northern hemisphere well. Due to reductions of noise and errors, the variance of the MME is smaller than the variance of a single model, but the prediction skill of the MME is higher than the mean skill of the individual models (Yoo and Kang, 2005).

To examine the predictability of the impact on EAWM in relation to the AO phase, composite fields corresponding to the positive and negative phases of AO were shown. In the observations for the positive AO phase, EAWM is weakened by the warming signal due to the southerlies, weakening East Asian trough, and meridional gradient of the jet stream. The opposite atmospheric patterns can be seen in the negative phase of AO. BMME did not capture the weakening of EAWM in the positive AO, while the patterns of BMME are similar with those of the observations in the negative AO. The PCCs of the negative AO phase are much higher than those of the positive AO. This means that the models cannot reproduce the opposite patterns associated with the AO phases but the models do capture the strengthening EAWM in the negative phase of AO well.

The EAWM had experienced a climate regime shift due to global warming (Koide and Kodera, 1999; Nakamura et al., 2002) and has been weakened since the late 1980s, along with a reduced intensity of the Siberian high (Panagiotopoulos et al., 2005). Analysis of 40 years European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and NCEP/NCAR reanalysis by Wang et al. (2009) suggests that EAWM was strong from 1978-87 and has experienced a significant weakening since 1988c. It is known that the variation of EAWM is closely related to variabilities of mean atmospheric circulation at mid-latitudes and that its changes come from the different variabilities of the Siberian high, Aleutian low and AO. However, we could not consider the climate regime change in the scope of this study. The common hindcast period among the models is not long enough to consider the decadal change of EAWM. It may be useful to investigate the predictability of the impact of AO on EAWM in association with the climate regime shift in further studies.

## 1. 서론

동아시아 겨울 몬순 (East Asian Winter Monsoon, 이하 EAWM)은 북반구의 겨울철 동안 일어나는 중요한 현상 중 하나로 잘 알려져 있고, 이는 시베리아 고기압의 강화와 한파를 동반하여 나타난다. Zhang et al. (1997)은 겨울철에 육지와 해양의 부등가열에 의해 만들어진 유효위치에너지 (available potential energy)가 EAWM를 움직이는 가장 중요한 힘임을 보였다. 주요 열원이 적도 서태평양에 근처에 위치하고, 강한 대류성 강수

와 관련된 잠열이 방출되어 local Hadley 순환에 영향을 준다. 이 열원에서 북쪽에 위치한 시베리아 근처에는 cold dome이 존재한다. 동아시아 제트, 시베리아 고기압, 500hPa 기압골, 서태평양 근처의 열원이 서로 관련되어 EAWM이 유지된다.

EAWM에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나는 Arctic Oscillation (이하 AO)이다. Arctic Oscillation (이하 AO)는 북반구 겨울철에 주요한 모드 중 하나로, Thompson and Wallace (1998)에 의해 북반구 겨울철의 해면기압에 대한 첫 번째 empirical orthogonal function (EOF) 모드임이 밝혀졌다. 유라시아 대륙의 지표 기온 변동은 North Atlantic Oscillation (NAO) 보다 AO와 더 연관성이 있음을 알아냈다. 이 연구는 동서방향으로 비대칭적인 지표 기온과 대류권 중층 순환의 아노말리는 AO와 관련되어 있다고 제시했다. 이들의 연구에서는 북반구와 남반구의 annular mode가 동서 평균된 geopotential height 와 동서풍 뿐 만 아니라 남북 순환에서도 비슷하게 보임을 밝혔다 (Thompson and Wallace, 2000). 최근 연구에 따르면, 유라시아 대륙의 가을철 snow cover는 겨울철 AO의 위상 및 강도를 변화된다고 알려져 있다 (Cohen and Entekhabo, 1999; Saito and Cohen, 2003; Cohen and Barlow, 2005; Cohen et al., 2009).

Gong et al. (2001)은 Arctic Oscillation (이하 AO)과 EAWM의 변동성이 서로 관련되어 있음을 보였는데, AO가 시베리아 고기압을 통해 EAWM에 영향을 미침을 알아냈다. 따라서 AO는 시베리아 고기압과 EAWM의 변화에 중요한 역할을 한다. Kim and Ahn (2012)은 북태평양의 해수면 온도 아노말리가 동아시아 겨울철 기온에 미치는 영향에 대해서 밝힌 바 있는데, AO와 북태평양 해수면 온도 아노말리가 겨울철 동아시아 기온과 관련됨을 제시하였다. 이 연구에 따르면, SON시기의 북태평양 해수면 온도와 11월의 AO 지수가 양의 위상일 때 시베리아 고기압의 강도가 약해지고 이는 EAWM의 약화를 초래하여 겨울철 동아시아의 기온이 따뜻하다. 이는 북태평양 해수면 온도가 AO에 영향을 미치고, 이에 따라 시베리아 지역의 continental-scale 순환을 지배하여 동아시아 지역의 지역 기후 변동에 영향을 미치게 됨을 의미한다. Jhun and Lee (2004)는 제트 기류와 관련된 300hPa의 남북 wind shear를 반영하여 동아시아 겨울 몬순의 변동성을 설명할 수 있는 동아시아 겨울 몬순 지수(East Asian Winter Monsoon Index, EAWMI)를 정의하였다. 이 연구에서는 해면기압의 회귀장을 통해 EAWMI의 interdecadal 성분이 AO의 합성장과 유사함을 제시했다. 또한 원격 상관 분석을 통해 AO가 decadal time scale에서 겨울 몬순



과 밀접한 관련성이 있음을 보였다. AO는 다른 변동성과도 관련이 있는데, Overland et al. (1999)는 알류산 저기압이 AO와 관련 있음을 제시한 바 있다. 이와 같이 AO는 중위도 특히 동아시아 겨울 몬순에 미치는 영향이 크기 때문에, AO를 잘 예측함으로써 EAWM의 예측성을 향상시킬 수 있는 가능성이 있다.

AO와 관련된 연구 중, 역학 모델을 이용하여 다양한 강제력에 의한 AO의 반응을 살펴 보거나 다양한 모델에서 나타나는 AO의 예측성을 살펴보는 연구가 다소 있었다. Gillett et al. (2002)은 5개의 기후 모델을 이용하여 온실가스 증가에 따른 AO 지수의 민감성 실험을 한 바 있다. 이 중 4개 모델은 온실가스에 의해 양의 AO 위상을 보이는 반응을 유의하게 나타내었다. 이 연구에서는 온실가스 강제력으로 인해 행성파가 적도방향으로 굴절되고 polar vortex가 강해져서 양의 AO가 증가한다고 설명하고 있다. Ahn and Kim (2013)은 접합 대순환 모형의 초기장에 현실적으로 변하는 태양상수를 적용했을 때의 북반구 겨울철 AO의 예측성이 보다 향상될 수 있음을 보였다. Xin et al. (2008)은 IPCC AR4의 “Twentieth-Century in Coupled Models (20C3M)”에 참여하는 23개의 접합 대순환 모형이 모사하는 겨울철 (JFM)의 AO를 분석한 바 있다. 대부분의 모형들은 북반구 중위도 대기의 경년 변동성에 대한 첫 번째 EOF 모드로 AO를 잘 설명하고, 북태평양에 위치하는 AO의 center of action을 잘 나타낸다. 그러나 AO가 유라시아 대륙에 미치는 영향은 잘 모사하지 못하는 한계를 보였다.

따라서 본 연구에서는 APEC 기후센터 (APEC Climate Center, 이하 APCC)와 WMO 장기예보 다중모델앙상블 선도센터 (WMO Lead Center for Long-range Forecast Multi-model Ensemble, 이하 WMO LC-LRFMME)에서 각각 수집하는 계절 예측 모형들의 AO 예측성을 살펴보고자 한다. 그리고 계절 예측 모형이 AO를 잘 예측한다면 AO가 EAWM에 미치는 영향 역시 나타내는지 알아보고자 한다.

## 2. 자료 및 분석방법

### 2.1 자료

본 연구에서는 APCC와 WMO LC-LRFMME에서 각각 수집하는 총 16개의 계절예측 모형에서 생산된 hindcast 자료를 사용하여 겨울철 AO의 계절 예측성을 평가하고, AO를 잘 예측하는 모형들이 동아시아 겨울 몬순에 미치는 영향 또한 예측할 수 있는지를 알아보 고자 한다. 분석 자료는 1983/84부터 2001/02년 동안의 겨울철 (December, January, February, 이하 DJF)에 대한 자료로서, 이는 11월의 초기조건을 사용하여 적분된 결과 중 첫 번째 lead부터 세 번째 lead에 해당한다. 각 모형들에 대한 자세한 설명은 Table 1에 나타내었다. 모든 모형들의 수평해상도는  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 로 내삽 하여 모형간의 비교를 용이하게 했다. 모형 예측 결과에 대한 검증 자료로 사용한 관측 자료는 NCEP/DOE Reanalysis-2 (Kanamitsu et al., 2002)로, 모형에서 분석하는 기간과 동일한 19년 동안 의 월별 DJF 자료를 사용하였다. 관측의 수평 해상도 역시 모형과 같은  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  이다.

본 연구에서는 다중 모형 앙상블 (Multi-model ensemble, 이하 MME) 기법을 사용하여 계절예측 모형들의 AO 예측성을 평가하였다. MME는 각 모형들이 가지고 있는 계통적 오차 등에 의한 예측의 불확실성을 줄이기 위한 방법 중 하나로 APCC와 WMO LC-LRFMME에서 각각 현업 계절예측에 활용되고 있다. MME 기법은 모델의 예측 값에 가중치를 주는 방법에 따라 선형 기법과 비선형 기법으로 구분되는데, 여기서는 선형 기법 중에서도 simple composite mean (SCM) 기법을 사용하였다. 이는 가장 간단한 MME 기법으로, 각 모델의 예측 값에 동일한 가중치를 주는 방법이다.

### 2.2 분석 방법

우선 북반구 겨울철 해면기압의 변동성을 알아보기 위해, 기후장과 표준편차를 관측 과 비교했다. 이를 통해 모형들이 가지고 있는 기본적인 bias를 살펴보고자 했다. Empirical Orthogonal Function (EOF) 분석을 통해 관측 및 개별모형의 겨울철 북반구 ( $20^{\circ}\text{N}-90^{\circ}\text{N}$ ) 영역에 대한 해면기압 아노말리의 우세한 모드인 AO의 공간분포와 지수를



계산하여 모형들이 관측과 비교하여 AO를 얼마나 잘 예측하는지를 살펴보았다. 이렇게 구해진 관측과 개별모형 사이에 AO의 패턴 및 지수의 상관분석을 통해 AO를 가장 잘 예측하는 몇 개의 모형을 선택하였다. 이렇게 선택된 모형들을 이용하여 MME를 수행하고, AO의 예측성을 살펴보았다. AO가 겨울철 북반구 순환에 미치는 영향이 MME에서도 나타나는지를 관측과 비교하였다. 또한 관측에서 나타나는 동아시아 겨울 몬순에 대한 AO의 영향을 MME가 잘 예측하는지 알아보았다.

**Table 1** Summary of models used in this study

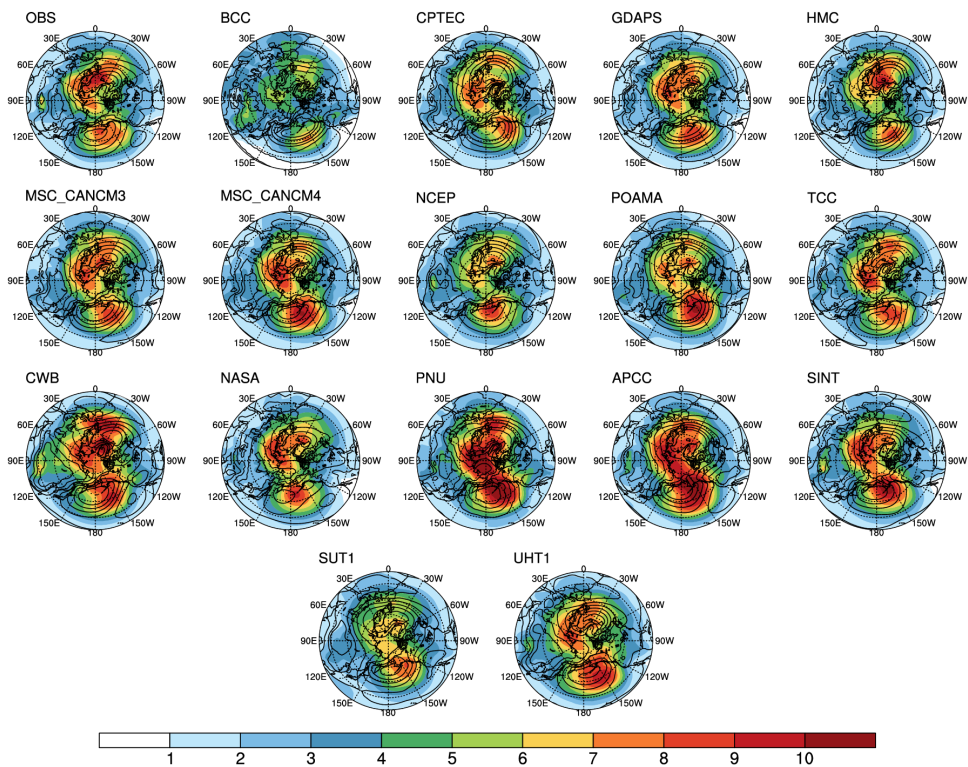
Model(GPC) name	Institute / Country	System configuration (ensemble member)	Hindcast Period
CPTEC	CPTEC / Brazil	2-tier (10)	1979-2001
BCC	Beijing Climate Center / China	Coupled (8)	1983-2007
POAMA	Bureau of Meteorology / Australia	Coupled (10)	1960-2010
MSC_CANCM3	Meteorological Service of Canada / Canada	Coupled (10)	1969-2002
MSC_CANCM4	Meteorological Service of Canada / Canada	Coupled (10)	1969-2002
HMC	Hydrometeorological Center of Russia / Russia	2-tier (10)	1981-2010
GDAPS	Korea Meteorological Administration / Korea	2-tier (20)	1979-2012
TCC	Japan Meteorological Agency / Japan	Coupled (10)	1979-2010
NCEP	National Centers for Environmental Prediction / USA	Coupled (15)	1981-2004
CWB	Central Weather Bureau / Chinese Taipei	2-tier (10)	1981-2005
NASA	NASA / USA	Coupled (11)	1981-present
PNU	Pusan National University / Korea	Coupled (5)	1980-present
APCC	APEC Climate Center / Korea	Coupled (5)	1983-2011
SINT	SINTEX / Japan	Coupled (9)	1982-2004
SUT1	Seoul National University / Korea	Coupled (6)	1980-2001
UHT1	University of Hawaii / USA	Coupled (10)	1982-2003

### 3. 북반구 겨울철 해면기압의 변동성

이 절에서는 각 개별 모형들이 북반구 겨울철의 기후 특성을 예측하는 능력을 알아보기 위해, 겨울철의 기후장과 변동성을 비교하였다. 관측과 각 개별모형에 대한 1983년부터 2001년의 월별 DJF에 대한 북반구 영역 (20–90°N) 해면기압의 기후장과 표준편차를 Figure 1에 나타내었다. 우선 관측의 기후장을 살펴보면, 시베리아 지역을 중심으로 유라시아 대륙에 넓게 분포하는 고기압 (시베리아 고기압)과 북태평양에 중심이 위치하는 알류산 저기압이 동아시아를 둘러싸고 있다. 이는 동아시아 겨울 몬순을 특징지을 수 있는 기압 시스템이다. 시베리아 고기압에 의해 대류권 하층에는 고기압성 바람이 발생한다. 또한 대륙과 해양의 비열차이에 의한 지표의 비등 가열에 의해 대륙의 공기는 해양에 비해 상대적으로 낮는데, 이 차가운 공기가 시베리아 지역을 중심으로 만들어진 고기압성 흐름을 타고 와서 동아시아에는 한랭 이류 (cold advection)가 우세하다 (그림으로 보이지는 않음). 각 모형들은 전체적으로 관측에서 나타나는 climatological mean을 잘 보여주고 있다. 그러나 각 모형이 가지고 있는 계통적 오차 등 (systematic error)에 의해서 bias가 존재하는데, 이는 Figure 2에서 자세히 설명하겠다.

Figure 1은 해면기압의 기후장 뿐만 아니라, 관측과 모형의 겨울철 월별 해면기압의 변동성을 살펴보기 위해 표준편차도 나타낸다. 각 모형별 표준편차를 계산 할 때는 앙상블 멤버간의 변동성 또한 고려하였다. 관측에서는 북태평양과 티벳 고원, 그리고 북극에서부터 그린란드 해에 걸쳐 5hPa 이상의 표준편차가 나타난다. 이는 이 세 지역에 나타나는 해면기압의 겨울철 월별 변동성이 크다는 것을 의미한다. 모형들의 변동성 역시 관측과 유사하게 북태평양과 그린란드 해에서 크게 나타나는 경향이 있다. 그러나 티벳 고원의 변동성은 약하게 모의하거나, 거의 나타나지 않는다. 변동성의 크기로 보면 관측의 표준편차의 범위와 유사한 모형들도 있지만 BCC, NCEP, SUT1은 관측에 비해 변동성의 크기가 약간 작다.

모형에서 예측한 해면기압과 관측된 해면기압 사이의 기후장 차이인 mean bias를 Figure 2에 나타내었다. CPTEC, HMC, POAMA, PNU, APCC, SUT1은 주로 북극에 양의 오차가 존재하고, 60°N 근처에서 음의 오차가 북극을 둘러싸고 있다. 또한 TCC, CWB, NASA, SUT1은 양의 오차가 북극을 중심으로 위치한다. 대부분의 모형들은 북태평양에 양의 오차를 가지고 있으나, TCC, CWB, PNU의 경우에는 음의 오차가 나타난다.



**Figure 1** Climatology (contour) and standard deviation (shading) of the mean sea-level pressure for observation and individual models over Northern Hemisphere during December to February

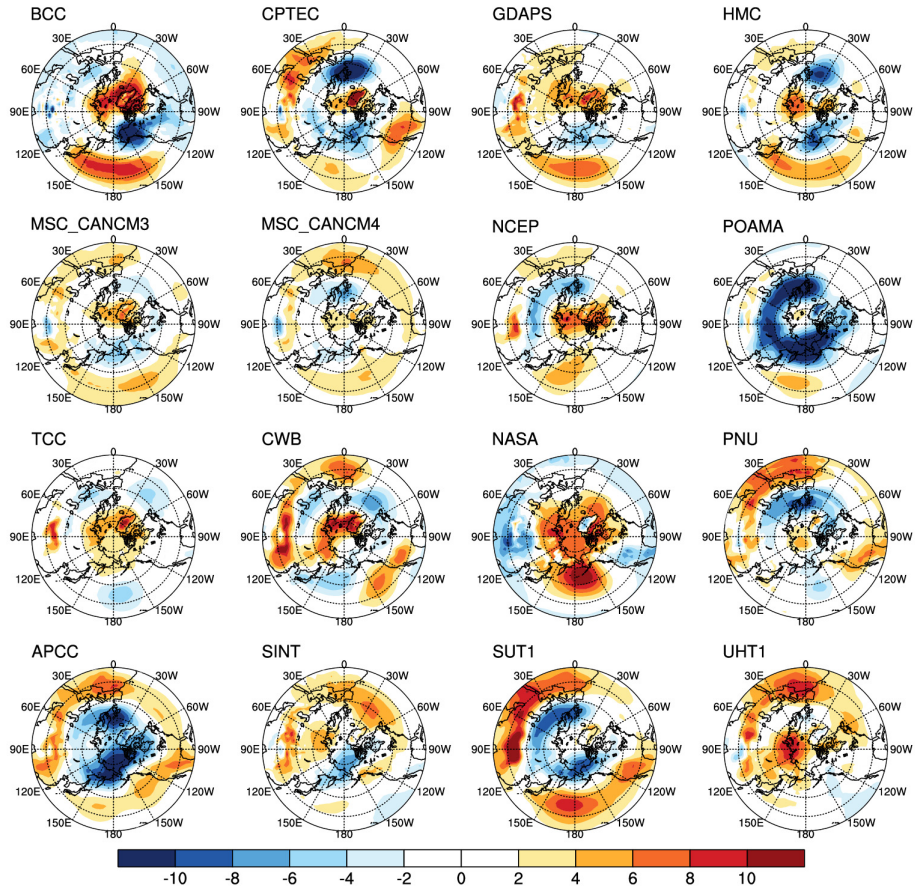


Figure 2 Mean bias of the mean sea-level pressure for individual models over Northern Hemisphere during December to February



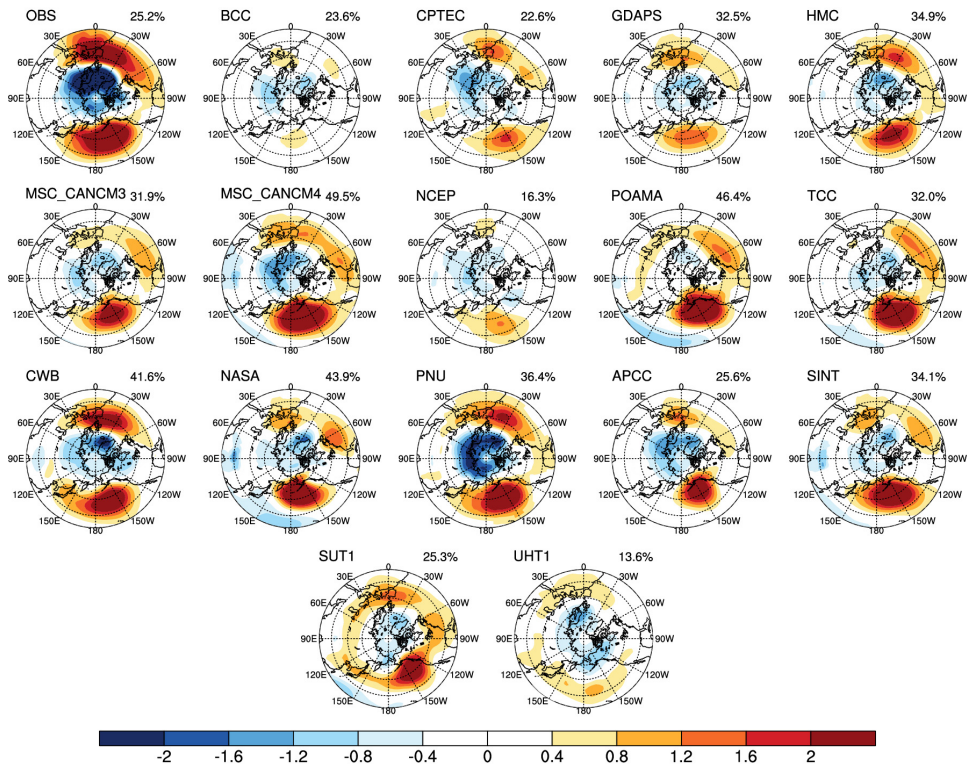
## 4. AO의 예측성 평가

### 4.1 개별모델의 AO 예측성

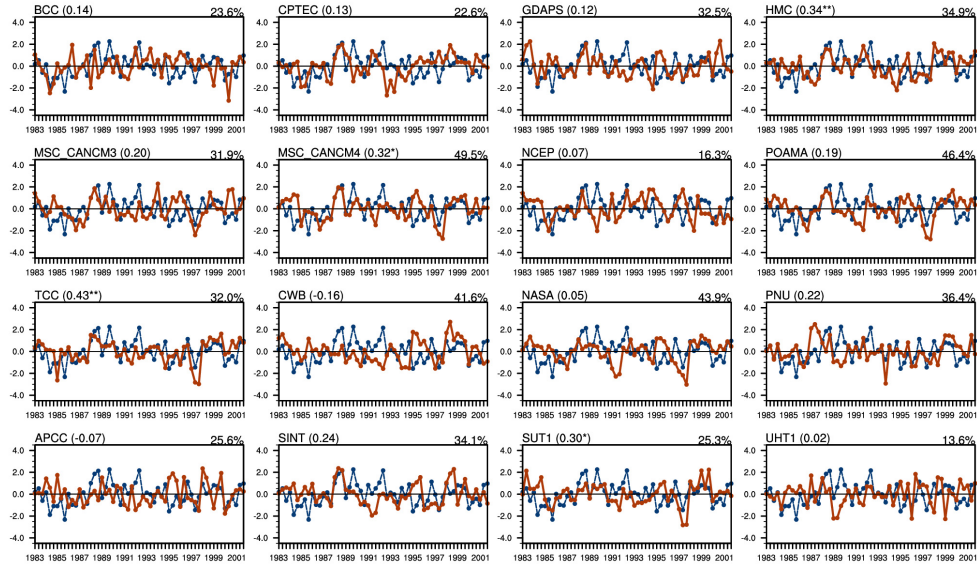
북반구 겨울철의 주요 모드인 AO를 설명하기 위해 EOF 분석을 수행하였다. Figure 3은 EOF 첫 번째 모드에 대한 패턴으로, 이는 Thompson and Wallace (1998)에 의해 정의된 AO 패턴이다. 관측에서는 AO의 3개의 center of action의 위치가 북태평양, 북극, 그리고 북대서양이고, 이에 따른 annular mode가 뚜렷하게 나타난다. 모형들에도 AO의 annular 모습이 관측과 유사하게 나타나고, center of action의 위치 또한 잘 보여준다. 관측에서 AO 모드는 겨울철 북반구 해면기압 아노말리의 전체 변동량 중 25.2%를 설명한다. 모형에 대해서도 AO를 설명하기 위해 EOF 분석을 수행하였다. 모형에서는 경우에 따라 첫 번째 모드와 두 번째 모드가 바뀌어 나타나기도 하므로 모형에서 나타난 주요한 두 모드 중 관측의 EOF 패턴과 가장 유사한 패턴을 AO로 선택하였다. 즉, 관측의 첫 번째 EOF 패턴과 모형의 첫 번째 및 두 번째 EOF 패턴 각각과의 공간상관을 구하여 상관계수가 높은 모드를 AO로 간주하였다. 대부분의 모형이 AO를 첫 번째 EOF 모드로 나타내는데, CPTEC, NCEP 및 UHT1은 두 번째 EOF 모드를 AO로 나타내었다. 16개 모형 중 12개가 AO의 변동량을 관측에 비해 크게 나타내는 경향이 있고, 나머지 4개 모형은 AO의 변동량을 관측에 비해 낮게 나타낸다. 관측과 비교했을 때 SUT1의 AO 변동량이 25.3으로 가장 작은 차이를 보이고, MSC\_CANCM4의 변동량은 24.3%로 가장 큰 차이를 보인다.

Figure 4는 각 모형별 첫 번째 EOF 모드에 대한 PC시계열을 관측과 함께 나타낸 것으로, 이는 AO 지수를 의미한다. 그림에서 관측은 파란 선, 각 모형은 빨간 선으로 구분하였다. 모든 시계열은 각 시계열에 대한 표준편차로 나누어서 정규화 시켰다. 각 모형의 이름과 함께 관측에 대한 AO 지수와 시간 상관계수를 나타내었는데, 상관계수 뒤에 있는 \*와 \*\*는 각각 통계적으로 95%, 99% 이상 유의함을 의미한다. 16개의 모형 중 4개의 모형만이 관측과 통계적으로 유의한 상관계수를 갖는데, HMC와 TCC의 상관계수는 각각 0.34, 0.43으로 99% 이상 유의하고, MSC\_CANCM3와 SUT1은 각각 0.32, 0.30으로 95% 이상 유의한 상관계수를 보여준다. 이 5개의 모형을 제외한 나머지는 AO 지수의 변동성을 잘 모의하지 못한다. 특히 CWB와 APCC는 통계적으로 유의하지는 않지만 각각 -0.16,

-0.07로 관측과 음의 상관을 가짐으로서 AO의 예측능력이 떨어진다. Figure 3과 Figure 4의 결과를 보면, 현재 계절예측에 사용된 모형들은 AO의 패턴은 잘 모의하지만, AO지수의 month-to-month 변동성은 잘 모의하지 못한다.



**Figure 3** The spatial patterns of the first EOF mode (which are AO patterns) of the wintertime (December-February) monthly sea level pressure anomalies for observation and single models over the domain poleward of 20°N during the period of 1983/84-2001/02.



**Figure 4** The PC timeseries of the first EOF mode (which are AO indices) of the wintertime(December-February) monthly sea level pressure anomalies for observation(blue) and single models(red) over the domain poleward of 20°N during the period of 1983/84-2001/02. (\* and \*\* indicate 95% and 99% confidence level, respectively.)

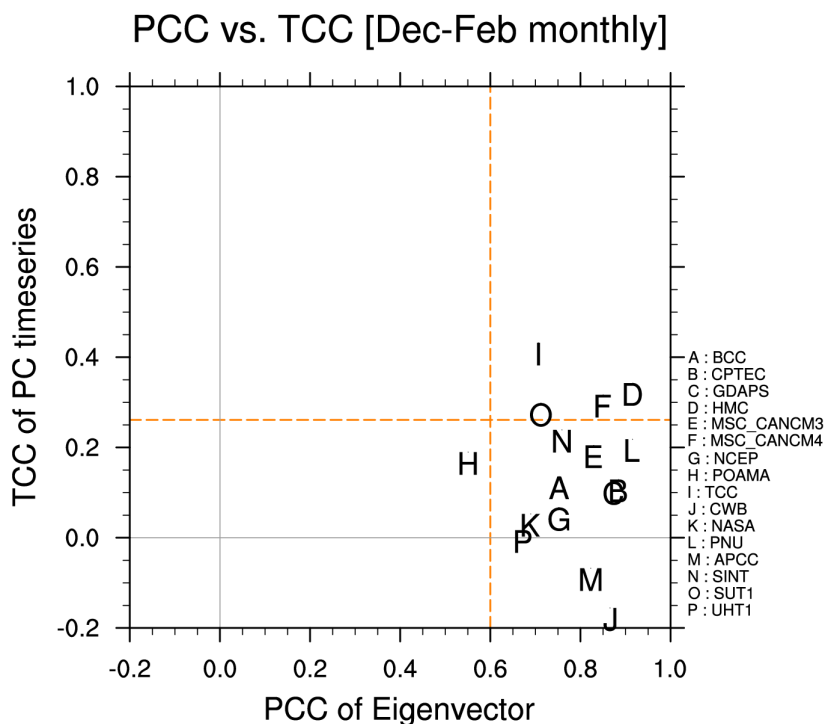
## 4.2 모형 평가 및 최적의 모형 선정

본 절에서는 각 모형들이 AO의 패턴과 지수를 예측하는 능력을 평가하고 우수한 몇 개의 모형을 선택하고자 한다. 각 모형별 AO 패턴과 관측간의 공간상관계수 (pattern correlation coefficient, PCC)를 x축으로 하고 모형별 AO지수의 시간상관계수 (temporal correlation coefficient, TCC)를 y축으로 하는 산점도를 Figure 5에 나타내었다. 모형의 AO패턴에 대한 PCC는 POAMA가 0.55로 가장 낮고 PNU와 HMC가 0.92로 가장 높다. POAMA를 제외한 모든 모형들은 0.60 이상의 높은 PCC를 가진다. 이는 모형들이 AO의 패턴은 관측과 유사하게 모의한다는 것을 의미한다. 모형별 AO 지수의 TCC의 경우, CWB가 -0.16으로 가장 낮고 TCC가 0.43으로 가장 높은 상관을 보인다. 16개의 모형 중 5개만이 95% 이상 유의한 시간상관계수를 갖는데, CPTEC과 SUT1이 0.30, MSC\_CANCM4가 0.32, HMC가 0.34, TCC가 0.43이다. 이는 전체적으로 모형들이 AO의 패턴은 잘 맞추는 반면, 지수의 시간변동은 잘 맞추지 못함을 의미한다. 따라서 PCC와

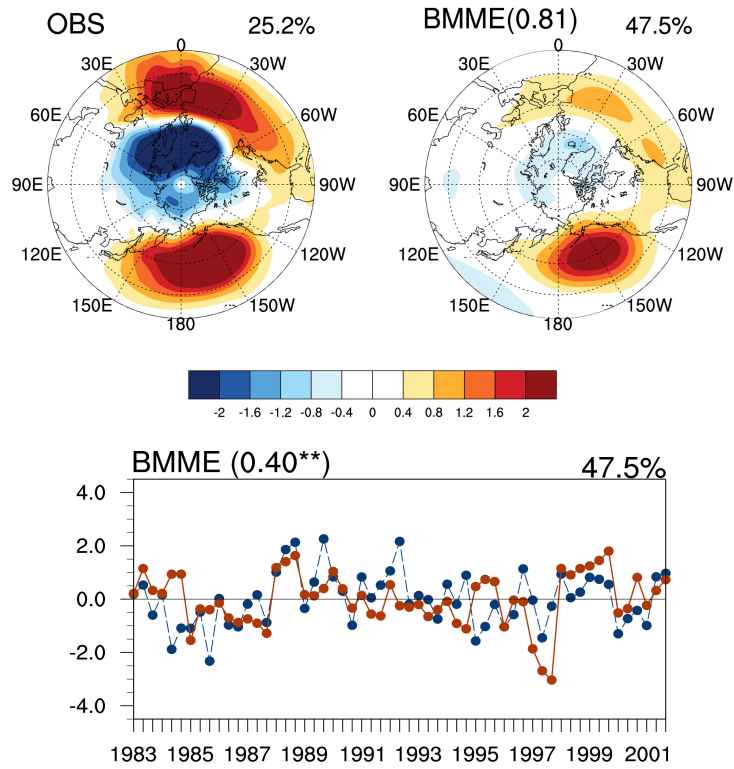
TCC가 동시에 높은 모형, 즉 AO의 패턴과 지수를 동시에 잘 예측하는 모형들을 최적의 모형 (best model)로 선정하였다. 선정된 best model은 HMC, MSC\_CANCM4, TCC, SUT1이다.

선정된 best model을 이용하여 다중모형앙상블 (best models' multi-model ensemble, 이하 BMME)을 한 후 EOF 분석을 수행한 결과를 Figure 6에 나타내었다. BMME의 AO 모드는 전체 변동 중 47.5%를 설명하는데, 이는 관측이 설명하는 변동량인 25.2%과 비교하면 2배 정도 높은 값이다. 관측과의 PCC는 0.81로 높은 상관을 보인다. BMME의 AO 패턴은 관측에서 보이는 annular mode를 잘 나타내고 있고, center of action의 위치 또한 유사하다. 그 중 북태평양에 위치한 center of action의 강도는 관측에 버금가게 나타내지만, 북극이나 북대서양 center of action의 강도는 관측에 비하면 약하다. BMME와 관측 간 AO 지수의 TCC는 통계적으로 99% 이상 유의한 수준인 0.40이다. BMME에 대한 PCC와 TCC는 각 모형의 평균적인 skill값 (PCC는 0.71, TCC는 0.18)보다 높을 뿐만 아니라, best model의 평균 skill (PCC는 0.80, TCC는 0.35)보다도 높다.

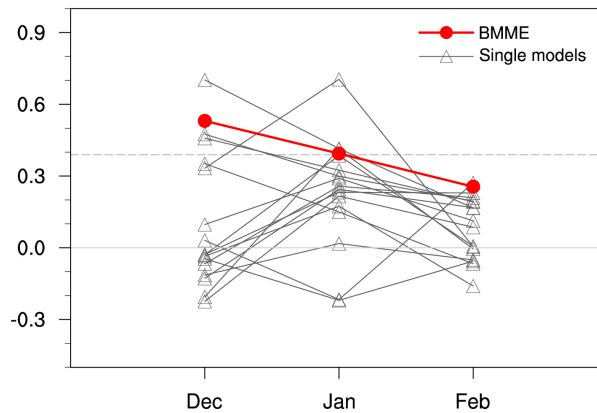
BMME와 개별모형들이 lead time에 따른 예측성의 변화를 살펴보기 위해 첫 번째 lead부터 세 번째 lead에 대한 AO index의 시간상관계수를 Figure 7을 나타내었다. 각 모형들에 대한 AO 지수의 시간상관계수는 lead time에 따라 감소되는 경향을 보인다. 그러나 많은 모형들이 첫 번째에 비해 두 번째 lead time인 1월에 상관계수가 약간 올라간다는 점이 흥미롭다. 그럼에도 불구하고 대부분이 모형들이 90% 이상 유의한 상관을 보이지는 않는다. 반면에 BMME는 두 번째 lead time까지도 90% 이상 유의한 수준의 시간상관계수가 유지됨으로써, 개별 모형들에 비해 높은 예측성이 2개월간 지속된다. 그림으로는 나타내지 않았지만, BMME에 대한 계절평균 AO 지수와 계절 내 진동을 고려한 AO지수의 시간상관은 0.40으로 절대적인 값은 비슷하다. 그러나 계절평균의 df는 17개로 95% 신뢰수준에서 유의하지 않지만, monthly 지수는 95% 신뢰수준에서 유의합니다. 이는 BMME가 month-to-month variation을 고려하여 선정되었기 때문으로 생각된다.



**Figure 5** The scatter plot of pattern correlation coefficients (PCC) of AO patterns (x-axis) and temporal correlation coefficients (TCC) of AO indices (y-axis) between observed and simulated results. The horizontal dashed line indicates 95% confidence level.



**Figure 6** (Top) The AO patterns of observation and BMME. Pattern correlation between them is 0.81. (bottom) The timeseries denote their AO indices of observation (blue) and BMME (red). The temporal correlation is 0.40 which exceeds 99% confidence level.



**Figure 7** The temporal correlation coefficients between observed and simulated AO indices for each month during December-February period. Dashed line denote the threshold value for the 90% significant level.

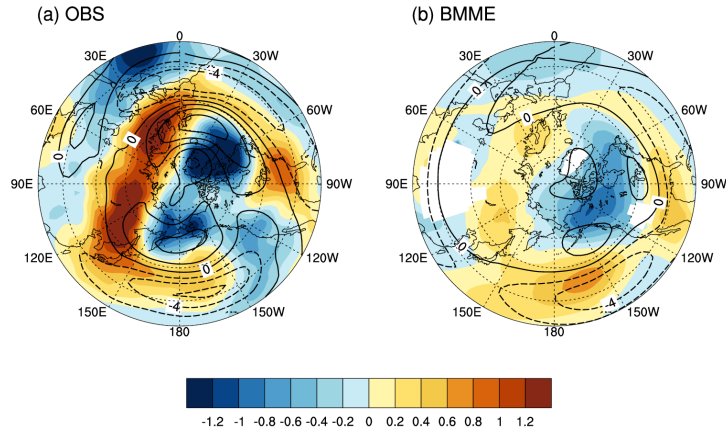


## 5. AO가 북반구 겨울철에 미치는 영향

### 5.1 AO와 관련된 북반구 순환장

본 절에서는 AO의 패턴과 지수를 잘 예측하는 BMME가 AO와 관련된 북반구 순환장 역시 잘 예측하는지를 살펴보고자 한다. 따라서 관측과 BMME의 850hPa 온도와 200hPa 동서바람을 각각 AO 지수에 대해 선형 회귀시킨 결과를 Figure 8에 나타내었다.

우선 관측에 나타나는 결과를 살펴보면 (Figure 8(a)), AO의 위상에 따라 유라시아와 북미의 온도가 반대로 나타난다. 예를 들어, AO가 양의 위상일 때 유라시아는 온도가 따뜻하고 북미대륙은 차가운 반면 AO가 음의 위상이면 유라시아의 기온은 낮아지고 북미 기온은 따뜻해진다. 또한 북태평양과 북대서양에 위치하는 subtropical jet이 약해진다. 이 특징은 동아시아 겨울 몬순과 연관 지어 생각할 수 있는데, 북유라시아 지역의 850hPa 온도가 높아(낮아)지고 200hPa의 jet stream이 약해 (강해)지는 것은 동아시아 겨울 몬순이 양 (음)의 AO일 때 약해 (강해)짐을 의미한다. BMME는 (Figure 8(b)) 관측에서 보이는 북유라시아와 북미대륙에 반대 위상의 기온이 나타나는 것과 북태평양의 jet stream이 약해지는 특징을 모의하고 있다. 그러나 관측에 비해 변동 폭이 작다. 관측에서는 북미대륙 근처에 크게 두 개로 나타나는 cold core도 BMME에서는 알래스카를 중심으로 하나만 나타난다. 북태평양 jet stream이 약화되는 위치는 관측과 유사하나, 그 크기가 작다. BMME는 북대서양 jet stream의 약화는 잘 모의하지 못하는데, 마치 북태평양의 jet stream이 북대서양 까지 확장되어 약해지는 것처럼 보인다. 그럼에도 불구하고 전체적인 패턴은 관측과 유사하다.



**Figure 8** Regression fields of temperature at 850hPa (shading) and zonal wind at 200hPa (contour) onto AO indices of (a) observation and (b) BMME.

## 5.2 AO와 관련된 동아시아 겨울 몬순의 예측성 평가

5.1절에서는 최적의 모형을 이용한 MME가 AO에 의한 북반구 겨울철 순환의 공간적인 패턴에 대한 예측성이 있음을 보였다. 여러 선행연구를 통해 동아시아 지역의 한파 발생이나 동아시아 겨울 몬순의 변동은 AO 지수와 통계적으로 높은 상관관을 보이는 것으로 알려져 있는데, 일반적으로 음의 AO 시기에는 겨울철 동아시아 대부분의 지역에서 겨울 몬순 순환의 강화에 의해 한파가 잦고 평년에 비해 지표 기온이 낮아지고, 양의 AO 시기에는 이와 반대로 따뜻한 겨울이 나타난다 (Gong et al., 2001; Jeong and Ho, 2005; Park et al., 2010). 따라서 본 절에서는 계절예측모형이 실제 관측에서 나타나는 양의 AO 또는 음의 AO인 시기를 잘 예측하는지, 또한 그 시기의 동아시아 겨울 몬순에 영향을 미치는 여러 대기 변수들 역시 잘 예측하는지에 대해 알아보려고 한다.

관측의 AO 지수가 평년변동성의  $1\sigma$  (표준편차) 이상일 때를 positive AO,  $-1\sigma$  이하일 때를 negative AO라고 정의하고, BMME에서도 역시 같은 시기를 각각 positive AO, negative AO라고 정의하였다. 총 57달 (1983/84-2001/02년의 12, 1, 2월) 중 7개의 달이 positive AO, 10개의 달이 negative AO에 해당한다. Table 2에 각 AO 위상에 따른 분류를 자세히 나타내었다.



각 AO 위상에 따른 동아시아 지역에 대한 850hPa 온도 아노말리와 850hPa 바람장 아노말리의 합성장을 살펴보았다 (Figure 9). 관측에서는 AO가 양의 위상일 때 (Figure 9(a)) 동아시아에는 남풍 계열의 바람이 유입되어 한반도, 일본, 중국 동북부 그리고 러시아 까지 warming signal이 나타나고 중국 남부지역과 캄차카 반도 근처의 온도는 낮아진다. 반면 AO가 음의 위상일 때는 (Figure 9(c)) 동아시아에 북풍 계열의 바람이 우세함에 따라 온도가 낮고 캄차카 반도 주변에는 기온이 올라간다. 관측에서는 AO의 위상에 따라 동아시아의 기온과 바람장이 대칭적인 패턴을 보여준다. BMME는 양의 AO일 때 동아시아의 기온이 평년에 비해 높아지는 모습을 예측하지 못하고 중국과 러시아에 오히려 기온이 낮아진다. 또한 동아시아에 우세한 남풍 계열의 바람도 잘 보여주지 못한다. 음의 AO의 경우에는 (Figure 9(d)) 한반도와 일본에 기온이 낮아지는 모습이 보이고 캄차카 반도에서도 관측과 유사하게 평년보다 따뜻한 온도가 나타난다. 그러나 한반도에서 중국 동북부와 러시아로 이어지는 cooling signal은 잘 나타나지 않는다. 이는 관측에 비해 북풍계열의 바람이 약하게 나타나기 때문이라고 생각된다. 또한 AO의 위상에 따른 반대 패턴이 잘 나타나지 않는다.

양의 AO일 때 500hPa에 동아시아에 위치하는 기압골 (East Asian trough)은 평년에 비해 약해지고 (Figure 10(a)), 음의 AO일 때는 평년보다 더 발달한다 (Figure 10(c)). 동아시아 겨울 몬순의 발생과 동아시아 한파는 East Asian trough가 깊어지는 것과 관련이 있는데 (Qiu and Wang, 1984), AO의 위상에 따라서 East Asian trough가 변화하여 동아시아 겨울 몬순에 영향을 줄 수 있다.

BMME는 양의 AO일 때 (Figure 10(b)) East Asian trough가 약해지는 모습을 잘 보여주나, 최대값이 관측과 비교하여 약 50° 정도 동쪽에 위치해 있고 최대값의 크기 또한 약 0.4gph 정도 작다. 음의 AO의 경우 (Figure 10(d)), 관측에 비해 East Asian trough가 덜 깊어지지만, 위치는 양의 AO에 비해서 관측과 유사하다. 또한 850hPa의 온도보다는 반대의 패턴을 보여준다.

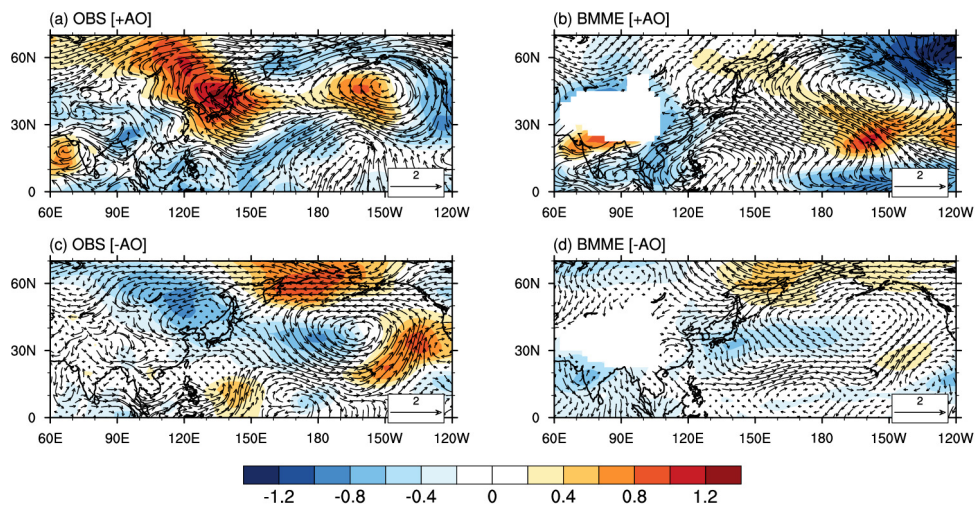
Figure 11은 AO의 위상에 따라 상층 제트 역시 반대 패턴을 보여주는데, AO가 양의 위상일 때는 200hPa 제트기류의 남북경도가 약해지고 (Figure 11(a)) AO가 음의 위상일 때는 jet stream의 남북경도가 더욱 커진다 (Figure 11(c)). 상층 제트의 남북 경도는 시베리아 고기압과 관련이 있는데 (Jhun and Lee, 2004), 양의 (음의) 위상일 때는 jet stream의 남북경도가 작아져서 (커져서) 동아시아 겨울 몬순이 약해짐 (강해짐)을 의미한다.

BMME는 AO의 위상에 따른 jet stream의 남북 경도를 잘 나타내지만 그 위치가 다르다 (Figure 11(b), (d)). 양의 위상일 경우, 관측에서는 positive core의 중심이 150°E, 50°N 근처에 위치하고 negative core는 140°E, 30°N 근처에 위치하는 반면 BMME는 남서쪽으로 치우쳐져서 positive core는 80°E, 35°N 근처에, negative core는 80°E, 20°N 근처에 위치한다. 그에 반해 음의 위상의 경우는 관측과 유사한 패턴이다.

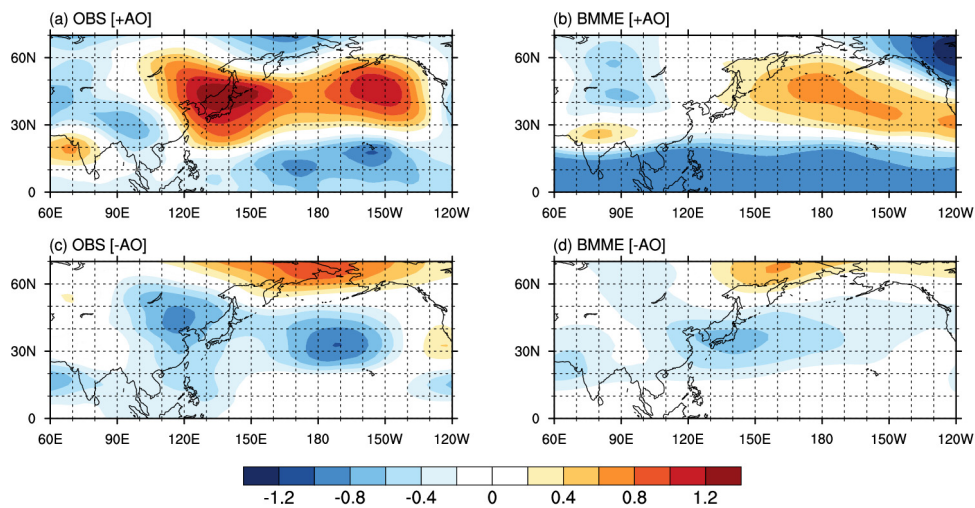
BMME가 관측과 비교하여 AO의 위상에 따른 동아시아 겨울 몬순을 특징지을 수 있는 대기변수들을 얼마나 잘 예측하는지를 쉽게 보여주기 위해, 앞서 제시된 세 변수 (850hPa 온도, 500hPa 지위고도, 200hPa 동서바람)에 대한 PCC를 Figure 12에 나타내었다. BMME의 예측성은 모든 변수에 대하여 음의 AO의 경우가 양의 AO 보다 더 높는데, 이 둘 간의 PCC가 작게는 0.17 (200hPa 동서바람), 크게는 0.69 (850hPa 온도) 정도 차이가 난다. 특히 양의 AO일 때 850hPa의 기온은 -0.01의 PCC를 갖는데, 이는 BMME는 양의 AO일 때의 기온은 잘 예측하지 못한다는 것을 의미한다. 그러나 200hPa의 동서바람의 PCC는 0.57으로, 양의 AO일 때는 jet stream의 남북경도를 이용하여 동아시아 겨울 몬순의 약화를 예측할 수 있음을 의미한다. 앞서 얘기한 대로 음의 AO는 동아시아 겨울 몬순의 강화와 밀접하게 연관되어 있는데, BMME는 AO와 관련된 동아시아 겨울 몬순의 강화되는 패턴을 잘 예측한다. 세 변수 모두 0.68 이상의 높은 PCC를 보이고, 특히 500hPa 지위고도와 PCC가 가장 높다. 이는 AO의 음의 위상일 때 동아시아 기온이 평년에 비해 낮아지고, jet stream의 남북경도가 커지고, 특히 East Asian trough가 더 깊어지는 것을 잘 예측한다고 할 수 있다.

**Table 2** Classification of positive ( $> 1\sigma$ ) and negative AO ( $< -1\sigma$ ) in boreal wintertime (monthly DJF) during the period 1983/84-2001/02.

Positive AO	Negative AO
Dec 1988	Jan 1985
Jan 1989	Feb 1985
Feb 1989	Dec 1985
Feb 1990	Feb 1986
Dec 1992	Feb 1987
Jan 1993	Dec 1995
Feb 1997	Jan 1996
	Dec 1996
	Jan 1998
	Dec 2000



**Figure 9** Composite anomalies of temperature at 850hPa [K] and wind at 850hPa [m/s] of (a), (c) the observation and (b), (d) BMME for positive AO phases (left panels) and negative AO phases (right panels)



**Figure 10** Same as Figure 9 except for geopotential height at 500hPa (gpm).

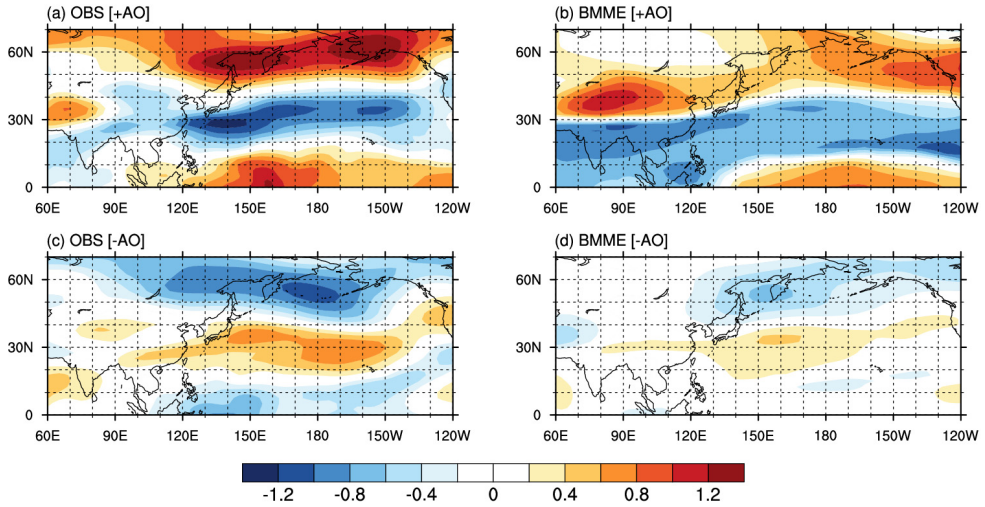


Figure 11 Same as Figure 9 except for zonal wind at 200hPa (m/s).

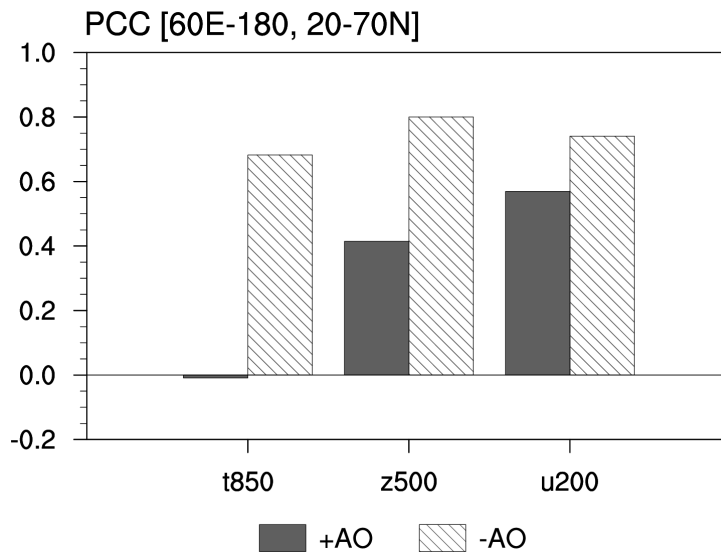


Figure 12 Pattern correlation coefficients between observed and simulated composite maps of positive and negative AO for temperature at 850hPa, geopotential height at 500hPa and zonal wind at 200hPa.

## 6. 결론 및 토의

북반구 겨울철 순환의 주요 모드인 AO는 겨울철 동아시아 몬순에 영향을 미치는 요인 중 하나로 알려져 있다. 본 연구에서는 APEC 기후센터와 WMO 장기예보 다중모델앙상블 선도센터에 참여하는 계절 예측 모형들의 겨울철 AO 예측성을 살펴보고, 계절예측모형이 AO를 잘 예측할 때 AO가 동아시아 겨울 몬순에 미치는 영향 역시 잘 예측하는지를 알아보았다.

우선 각 모형들이 북반구 겨울철의 기후 특성을 예측하는 능력을 알아보기 위해 겨울철 해면기압의 기후장과 변동성을 관측과 비교하였다. 관측의 기후장에서는 동아시아를 중심으로 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 보였는데, 이는 동아시아 겨울 몬순의 세기를 결정짓는 중요한 패턴이다. 대륙과 해양의 비열 차에 의해 대륙의 공기는 상대적으로 차가운데, 대륙권 하층에 시베리아 고기압이 유도하는 고기압성 바람으로 인해 동아시아에는 한랭이류가 우세하다. 개별 모형들은 각 모형의 고유한 계통적 오차 등에 의해 bias가 나타난다. 대부분의 모형들은 북태평양에 양의 오차가 나타나나, 일부 모형들은 음의 오차를 보였다. 또한 어떤 모형은 북극에 양의 오차가 존재하고 그 주변에 음의 오차가 둘러싼다. 또 다른 모형들은 북극을 중심으로 양의 오차가 우세했다. 관측의 월별 변동성을 살펴보면 북태평양, 티벳 고원, 그리고 북극에서부터 그린란드 해에 걸쳐 5hPa 이상의 표준편차를 보였는데, 이는 이 세 지역의 북반구 겨울철 동안의 변동성이 다른 지역에 비해 크다는 것을 의미한다. 모형들은 관측과 유사한 표준편차의 범위를 보이나, 몇 개의 모형들은 관측보다 변동성이 작았다. 또한 북태평양과 그린란드해의 변동성은 크지만, 티벳 고원의 변동성은 약하게 모의되거나 거의 나타나지 않았다.

EOF 분석을 통해 관측과 모형들의 AO 패턴과 지수를 살펴보았는데, 모든 모형들은 관측에서와 같이 첫 번째 모드를 AO 모드로 나타내었다. 관측에서는 AO 모드가 전체 변동량 중 25.2%를 설명하는 반면, 많은 모형들이 관측에 비해 AO의 변동량을 크게 나타나는 경향이 있었다. 각 모형들은 관측에 나타나는 AO의 annular mode를 잘 보여주는데, 북태평양, 북극, 북대서양에 위치하는 3개의 center of action도 잘 예측했다. 그러나 AO 지수는 5개의 모형만이 관측과 통계적으로 95% 이상 유의한 시간상관계수를 보이고 나머지 모형들은 AO 지수의 변동성을 잘 나타내지 못했다. 이는 현재 계절예측모형들은 AO 패턴

은 잘 나타내는 반면 AO 지수의 sub-seasonal 변동성은 잘 나타내지 못한다는 것을 의미한다.

따라서 AO의 패턴 뿐 만 아니라 AO의 지수도 잘 예측하는 4개의 모형을 선정하고, 이들에 대해 MME를 수행하였다. BMME의 AO 모드는 전체 변동량 중 47.5%를 설명하는데, 이는 관측보다는 여전히 2배가량 높은 값이었다. BMME가 모의하는 AO 패턴은 북극이나 북대서양 action center의 강도는 약하나 북태평양의 center of action은 관측과 유사한 수준의 강도를 나타냈다. AO지수는 관측과 통계적으로 99% 이상 유의한 수준인 0.40의 시간상관계수를 보였다. BMME에 대한 PCC와 TCC는 각 모형의 평균적인 skill보다 높을 뿐만 아니라, best model의 평균 skill보다도 높다.

이렇게 AO를 잘 예측하는 BMME가 AO와 관련된 북반구의 순환장 역시 잘 예측하는지 살펴보기 위해 850hPa 온도와 200hPa 동서바람을 AO 지수에 선형 회귀 시킨 결과를 관측과 비교하였다. 관측에서는 유라시아와 북미의 온도가 반대 위상을 보이고 BMME 역시 이 특징을 잘 모의하나 그 변동폭이 작다. 북태평양에 위치한 200hPa의 jet stream의 경우, AO와 관련되어 약해지는 모습을 관측과 BMME에서 볼 수 있었다. 기온과 마찬가지로 BMME의 변동폭은 관측에 비해 작았다. 그럼에도 불구하고 BMME는 AO에 의한 북반구 겨울철 순환의 공간적 패턴에 대한 예측성이 있다고 생각된다. 이는 MME가 ensemble spread는 증가시키지만, 이에 따라 ensemble mean의 variance는 작아지는 특징을 가지기 때문이다 (Yoo and Kang, 2005).

실제 관측에서 나타나는 AO의 위상에 따라 동아시아 겨울 몬순에 영향을 미치는 여러 대기 변수들의 예측성을 살펴보기 위해, AO의 위상에 따른 합성장 분석을 수행했다. AO가 양의 위상일 때, 관측에서는 동아시아에 남풍 계열의 바람이 유입되어 warming signal이 나타나고 East Asian trough는 약화되고 200hPa jet stream의 남북 경도는 약해짐에 따라 동아시아 겨울 몬순이 약해졌다. AO가 음의 위상일 때는 반대의 패턴을 보인다. BMME는 AO가 양의 위상일 때는 이러한 패턴을 잘 나타내지 못하지만, 음의 위상에 대해서는 관측과 유사한 패턴을 보였다. AO에 위상에 따른 공간상관계수를 통해 BMME는 음의 AO일 때의 예측성이 양의 AO일 때 보다 더 높은 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 모형이 AO의 위상에 따라 동아시아 몬순의 패턴이 반대로 나타나는 것은 잘 모의하지



못하지만, 음의 AO일 때 동아시아 겨울 몬순이 강해지는 것은 잘 보여줌을 의미한다.

동아시아 겨울 몬순은 지구 온난화로 인해 기후 변이 (climate regime shift)를 겪었는데 (Koide and Kodera, 1999; Nakamura et al., 2002), 1980년대 이후로 시베리아 고기압이 약해짐에 따라 동아시아 겨울 몬순 역시 약화되었다 (Panagiotopoulos et al., 2005). Wang et al. (2009)는 40년의 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 재분석자료와 NCEP/NCAR 재분석자료를 이용하여 1978-87년 동안은 강했던 동아시아 겨울 몬순이 1988년 정도에 약해짐을 보인 바 있다. 동아시아 겨울 철 몬순의 변동은 중위도의 평균 대기순환장과 밀접한 상관성을 가지고 있는 것으로 알려져 있으며 이러한 평균 대기순환장의 변화는 시베리아 고기압, 알류산 저기압 및 AO의 변동성의 차이로 나타나게 된다. 그러나 본 연구에서는 이러한 climate regime shift를 고려하지 않았는데, 이는 모형들의 공통된 hindcast 기간이 1983/84-2001/02년 동안의 19년으로 regime shift를 고려하기에는 너무 짧기 때문이다. 추후에 climate regime shift를 고려하여 AO가 동아시아 겨울 몬순에 미치는 영향을 살펴보는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## REFERENCES

- Ahn, J.-B. and Kim, H.-J., 2013: Improvement of 1-month lead predictability of the wintertime AO using a realistically varying solar constant for a CGCM. *Meteor. Appl.*, n/a.
- Cohen, J., and D. Entekhabi, 1999: Eurasian snow cover variability and Northern Hemisphere climate predictability. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 345-348.
- Cohen, J. and M. Barlow, 2005: The NAO, the AO and global warming: How closely related?, *J. Climate*, **18**, 4489-4513.
- Cohen, J., M., Barlow, and K. Saito, 2009: Decadal Fluctuations in Planetary Wave Forcing Modulate Global Warming in Late Boreal Winter, *J. Climate*, **22**(16), 4418-4426.
- Gillett, N. P., M. R. Allen, R. E. McDonald, C. A. Senior, D. T. Shindell, and G. A. Schmidt, 2002: How linear is the Arctic Oscillation response to greenhouse gases?, *J. Geophys. Res.*, **107**, D3, 4022.
- Gong, D.-Y., S.-W. Wang, and J.-H. Zhu, 2001: East Asian winter monsoon and Arctic oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2073-2076.
- Jeong, J.-H., and C.-H. Ho, 2005: Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14704.
- Jhun, J.-G., and E.-J. Lee, 2004: A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon, *J. Climate*, **17**, 711-726.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, Yang S-K, Hnilo JJ, Fiorino M, Potter G.L., 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.
- Kim, H.-J., and J.-B. Ahn, 2012: Possible impact of the autumnal North Pacific SST and November AO on the East Asian winter temperature, *J. Geophys. Res.*, **117**, D12104, doi:10.1029/2012JD017527.
- Koide, H., and K. Kodera, 1999: A SVD analysis between the winter NH 500-hPa height and surface temperature fields. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 47-61.
- Nakamura, H., T. Izumi, and T. Sampe, 2002: Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and East Asian winter monsoon. *J. Climate*, **15**, 1855-1874.
- Overland, J. E., J. M. Adams, and N. A. Bond, 1999: Decadal variability of the Aleutian low and its relation to high-latitude circulation. *J. Climate*, **12**, 1542-1548.
- Panagiotopoulos, F., M. Shahgedanova, A. Hannachi, and D. Stephenson, 2005: Observed trends and teleconnections of the Siberian high. *J. Climate*, **18**, 1411-1422.
- Park, T.-W., C.-H. Ho, S. Yang, and J.-H. Jeong, 2010: Influences of Arctic Oscillation and Madden-Julian Oscillation on cold surges and heavy snowfalls over Korea: A case study for the winter of 2009-2010, *J. Geophys. Res.*, **115**, D23122.
- Qiu, Y. Y., and W. D. Wang, 1984: *Progresses in the research of medium-range prediction of cold surge. Proceedings of Medium-Range Prediction of Cold Surge*. Peking University Press, 1-10.
- Saito, K. and J. Cohen, 2003: The potential role of snow cover in forcing interannual variability of the major Northern Hemisphere mode, *Geophys. Res. Lett.*, **30**(6), 1302.



- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297-1300.
- Thompson, D. W. J., and J. M. Wallace, 2000: Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. *J. Climate*, **13**, 1000-1016.
- Wang, L., R. Huang, L. Gu, W. Chen, and L. Kang, 2009: Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity. *J. Climate*, **22**, 4860-4872.
- Xin, Xiao-Ge, T.-J. Zhou, and R.-C. Yu, 2008: The Arctic Oscillation in Coupled Climate Models. *Chinese J. Geophys.*, **51**, 223-239.
- Yoo, J. H., and I.-S. Kang, 2005: Theoretical examination of a multi-model composite for seasonal prediction. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18707.
- Zhang, Y., K. R. Sperber, and J. S. Boyle, 1997: Climatology and interannual variation of the East Asia winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP-NCAR reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2605-2619.



## APCC RESEARCH REPORT 2013-03

- A study on the Prediction of East Asian Summer Rainfall in Relation to the Western Pacific Convection
- Seasonal Predictability of Artic Oscillation and its Impact on the East Asian Winter Monsoon using a Multimodel Ensemble
- Seasonal Track Feature Analysis of the Western North Pacific Tropical Cyclones using APCC MME

### APEC Climate Center

12, Centum 7-ro, Haeundae-gu, Busan 612-020,  
Republic of Korea  
Tel: +82-51-745-3900 Fax: +82-51-745-3949  
[www.apcc21.org](http://www.apcc21.org)

비매품



94550



9 788897 333950

ISBN 978-89-97333-95-0  
ISBN 978-89-97333-92-9 (세트)