



---

# 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

---

## CMIP5 모형을 이용한 동아시아 여름 몬순의 미래 변화와 최적 모형 선정

■ 이은정 | 기후변화연구팀

1. 서론	132
2. 연구 자료 및 방법	133
2.1 연구 자료	133
2.2 전지구 몬순 및 동아시아 몬순 영역 선정	135
2.3 최적 모형 선정 방법	136
3. CMIP5 모의 성능 평가 및 최적 모형 선정	138
3.1 연 평균 강수량 및 경년 변동 모의 평가	138
3.2 계절 특성 모의 평가	140
3.3 최적 모형 선정	147
3.4 주성분 분석	149
4. 동아시아 몬순의 변화	152
4.1 몬순 강수량의 변화	152
4.2 몬순 시스템의 변화	156
5. 결론 및 토론	157



APCC  
RESEARCH REPORT 2013-06

---

# CMIP5 모형을 이용한 동아시아 여름 몬순의 미래 변화와 최적 모형 선정

---

이은정 | 기후변화연구팀

**ABSTRACT**

Forecasting future changes in monsoon precipitation is important because agriculture, water resources, energy, the economy, and society in the world's most populous monsoon regions are critically influenced by climatic disasters arising from monsoon precipitation variability due to the changing climate. In the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5), there are various scenarios assuming that radiative forcing will be stabilized with increases of about 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5  $\text{Wm}^{-2}$  after 2100. Recently, several studies have revealed that most models in the third phase of CMIP (CMIP3) and CMIP5 project show an increase in global monsoon area and precipitation under global warming, mainly attributable to the increases in moisture convergence and surface evaporation.

We evaluated abilities of coupled general circulation models (CGCMs) in the CMIP5 to simulate the East Asian monsoon system and variables during the reference period of 1979-2005 in terms of simple metrics that were chosen to better understand the physical processes by which large-scale meteorological variables influence the monsoon system. The metrics include: (1) the annual and seasonal mean precipitation and (2) the monsoon precipitation intensity and the threat score in (or over) the monsoon domain. The evaluation metrics mostly consist of global and regional coefficients of spatial pattern correlation and root-mean-squared error between the observed and simulated results. The threat score for the monsoon domain and the spatial correlation of monsoon precipitation intensity were also included.

The number of selected best models for the mean field (BM\_M) and seasonal variation (BM\_S) were six and five, respectively. Two best modelgroups are listed as follows: 1) BM\_M: ACCESS1-0, CNRM-CM5, FGOALS-g2, IPSL-CM4A-LR, IPSL-CM5B-LR, MRI-CGCM3. 2) BM\_S: ACCESS1-0, CCSM4, CESM1-CAM5, MIROC5, MPI-ESM-LR.

The averages of BM\_M and BM\_S were compared with 28MME, respectively. Variations canceled each other out in 28MME, but BM\_M and BM\_S demonstrated stronger summer rainfall cores. Though most dominant modes in the three ensemble groups were similar to each other, there are spatially distinct differences. 28MME, BM\_M and BM\_S demonstrated a weakened magnitude of rainband, a strengthened core over the peninsula and meridional dry spell-rainband dipole mode, respectively. Under the RCP 8.5 scenario, summer precipitation increase in BM\_S was the largest among the three groups. There was a big change over the Yellow Sea and near 30-35°N. In terms of low level circulation, southerlies were strengthened among the three ensemble groups. Summer precipitation change in BM\_S was large over the Korean peninsula and 30-35°N, compared to the other ensemble groups. This was influenced by the convergence between the strengthened southerly at 120°E and easterly at 30-35°N.



## 1. 서론

기후변화에 의해 전 세계적으로 가장 인구가 밀집해 있는 몬순 지역에서의 강수 변동성이 커짐에 따라 재해의 빈도가 증가하고 있다. 농업이나 수자원, 에너지, 경제, 사회 등 우리의 삶과 밀접한 부분에서도 매우 큰 영향을 받기 때문에, 몬순 강수의 미래 변화를 예측하는 것은 매우 중요하다. 동아시아 여름 몬순은 이 지역의 기후와 날씨에 영향을 주는 가장 중요한 순환 중 하나이다. 이러한 동아시아 여름 몬순과 관련된 강수가 지구 온난화 하에 미래에 어떻게 변화하는지는 기후 변화에 대한 정부 간 패널(Intergovernmental panel on climate change, IPCC)의 제 3차 결합모형간 비교사업(the third phase of the coupled model intercomparison project, CMIP3)의 결합 모형들을 이용하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 사전 연구들에서는 중국의 중부와 북부, 한반도, 일본의 여름 몬순 강수는 지구 온난화로 인해 21세기 말에는 8에서 20%까지 증가할 것으로 예상하였다(Min et al. 2006; Kripalani et al. 2007; Kusunoki and Arakawa 2012; Seo and Ok 2013). 이러한 증가의 이유는 동아시아 연안지역에서 습한 남풍의 강화에 의한 것으로 보인다고 연구된 바 있다(Lu et al. 2007).

최근 제 5차 결합모형간 비교사업(the phase five of Coupled Model Inter-comparison Project, CMIP5)에서는 복사 강제력이 2100년에는 2.6이나 4.5, 6.0, 8.5  $Wm^{-2}$ 까지 증가 후 안정될 것이라고 가정한 다양한 시나리오를 내놓았다. 최근 Hsu et al.(2012)은 CMIP3과 CMIP5의 대부분 모형들이 지구 온난화 하에 수분 수렴과 지표 증발의 증가가 주로 기인하여 전지구 몬순 지역과 몬순 강수 모두 증가한다고 말했다. Lee and Wang(2012)에서는 전지구 몬순에 대해 최적 모형 4개를 선정하였으며, 이전에 비해 크게 달라진 점들은, CMIP3보다 CMIP5에서 “습한 지역은 더욱 습하고, 건조한 지역은 더욱 건조한 패턴”을 덜 모의함을 밝혔다. 또한, 전자는 아시아 몬순 전체 지역의 연 평균 강수량의 큰 증가를 모의하였고, 후자는 전자에 비해 서아프리카 몬순지역의 불확실성을 줄였다는 것을 알아내었다.

Lee and Wang(2012)에서 사용된 최적 모형 선정 방법은 지역의 특성에 매우 많은 영향을 받으므로, 선정된 전지구 몬순 최적 모형을 본 연구에서 집중하고자 하는 동아시아 지역에 대해 바로 적용할 수 없다. 그러므로 CMIP5 모형들이 동아시아 몬순을 어떻게

모의하는지 보고 미래 변화를 예측하기 위해서는, 동아시아 지역에 대한 최적 모형이 새롭게 선정되어야 한다. 최근 Seo et al.(2013)은 동아시아 여름 몬순에 대해 CMIP3와 CMIP5 모형들의 성능을 비교하고, 강수의 공간 상관과 표준 편차를 동시에 평가할 수 있는 숙련도를 계산하여 15개의 우수한 모형들을 선정하고 미래 변화를 조사하였다.

하지만 이러한 최적 모형을 선정하는 것은 초점을 맞추는 시간 규모에 따라서도 달라질 수 있다. APEC 기후 센터 내의 응용 분야에서의 기후 자료 활용성을 높이기 위해, CMIP5 모형 사용을 권장하고 있으나, 실제로 타 분야에서 방대한 기후 모형을 모두 사용하기에는 역부족이다. 본 연구에서는 사전연구를 기반으로 하여 최적 모형을 선정하되, 평균장 및 계절 변동 등을 모두 고려하여 같은 동아시아 몬순 지역에서 평균 기후장을 잘 모의하는 최적 모형과 몬순 기후장을 잘 모의하는 최적 모형을 각각 선정하여 정보를 제공하고자 한다. 또한 이러한 모형들이 기존의 28개 모형 평균과는 어떻게 다른 특징을 가지는지 비교 분석하고자 한다.

그러므로 본 연구에서는 동아시아 몬순 지역에 대해 1) 기후 모형들의 과거 기후장 모의 성능을 평가하여 최적 모형을 선정하고, 2) 선정된 최적 모형이 다른 모형들에 비해서 서로 어떻게 다르게 모의 하는지 조사하고자 한다. 이러한 최적 모형을 선정하기 위해서는 강수량 중심으로 모형 간 비교가 이루어 졌으며, 대부분의 강수가 여름에 집중되므로 여름 몬순에 더욱 초점을 맞추어 분석을 실시하고자 한다. 특히 여름의 한반도 강수 특성에 대한 분석도 함께 수행하였다.

## 2. 연구 자료 및 방법

### 2.1 연구 자료

#### 2.1.1 기후 모형

본 연구에서 사용된 기후 모형 자료들은 CMIP5의 모형 간 앙상블 자료에서 제공되었다. 이러한 모형 자료 중 과거 재현실험과 2가지 시나리오에 대하여 분석을 실시하였다.



기후 모형 자료의 과거 모의에 대해서는 1979~2005년, 대표 농도 경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 4.5와 8.5 시나리오에 대해서는 2006~2100년의 자료가 이용되었다. 여기서 RCP 4.5와 8.5 시나리오는 2100년까지 복사 강제력이 각각 4.5와 8.5Wm<sup>-2</sup>로 증가 후 안정될 것이라는 가정 하에 모의된 실험이다(Taylor et al, 2012). 과거 모의 자료는 각각의 모형들이 과거 기간 동안의 기후 평균장과 몬순 시스템을 얼마나 현실적으로 잘 모의하는지 평가하는 데 이용되었고, RCP 4.5와 8.5 시나리오는 지구 온난화 하에 미래에 몬순 시스템이 어떻게 변하는지 조사하기 위해 이용되었다.

CMIP5 프로젝트에서 제공되는 모형 중 28개의 모형들이 본 연구에 이용되었고, 표 1에 모형 이름, 기관, 대기 요소의 수평 해상도, 각 모형에 이용된 앙상블 숫자 등을 나타내었다. 모형들의 과거 기후 자료와 관측 자료를 비교하기 위해, 연구에 사용된 모든 자료의 수평 해상도는 2.5° × 2.5°로 통일하였다. 또한 다중 모형 앙상블(multi-model ensemble, MME)은 모든 모형에 대해 동일한 가중치로 계산되었다. 모형의 과거 모의 기간 또한 관측 자료 기간과 동일하게 1979~2005년, 총 27년의 자료가 이용되었다.

### 2.1.2 관측 자료

동아시아 몬순 지역에서의 CMIP5 모형들의 과거 기후 모의 성능을 평가하기 위해서 미국의 국가 환경 예측 센터-에너지부(National Centers for Environmental Prediction-U.S. Department of Energy, NCEP-DOE) 재분석 자료 2(Kanamitsu et al, 2002)를 이용하였다. 해상도는 위, 경도 2.5° × 2.5°이고, 850hPa에서의 동서바람과 남북바람이 이용되었다. 강수량은 전지구 강수 기후치 프로젝트(Global Precipitation Climatology, GPCP Project) 2.2 버전의 월평균 자료를 이용하였으며, 해상도는 2.5° × 2.5°이다(Xie and Arkin, 1997).

본 연구에서는 과거 기후 모의 기간 동안의 모형 자료의 모의 성능을 관측 자료와 비교하기 위해, 여름철은 6, 7, 8월의 평균값을, 겨울철은 12월, 1, 2월의 평균값을 이용하였다. 분석을 위해 사용된 동아시아 몬순 지역은 위도 30°N~60°N, 경도 90°E~140°E로 정의하였다.

## 2.2 전지구 몬순 및 동아시아 몬순 영역 선정

Wang and Ding(2006)에서 제시되었던 전지구 몬순 정의를 통해 얻어진 몬순 영역은 Fig. 1과 같다. 전지구 몬순 영역은 여름과 겨울 강수량의 차이가 180mm를 초과하고, 여름 몬순 강수량이 연강수량의 35% 이상을 설명하는 지역으로 정의된다. 크게 북반구에 3개, 남반구에 3개 영역이 선정되었다. 북반구에는 북아프리카(North Africa, NAF), 북아메리카(North America, NAM), 아시아(Asia, AS) 몬순이, 남반구에는 남아프리카(South Africa, SAF), 호주(Australia, AU), 남아메리카(South America, SAM) 몬순이 위치하고 있다. 그 중에서도 AS 몬순은 특성이 서로 다른 인도(India, ID), 북서태평양(Western North Pacific, WNP), 동아시아(East Asia, EA)의 복합적인 3개의 몬순 지역으로 이루어져 있다. 그 중에서도 한반도가 속해 있는 동아시아 몬순에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 동아시아 몬순 지역은 Fig. 1에서 EA이며, 유일한 중위도 몬순임을 알 수 있다. 또한 중국 대륙의 북동부와 한반도를 포함하는 영역임을 알 수 있다. 계산에 사용된 동아시아 몬순 영역은 Fig. 1에서와 같이 정의된 EA 영역을 사용하였고, 공간장 분석 시에는 EA 영역을 포함하는 사각 격자를 위도 30°N~60°N, 경도 90°E~140°E로 정하여 공간 패턴을 살펴보았다.

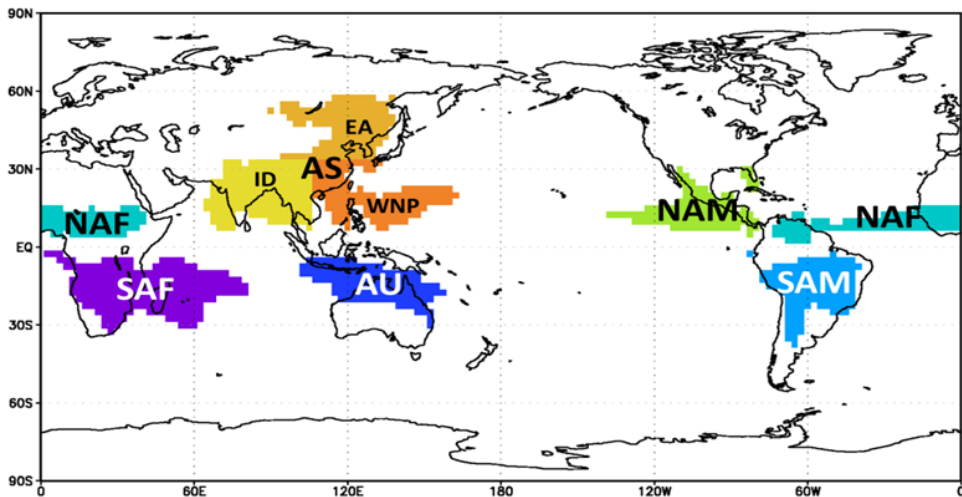


Figure 1 Global monsoon domains defined according to Wang and Ding (2006) using recent precipitation data.



**Table 1** CMIP5 models used in this study.

No	Model	Institution	No. of ensemble runs	Resolution Lon. x Lat.
1	ACCESS1-0	CSIRO-BOM	1	1.875° × 1.25°
2	BCC-CSM1-1	BCC	1	2.8125° × 2.8125°
3	CanESM2	CCCma	1	2.8125° × 2.8125°
4	CCSM4	NCAR	1	1.25° × 0.9375°
5	CESM1-CAM5	NCAR	1	1.25° × 0.9375°
6	CNRM-CM5	CNRM-CERFACS	1	1.40625° × 1.40625°
7	CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE	1	1.875° × 1.875°
8	EC-EARTH	EC-EARTH	6	1.125° × 1.125°
9	FGOALS-g2	LAGG-CCESS	2	2.8125° × 2.8125°
10	GFDL-CM3	NOAA GFDL	1	2.5° × 2°
11	GFDL-ESM2G	NOAA GFDL	1	2.5° × 2°
12	GFDL-ESM2M	NOAA GFDL	1	2.5° × 2°
13	GISS-E2-H	NASA/GISS	1	2.5° × 2°
14	GISS-E2-R	NASA/GISS	1	2.5° × 2°
15	HadGEM2-AO	NIMR/KMA	1	1.875° × 1.24°
16	HadGEM2-CC	MOHC	1	1.875° × 1.24°
17	HadGEM2-ES	MOHC	2	1.875° × 1.24°
18	INM-CM4	INM	1	2° × 1.5°
19	IPSL-CM5A-LR	IPSL	1	3.75° × 1.875°
20	IPSL-CM5A-MR	IPSL	1	3.75° × 1.875°
21	IPSL-CM5B-LR	IPSL	1	3.75° × 1.875°
22	MIROC5	AORI	1	1.40625° × 1.40625°
23	MIROC-ESM	JAMSTEC, AORI, NIES	1	2.8125° × 2.8125°
24	MIROC-ESM-CHEM	JAMSTEC, AORI, NIES	1	2.8125° × 2.8125°
25	MPI-ESM-LR	MPI-M	1	1.875° × 1.875°
26	MPI-ESM-MR	MPI-M	1	1.875° × 1.875°
27	MRI-CGCM3	MRI	1	1.125° × 2.25°
28	NorESM1-M	NCC	1	2.5° × 1.875°

### 2.3 최적 모형 선정 방법

과거 기후에 대해 CMIP5 모형들이 관측과 얼마나 유사하게 모의하는지 성능을 비교하기 위해 공간 상관계수(pattern correlation coefficient, PCC) (Wilks, 1995)와 정규화된 평균 제곱근 오차(normalized root mean square error, NRMSE)를 각 모형에 대해

계산하였다. PCC는 관측과 모의 공간이 공간적으로 비슷한 정도를 상관계수처럼 수치로 -1부터 1까지 나타낼 수 있다. 또한 NRMSE는 표준편차로 정규화된 RMSE로, RMSE는 ‘관측 자료와 모형 자료의 차’의 제곱을 평균 후 제곱근을 구하는 것이며 이 값이 크다는 것은 관측과 모형의 차이가 크다는 것을 뜻한다. 즉, 관측 자료의 PCC가 높고 NRMSE가 작다면, 그 모형은 과거 기후를 잘 모사한다고 말할 수 있다. PCC와 NRMSE는 강수량의 연평균과 여름, 겨울 평균 각각에 대해 계산되었으며 이를 토대로 28개 모형 중 동아시아 여름 몬순 강수량의 ‘평균장을 잘 모의하는’ 최적 모형(best models for mean field, BM\_M)을 선정하였다.

동아시아 몬순을 잘 모의하는지 평가하기 위해서는 몬순 강수 강도(monsoon precipitation intensity, MPI)와 몬순 정의에 따라 선정된 몬순 영역을 비교하는 threat score(TS)가 이용되었다. 먼저 MPI는 다음 식과 같이 여름과 겨울 강수량의 차이와 연평균 강수량의 비로 정의된다.

$$MPI = \frac{PRCP_{summer} - PRCP_{winter}}{PRCP_{annual}}$$

Wang and Ding(2006)에서 사용된 몬순 영역 정의를 이용하여 각 모형에서 몬순 영역을 어떻게 정의하는 지 비교에 사용된 계산은 TS를 계산하는 방법으로, 관측과 모형에서 정의된 몬순 영역을 격자별로 비교하여 관측과 모형에서 모두 정의한 격자는 H(hitted), 관측에서는 정의 되었으나 모형에서는 정의하지 못한 격자는 M(missed), 관측에서는 정의 되지 않았지만 모형에서는 정의된 격자는 F(False-alarm)으로 두고 계산하여 다음 식과 같이 TS를 계산할 수 있다.

$$TS = \frac{H}{(H + M + F)}$$

이를 토대로, 여름과 겨울의 차이에 대한 PCC와 NRMSE를 비교하고, TS와 MPI의 PCC를 이용하여 동아시아 몬순 강수량의 ‘계절 변동을 잘 모의하는’ 최적 모형(best models for seasonal variation, BM\_S)을 선정하였다.

### 3. CMIP5 모의 성능 평가 및 최적 모형 선정

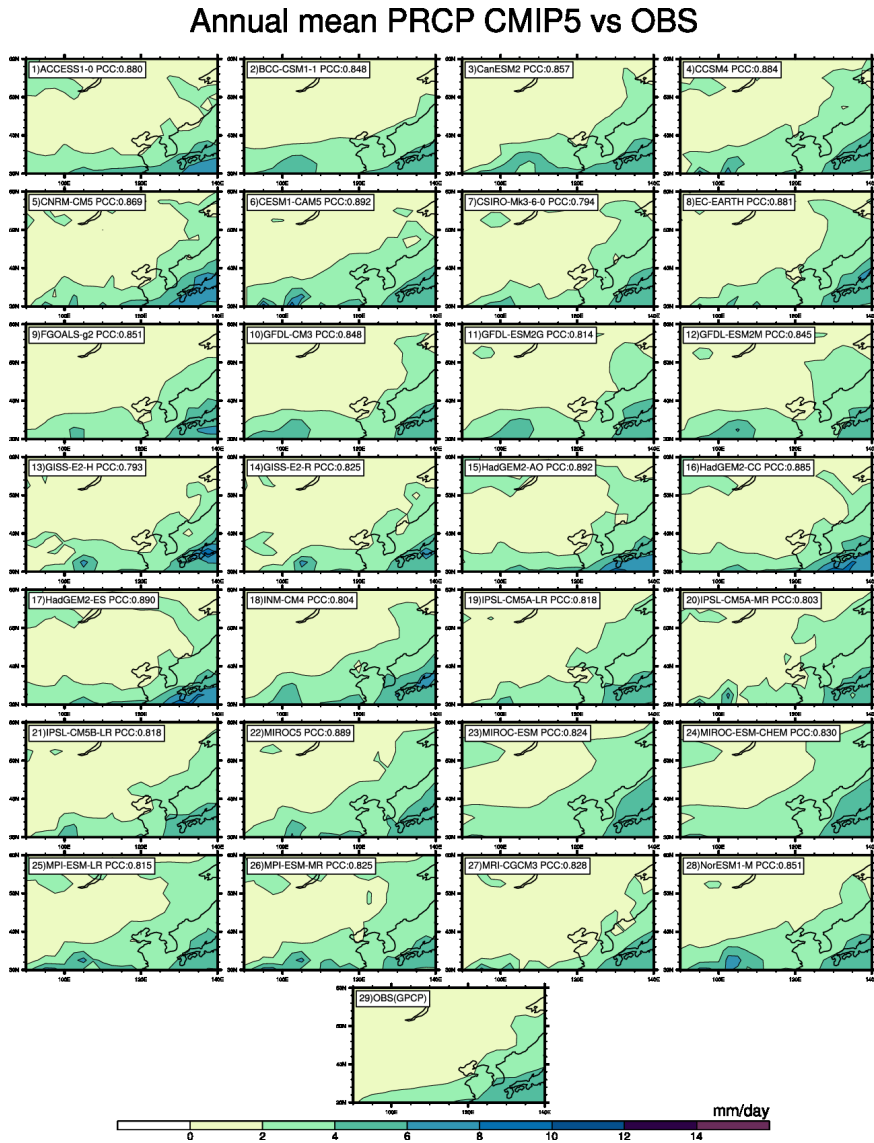
28개의 CMIP5 전지구 기후 모형들을 이용하기 위해서는 28개 모형 앙상블을 해야 하지만, 모형 간 불확실성이 너무 커서 서로 다른 시그널이 상쇄될 수 있으므로 28개의 모형 중에서도 현재 기후를 잘 예측한 모형들을 골라내어, 그러한 모형들이 미래에도 잘 예측할 것이라는 가정 하에 미래 기후 변화를 조사한다. 그러므로 CMIP5 모형 자료들을 이용하여 미래 기후를 예측하기 위해서는 우선 이 모형들이 현재의 기후 시스템을 잘 모의하는지 평가 할 필요가 있다. 하지만 이러한 모형 모의 성능 평가하는 데에도 여러 가지 요소를 고려하여, 연 평균 및 경년 변동, 계절 평균 및 월 변동과 더불어 몬순 강도와 몬순 영역 등을 관측 자료와 비교 하여 동아시아 몬순 지역에서의 강수량의 연 변동과 계절 변동 등을 평가할 뿐만 아니라, 28개 모형 중 가장 현재 기후를 잘 모의하는 최적 모형들을 선정하였다.

#### 3.1 연 평균 강수량 및 경년 변동 모의 평가

CMIP5 모형들이 강수량의 연 평균과 경년 변동을 어떻게 모의하는지 Fig. 2에 28개의 CMIP5 모형들과 관측에서의 27년(1979~2005년) 평균 강수량을 공간적으로 나타내었다. 관측기간 동안의 모형과 관측 기후값의 PCC를 계산하여 모형들이 평균 공간장을 얼마나 관측과 유사하게 모의하는지 조사하였다. PCC 값은 최저 0.79에서 최고 0.89까지 분포하여, 28개 모형 모두가 관측과 공간적으로 유사하게 모의하였다. 관측된 공간 패턴과의 큰 차이점은, 동아시아 몬순 지역에서의 연 평균 강수량 패턴은 한반도의 남쪽에 위치한 북서태평양의 강수를 관측보다 더욱 강하게 모의하는 모형들이 많고, 또한 중국 대륙의 동부 지역에서의 강수 강도를 관측에서보다 강하게 모의한 모형들도 꽤 있다는 것이다.

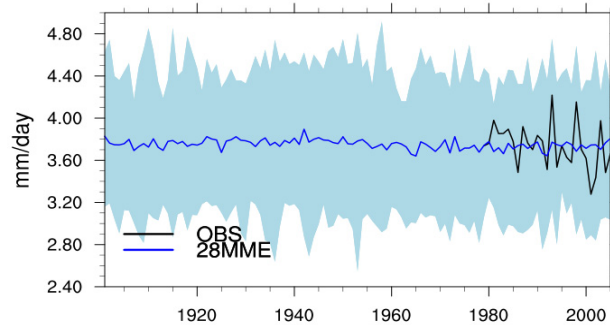
연 평균과 여름 평균의 경년 변동에 대해서도 28개 모형과 관측을 비교하였다. Fig. 3에서는 여름 평균 강수량의 경년 변동을 28개 평균과 변동성을 관측 자료와 함께 나타내었다(연강수량의 경년변동은 그림에 나타내지 않음). 그래프에서 검은색과 파란색의 실선은 관측과 28개 모형의 평균값을 각각 나타낸 것이며, 색칠된 부분은 28개 모형 간 불확실성을 나타낸 것으로 관측 값이 모형 간 불확실성 내에 포함되기는 하나 모형 간 차이가 너무 크므로 28개 모형 평균이 관측과 유사하다고 말할 수는 없다. 또한 28개 모형 평균은

관측 시계열에 비해 변동폭이 작은 것을 볼 수 있는데, 이는 모형 간 서로 다른 부호의 편차가 상쇄되었기 때문으로 보인다. 또한 연평균에서보다 여름 평균에서 28MME가 관측과 더욱 가까운 값을 나타내었다.



**Figure 2** Annual mean precipitation for (1)-[28] each CMIP5 model and (29) OBS over the East Asian monsoon region from 1979 to 2005 (27 years). The PCC between each model and OBS is shown in each panel.

### AR5 Model Ensembles EA monsoon JJA PRCP



**Figure 3** Interannual variability of JJA mean precipitation over EA monsoon region from 1901 to 2005. Black solid indicates observed JJA mean precipitation from 1979 to 2005. Blue shaded area and solid line mean the range among 28 CMIP5 models and its ensemble mean.

모형과 관측 사이의 연평균과 여름 평균 경년변동성에 대해 각각 상관계수를 계산하였다. 계산 기간은 관측기간과 겹치는 1979~2005년이다. 연평균의 경년변동성의 상관계수는  $-0.39$ 에서  $0.34$ 의 값을 가진다. 28개 모형 중 5개의 모형이 95% 유의수준에서 유의한 상관으로 나타났으며, 그 중에서도 INM-CM4와 IPSL-CM5A-LR 모형들은 관측과 양의 상관을, ACCESS1-0, CCSM4, HadGEM2-CC 모형들은 관측과 음의 상관을 가지는 것으로 나타났다. Fig. 3에 나타난 여름 평균경년 변동성의 모형 관측 간 상관관계는  $-0.35$ 에서  $0.23$ 의 값을 가진다. ACCESS1-0, CNRM-CM5 모형과 각각 95% 유의수준에서 유의한 양의 상관을 가지는 것으로 나타났다. 연평균 및 여름 평균의 경년 변동성만을 보고 28개의 모형을 평가할 수 없으므로 계절 평균과 월별 변동에 대해서도 모형 성능의 평가를 실시하였다.

## 3.2 계절 특성 모의 평가

### 3.2.1 계절 평균장

Fig. 4은 동아시아 몬순 지역의 여름 평균 강수량의 공간적 분포를 28개 모형들과 관측에 대해 각각 나타낸 것이다. 관측과 각 모형에 대해 PCC가 계산되었고, 최저  $0.52$ 에

서 최고 0.80까지 나타냈다. 공간 상관 계수로 보건대, 모형 대부분이 여름 평균 강수의 공간장의 특징들을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 하지만 몇몇 모형에서는 중국 동부 지역의 과대 모의로 인해 북서태평양 여름 강수보다 강한 강수값을 나타내었다. 또한 연평균 공간 패턴보다는 각 모형 간 패턴 차이가 더욱 크게 드러나는 것으로 보인다.

마찬가지로 Fig. 5에 겨울철 평균 강수량의 공간 분포를 각 모형과 관측에 대해서 비교하였다. 겨울철은 동아시아의 겨울 몬순 기간에는 우기가 아니므로, 강수량 값은 현저히 낮지만, 특별한 공간 패턴이 없어 PCC 대부분이 0.8 정도로 나타났다.

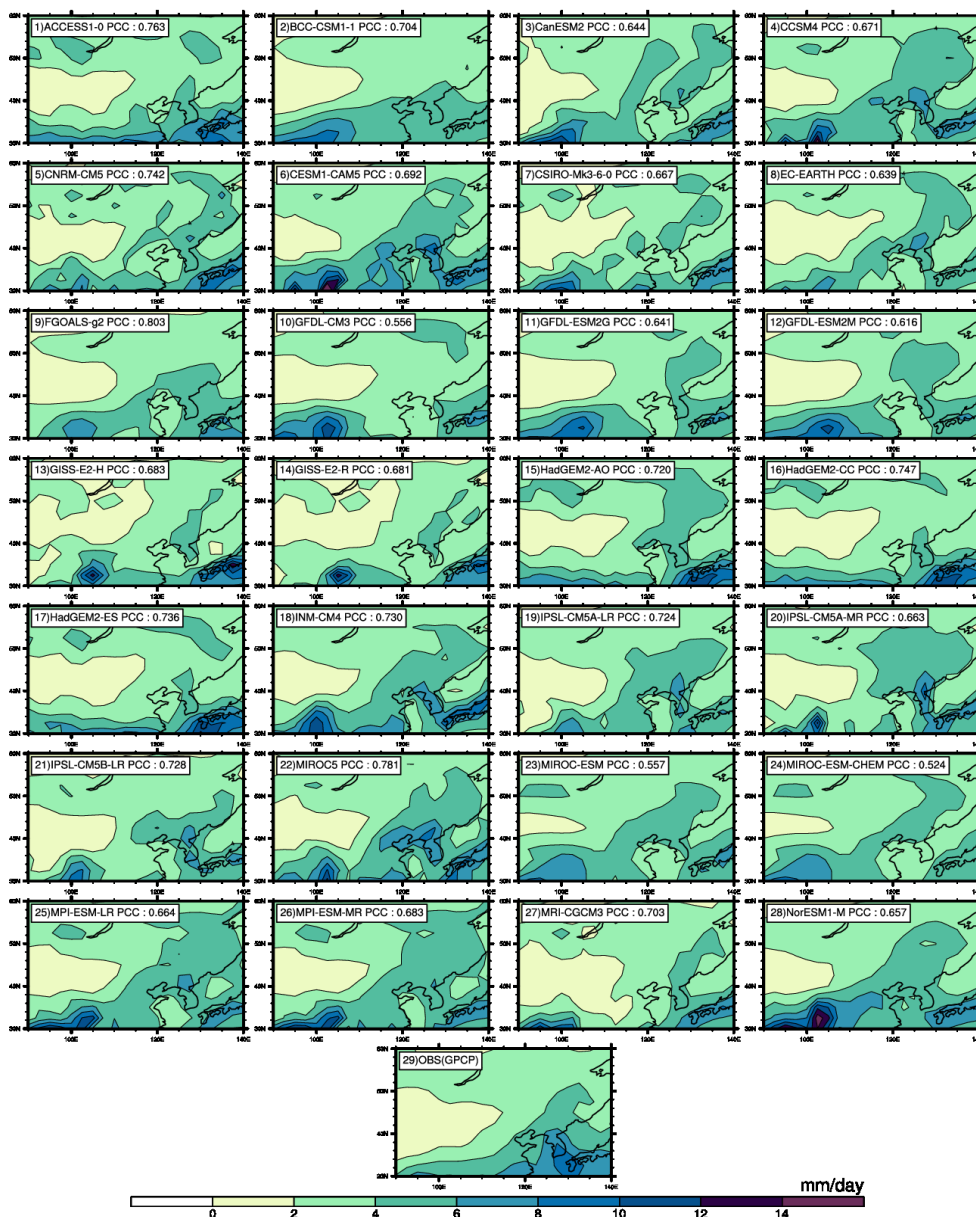
### 3.2.2 월별 변동

28개의 CMIP5 모형들의 계절 변동을 관측과 비교하기 위해, 각 월에 대해 27년 평균된 계절 변동의 기후치를 Fig. 6에 나타내었다. 28개의 모형들이 월평균 강수량의 계절 변동을 여름에 최고, 겨울에 최저로 비슷하게 모의하였지만, 모형마다 여름 강수량을 모의하는 데에 있어서 평균적으로 적게는 약 3mm/day에서 크게는 5mm/day로 큰 차이를 보인다. 특히 몇몇 모형에서는 관측의 최고 강수량이 7월에 나타나는 것과는 다르게 최고 강수량이 나타나는 시점이 다르게 모의되었다. 이렇게 모형마다 다르게 나타나는 연 사이클의 특징들은 CMIP5 모형 자료를 수문 모형이나 농업 모형에 이용하는 사용자들에게 필요한 정보가 될 수 있다. 이러한 모형들에는 강수량이 매우 중요한 인자로 작용하게 되는데, 강수량이 너무 과하거나 적게 모의되거나 강수의 최고 시점이 다르게 모의되면 모형 실험은 매우 다른 결과를 초래한다. 그러므로 Fig. 6과 같이 연 사이클을 잘 모의하는 모형과 잘 모의하지 못하는 모형들에 대한 정보를 제공할 필요가 있다.

28개의 모형을 평균한 28MME와 관측의 변동을 살펴보면 1~6월과 10~12월에는 관측보다 28MME가 강수를 더 많이 모의하였지만 7~9월에는 매우 유사하지만 관측치보다는 약간 적게 모의하였다. 특히, 봄부터 시작하여 강수 최고치가 나타나는 7월 직전까지는 대부분의 모형이 강수를 많이 모의하고, 우기에는 모형마다 모의하는 강수량의 범위가 넓으므로 28MME는 관측보다 약간 적지만 거의 비슷한 평균치를 나타낸다.

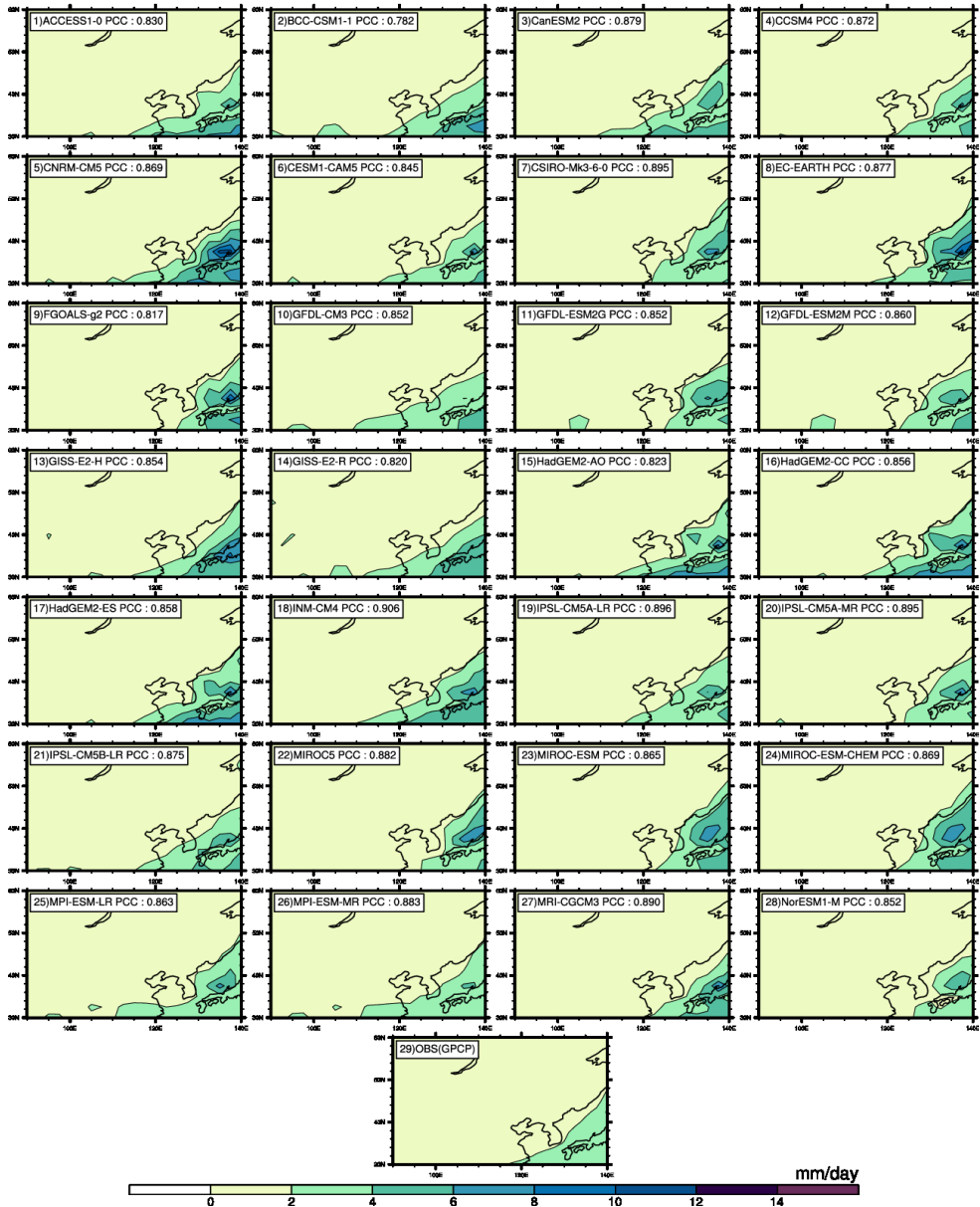


### JJA mean PRCP CMIP5 vs OBS

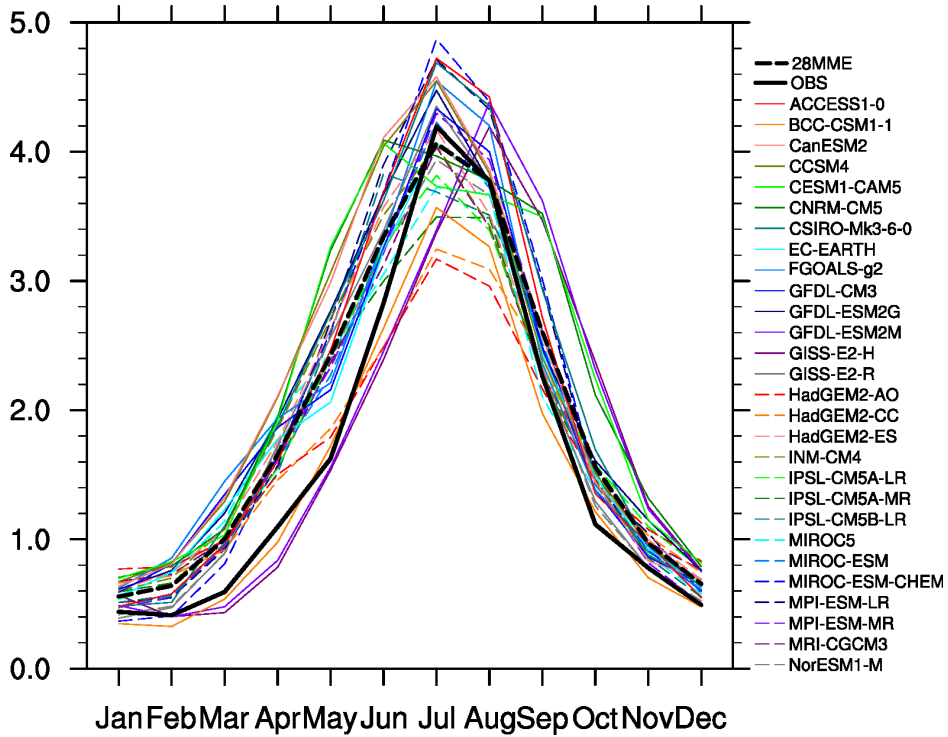


**Figure 4** Summer mean precipitation for [1]-[28] each CMIP5 model and [29] OBS over the East Asian monsoon region from 1979 to 2005 (27 years). The PCC between each model and OBS is shown in each panel.

### DJF mean PRCP CMIP5 vs OBS



**Figure 5** Winter mean precipitation for [1]-[28] each CMIP5 model and [29] OBS over the East Asian monsoon region from 1979 to 2005 (27 years). The PCC between each model and OBS is shown in each panel.



**Figure 6** Monthly variation of 28 CMIP5 models and OBS data over EA monsoon region. Black solid and dashed line indicate OBS and 28MME, respectively. Colorful lines indicate climatological monthly variation for each CMIP5 model.

### 3.2.3 몬순 영역 정의

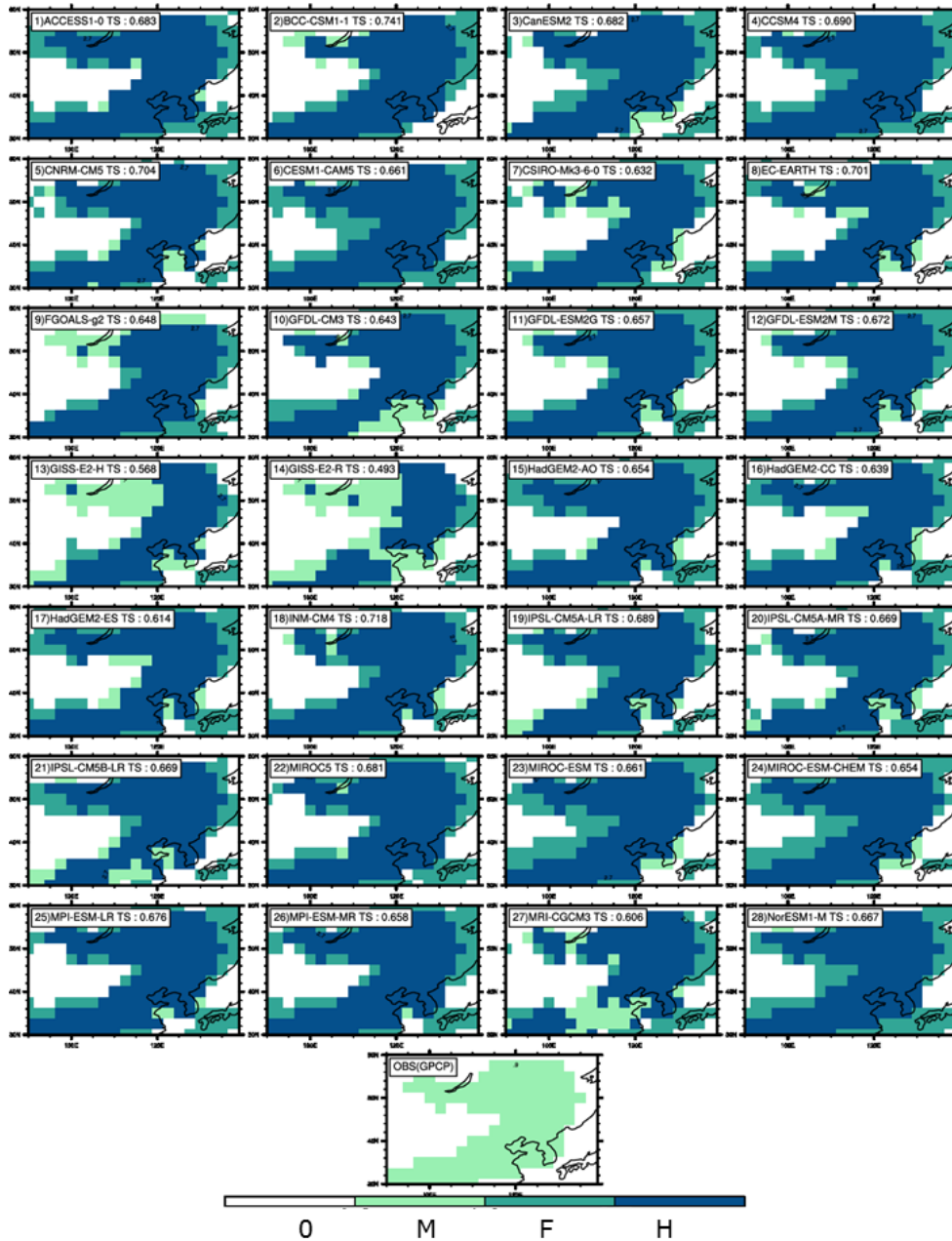
앞에서 연 변동, 계절 변동 그리고 월 변동을 살펴보았다면, 이번에는 각 모형별로 몬순 영역이 어떻게 선정되는지 조사하였다. 몬순 영역 선정 방법(Wang and Ding, 2006) 자체가 연간 강수량의 범위(여름과 겨울의 차이)를 포함하고 있으므로, 즉 몬순 특성을 잘 모의하는 모형이라 볼 수 있다.

Fig. 7는 각 모형별로 정의된 몬순 영역을 관측에서 정의된 몬순 영역과 비교한 것으로, 각 패널에 나타난 숫자는 TS를 나타낸다. 방법에서 설명되었듯 M은 관측에서만 정의된 격자점, F는 모형에서만 정의된 격자점, H는 관측과 모형 모두에서 정의된 격자점의 갯수를 각각 나타낸다. 이러한 H, M, F 값을 이용하여 TS는 3개의 수를 모두 합한 것과

H 수의 비로 계산되었으며, 0과 1사이의 값을 가지게 되고, 이 숫자는 관측에서 선정된 영역과 모형에서 선정된 영역이 얼마나 일치하는 지를 보여준다.

마지막 패널은 관측에서의 동아시아 몬순 영역을 나타내며 모형에서 정의한 지역과 비교하기 위해 가장 옅은 색으로 표시되었다. 중간 색은 관측에서는 정의되지 않았지만 모형에서만 정의된 F를 나타내었으며, 관측과 모형에서 모두 몬순 지역이라 정의한 H 지역은 가장 진한 색으로 나타내었다. 이렇게 얻어진 TS는 최저 0.50에서 최고 0.74 사이에 분포하고 있고, TS가 높을수록 관측에서 정의된 영역과 일치성이 크다는 것을 뜻한다. 몬순 영역 정의에 있어서는 모형마다 큰 차이를 보였다. 잘 모의한 모형은 BCC-CSM1.1으로 나타났다. TS가 낮은 모형들 중 특히 GISS-E2-H와 GISS-E2-R의 모형의 경우는 관측에서 정의된 영역과 겹치는 부분이 적어 TS 값이 약 0.5 정도를 보였다. TS가 0.5라면, 모형과 관측에서 서로 겹치지 않고 각각 정의된 격자의 합이 모형과 관측에서 모두 정의되어 겹치는 격자의 개수의 2배가 된다는 것을 뜻한다. 이는 다시 말하면, 관측과 비교했을 때, 정의되어야 할 격자는 정의되지 않았고, 정의되지 않아도 될 격자까지 정의가 되어 TS의 분모를 더욱 크게 만드므로 TS는 작아진다. 이 두 모형의 경우, 연 평균장이나 계절 평균장은 무난하게 잘 모의하였고, GISS-E2-R는 연평균 모의에서 높은 순위로 10위 안에 선정되기도 하였다. 하지만, 이렇게 여름 평균장을 잘 모의하는 모형들이라도 동아시아 몬순의 특성을 모의하는 능력이 현저히 떨어짐을 알 수 있다.

### GM domain OBS vs CMIP5

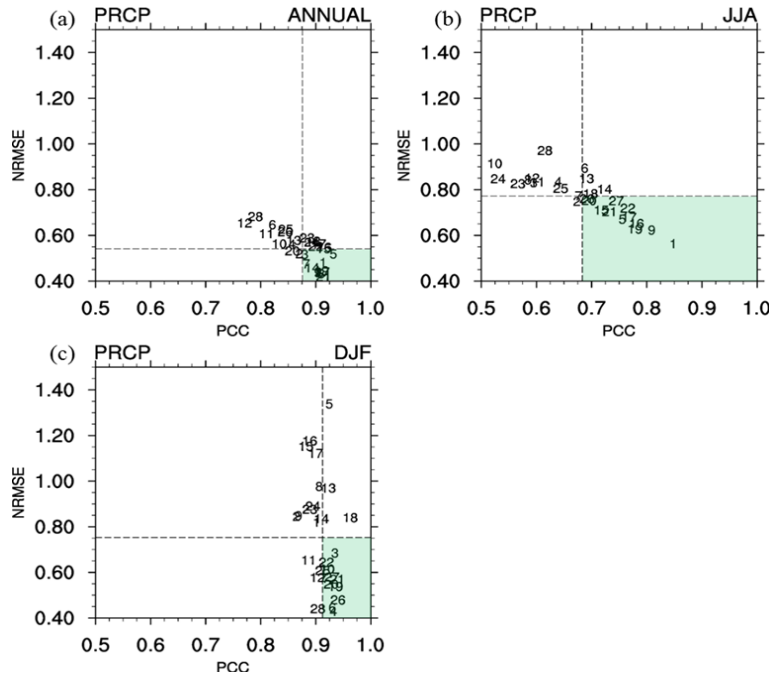


**Figure 7** Declined East Asian monsoon domain in the observation with those in 28 CMIP5 models. Numbers indicate threat scores.

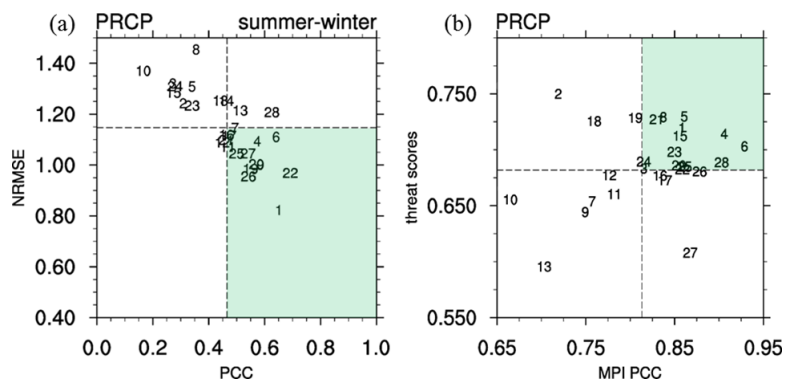
### 3.3 최적 모형 선정

관측 기간(1979~2005년) 동안 28개 모형들이 각각 강수의 평균장을 얼마나 잘 모의하는지 평가하기 위해서 PCC와 NRMSE가 이용되었다. 연평균과 여름(6, 7, 8월), 겨울(12, 1, 2월) 평균에 대해 각각 PCC와 NRMSE를 계산하였고, PCC 값이 클수록 모형이 공간 패턴을 관측 자료의 공간 패턴과 더욱 유사하게 모의한다고 볼 수 있으며, NRMSE 값이 작을수록 관측 값과의 차이가 작다고 볼 수 있다. Fig. 8은 가로축이 PCC, 세로축이 NRMSE인 산포도이다. PCC 값이 크고(x축의 오른쪽에 위치할수록) NRMSE 값이 작을수록(y축의 아래에 위치할수록), 더욱 성능이 좋은 모형이라 말할 수 있다. 이 산포도에서 점선은 PCC와 NRMSE의 평균을 각각 나타낸다. 연평균, 여름 평균, 겨울 평균에 대해서 PCC의 평균은 각각 0.88, 0.68, 0.91이고, NRMSE의 평균은 각각 0.54, 0.77, 0.75이다. 평균 PCC보다 크고 평균 NRMSE보다 작은 영역을 하늘색 지역으로 칠하여 나타내었다. 두 평균이 만나는 지점에서부터 하늘색 영역에 포함된 각각의 값에 대해 벡터 거리를 계산하였다. 이를 이용하여 연평균, 여름 평균, 겨울 평균에 대해 모형을 상위 10개씩 정렬한 후, 동아시아 강수 특성을 잘 설명하는 연 평균 강수량과 여름 평균 강수량에 대해 상위 10개 모형 중 겹치는 모형들을 찾아내었다. 동아시아 지역의 연평균과 여름 평균 강수량의 공간 패턴을 잘 설명하면서 관측에 대한 오차가 적은 모형(BM\_M)은 ACCESS1-0, CNRM-CM5, FGOALS-g2, IPSL-CM4A-LR, IPSL-CM5B-LR, MRI-CGCM3 등 총 6개의 모형으로 선정되었다.

동아시아 지역의 강수를 설명하는 데에 있어서, 평균장 뿐만 아니라 몬순 강수도 매우 중요하다. Fig. 9의 (a)는 Fig. 8과 같이 여름과 겨울에 차이에 대해 PCC와 NRMSE를 계산하여 여름과 겨울의 차이, 즉 몬순 강수를 잘 모의하는 모형들을 조사하였다. 그리고 (b)에서는 몬순 강수의 강도의 PCC와 threat score를 이용하여 몬순 강수 강도와 몬순 지역 정의를 잘 나타내는 모형들을 조사하였다. 몬순 강수 강도의 PCC 값이 크고(x축의 오른쪽에 위치할수록) TS가 클수록(y축의 위쪽에 위치할수록), 동아시아 지역의 몬순을 더욱 잘 모의하는 모형이라 말할 수 있다. 이 산포도에서도 마찬가지로 벡터 거리를 이용하여 여름과 겨울에 차이에 대한 PCC와 NRMSE에 의한 상위 10개 모형, 몬순 강수 강도 PCC와 TS를 이용한 상위 10개 모형 중 공통적으로 포함되는 모형들을 찾아내었다. 동아시아 지역의 몬순 강수량과 몬순지역의 패턴을 잘 설명하는 모형(BM\_S)은 ACCESS1-0, CCSM4, CESM-CAM5, MIROC5, MPI-ESM-LR 등 총 5개의 모형들이 선정되었다.



**Figure 8** Scatter diagrams showing normalized root mean square error (NRMSE) versus pattern correlation coefficient (PCC) from each CMIP5 model averaged for (a) the annual, (b) summer (JJA) and (c) winter (DJF) during the reference period of the observation data. Dashed lines indicate the averaged value of models' NRMSE or PCC. Area which is greater than mean PCC and less than mean NRMSE is shaded. Used domain over EA is 30°N-60°N, 90°E-140°E.



**Figure 9** Scatter diagrams showing (a) normalized root mean square error (NRMSE) versus pattern correlation coefficient (PCC) from each CMIP5 model averaged for summer minus winter (JJA minus DJF) and (b) threat scores versus monsoon precipitation intensity (MPI) during the reference period of the observation data. Dashed lines indicate the averaged value of models' NRMSE or PCC. Area which is greater than mean PCC and less than mean NRMSE is shaded. Used domain over EA is 30°N-60°N, 90°E-140°E.

### 3.4 주성분 분석

앞에서는 선정된 최적 모형을 이용하여, 관측, 28MME, BM\_M, BM\_S의 여름 강수 평균장을 비교하였다. 먼저 관측 자료에서는 한반도까지 강수 최대 구역이 존재하는 것으로 보이지만 28개 모형 평균을 하면서 모형 간 서로 다른 부호의 편차가 상쇄되어 한반도 지역의 강수를 약간 적게 모의하였다. 또한 평균장을 잘 모의하는 BM\_M보다 몬순 특성을 잘 모의하는 BM\_S에서 한반도까지 강수 중심이 조금 더 올라와, 관측과 유사한 공간 패턴을 보였다. 또한 관측과의 비교에서 공통적으로 나타나는 특징은 중국 동부 지역의 강수를 관측보다 강하게 모의한다는 것이다.

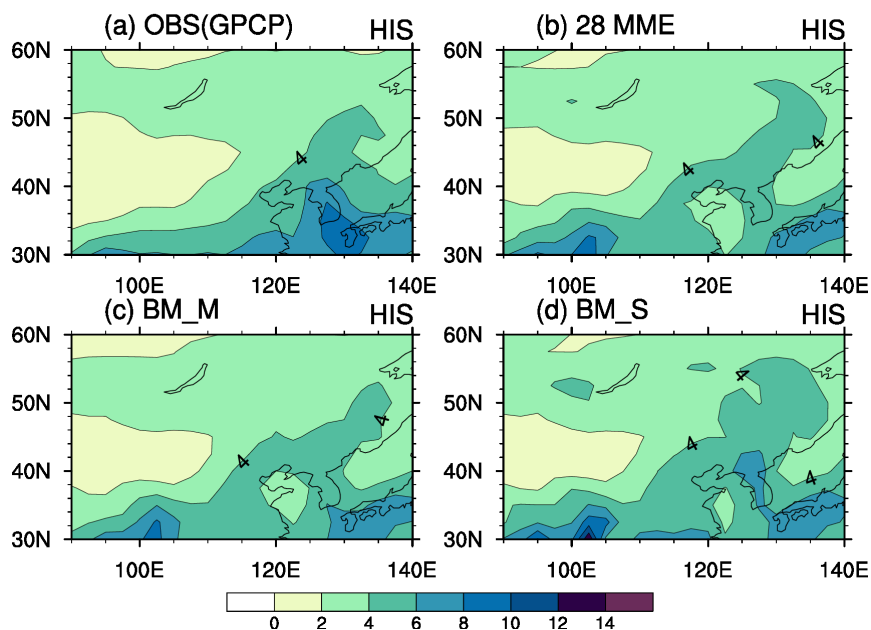
여름 강수장의 가장 주요한 특성을 살펴보기 위해, 관측, 28MME, BM\_M, BM\_S에 대해 각각 여름 평균 강수장의 주성분 분석을 실시하였다. Fig. 11에서와 같이 관측된 강수의 첫 번째 모드는 여름 평균 강수장의 29.1%의 변동을 설명하고 있으며, 큰 강수값이 한반도의 남쪽인 북서태평양의 가장자리에 위치하고 있다. 28MME, BM\_M, BM\_S도 마찬가지로 약 20%정도를 설명하고 있으며, 주요 공간장 패턴도 잘 모의하는 것으로 나타났다. 주성분 분석에서 첫 번째 모드로 나타나는 공간 분포는 이 분석에서 사용된 기간 동안 이 지역의 시·공간적으로 가장 주요한 특성을 나타낸다. EOF 분석시 사용된 여름 평균은 6월부터 8월까지의 강수량 평균으로, 이 기간동안 나타나는 강수특징에는 6월 초부터 7월 초순까지 나타나는 메이유-바이유 모드와 6월 중순부터 7월 중순까지 한반도에서 우세한 장마 모드, 8월에 강하게 나타나는 후기 장마 모드와 건조 기간으로 구분할 수 있다. 이러한 네 가지 모드가 결합되어 첫 번째 모드의 공간장이 Fig. 11와 같이 나타난다. 28MME, BM\_M, BM\_S 모두 관측과 패턴은 약간 다르지만 한반도의 북쪽에는 건조기 모드, 남쪽에는 메이유-바이유와 장마, 포스트 장마 모드가 결합된 패턴을 나타낸다. 이러한 여름 강수량의 주요 모드는 ENSO와도 관련이 깊지만, 본 연구에서는 SST 자료의 부재로 조사되지 않았다.

이러한 주요 모드의 미래 변화를 보기 위해, RCP8.5 시나리오 중 먼 미래(distant future, DFT) 기간인 2070년부터 2099년 기간 동안의 여름 평균 강수장의 추세를 제거 후 주성분 분석을 실시하였다. Fig. 12는 몬순 강수의 가장 주요한 공간 패턴을 28MME, BM\_M, BM\_S에 대해 각각 나타내고 있다. 그 결과, 28MME는 강수 밴드를 한반도보다

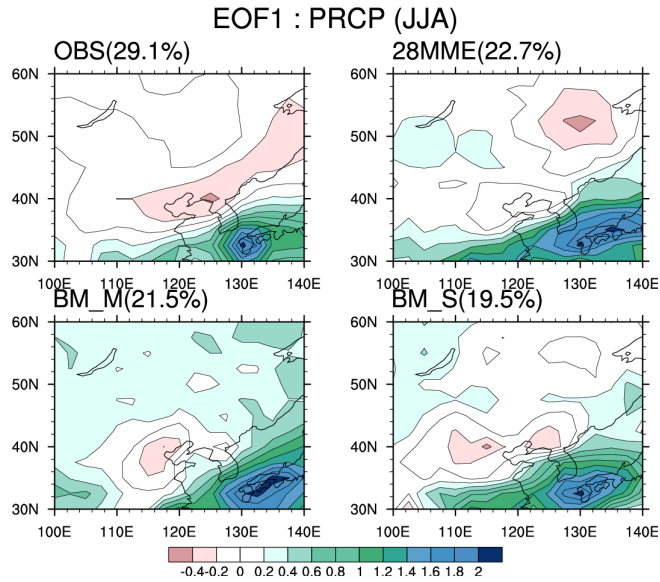


남쪽에 약하게 모의하고, BM\_M은 한반도에서 강한 강수값을 나타냄으로써 장마 모드와 비슷한 패턴을 나타낸다. 또한 BM\_S는 한반도의 북쪽에는 강한 건조기 모드, 남쪽에는 강한 강수모드를 나타냄으로써 3가지 모형 앙상블 그룹이 미래에 모의하는 주요 모드는 각기 다름을 알 수 있다.

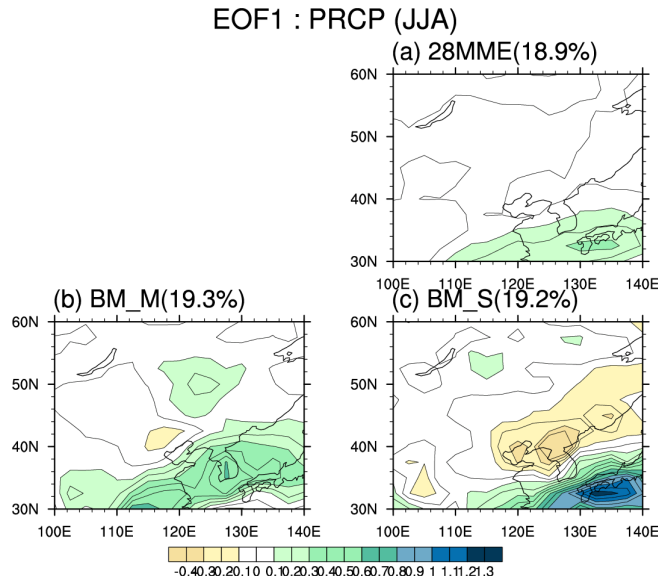
### JJA mean field (PRCP)



**Figure 10** Spatial patterns of summer mean precipitation over EASM region for (a) OBS, (b) 28MME, (c) BM\_M and (d) BM\_S of historical run. Unit is mm per day.



**Figure 11** Spatial patterns of first leading mode of summer mean precipitation over EASM region for (a) OBS, (b) 28MME, (c) BM\_M and (d) BM\_S of historical run. Unit is mm per day.



**Figure 12** Spatial patterns of first leading mode of detrended summer mean precipitation over EASM region during distant future (2070-2099) in RCP 8.5 scenario for (a) 28MME, (b) BM\_M and (c) BM\_S of historical run. Unit is mm per day.

## 4. 동아시아 몬순의 변화

### 4.1 몬순 강수량의 변화

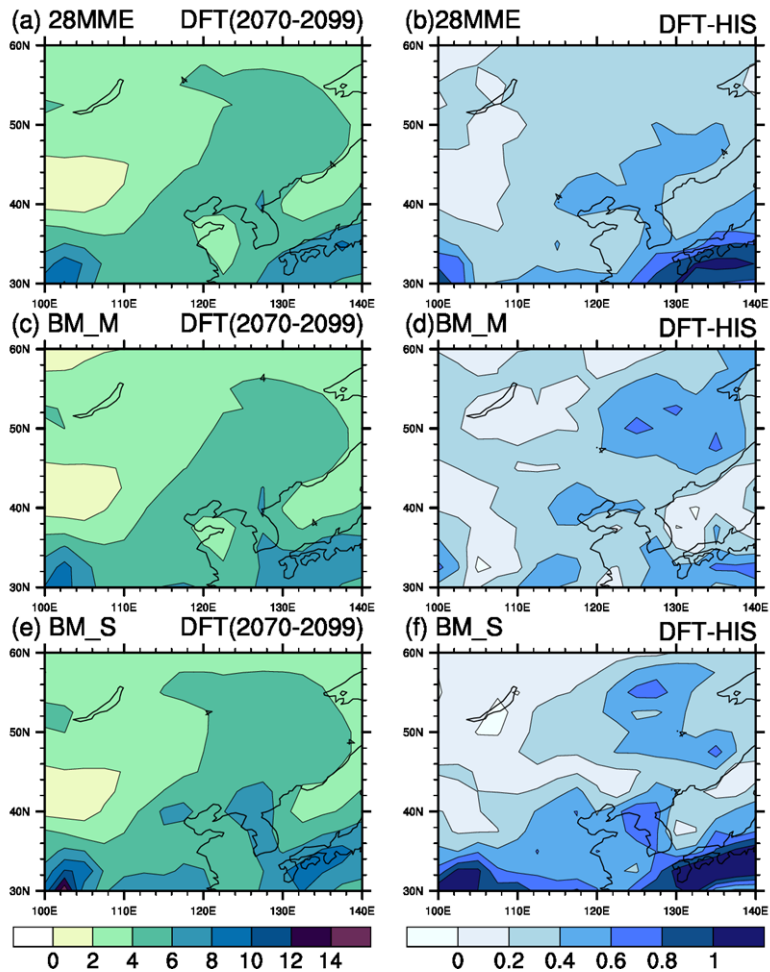
동아시아 여름 몬순의 미래 변화를 보기 위해서 RCP 4.5와 8.5 시나리오의 2006~2100년 기간 자료를 이용하여 과거 모의 자료와의 비교를 통해 동아시아 몬순 지역의 몬순 기후 변화를 살펴보았다. 850hPa의 동서바람, 남북바람 벡터와 지표기온이 사용되었다.

Fig.13는 먼미래(2070~2099년) 기간 동안의 여름 평균 강수량 모의를 28MME, BM\_M, BM\_S에 대해 각각 공간장으로 나타내었다. 여름철 평균 강수량은 과거 기후 모의와 마찬가지로 30°N 부근에서 더욱 강한 강수가 나타나고 BM\_S는 한반도에서의 강수를 더욱 크게 모의하였다. Fig.13 b, d, f는 먼미래 여름철과 과거 여름철의 차이를 나타낸 것으로, 세 가지 모형 앙상블에서 서로 다른 변화 패턴을 확인 할 수 있었다. 먼저 28MME는 HIS에 비해 한반도 및 동아시아 연안을 따라 강수가 증가하는 것으로 보인다. BM\_M은 한반도의 강수는 크게 증가하지 않고, 동아시아 대륙의 북쪽에서 큰 증가가 보인다. BM\_S에서는 한반도 및 중위도와 고위도에서 큰 강수 증가를 보이는 특징이 나타났다.

Fig. 14는 과거 기후값에 대한 동아시아 여름 몬순 강수량의 미래 변화를 기후치 대비 변화율을 나타낸 것이다. 28MME는 BM\_M과 BM\_S에 대해 약간 더 강하게 강수를 모의하고 있지만, 큰 차이를 보이지는 않는다. RCP4.5 시나리오에 대해서 대부분의 모형이 평균적으로 강수가 10% 정도 증가할 것으로 모의한다. 또한 최적 모형으로 선정된 두 그룹 BM\_M과 BM\_S의 경우도 약간의 강수 증가를 모의했지만, 28MME보다는 강수 증가를 적게 모의하였다.

하지만 그림에서와 같이 여전히 모형 간의 불확실성은 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 불확실성이 기후 변화의 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio, SNR)를 결정하는 데에 아주 중요한 역할을 한다. 28개 모형간의 불확실성은 잡음(noise)이며, 미래와 현재 강수량의 차이를 신호(signal)로 두게 된다. 즉, 미래 변화를 28개 모형의 표준편차로 나누면 SNR을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 SNR이 1보다 크거나, -1보다 작다면 신호가 잡음보

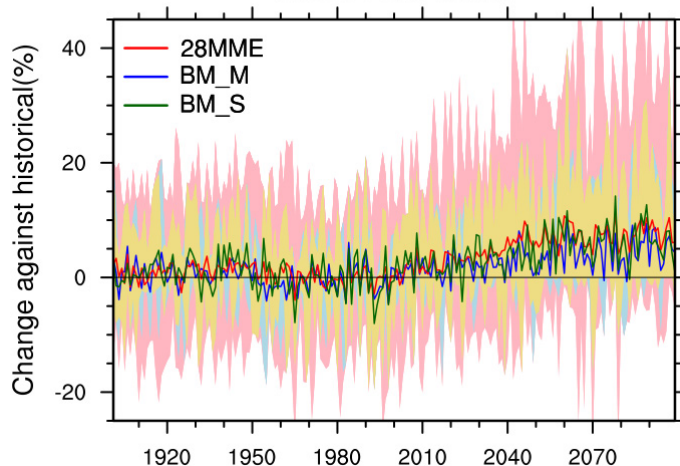
다 크고, SNR이 1과 -1 사이라면 신호가 잡음보다 작다는 것을 뜻한다. Fig. 15에서 점으로 표시된 격자가 SNR의 절대값이 1이상, 즉 신호가 잡음보다 큰 지역을 말한다. 이는 다시 말하면, 그 지역에서의 강수 증가는 28개의 모형들의 불확실성보다도 더욱 확실한 증가라고 말할 수 있다. 그림에서 한반도 지역은 근미래에는 크게 유의한 지역이 없었지만, RCP8.5 시나리오의 먼 미래에 한반도 및 동아시아 대륙의 북부에서 강수의 증가 신호가 뚜렷함을 알 수 있다.



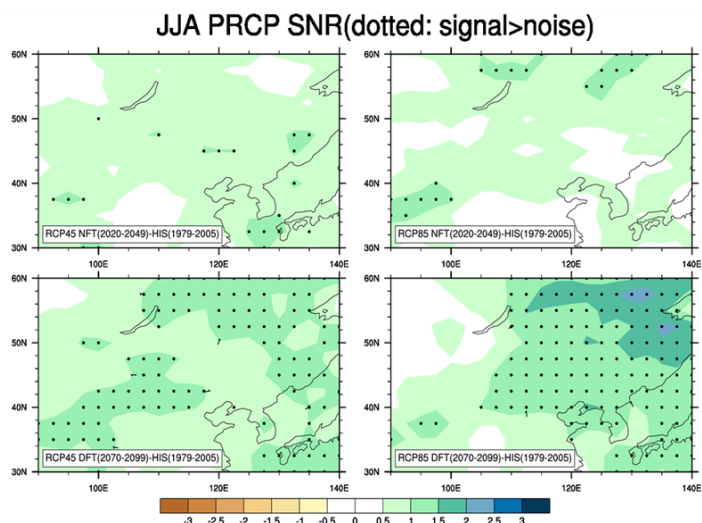
**Figure 13** JJA mean precipitation during distant future(DFT) (left panels) and difference with historical period(HIS) (right panels) for 28MME (top), BM\_M (middle) and BM\_S(bottom panels).



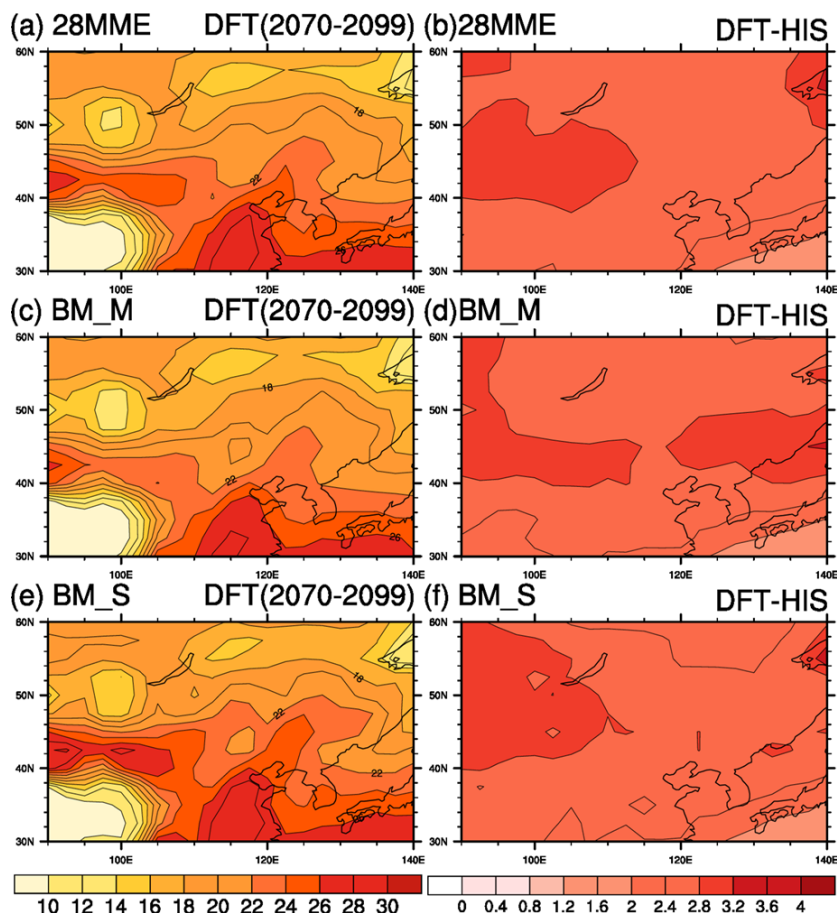
### RCP4.5 Scenario Future Change ea\_summer monsoon PRCP Anomalies from 1979-2005 average



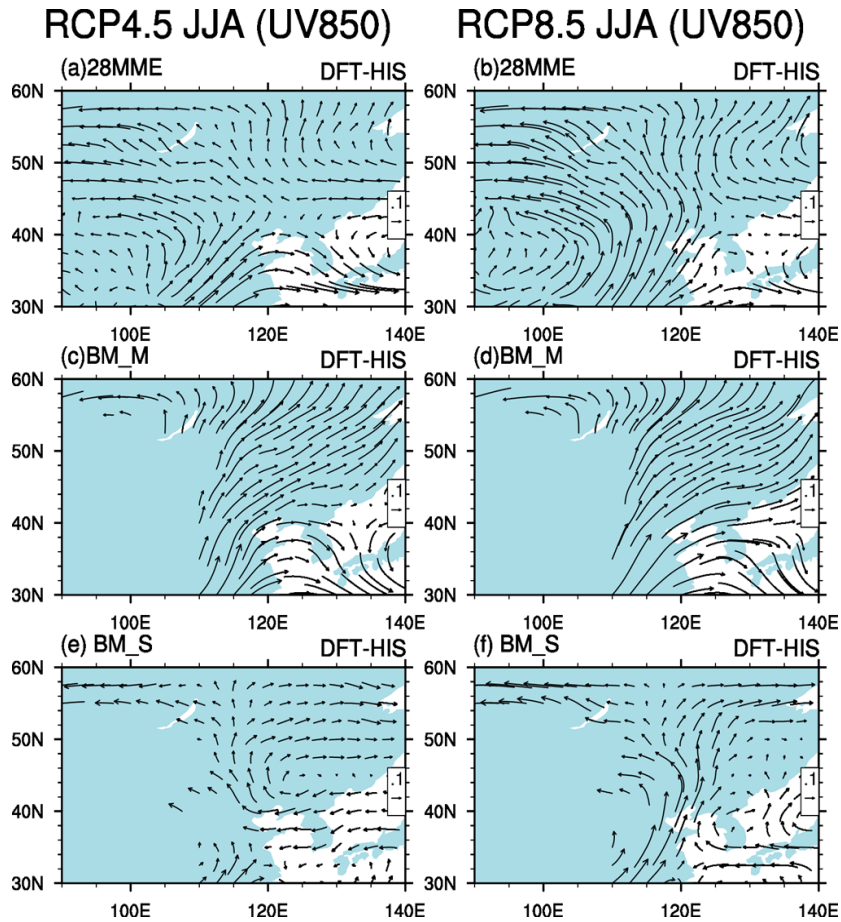
**Figure 14** Future changes of EA summer monsoon precipitation against historical average from 1979 to 2005. The red, blue and green solid lines are indicate 28MME, BM\_M and BM\_2, respectively. Shaded area is the variability of 28MME(pink), BM\_M(skyblue) and BM\_S(yellow).



**Figure 15** Signal-to-Noise ratio(SNR) of future change of summer mean precipitation over EA region. Shaded area indicate SNR and dotted area mean that the change signal is greater than noise.



**Figure 16** JJA mean temperature during DFT (left panels) and difference with HIS (right panels) for 28MME (top), BM\_M (middle) and BM\_S(bottom panels).



**Figure 17** JJA mean wind at 850 hPa during DFT (left panels) and difference with HIS (right panels) for 28MME (top), BM\_M (middle) and BM\_S (bottom) panels.

## 4.2 몬순 시스템의 변화

동아시아 여름 몬순 순환장과 기온의 미래 변화를 살펴보기 위해 먼 미래와 과거 기후와의 차이를 3가지 평균 그룹들에 대해 비교하였다. 먼저 Fig. 16의 기온 변화를 살펴보면, 28MME, BM\_M, BM\_S 평균 그룹 모두 비슷한 공간 패턴을 나타낸다. 또한 기온 변화도 비슷한 패턴으로 증가하지만, BM\_M의 경우 먼 미래에 동아시아의 4~50°N에서의

기온 증가가 다른 동아시아 지역에 비해 조금 더 큰 것으로 나타났다.

Fig. 17은 850hPa에서의 UV vector의 여름 평균장의 미래 변화를 나타낸 것이다. 각 평균 그룹마다 제각각의 순환 패턴을 나타내지만, 동아시아 대륙의 연안을 따라 남풍이 미래에 더욱 우세해 졌다는 공통점을 가진다. 이는 동아시아 연안을 따라 남풍이 우세해져 수분속 수렴의 증가하고 동아시아 여름 몬순 강수의 증가를 야기한다는 Seo et al.(2013)에서와 일관성 있는 결과이다. 또한 최적 모형 그룹별로 나누어 살펴보면, BM\_S보다는 BM\_M에서 남서풍이 아주 강하게 증가함을 알 수 있다. 이를 강수장의 미래 변화와 연관 지어보면, BM\_M은 Fig. 17 c, d와 같이 다른 모형 그룹 평균에 비해 남서풍이 매우 강하여 한반도에 수렴 되지 않고, 거쳐 한반도보다 북동부에 하층 바람이 수렴되므로 강수 증가 또한 한반도 및 중위도보다는 고위도 방향에서 더욱 두드러짐을 알 수 있다. 또한 비교적 강수가 적게 증가하므로 다른 모형들에 비해 4~50°N의 기온 증가를 더욱 크게 모의함을 알 수 있다. BM\_S는 28MME와 비교하였을 때 한반도의 서쪽을 가로지르는 남풍이 더욱 강하고, 위도 30°N 부근의 강한 동풍이 경도 120°E 부근에서 수렴되어 한반도의 남쪽과 서쪽에 강한 강수를 야기함을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 토론

동아시아 몬순 지역에 대해 평균장 및 경년 변동, 월별 변동, 몬순 정의 등을 이용하여 28개의 CMIP5 모형들을 PCC와 NRMSE, TS 등을 이용하여 평가하였다. 이러한 평가를 통해 동아시아 여름 평균장을 잘 모의하는 BM\_M은 ACCESS1-0, CNRM-CM5, FGOALS-g2, IPSL-CM4A-LR, IPSL-CM5B-LR, MRI-CGCM3 등 총 6개의 모형으로 선정되었고, 동아시아 몬순의 계절 변동을 잘 설명하는 모형 BM\_S ACCESS1-0, CCSM4, C-CM5, MIROC5, MPI-ESM-LR 등 총 5개의 모형들이 선정되었다.

최적 모형과의 비교를 실시하기 전, 평균장에 대한 분석이 먼저 이루어졌다. 연평균 강수량 공간 패턴은 관측과 매우 유사하게 나타났으며, 28개 모형 평균인 28MME의 연평균 강수량 경년변동은 평균되어 편차는 상쇄되었지만 관측치보다 약간 높은 값을 나타내었다. 반면 여름 평균 강수량은 관측치와 비슷하게 잘 모의하였으며, 28개 모형 중 2개의



모형이 관측의 경년 변동성과 95% 유의수준에서 유의한 상관관계를 보였다. 여름과 겨울 평균 강수량은 공간적으로 잘 모의하였지만, 월별 변동의 기후치를 살펴보면 우기에는 28MME와 관측이 비슷하거나 관측이 약간 높지만, 우기를 제외하고는 모형에서 관측보다 과하게 월별 강수량을 모의하는 것으로 나타났다. 몬순 정의에 따른 동아시아 몬순 영역 또한 관측과 모형의 비교가 이루어졌다. 몇 개의 모형을 제외하고는 관측과 모형 간 정의된 몬순 지역의 일치성을 나타내는 TS 값이 0.6 이상으로 높게 나타났다.

이러한 특성들을 분석하고 평가를 통해 동아시아 여름 평균장을 잘 모의하는 BM\_M은 ACCESS1-0, CNRM-CM5, FGOALS-g2, IPSL-CM4A-LR, IPSL-CM5B-LR, MRI-CGCM3 등 총 6개의 모형으로 선정되었고, 동아시아 몬순의 계절 변동을 잘 설명하는 모형 BM\_S는 ACCESS1-0, CCSM4, CESM1-CAM5, MIROC5, MPI-ESM-LR 등 총 5개의 모형들이 선정되었다. 선정된 모형 그룹의 평균 BM\_M, BM\_S는 28MME와 비교 분석하였다.

28MME에서 서로 다른 부호의 편차가 상쇄되어 나타나지 않았던 강한 강수 값들이 최적 모형 평균시에 나타났고, 특히 여름 평균 강수의 공간장에서는 28MME 보다 한반도의 강수를 BM\_M과 BM\_S 평균 공간장에서 더욱 강하게 나타내었다. 최적모형이 28MME 보다 한반도의 강수를 관측과 더욱 가깝게 모의한다는 것을 알 수 있다. 주성분 분석을 통해 과거 기후 모의 기간에는 28MME, BM\_M, BM\_S 모두 관측과 유사한 공간장을 나타내었지만, 먼 미래(2070~2099년)에는 28MME는 강수 중심을 약하게 한반도 남쪽에서 나타내고, BM\_M은 한반도에서 강한 강수 값을 나타내었다. BM\_S는 북쪽에는 건조기 모드, 남쪽에는 강한 강수 값을 나타내 세 모형 그룹 모두 서로 다른 미래 특징을 모의함을 알 수 있다.

RPC8.5 시나리오 하에서 여름 강수의 미래 변화는 BM\_S에서 가장 크게 나타났다. 28MME나 BM\_M에서보다 BM\_S에서 한반도의 강수 증가를 더욱 강하게 모의하였다. 위도 30-35°N의 강수 증가 또한 크게 모의하였다. 또한 850hPa에서의 바람장은 먼 미래에 남서풍으로 우세해짐을 보였는데, 이는 BM\_M에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이는 Seo et al.(2013)와도 같은 결과로, 미래의 동아시아 몬순 강수 증가는 남서풍의 우세와 관련이 있음을 알 수 있다. 특히 BM\_M에서는 남풍이 한반도 부근에서 수렴하지 않고 더욱 고위도에서 수렴하여 한반도의 강수 증가를 비교적 적게 모의하였고, BM\_S는 한반도 서쪽을 가로

지르는 남풍과 위도 30°N 부근의 동풍이 경도 120°E 부근에서 수렴되어 한반도의 남쪽 및 서쪽에 더욱 강한 강수 증가를 모의하였다. 본 연구는 동아시아 몬순 지역에 대해 한정되었고, 다른 기후 영향 및 순환지수들과의 관계는 전혀 고려되지 않았다. 추후에 두 가지 최적 모형 그룹을 비교하는데 있어서 더욱 다양한 메커니즘 연구가 필요할 것으로 보인다.

또한 동아시아 몬순 강수는 엘니뇨 남방 진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)과 큰 관계를 가지므로, CMIP5 모형들의 해수면 온도 자료를 확보하여, 선정된 최적 모형들이 ENSO와는 관계를 어떻게 모의하는지, 미래에는 ENSO와의 관계가 어떻게 변하는지 살펴볼 필요가 있다. 더불어 기후 모형 자료를 이용하는 수문, 농업 분야의 사용자들에게는 최적 모형 선정보다도 동아시아 몬순의 특징을 가장 모의하지 못하는 모형을 선정하여 정보를 제공하는 것 또한 매우 유용할 것으로 생각된다.

**REFERENCES**

- Hsu, P., T. Li, B. Wang, 2011: Trends in global monsoon area and precipitation over the past 30 years. *Geophys Res Lett* **38**, L8701
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woolen, J. Potter, and M. Fiorino 2002: NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (R-2), *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **83**, 1631-1643.
- Kripalani, R. H., J. H. Oh, and H. S. Chaudhari, 2007: Response of the East Asian summer monsoon to doubled atmospheric CO<sub>2</sub>: Coupled climate model simulations and projections under IPCC AR4. *Theor. Appl. Climatol.*, **87**, 1-28.
- Kusunoki, S., and O. Arakawa, 2012: Change in the precipitation intensity of the East Asian summer monsoon projected by CMIP3 models. *Climate Dynamics*, **38**, 2055-2072.
- Lee, J. Y., B. Wang, 2012: Future change of global monsoon in the CMIP5. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-012-1564-0
- Lu, R., Y. Li, and B. Dong, 2007: East Asian precipitation increase under the global warming. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 267-272.
- Min, S. K., S. Legutke, A. Hense, U. Cubasch, W. T. Kwon, J. H. Oh, and U. Schlese, 2006: East Asian climate change in the 21st century as simulated by the coupled climate model ECHO-G under IPCC SRES scenarios. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 1-26.
- Seo, K. H., and J. Ok, 2013: Assessing future changes in the East Asian summer monsoon using MCIP3 models: Results from the best model ensemble. *J. Climate*, **26**, 1807-1817.
- Seo, K. H., J. Ok, J. H. Son, and D. H. Cha, 2013: Assessing future changes in the East Asian summer monsoon using CMIP5 coupled models, *J. Climate*, **26**, 7662-7675.
- Taylor, K. E., 2001: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, **106**, 7183-7192.
- Wang B, Ding Q 2006: Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. *Geophys Res Lett* **33**, L06711
- Wang, B., H.J. Kim, K. Kikuchi, 2011: Diagnostic metrics for evaluation of annual and diurnal cycles. *Climate Dynamics*, **37**, 941-955.
- Wilks, D.S., 1995: Statistical method in Atmospheric Sciences, International geophysics Series, vol 59. Academic Press, London.
- Xie, P., and P. A. Arkin, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2539-2558.



## APCC RESEARCH REPORT 2013-06

- Hydrometeorological Variability over the Korean Peninsula from ENSO Pattern Change and Tropical Cyclone Activities and Assessment of Integrated Flood Risk
- Variability and Mechanisms of Summer Heat Wave in Korea
- Future Changes and Selection of Best CMIP5 Models for the East Asian Summer Monsoon

### **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



ISBN 978-89-97333-98-1  
ISBN 978-89-97333-92-9 (세트)