

다양한 기후요소와 지표에 대한 CMIP5 GCMs 모델 성능 평가 -미국 남동부 지역을 대상으로-

Assessing the Performance of CMIP5 GCMs for Various Climatic Elements and Indicators over the Southeast US

황 세 운*

Hwang, Syewoon

Abstract

The goal of this study is to demonstrate the diversity of model performance for various climatic elements and indicators. We evaluated the skills of the most advanced 17 General Circulation Models (GCMs) i.e., CMIP5 (Climate Model Inter-comparison project, phase 5) climate models in reproducing retrospective climatology from 1950 to 2000 over the Southeast US for the key climatic elements important in the hydrological and agricultural perspectives (i.e., precipitation, maximum and minimum temperature, and wind speed). The biases of raw CMIP5 GCMs were estimated for 16 different climatic indicators that imply mean climatology, temporal variability, extreme frequency, etc. using a grid-based observational dataset as reference. Based on the error (RMSE) and correlation (R) of GCM outputs, the error-based GCM ranks were assigned on average over the indicators. Overall, the GCMs showed much better accuracy in representing mean climatology of temperature comparing to other elements whereas few GCM showed acceptable skills for precipitation. It was also found that the model skills and ranks would be substantially different by the climatic elements, error statistics applied for evaluation, and indicators as well. This study presents significance of GCM uncertainty and the needs of considering rational strategies for climate model evaluation and selection.

keywords : CMIP5 GCMs, indicators for model evaluation, uncertainty

요 지

본 연구에서는 전지구 기후모델의 성능을 평가함에 있어 기후 요소와 평가 지표에 따른 분석 결과의 다양성에 대해 살펴보고자 하였다. 미국 남동부 지역을 대상으로 17개의 CMIP5 GCM의 강우량, 일 최대·최저기온, 풍속에 대한 과거기간(1950~2000)의 모의 결과를 같은 기간의 관측치와 비교한 오차와 상관도를 이용하여 정량적으로 평가하였다. 기후 모델 산출물을 효과적으로 분석하기 위해 격자 단위 관측 자료를 평가기준으로 사용하였으며 다양한 형태의 기상 특성에 대한 모의 성능을 다각적으로 진단하기 위해 기후 정보(평균적 기후 통계량, 시간 변동성, 극한 사상 빈도 등)를 16개 지표로 정의하여 평가에 적용하였다. 또한 산정된 오차와 상관도를 기반으로 대상지역에 대한 기후요소별 GCM 성능 순위를 도출하여 비교하였다. 연구 결과, 기온에 대한 기후 특성에 대한 모델 재현성은 전반적으로 뛰어난 반면 강우량 및 풍속에 대한 모델 성능은 일 변동성을 제외한 대부분 지표들에 대해 비교적 낮은 것으로 나타났다. 더불어 모델의 정확도 순위는 기후 요소, 평가 지표, 그리고 오차 산정 방법에 따라 다양하게 나타남을 확인하였다. 특히 IPSL-CM5A-LR 모델은 대상지역에 대한 적용성이 현저히 낮은 것으로 나타났다. 본 연구는 다양한 기후변화 영향 연구에 적합한 모델 선정과 기후 모델의 불확실성을 고려한 합리적 미래 예측을 위해서는 다각적이고 면밀한 모델 평가가 선행되어야 함을 시사한다.

핵심용어 : CMIP5 GCM, 모델 평가 지표, 불확실성

* 경상대학교 농업생명과학대학 지역환경기반공학과 조교수, 경상대학교 농업생명과학연구원 (e-mail: swhwang@gnu.ac.kr, Tel: 82-55-772-1934)
Assistant Prof., Dept. of Agricultural eng., (Institute of Agriculture and Life Science), Gyeongsang Nat. Univ., Jinju 660-701, Korea

1. 서 론

기후변화 메커니즘의 이해 증진과 함께 관련 기상재해의 심각성에 대한 관심이 고조되면서 미래 기상 변화에 따른 다양한 분야의 사회경제적 영향평가연구가 국내에서 활발히 이루어지고 있다. 미래 기후변화에 대한 관심은 기온과 해수면 온도 상승의 평균적인 변화 추세가 관측되면서 그 원인이 인류의 산업 활동에 의한 온실가스 배출 증가에 있음이 제기되어 기후모델링을 통한 시나리오 분석을 바탕으로 고조되기 시작하였다(IPCC, 1990). 금세기 들어서는 강우량, 일사량 등 다양한 기후요소에 대한 주기변동성 및 극한 기후사상(extreme event) 빈도 변화와 같은 기후 특성 변화와 이에 따른 영향평가 연구가 활발히 이루어지고 있는 추세이다.

일반적인 기후변화 연구는 관측 자료를 바탕으로 한 통계적 추이 분석과 더불어 미래기간에 대한 전지구 기후 모델(GCM, General Circulation Model/Global Climate Model) 산출물을 활용하여 미래 기상정보를 생산하는 과정을 시작으로 수행된다. 관측 자료 분석만을 통한 기상 특성 변화에 대한 추세 예측은 관측 기록을 양·질적으로 갱신하는 기상 이변 현상 등을 재현하는데 한계가 있다. 이에 기후의 비정상성(non-stationarity)과 기상현상의 물리적 개연성을 동시에 고려한 역학적 기후모델의 적용은 미래 기상정보 획득을 위한 합리적 방법으로 주목받고 있다(Milly et al., 2008; Hwang et al., 2011).

각종 기후모델 산출물의 활용성이 높아지고 기후변화 영향평가를 위한 다양한 방법론(예: 편이보정 및 시공간 상세화)이 제안·적용되면서 연구결과의 다양성과 불확실성에 대한 관심이 커지고 있다. 국내 연구로서 기존 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 기반 CMIP3 (The Coupled Model Intercomparison Project, Phase 3) GCM에 대해서는 Yun et al. (2011)이 3개의 GCM 자료와 기상청에서 공간 상세화한 1개 모델을 적용하여 국내 주요 지점에 대한 논 필요수량의 미래 변화를 예측한 바 있으며, Kim et al. (2013)과 Park et al. (2014)은 4개의 GCM 산출물을 동일하게 활용하여 각각 한반도의 미래 물수급 상황과 특정 댐에 대한 미래 유입량을 전망함으로써 기후모델을 불확실성을 고려한 바 있다. 더불어 Shon et al. (2010)과 Sohn et al. (2014)은 모델 평가를 통해 소수의 최적 GCM을 선정하여 특정유역의 한천유출 및 국내 가뭄 양상 변화를 전망한 바 있으며 Bae et al. (2011)은 3개 시나리오와 13개 GCM 결과를 적용하여 미래 기후정보의 불확실성을 고려한 한반도 미래 수문 환경 변화를 종합적

으로 전망하고자 하였다. 이 밖에도 기존 기후모델에 대한 평가와 불확실성을 고려한 연구가 다양하게 수행된 한편, 최신 RCP (Representative Concentration Pathways) 시나리오 기반 CMIP5 (CMIP, Phase 5) GCM에 대해서는 기상청에서 제공하고 있는 고해상도 국가표준 시나리오의 적용이 활발해지면서 미래 기후정보의 불확실성에 대한 연구는 소홀한 경향을 보인다. Tempa and Chung (2014)이 12개의 모델을 선정하여 모델 산출물의 다양성에 따른 국내 수자원 영향평가 결과의 불확실성에 대해 고찰한 바 있으나 최신 기후모델 즉, CMIP5 GCMs의 다양성 및 모델 성능에 대한 심도있는 고찰이 필요한 실정이다.

기후모델로부터 예측된 미래 정보를 바탕으로 수행되는 기후변화 연구는 연구 과정과 그 결과의 불확실성에 대한 고찰이 함께 이루어지는 것이 바람직하다. 다양한 GCM에 대한 산출물을 수집하고 평가한 후 결과를 활용하는 것은 도출된 미래정보와 연구결과의 불확실성을 고려하는 기본적인 방법이다. 그러므로 기후모델의 원시 산출물에 대한 사전평가는 기후변화 영향 연구 결과의 실효성을 제고하기 위한 필수 과정이라 할 것이다(Palutikof et al., 1997; Hwang et al., 2011). 또한 기후요소, 대상지역, 평가방법, 평가지표에 대한 모델의 성능은 달리 평가될 수 있으므로 기후변화 연구를 위한 합리적인 모델 선정 및 적용을 위해서는 다각적이고 종합적인 평가가 시도되어야한다(Gleckler et al., 2008; Hwang et al., 2014).

이에 본 연구는 미국 남동부 지역을 대상으로 4가지 기후요소(강우량, 일 최대기온, 일 최저기온, 풍속)에 대한 17개 CMIP5 GCM의 일 단위 산출물을 다양한 평가지표를 이용하여 비교·평가하였다. 기후요소별로 다양한 지표(indicator)를 정의하고 이에 대해 격자 단위 관측 자료를 이용하여 모델 성능을 정량적으로 평가하고자 하였다. 더불어 평가 결과를 바탕으로 모델의 관측치 재현성에 대한 우수 순위를 정하고 평가지표 및 방법에 따른 연구 결과의 다양성에 대해 고찰하였다. 본 연구의 궁극적 목적은 기후 모델 산출물의 한계와 구조적인 차이에 의한 다양성을 보이고 모델 불확실성 고려에 대한 인식을 고무하는 것은 물론, 기후모델 결과로부터 미래 정보를 추출하여 활용함에 있어 선행되어야 할 모델 평가를 위한 기초 방법론을 제시하고자 함이다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상지역

본 연구에서는 플로리다 주를 포함하는 미국 남동부 지역에 대한 GCM 산출물을 추출하여 평가하였다(Fig. 1).

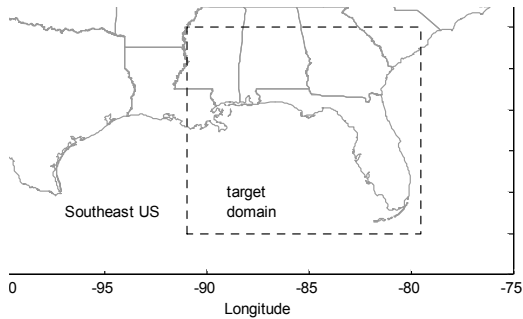


Fig. 1. Target Domain Chosen for GCM Evaluation over the Southeast US

대상지역은 온대에서 아열대 기후 특성을 가지는 지역이 주를 이루며 플로리다 남단은 열대기후대에 속하는 지역으로 광범위한 기후대를 포함한다. 평균적으로 뚜렷한 우기와 건기를 가지는 몬순기후 특성을 보이며 고온다습한 우기(6~9월)에는 월평균강우량이 160 mm 이상으로 연강우량의 약 50%가 집중되고 대류성 폭우(convective storm) 사상이 잦게 발생하는 특징이 있다. 우기와 건기의 일평균 기온은 각각 약 27°, 16° (1950~2000년 평균)로 평균적으로 연중 온난한 지역이 대부분을 차지한다. 특히 플로리다 지역은 지표 고도차가 작아 완만한 지형적 특성을 가지며 한반도와 같이 3면이 해양에 둘러싸인 지리적 특성을 가지고 있으며 뚜렷한 지형적 고도차가 있는 내륙지역에 비해 고해상도 기후 모의가 난해한 지역이다(Hwang et al. 2011).

미국 동남부 지역에서는 이상 기후 현상(극한 사상 빈도 증가, 건기 기온 및 강우량 증가)과 해수면 상승이 관측되면서 기후변화에 대한 지역적 특성과 영향 그리고 적응 방안을 체계적으로 모색하기 위한 활동이 활발하다. 학제간 연계는 물론 학계와 의사결정기관, 이해관계기관, 관련실무기관 등과의 소통을 통해 미래 기후 정보의 생산을 비롯하여 활용방안 모색에 있어 기후변화 연구의 실효성을 높이는 데 많은 노력을 기울이고 있는 지역이다(예: SECC (Southeast Climate Consortium): <http://www.seclimate.org/>, FWCA (Florida water-climate alliance): <http://floridawca.org/>).

2.2 관측 및 GCM 자료

PCMDI (Program For Climate Model Diagnosis and Intercomparison)는 IPCC 연구활동의 바탕이 되는 GCM 모델 진단과 비교·평가를 위한 모델 산출물(테라 규모 대용량 데이터)을 저장하고 배포하는 역할을 하는 기관이다. 총 28개 기상·기후 연구기관의 다양한 기후모델(60여 종)결과들이 소개되어 있으나, 일 단위 산출물의 유용성

및 서버의 안정성 등의 문제로 자료 확보가 여의치 않은 기관모델들도 포함하고 있다. 본 연구에서는 GCM 성능 평가를 위해 PCMDI 서버로부터 50년 기왕기간(1950~2000)에 대한 GCM 모의결과(historical simulation) 중 연구기간에 대해 완결된 일 단위 자료 확보가 가능한 17개 모델에 대해 일 단위 강우량과 풍속 산출물을 비롯하여 일 최대기온, 일 최저기온 자료를 수집하였다. Table 1은 본 연구에서 평가한 모델을 나열한 표이며 산출물의 격자 간격 및 적용한 모델별 기후요소를 정리하고 있다. 격자 간격은 위·경도에 대해 모델에 따라 약간의 차이가 있으나 대체로 약 1.1°~3.7°(대상지역에 대해 약 100~350 km에 해당) 범위로 다양하다.

기후 모델 산출물은 특정 격자 단위의 지역 평균값에 해당한다. 이에 기후 모델 결과의 합리적 보정을 위해서는 동일한 해상도의 지역 평균 관측 자료가 필요하다. 특히 우기에 발생하는 대류성 강우 사상(convective storm)의 경우 그 강도 및 지속 시간 등의 특성이 근거리에서라도 상이할 수 있으므로 점 관측 자료를 일반적인 기후 모델 결과 자료와 직접 비교·분석하는 방법은 적절치 않다(Hwang, 2012). 이에 본 연구에서는 다양한 기상 변수에 대한 기후 모델 결과를 바탕으로 지상 관측 자료의 자료 동화 기법(data assimilation)을 통해 미국 전 지역을 대상으로 생산된 격자 단위 관측 자료(Maurer et al., 2002)를 수집하여 사용하였다. 이 자료의 기후모델 결과 보정에 대한 적용성에 대해서는 Hwang (2012)과 Hwang et al. (2013)의 연구에서 검증된 바 있다. 본 연구에서는 과거 50년 기간(1950~1999)에 대한 일 강우량, 일 최대·최저 기온, 일평균 풍속 자료가 사용되었으며 관측 자료의 격자 크기는 0.125°×0.125°(약 12×12 km)이다. 임의적인 변형 없이 GCM의 원 산출물을 평가하기 위해 관측 격자자료를 단순 평균하여 각 GCM 격자 단위(Table 1)로 규모확장(scaling-up)한 후 분석에 적용하였다.

2.3 평가 지표 및 방법

대상 GCM에 대해 다양한 형태의 기상 특성에 대한 모의 성능을 평가하기 위해 기후 특성에 대한 정보를 다양한 지표로 정의하여 관측 자료와 GCM으로부터 산출된 정보를 비교하였다(Table 2). 총 16개의 지표는 크게 시계열 자료, 극한 사상 지표, 평균적 기후 통계량, 시간 변동성에 대한 지표들로 구분되며 시계열과 시간 변동성 지표의 경우 시간 월(monthly) 또는 계절(seasonal) 등의 시간 단위에 따라 세분하여 적용하였다.

관측 자료 대비 모델 산출물의 오차 및 재현성을 평가하기

Table 1. Description of CMIP5 Models Used in This Study

No.	GCMs	Grid resol. (°)		Institution	Data availability			
		Lat.	Lon.		P	Tmax	Tmin	Wind
1	ACCESS1-0	1.5	1.875	CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia), and BOM (Bureau of Meteorology, Australia)	O	O	O	O
2	BCC-CSM	2.7906	2.8125	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	O	O	O	X
3	BNU-ESM	2.7906	2.8125	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University	O	O	O	O
4	CMCC-CESM	2.7906	2.8125	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	O	O	O	O
5	CSIRO-mk3	3.7111	3.75	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence	O	O	O	O
6	CanESM2	1.8653	1.875	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	O	O	O	O
7	FGOAL-g2	2.7906	2.8125	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; and CESS, Tsinghua University	O	O	O	X
8	GFDL-CM3-1	2	2.5	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	O	O	O	O
9	GFDL-ESM2G	2.0225	2.5	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	O	O	O	O
10	GFDL-ESM2M	2.0225	2.5	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	O	O	O	O
11	HadGEM2-CC	1.25	1.875	Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)	O	O	O	O
12	INM-CM4	1.5	2	Institute for Numerical Mathematics	O	O	O	O
13	IPSL-CM5A	1.8947	3.75	Institute Pierre-Simon Laplace	O	O	O	O
14	MIROC-ESM	2.7906	2.8125	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies	O	O	O	O
15	MPI-ESM-LR	1.8653	1.875	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)	O	O	O	O
16	MRI-CGCM3	1.1215	1.125	Meteorological Research Institute	O	O	O	X
17	NorESM1-M	1.8947	2.5	Norwegian Climate Centre	O	O	O	X

More information is available at <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/availability.html>

Table 2. Definition of indicators used for GCM evaluation

No.	Indicator	Acronym	Definition
1	Time series	d10TS	Time series of 10 days mean
2		monthlyTS	Time series of monthly mean
3		4seasonalTS	Time series of seasonal mean (3 months average)
4		annualTS	Time series of annual mean
5		annualCVTS	Time series of annual ratio of standard deviation of daily data to the daily mean for each year
6		annualQ95TS	Time series of 95th percentile of daily data for each year
7		annualQ99TS	Time series of 99th percentile of daily data for each year
8	Strength of extreme high event	MonthlyQ95	95th percentile of daily data for each calendar month over the study period
9		MonthlyQ99	99th percentile of daily data for each calendar month over the study period
10	Mean climatology	D10mean	Annual cycle of averaged 10 days mean over the study period
11		monthlymean	Annual cycle of monthly mean over the study period
12	Temporal variance	monthlyCV_d	Monthly ratio of standard deviation of daily data to the daily mean
13		monthlyCV_m	Monthly ratio of standard deviation of monthly data to the monthly mean
14		d10std	Temporal standard deviation of daily data on 10 day basis
15		monthlystd_d	Temporal standard deviation of daily data on monthly basis
16		monthlystd_m	Temporal standard deviation of monthly data for each calendar month (Inter-annual variability of monthly mean)

위해 본 연구에서는 RMSE (root mean square error, Eq. (1)), R (correlation coefficient, Eq. (2))을 사용하였다. RMSE는 각 평가지표에 대한 산술적 오차량을 표현하는 한편 R은 패턴의 재현성을 평가하기 위한 지수로 활용된다. 모델 성능의 상대적 비교를 위해 오차를 지표별 평균 관측치로 나눈 무차원 지수인 NRMSE (normalized RMSE, Eq. (3))를 사용하였으며 이는 각 모델에 대한 평균적 오차를 고려하여 모델 순위를 결정할 경우, 지표별 관측치의 상대적인 차이를 합리적으로 적용하기 위함이다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{sim,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \overline{X_{obs}}) \cdot (X_{sim,i} - \overline{X_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - \overline{X_{obs}})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - \overline{X_{sim}})^2}} \quad (2)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{X_{obs}}} \quad (3)$$

여기서, X_{obs} 과 X_{sim} 은 지표별 관측치와 GCM 산출물을 의미하며 n 은 해당 자료의 개수, 그리고 $\overline{X_{obs}}$ 과 $\overline{X_{sim}}$ 는 각 자료의 평균을 나타낸다.

더불어 본 연구에서는 평가지표에 대한 기후 모델의 성능의 차이와 특정 모델에 대한 평가지표에 따른 성능 차이를 도식적으로 비교·평가하기 위해 Taylor diagram (Taylor, 2001)을 사용하였다. Taylor diagram은 R과 표준화된 RMSD (centered root mean square distance, Eq. (4)), 그리고 표준편차(standard deviation)의 세 변수간의 상관성을 이용하여 상관성과 오차 그리고 자료 변동성을 2차원 그래프로 나타낼 수 있도록 고안된 방법으로 기후 모델의 성능을 평가하거나 상호 성능 비교를 위해 널리 활용되고 있는 기법이다.

$$centered\ RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_{obs,i} - \overline{X_{obs}}) - (X_{sim,i} - \overline{X_{sim}})]^2}{n}} \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 기상요소에 대한 기본적 기후 특성

대상지역의 강수량, 일 최대기온, 일 최저기온, 그리고 풍속에 대한 일반적 기후 특성을 분석하였다. 또한 각 특성에 대한 GCM의 재현성을 평가하기 위해 일 단위 자료의 월평균과 월별 표준편차, 그리고 월별 상위 95%에 해

당하는 자료(Q95)를 산출하여 비교하였다(Fig. 2). 표준편차는 각 기상 인자에 대한 일별 변동성 또는 자료의 산포 정도를 대변하는 변수로서 극한 사상의 규모를 간접적으로 정량화하는 방법이며 Q95는 극한 사상의 강도 및 빈도에 대한 직접적 지표로 해석할 수 있다.

평균 강수량은 5월까지의 건기와 6월부터 시작되는 우기의 경계가 명확한 형태를 보이며 대부분 모델에서 비교적 큰 오차로 과소 모의되는 것으로 나타났다. 특히 우기에 대한 모델 재현성이 건기에 비해 확연히 저조한 것을 확인할 수 있다. IPSL-CM5A과 INM-CM4 모델 등은 대상지역에 대해 강우의 계절 변동성의 계절적 패턴(즉, seasonal cycle)조차 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 표준 편차의 경우 건기와 우기 간의 평균적 차이는 크게 나타나지 않았으며 다른 기후요소에 비해 큰 오차를 보였다. Q95 결과는 모든 모델에 대한 산출물이 극한 강우 사상을 과소 모의하고 있는 것을 보여준다.

기온은 대체로 7월과 8월에 최고치를 가지는 부드러운 곡선 형태를 보이며, 일 최대기온은 1월 평균 19.1°C에서 7월 평균 32.9°C, 일 최저기온은 같은 시기에 평균 6.9°C에서 22.2°C의 범위를 보였다. 대부분 모델이 월별 일 최대기온은 과소, 최저기온은 과대 모의하는 경향을 보였으나, 5°C 내외의 오차로 연중 기온변화 패턴을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 그 중 CMCC-CESM 모델이 일 최대기온에 대해 평균 0.8°C의 최소 오차를 보였으며 FGOAL-g2 모델이 일 최저기온에 대해 1.2°C의 오차로 우수한 성능을 보였다. 반면 IPSL-CM5A 모델은 강우 패턴에 대한 저조한 재현성과 함께 월평균 일 최대·최저 기온과 월별 Q95 기온에 대해서도 큰 오차(>10°C)로 과소 모의하는 경향을 보였다.

풍속의 경우 우기에 평균 풍속 및 일 변동성 등이 건기에 비해 작은 경향을 보였으며, 전체 모델이 그 패턴을 잘 모사하였으나, 모델 별 정확도는 평균 2.3m/s에서 0.1m/s의 큰 오차 범의를 보여 성능차가 다소 있는 것으로 확인되었다. 또한 Q95결과에서 확인할 수 있듯이 대부분 모델이 극한 사상에 대해 과소 모의하는 경향을 보여 폭우 함께 강풍을 동반하는 사상에 대한 빈도변화 분석을 위해 GCM 산출물을 활용할 경우 유의해야 될 점으로 판단된다.

3.2 다양한 평가 지표에 대한 GCM 별 오차 산출

일 단위 GCM 원 산출물과 관측 자료로부터 선정된 평가지표를 산출하여 RMSE와 상관계수 R을 계산하였다. Fig. 3은 각 기상요소에 대해 모델과 평가지표 별로 산정된 RMSE를 비교한 결과이다. 대체로 다른 시간 단위의 시계열 지표(예: d10TS, monthlyTS, seasonal, annualTS)

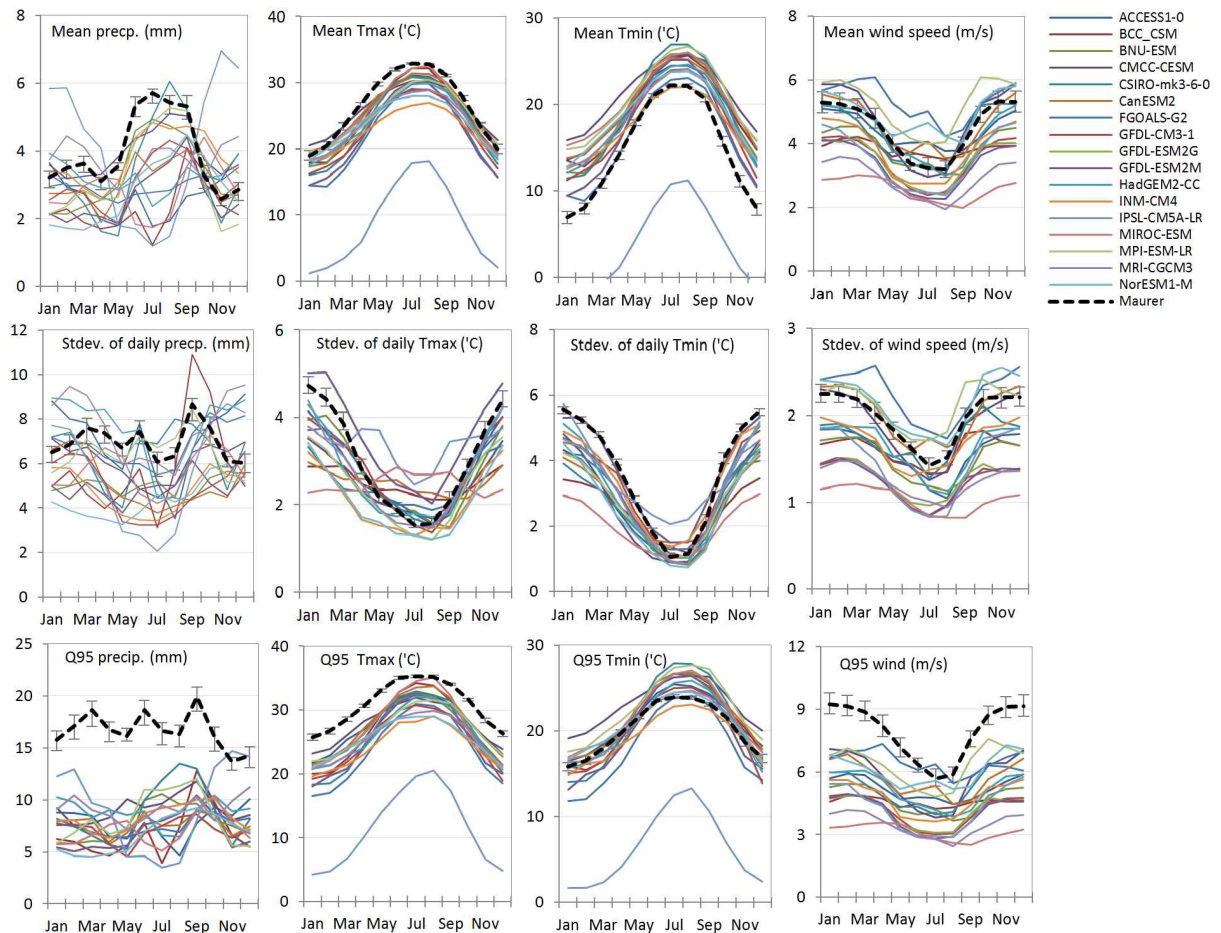


Fig. 2. Comparison of Monthly Mean (top row), Monthly Standard Deviation (middle row), and Monthly 95th Percentile of 17 Daily GCM Data for Precipitation (first column), Maximum Temperature (second column), Minimum Temperature (third column), and Wind Speed (last column)

및 평균 기후정보(예: d10mean, monthlymean)는 시간 단위가 길수록 오차가 적게 나타나는 경향을 보였으며, 모델별 RMSE 오차 범위는 일 최대 최저 기온의 경우 약 3°C로 나타났다.

특정 시간 단위에 대한 기상요소 변동성 지표(예: d10std, monthlystd_d, monthlystd_m)에서는 월평균 일 단위 변동성(daily variability on a monthly basis)이 월 변동성(inter-annual variability)과 10일 단위 변동성 지표에 대한 RMSE 보다 크게 나타났다. 이는 각 기상요소에 대해 유사한 경향을 보였으나 강우량의 경우 그 차이가 특히 큰 것으로 나타났다.

극한 사상 지표에 대한 평가결과, 일 강우량과 일 최대 기온의 경우 일 단위 극한 사상의 재현빈도가 낮을수록(예: monthlyQ99, annual Q99TS) 모델 오차가 크게 나타나는 경향을 보였으며 특히 일 변동성이 큰 요소인 강우량의 경우 monthlyQ95에 대한 전 모델 평균 RMSE는 10 mm인 반면 monthlyQ99의 RMSE는 23 mm로 그 차이가

현저히 큰 것으로 확인되었다.

Fig. 4는 각 모델의 평가지표에 대한 상관계수를 산정하여 비교한 결과이다. 대체로 Fig. 3의 RMSE 비교에서도 출한 결과와 유사한 경향을 보였으나 시계열 지표의 경우 비교적 짧은 시간 단위(예: d10)에 대한 모델 산출물의 관측치 대비 상관성이 낮은 모델은 월 단위 또는 연 단위 자료에 대해서도 상관도의 향상이 나타나지 않았다. 이는 GCM 산출물의 시계열 자료 활용 시, 계절성과 같은 기본적으로 뚜렷한 패턴을 재현하지 못하는 모델의 경우에는 시간 단위에 무관하게 그 적용성에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 함을 시사한다.

일 최대·최저기온에 대한 시계열 자료 및 평균 기후정보는 대체로 관측치와 높은 상관성($R > 0.75$)을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 계절적 패턴에 대한 속성이 배제된 연 평균 기온 시계열 자료(annualTS)에 대해서는 일 최대 기온의 경우 상관계수가 $-0.27 \sim 0.51$, 일 최저기온의 경우

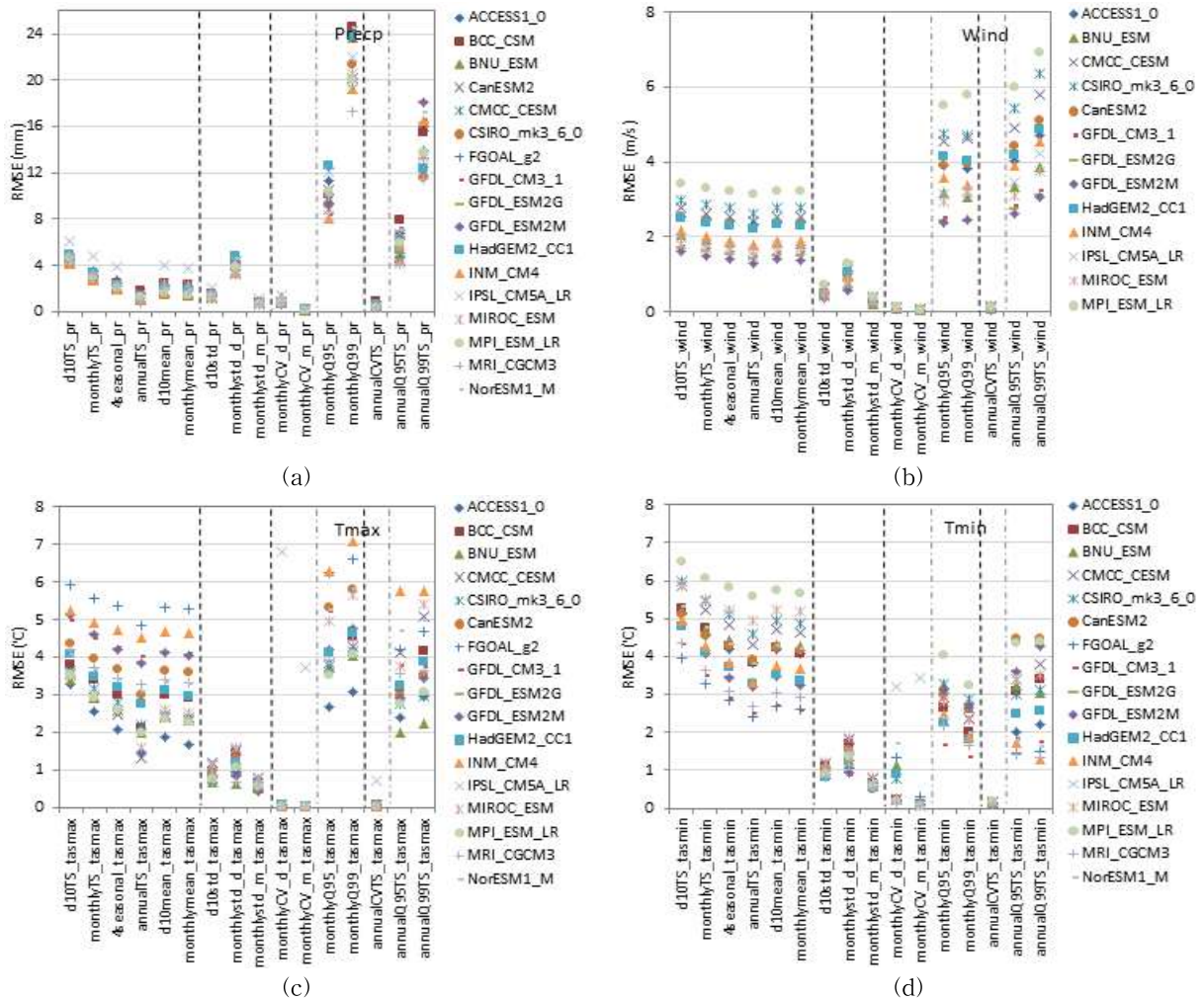


Fig. 3. Comparison of RMSE of GCM Outputs (i.e., (a) precipitation, (b) wind speed, (c) maximum temperature, and (d) minimum temperature) for 16 Indicators (x-axis)

-0.35~0.53으로 분포해 그 상관도가 비교적 낮고 모델 간의 결과 차이가 큰 것으로 나타났다. 풍속에 대해서도 기온과 유사한 결과를 보였으나 비교적 낮은 상관성을 보여, 기온에 비해 모델 산출물의 정확도와 활용성이 떨어지는 것으로 평가된다.

특정 시간 단위에 대한 변동성에 대한 상관성은 RMSE 분석과 다르게 월별 평균 일 변동성(monthlystd_d)이 월 평균의 연간 변동성(monthlystd_m)과 10일 자료의 변동성(d10std)에 비해 관측치와 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 이는 일 변동성에 대한 모델 산출물 오차는 비교적 크지만 계절성과 같은 패턴은 타 지표에 비해 대체로 잘 모사하고 있는 것을 보여준다.

극한사상의 경우(예: monthlyQ95, monthlyQ99), 강우사상의 재현빈도에 따른 오차 정도가 큰 차이를 보이는 반면(Fig. 3) 월별 패턴에 대한 상관도는 큰 차이를 보이지 않

았으며 모델 간 상관도 범위는 -0.2~0.6로 나타났다.

3.3 GCM 산출물 비교·평가

산정된 RMSE와 R을 바탕으로 모델 성능을 평가지표 별로 정량화하고 그 순위를 도출하였다. Fig. 5는 고려된 평가지표에 대한 RMSE를 지표별 평균 관측값으로 나눈 NRMSE와 R을 기준으로 결정한 모델별 평균 순위를 도시한 것이다. 강우량의 경우 NorESM1-M, BNU-ESM, GFDL-CM3-1 모델이 RMSE 기준 평균 순위가 가장 높고 R을 기준으로 평가한 결과는 CSIRO-mk3, CanESM2, MPI-ESM-LR이 높은 순위를 보이는 것으로 나타났다. 기온의 경우는 ACCESS1-0, GFDL-CM3-1, MRI-CGCM3 모델이 높은 순위를 보였으며 GFDL-CM3-1, MRI-CGCM3의 경우는 R 평가에서도 상위 순위에 있는 모델로 나타났다. 풍속의 경우 ACCESS1-0, CMCC-CESM, HadGEM2-CC

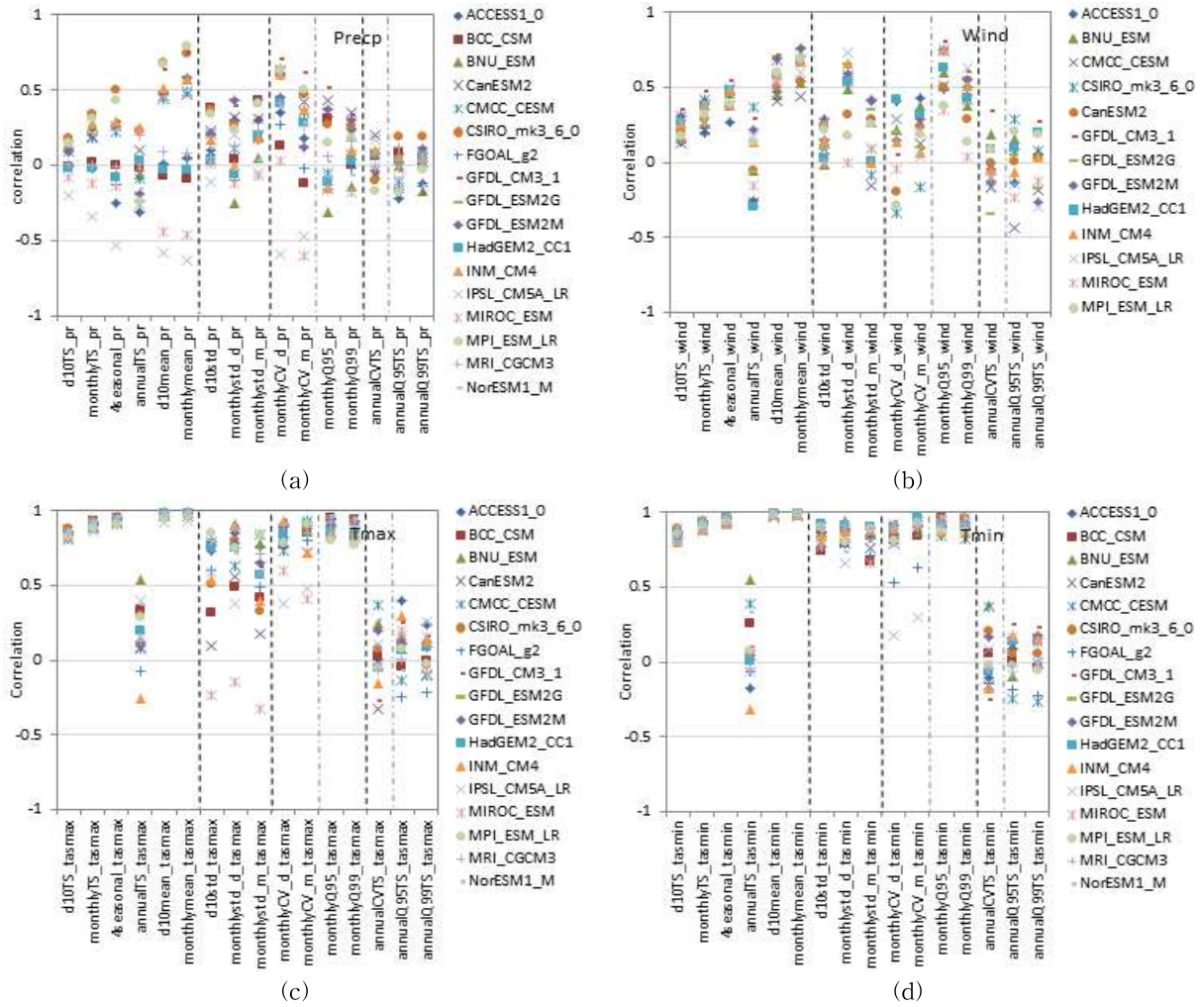


Fig. 4. Comparison of R (correlation) of GCM Outputs (i.e., (a) precipitation, (b) wind speed, (c) maximum temperature, and (d) minimum temperature) for 16 Indicators

모델이 높은 순위에 있는 모델로 판정되었으며 NRMSE와 R에 대한 분석결과가 동일하게 나타났다. 강우량의 경우 평가지표 및 평가기준에 따른 모델 성능에 대한 평가 결과가 상이하게 나타났고, 기온과 풍속의 경우는 평가기준에 따른 결과는 일관성을 보였으나 평가지표에 대한 모델성능 평가 결과는 다양하게 나타날 수 있음을 확인하였다.

Table 3은 모델별로 산정된 평균 NRMSE와 R, 그리고 평가지표에 따른 NRMSE와 R의 모델별 표준편차를 정리한 것이다. Fig. 5에서 도출된 모델 순위와 Table 3에서 최저 NRMSE 또는 최대 R 평균치를 가지는 모델이 상이한 결과를 보이는데 이는 모델의 평균 순위가 각 평가지표 별로 판정한 후 각 순위를 평균한 결과이기 때문이다. 그 예로 특정 평가지표에 대한 오차가 큰 경우 평균 오차 (RMSE)는 크게 나타날 수 있으나 다른 대부분의 평가지

표에 대해 높은 순위에 있다면 모델의 평균 순위는 높을 수 있다. 종합적으로 모든 평가지표와 기상요소에 대해 높은 정확도를 모인 모델은 ACCESS1-0, MRI-CGCM3이며 IPSL-CM5A는 대상 지역에 대해 가장 저조한 정확도를 보이는 것으로 평가되었다.

더불어 Fig. 6의 Taylor diagram은 일 최대-최저 기온에 대해 작은 오차로 높은 순위를 보인 MRI-CGCM3에 대해 16개 평가 지표에 대한 오차의 범위 그리고 가장 일반적인 기후 특성 중 하나인 월평균 기온에 대한 17개 GCM에 대한 오차의 범위를 도식적으로 비교하고 있다. 이는 평가지표에 대한 기후 모델의 성능의 차이와 특정 모델에 대한 평가지표에 따른 성능 차이를 효과적으로 평가하고자 함이다. 비교 결과, MRI-CGCM3 산출물의 경우 자료의 지표별 표준편차는 관측치와 유사하나 RMSD는 다른 지표에 대해 비교적 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Table 3. Mean and Standard Deviation (parentheses) of NRMSE and R over Indicators for each GCM. The 3 Top-ranked and 3 Bottom-ranked Models were Chosen for each Climatic Element Based on Averaged Error Statistics and Presented Bold and Italic in the Table, Respectively

GCM		NRMSE				R coeff.			
		Precip.	Tmin	Tmax	Wind	Precip.	Tmin	Tmax	Wind
1	ACCESS1-0	<i>1.82</i> (±0.63)	0.60 (±0.25)	0.72 (±0.68)	0.81 (±0.40)	0.17 (±0.15)	0.74 (±0.31)	0.82 (±0.19)	0.68 (±0.21)
2	BCC-CSM	1.60 (±0.37)	0.93 (±0.45)	<i>1.18</i> (±1.13)	1.00 (±0.37)	0.06 (±0.16)	<i>0.64</i> (±0.31)	0.73 (±0.23)	0.42 (±0.17)
3	BNU-ESM	1.30 (±0.31)	0.73 (±0.34)	0.80 (±0.68)	0.97 (±0.36)	0.17 (±0.19)	0.76 (±0.27)	0.81 (±0.19)	0.49 (±0.23)
4	CMCC-CESM	1.31 (±0.29)	0.72 (±0.26)	0.83 (±0.60)	0.86 (±0.36)	0.11 (±0.23)	0.76 (±0.25)	0.80 (±0.16)	0.63 (±0.29)
5	CSIRO-mk3	1.45 (±0.45)	<i>1.08</i> (±1.55)	1.17 (±1.08)	1.01 (±0.30)	0.29 (±0.19)	0.73 (±0.33)	0.75 (±0.21)	0.51 (±0.13)
6	CanESM2	1.49 (±0.41)	0.85 (±0.30)	<i>1.17</i> (±1.12)	1.09 (±0.39)	0.19 (±0.17)	<i>0.62</i> (±0.31)	<i>0.66</i> (±0.24)	0.48 (±0.17)
7	FGOAL-g2	1.56 (±0.57)	0.73 (±0.32)	1.08 (±0.96)	<i>1.15</i> (±0.33)	<i>0.06</i> (±0.18)	0.76 (±0.30)	0.78 (±0.21)	<i>0.27</i> (±0.36)
8	GFDL-CM3-1	1.31 (±0.28)	<i>0.96</i> (±1.50)	0.67 (±0.57)	0.99 (±0.25)	0.15 (±0.23)	0.77 (±0.30)	0.83 (±0.20)	0.42 (±0.12)
9	GFDL-ESM2G	1.45 (±0.38)	0.69 (±0.36)	0.96 (±0.75)	1.04 (±0.26)	0.09 (±0.19)	0.75 (±0.34)	0.79 (±0.25)	0.38 (±0.12)
10	GFDL-ESM2M	1.45 (±0.38)	0.69 (±0.36)	0.96 (±0.75)	1.05 (±0.31)	0.09 (±0.19)	0.75 (±0.34)	0.79 (±0.25)	0.38 (±0.15)
11	HadGEM2-CC	<i>1.70</i> (±0.71)	0.68 (±0.32)	0.82 (±0.74)	0.86 (±0.32)	0.21 (±0.13)	0.74 (±0.32)	0.80 (±0.22)	0.66 (±0.19)
12	INM-CM4	1.35 (±0.36)	0.86 (±0.28)	1.14 (±1.22)	1.04 (±0.33)	0.13 (±0.22)	0.67 (±0.27)	0.68 (±0.28)	0.49 (±0.14)
13	IPSL-CM5A	<i>1.95</i> (±0.40)	<i>1.30</i> (±1.35)	<i>2.45</i> (±2.83)	<i>1.17</i> (±0.40)	<i>0.02</i> (±0.17)	<i>0.58</i> (±0.36)	<i>0.51</i> (±0.37)	<i>0.38</i> (±0.26)
14	MIROC-ESM	1.54 (±0.31)	0.66 (±0.24)	1.10 (±1.07)	<i>1.51</i> (±0.72)	<i>-0.06</i> (±0.13)	0.75 (±0.26)	<i>0.66</i> (±0.30)	0.40 (±0.24)
15	MPI-ESM-LR	1.47 (±0.44)	0.71 (±0.33)	0.76 (±0.55)	0.98 (±0.26)	0.21 (±0.23)	0.74 (±0.34)	0.80 (±0.21)	0.52 (±0.19)
16	MRI-CGCM3	1.53 (±0.68)	0.54 (±0.28)	0.50 (±0.31)	1.15 (±0.40)	0.15 (±0.15)	0.78 (±0.31)	0.87 (±0.17)	<i>0.34</i> (±0.15)
17	NorESM1-M	1.27 (±0.24)	0.83 (±0.37)	0.66 (±0.54)	1.02 (±0.46)	0.15 (±0.15)	0.72 (±0.30)	0.81 (±0.21)	0.44 (±0.27)

bold and italic indicate the three top-ranked and bottom-ranked models, respectively

한편, 평균 기온에 대한 모델별 표준편차와 상관도 그리고 오차는 비교적 작은 범위 내에 포함되어 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 강수량, 일 최대·최저기온, 풍속에 대한 17개의 CMIP5 GCM 일 단위 산출물에 대해 다양한 평가 지표를 이용한 평가 결과를 다양한 형태로 제시하였다. 미국 남동부 지역에 대한 모델의 성능에 대해 관측치 대

비 RMSE를 이용하여 절대적 오차를 산정하고 상관도 R을 이용하여 관측 패턴 재현성을 평가하였다. 더불어 산정된 오차들을 바탕으로 기상 인자별 모델의 순위를 결정하여 평가지표와 기상요소에 대해 각 모델의 성능이 어떤 차이를 보이는지 분석하였다. 그 결과로부터 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기온에 대한 GCM 산출물의 정확도는 다른 기상요소에 비해 미래 시나리오 적용 (미래기간 모의 결과)에 대한 타당성을 보이지만 대상지역 강수량의 경우는 대체로 낮은 정확도를 보이며 모델별 성능 차이가 크

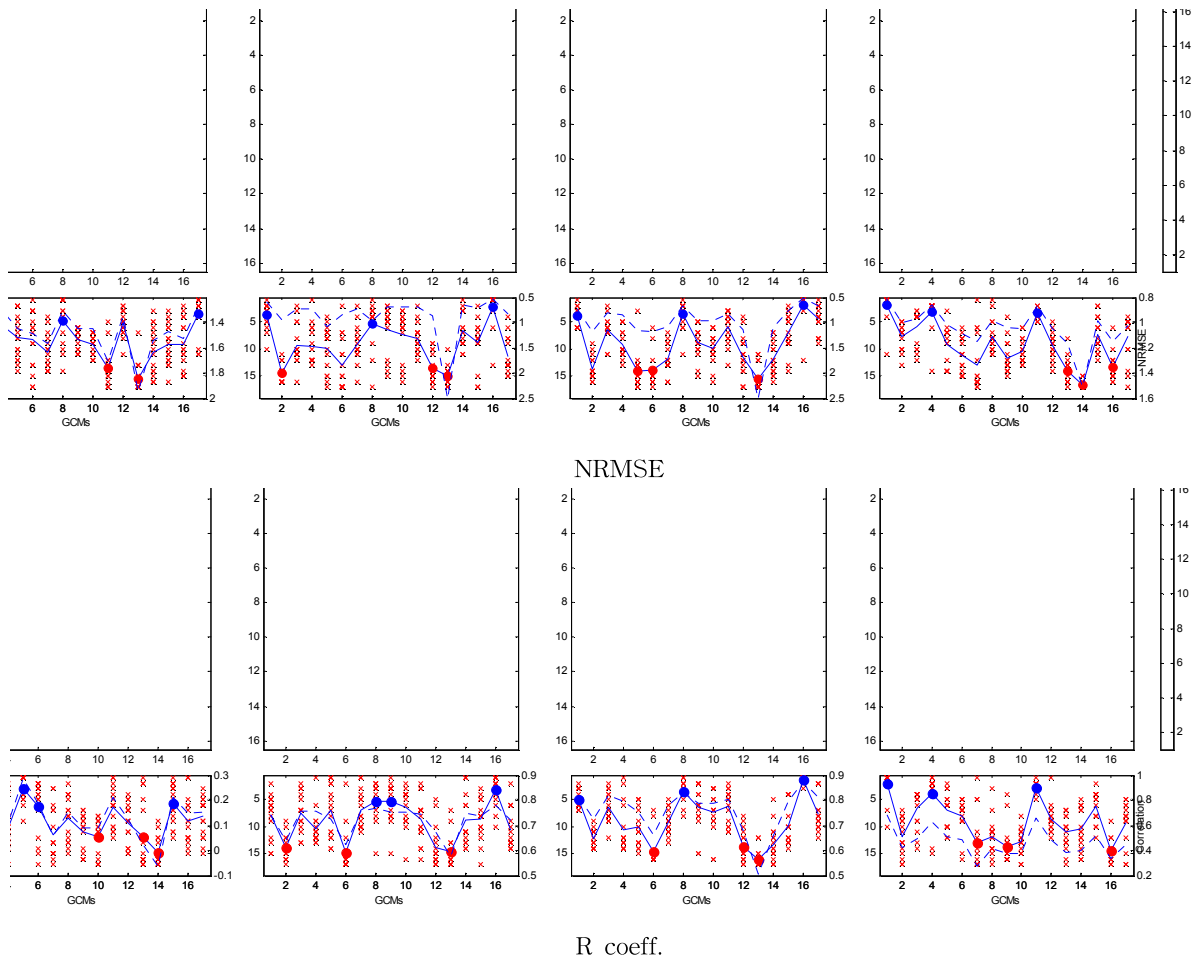


Fig. 5. The Portrait Diagram of the CMIP5 Ranks Estimated using NRMSE (i.e., RMSE normalized to the mean of the observed index, upper row) and R (i.e., correlation coefficient, bottom row) with Respect to the NLDAS Observation for 11 Index (See Table 2) and 4 Climate Variables. Averaged Ranks and Variations of Ranks over the Index (blue solid lines and red 'x's, respectively) and Averaged NRMSE and R (blue dotted line in the line plots) for each GCM (see Table 1) were Presented on the Bottom of each Row. The Blue and Red Circles on the Plots Represent the 3 Best and 3 Worst Models Respectively, Chosen by Averaged Ranks

- 게 나타나므로 신중한 모델 평가가 선행되어야 한다.
- 2) IPSL-CM5A는 관측된 강우 계절성(seasonal cycle)을 역으로 구현하고 평균 기온에 대해 13°C 이상 과소 모의하는 등 대상 지역에 대한 적용성이 현저히 떨어지는 것으로 판단되어 본 지역에 대해 기후모델 산출물 적용 시 제외하는 것을 제안한다.
 - 3) 다양한 시간 단위의 시계열 자료, 시간적 패턴과 변동성에 대한 지표, 그리고 극한 사상에 대한 평가 지표 등의 16개 지표에 대한 모델 평가 결과, 지표 특성과 시간 단위 (time scale)에 대한 모델 성능이 기상요소별로 상이하게 나타나므로 산출물 활용 목적에 따른 지표 선정이 신중하게 이루어져야 한다.
 - 4) 극한 사상 지표에 대한 모델 성능이 대체로 낮게 나

- 타나(과소 모의) 관련 연구를 위한 기후 모델 산출물 적용 시 통계적 편이 보정 수행 및 모델 선별 과정이 선행되어야 할 것으로 판단된다.
- 5) 미래 기후특성(예: 평균기온, 강우 일 변동성, 극한 사상 빈도, 등)과 더불어 평가 방법에 따라 과거기간에 대한 모의결과를 바탕으로 한 모델의 순위가 다르게 나타나므로 합리적인 최적 모델 선정을 위해서는 모델별 가중치 산정 등의 기법을 고안·적용하는 것이 필요하다.
 - 6) 평가 지표별 모델 오차의 차이가 특정 지표에 대한 모델별 오차 범위보다 크거나 상이하게 나타났다 (Fig. 6). 특정 또는 다수 GCM 산출물을 활용한 연구 결과의 신뢰도와 실효성을 제고하기 위해서는 모

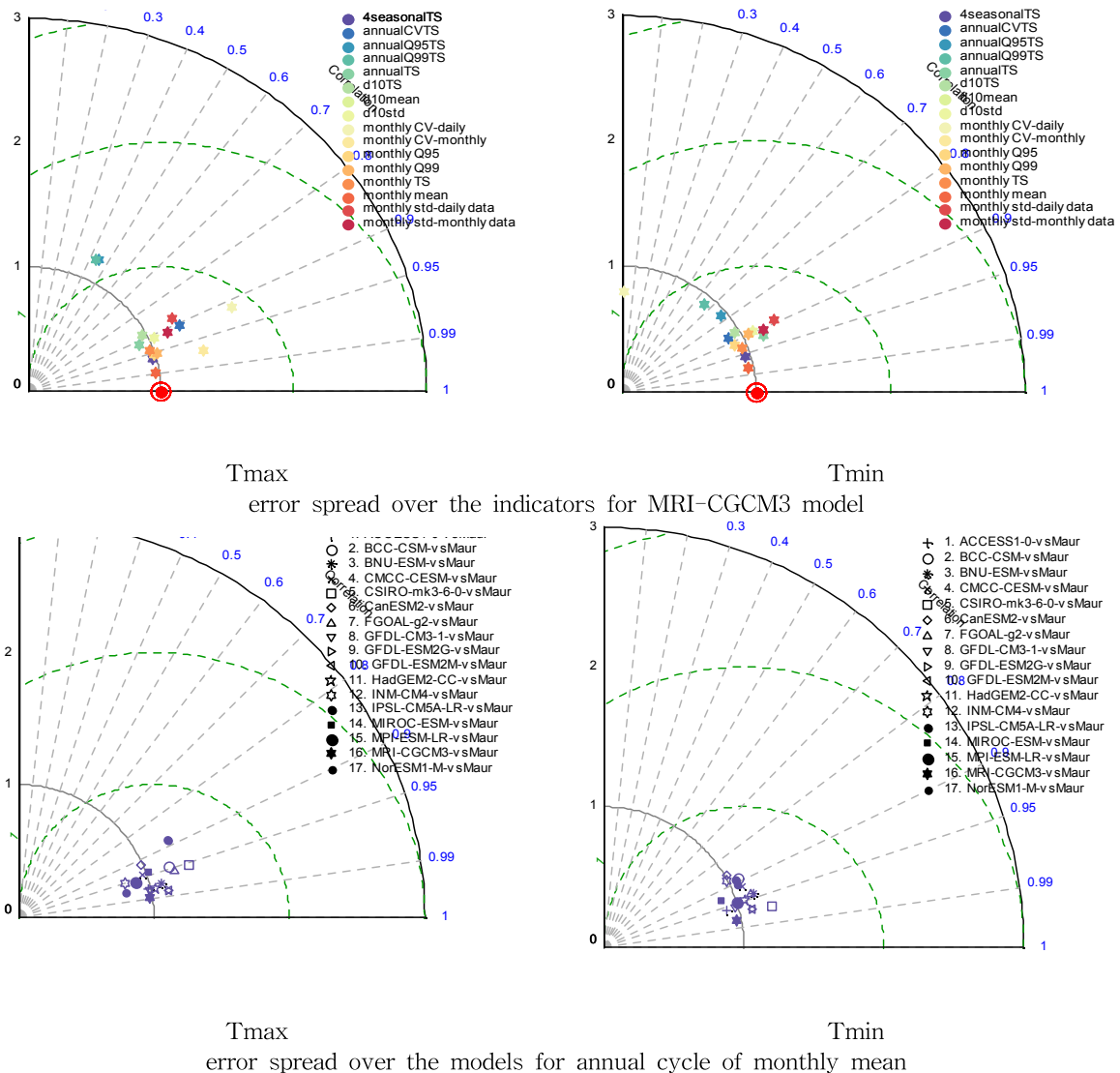


Fig. 6. Taylor Diagrams Comparing the Performance of MRI-CGCM3 (top-ranked model for maximum and minimum temperature) for 16 Indicators (upper row) and the Performance of 17 GCMs in Representing Monthly Mean of Maximum and Minimum Temperature (bottom row)

델 성능의 다양성에 대한 면밀한 분석과 더불어 기후모델 산출물의 활용 목적에 적합한 지표 선정을 통한 모델 평가가 이루어져야 할 것이다.

서론에서 언급한 바와 같이 현재 국내에서는 기후변화 영향평가를 위해 기상청에서 제공하는 ‘고해상도 국가표준 기후변화 시나리오’를 단일 미래 기상정보로 적용한 연구가 다채롭게 이루어지고 있다. 신뢰성 있는 국가기관으로부터 제공되는 이른바 ‘대표 시나리오’는 국내 기후변화 연구의 활성화에 그 역할을 하고 있는 동시에 미래 예측 정보의 불확실성과 신뢰도에 대한 고찰이 연구과정에서 간과되는 경향을 초래하고 있는 듯하다. 미래에 대한 기후 정보를 바탕으로 한 기후변화 전망에 있어 예측정보

의 불확실성과 결과의 다양성에 대한 고려는 연구결과의 정책적 실효성 제고를 위한 필요충분조건일 것이다. 본 연구의 결과와 같이 미래 기후정보의 정확도는 기후 모델 평가 방법과 적용 목적, 나아가 대상 지역의 지리·지형적 특성에 따라 다양하게 평가될 수 있으므로 다각적인 기후 모델 불확실성 분석은 합리적인 기후변화 예측을 위한 필수 선행 과제라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 경상대학교 신임교원 연구기반 조성 연구비 지원으로 수행되었음(2014-04-009).

References

- Bae, D.H., Jung, I.W., Lee, B.J., and Lee, M.H. (2011). "Future Korean Water Resources Projection Considering Uncertainty of GCMs and Hydrological Models." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5, pp. 389-406.
- Gleckler, P.J., Taylor, K.E., and Doutriaux, C. (2008) "Performance metrics for climate model." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, D6104, doi:10.1029/2007JD008972
- Hwang, S. (2012). "Utility of Gridded Observations for Statistical Bias-Correction of Climate Model Outputs and its Hydrologic Implication over West Central Florida." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 54, No. 5, pp. 91-102.
- Hwang, S., and Graham, W.D. (2011). "Quantitative Spatiotemporal Evaluation of Dynamically Down-scaled MM5 Precipitation Predictions over the Tampa Bay Region, Florida." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 12, pp. 1447-1464.
- Hwang, S., Graham, W.D., Geurink, J.S., and Alison, A. (2014). "Hydrologic implications of errors in bias-corrected regional reanalysis data for west central Florida." *Journal of Hydrology*, Vol. 510, pp. 513-529.
- Hwang, S., Hue, Y., and Chang, S.W. (2013). "Uncertainty in Regional Climate Change Impact Assessment using Bias-Correction Technique for Future Climate Scenarios." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 55 No. 4, pp. 95-106.
- IPCC. (1990). *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*, Edited by Houghton, J.T., Jenkins, G.J., and Ephraums, J.J., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kim, C.-R., Kim, Y.-O., Seo, S.B., and Choi, S.-W. (2013). "Water Balance Projection Using Climate Change Scenarios in the Korean Peninsula." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 8, pp. 807-819.
- Maurer, E.P., Wood, A.W., Adam, J.C., Lettenmaier, D.P., and Nijssen, B. (2002). "A Long-Term Hydrologically-Based Data Set of Land Surface Fluxes and States for the Conterminous United States." *Journal of Climate*, Vol. 15, pp. 3237-3251.
- Milly, P.C., Betancourt, D.J., Falkenmark, M., Hirsch, R.M., Kundzewicz, Z.W., Lettenmaier, D.P., and Stouffer, R.J. (2008). "Stationarity Is Dead-Whither Water Management?." *Science*, Vol. 319, pp. 573-574.
- Palutikof, J.P., Winkler, J.A., Goodess, C.M., and Andresen, J.A. (1997). "The simulation of daily temperature time series from GCM output. Part 1: comparison of model data with observations." *Journal of Climate*, Vol. 10, pp. 2497-2513.
- Park, J., Kwon, J.-H., Kim, T., and Heo, J.-H. (2014). "Future Inflow Simulation Considering the Uncertainties of TFN Model and GCMs on Chungju Dam Basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 2, pp. 135-143.
- Shon, T.S., Lee, S.D., Kim, S.D., and Shin, H.S. (2010). "An Analysis of the Effect of Climate Change on Flow in Nakdong River Basin Using Watershed-Based Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 10, pp. 865-881.
- Sohn, K.H., Bae, D.H., and Ahn, J.H. (2014). "Projection and Analysis of Drought according to Future Climate and Hydrological Information in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 1, pp. 71-82.
- Taylor, K.E. (2001). "Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, pp. 7183-7192, (also see PCMDI Report 55, <http://www.pcmdi.llnl.gov/publications/ab55.html>)
- Temba, N., and Chung, S.-O. (2014). "Uncertainty of Hydro-meteorological predictions due to climate change in the republic of Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 3, pp. 257-267.
- Yun, D.K., Chung, S.O., and Kim, S.J. (2011). "Climate change impacts on paddy requirement." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 53, No. 4, pp. 39-47.

paper number : 14-084

Received : 1 September 2014

Revised : 4 October 2014 / 13 October 2014

Accepted : 13 October 2014