

CMIP6 다중모델 기반 동아시아 현재기후 재현성 평가

이재희* · 성현민**† · 김지선* · 심성보** · 하종철*** · 변영화*** · 김연희***

*국립기상과학원 미래기반연구부 연구원, **국립기상과학원 미래기반연구부 연구사, ***국립기상과학원 미래기반연구부 연구관

Assessment of Model Performance in East Asia Based on the CMIP6 Multi-Model Ensemble

Lee, Jae-Hee* · Sung, Hyun Min**† · Kim, Jisun* · Shim, Sungbo** · Ha, Jong-Chul***
· Byun, Young-Hwa*** · Kim, Yeon-Hee***

*Researcher, Innovative Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences(NIMS), Jeju, Korea

**Research Scientist, Innovative Meteorological Research Department, NIMS, Jeju, Korea

***Senior Research Scientist, Innovative Meteorological Research Department, NIMS, Jeju, Korea

ABSTRACT

This study evaluates the performances of 38 global climate models used in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) for simulating present-day (1995 ~ 2014) climatological temperature and precipitation for the East Asian region. The simulated results of the CMIP6 multi-model ensembles show that overall spatial distribution is similar to that of the reanalysis data. In winter (December-January-February; DJF), temperature and precipitation biases are -0.62°C and 0.11 mm, respectively. Also, in summer (June-July-August; JJA), temperature and precipitation biases are -0.28°C and 0.22 mm, respectively. Additionally, we evaluate four climate extreme indices (TXx, TNn, R95p, Rx5day) compared with ERA5 and HadEX3 data. Simulated extreme temperature-related indices are well reproduced in the present-day, although the daily maximum and minimum temperature show negative and positive bias, respectively. Using the precipitation indices, the result of CMIP6 models is underestimated compared to reanalysis data. This is a typical feature of the East Asian Summer Monsoon simulated from CMIP climate models. Taking into account model validation and uncertainty estimation, this study demonstrates simulated performance of CMIP6 models for the present-day period.

Key words : CMIP6, East Asia, Multi-Model, Performance, Present-day

1. 서론

세계 기상기구(World Meteorological Organization, WMO) 전지구 기후보고서(WMO, 2019)에 따르면, 전지구 평균기온은 산업화 이전 시기(1850 ~ 1900년)보다 1.1°C 상승하였다. 이는 이전 5년(2011 ~ 2015년)보다 0.2°C 상승한 것으로, 2015년부터 2019년까지의 최근 5년은 역사상 가장 더웠던 5년으로 기록되었다. 또한, 최근

10년(2011 ~ 2020년)기간에 기상관측 기록을 시작한 1880년 이후의 141년 기간 중 가장 뜨거운 해로 기록된 1위부터 3위까지(순서대로 2016년, 2019년, 2020년) 포함되어 있으며, 이를 통해 지구온난화는 점점 가속되고 있음을 확인할 수 있다(NOAA, 2020). 지구온난화 가속화의 영향으로 호주 대형 산불, 동아시아(한국, 중국)지역의 이례적인 장마와 홍수피해, 최근 히말라야의 빙하 분리 등의 이상기후현상이 많이 증가하고 있으며, 그에 따른 피해들이 발생하고 있다. 기후변화 커뮤니티에서는

†Corresponding author : sunghml22@korea.kr (33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, National Institute of Meteorological Sciences, Republic of Korea. Tel. +82-64-780-6631)

ORCID 이재희 0000-0003-3227-923X
성현민 0000-0001-5173-8580
김지선 0000-0002-8238-3521
심성보 0000-0002-3533-5818

하종철 0000-0003-2522-6009
변영화 0000-0002-6074-4461
김연희 0000-0002-1157-3838

이상기후현상에 따른 피해를 막고자 기후변화의 영향에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다(Coumou et al., 2012; Diffenbaugh et al., 2017; Ma et al., 2020). 관련 선행연구들은 온실가스의 지속적인 배출이 기후변화를 가속화시키는 주요 원인이라고 이야기하고 있으며, 잠재적인 기후 비가역성(Irreversibility)의 생태환경과 인간사회에 미치는 영향이 점점 더 커질 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2013; Kim et al., 2020; Sung et al., 2021). 이에 대응을 위해 세계기후프로그램(World Climate Research Programme, WCRP)에서는 결합모델 실무그룹(WGCM)을 통해 국제 결합모델 상호비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison project, CMIP)을 진행시켜왔으며, 이를 기반으로 2021년 8월에 IPCC 제6차 평가보고서 제1실무그룹 보고서가 승인되었다. 현재 CMIP6에 참여한 기후모델들의 산출자료는 국제공유센터(Earth System Grid Federation, ESGF)에서 다운로드를 통해 활용이 가능하다. CMIP에서 산출되는 자료들은 기후시스템을 이해하거나 기후정책의 과학정보 지원의 관점에서 아주 유용한 자료로 활용되어왔으며(Forster et al. 2013; Aloysius et al. 2016; Papalexios et al. 2020), CMIP6 산출자료는 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathway, SSP)를 고려한 기후변화 시나리오이기 때문에, 21세기 미래전망에 대한 개선된 과학정보를 제공할 수 있다(Eyring et al., 2016; O'Neill et al., 2016).

CMIP6에 참여하는 모델들은 이전 페이즈의 CMIP에 참여하였던 기후모델을 업그레이드 하거나 새로 개발된 기후모델들이다. 전반적인 개선사항으로는 구름물리과정에 대한 모수화(Eyring et al., 2016)와, 육상과 해양의 생지화학과정 및 빙하녹음과정 등의 물리과정이 있다. 또한, CMIP6 참여모델들이 CMIP5에 비해 평균적으로 해상도가 높아졌으며, 그에 따른 개선된 산출자료의 과학정보가 기후모델링 커뮤니티의 주요 관심사이다(Eyring et al., 2016, O'Neill et al., 2016). 이와 관련하여, IPCC AR6 (Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report) 대응을 위해 세계 각국의 기후변화 연구그룹에서 CMIP6 자료를 활용하여 21세기 미래전망과 국제사회의 목표인 지구온난화 제한에 따른 미래전망과 관련한 연구들을 진행 중이며(Fan et al., 2020; Kim et al., 2020; Wehner et al., 2020; Zhu et al., 2020), 미래전망에 대한 분석을 위해서는 CMIP6 모델들의 현재기후에 대한 기후평가가 필수적이다. 하지만, 최근연구들은 CMIP5 자료들을 이용하거나(Zhu et al.,

2020), CMIP6 자료를 이용한 미래전망과 영향요인에 대해 초점을 맞춘 연구(Fan et al., 2020; Kim et al., 2020; Wehner et al., 2020)들이기 때문에, 현재기후에 대한 산출자료의 평가는 아주 짧게 언급되는 수준이다. 아프리카, 아라비아 반도, 동남아시아(필리핀 지역) 및 북아메리카 지역에 대한 CMIP6 산출자료 기반의 현재기후평가는 몇몇의 연구를 통해 이루어졌지만(Almazroui et al., 2020a, b, c), 한반도를 포함하는 동아시아 지역에 대한 CMIP6 산출자료의 현재기후에 대한 평가는 미흡한 실정이다. 특히, 동아시아지역에 대한 기후변화 과학정보는 대학 및 연구 커뮤니티의 과학적 관점뿐만 아니라, 많은 인구 밀집지역에 따른 국제사회의 대응정책적인 관점에서 수요가 급증하고 있기 때문에, 본 연구에서 수행한 CMIP6 참여모델의 현재기후에 대한 재현성 평가연구는 그 수요를 충족함에 있어 도움이 될 것으로 기대된다. 또한, 현재 기후모델링 커뮤니티에서는 CMIP6 참여모델들이 이전 CMIP 참여 모델들보다 기후민감도가 높은 편으로 알려져 있다(Sun et al., 2020; Zelinka et al., 2020). 기후민감도가 높다는 것은 온실가스 증가에 따라 기후모델에서 나타나는 온난화 반응이 더욱 큰 폭으로 나타난다는 것을 의미하기 때문에 신규 산출자료를 활용한 미래전망 분석을 위해서는 CMIP6 모델들의 현재기후에 대한 기후평가가 필요하다.

이러한 배경을 통해, 본 연구에서는 새로운 온실가스 농도경로를 따르는 CMIP6 참여모델의 다중모델 앙상블 분석을 통해 동아시아 지역의 현재기후에 대한 재현성 모의 성능평가를 수행하고자 하였다. 이를 위해 기온과 강수량 자료를 이용하여 모델의 모의성능을 살펴보고, 극한기후지수를 이용해 평가를 수행하였다. 2장에서는 자료 및 분석방법에 대해서 설명하고, 3장에서는 주요 분석결과를 요약하였다. 마지막으로, 결론과 요약내용을 4장에 기술하였다.

2. 자료 및 분석 방법

2.1. 기후모델 및 관측자료

본 연구에서는 동아시아 지역의 현재기후 평가를 위하여 ESGF에 등재된 38개의 CMIP6 모델자료를 앙상블 분석에 사용하였다. 국립기상과학원에서 CMIP6에 대응하기 위해 산출한 K-ACE (KMA's Advanced Climate Earth System Model)와 UKESM1 (UK's Earth System Model version1)기후모델자료도 분석에 사용되었다(Sellar et al., 2019; Lee et al., 2020; Sung

et al., 2021). 이 두 모델의 자료는 국가 표준 기후변화 시나리오 인증을 통과하였기 때문에, 양상불 분석의 신뢰성 확보에 도움이 될 것이다. 38개 기후모델에 대한 모델명, 산출기관 및 대기변수의 수평분해능이 Table 1에 제시되어 있다. ESGF (<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6>)와 각 기후모델의 모의 성능평가 논문들에서 더 상세한 정보를 확인할 수 있다. 분석에 사용한 산출자료는 1850년부터 2014년까지의 과거기후 (Historical) 실험이며, 현재기후의 분석기간은 IPCC AR6에서 정의한 1995년부터 2014년까지의 20년 평균기후를 사용하였다(O'Neil et al., 2016). 모델자료와의 비교를 위하여 유럽

중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)의 재분석 자료인 ERA5 (ECMWF ReAnalysis version 5)를 입수하여 분석을 수행하였다. ERA5의 수평해상도는 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (721×1440)로 Copernicus Climate Service (<https://cds.climate.copernicus.eu>)에서 다운로드 가능하다. 또한 극한기후지수에 대한 성능 평가를 위해 영국기상청 해들리센터(Met Office Hadley Centre)에서 생산되는 자료인 HadEX3를 사용하였다. HadEX3 자료의 수평해상도는 $1.875^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ (192×144)이며, 지상관측 자료를 기반으로 산출된 격자화 된 극한기후지수 자료이다.

Table 1. List of 38 climate models participated in CMIP6 and their resolution

No.	Model name	Institute	No. of grids (lon×lat)
1	ACCESS-CM2	The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia (Bi et al. 2020)	192×144
2	ACCESS-ESM1-5	The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Australia (Bi et al. 2020)	192×144
3	AWI-CM-1-1-MR	Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Germany (Semmler et al. 2020)	192×384
4	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China (Wu et al. 2019a)	160×320
5	BCC-ESM1	Beijing Climate Center, China (Wu et al. 2019b)	64×128
6	CAMS-CSM1-0	Chinese Academy of Meteorological Sciences, China (Rong et al. 2018)	160×320
7	CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada (Swart et al. 2019)	64×128
8	CanESM5-CanOE	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada (Swart et al., 2019)	64×128
9	CAS-ESM2-0	The Chinese Academy of Sciences, China (Zhang et al., 2020)	128×256
10	CESM2	National Center for Atmospheric Research, USA (Danabasoglu et al., 2020)	192×288
11	CESM2-WACCM	National Center for Atmospheric Research, USA (Danabasoglu et al., 2020)	192×288
12	CMCC-CM2-SR5	The Euro-Mediterranean Center on Climate Change, Italy (Cherchi et al., 2018)	192×288
13	CNRM-CM6-1	The CNRM/CERFACS modelling group, France (Voldoire et al., 2019)	128×256
14	CNRM-CM6-1-HR	The CNRM/CERFACS modelling group, France (Voldoire et al., 2019)	360×720
15	CNRM-ESM2-1	The CNRM/CERFACS modelling group, France (Seferian et al. 2019)	128×256
16	E3SM-1-0	the U.S. Department of Energy's Office of Biological and Environmental Research, USA (Rasch et al., 2019)	180×360
17	EC-Earth3	Consortium of various institutions from EU (Doscher et al. 2020)	256×512
18	EC-Earth3-Veg	Consortium of various institutions from EU (Doscher et al. 2020)	256×512
19	FGOALS-f3-L	The Chinese Academy of Sciences, China (Pu et al., 2020)	180×360
20	FGOALS-g3	Chinese Academy of Sciences, China (Pu et al., 2020)	80×180
21	FIO-ESM-2-0	First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, China (Bao et al., 2020)	192×288
22	GFDL-ESM4	National Oceanic and Atmospheric Administration, USA (Held et al., 2019)	180×288
23	GISS-E2-1-G	The NASA Center for Climate Simulation, USA (Kelly et al., 2020)	90×144

No.	Model name	Institute	No. of grids (lon×lat)
24	HadGEM3-GC31-LL	Met Office Hadley Center, UK (Sellar et al. 2019)	192×144
25	IITM-ESM	Indian Institute Of Tropical Meteorology (IITM), India (Krishnan et al., 2019)	94×192
26	INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics, Russia (Volodin et al., 2018)	120×180
27	INM-CM5-0	Institute for Numerical Mathematics, Russia (Volodin et al., 2018)	120×180
28	IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace, France (Boucher et al. 2020)	143×144
29	KACE-1-0-G	National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration, Korea (Lee et al. 2019)	192×144
30	MIROC6	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and RIKEN Center for Computational Science, Japan (Tatebe et al., 2019)	128×256
31	MIROC-ES2L	Research Center for Environmental Modeling and Application, Japan (Tatebe et al., 2019)	64×128
32	MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany (Mauritsen et al., 2019)	192×384
33	MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Germany (Mauritsen et al., 2019)	96×192
34	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute, Japan (Yukimoto et al., 2019)	160×320
35	NESM3	Nanjing University of Information Science and Technology, China (Cao et al., 2018)	96×192
36	NorESM2-LM	NorESM Climate modeling Consortium, Norway (Seland et al., 2020)	96×144
37	NorESM2-MM	NorESM Climate modeling Consortium, Norway (Seland et al., 2020)	96×144
38	UKESM1	Met Office Hadley Center, UK (Sellar et al. 2019)	192×144

2.2. 분석방법

본 연구에서는 CMIP6 38개 모델을 앙상블 평균 한 후 그 값을 관측 값과 비교하여 모델 값이 관측치와 일치하는가를 통해 모델의 재현성 성능을 평가하였다. CMIP6 모델 과거기후모의실험에서 1995 ~ 2014년 기간 동안의 기온과 강수 자료를 분석하였다(Eyring et al., 2016). 지표 기온은 구름의 영향을 받는 일사량, 지면 열 플럭스(surface heat flux), 대기와 해양이 운반하는 에너지량에 따라 결정되기 때문에 기후시스템의 흐름을 파악하기 위한 핵심 변수중 하나로 꼽히며(IPCC, 2013; Yang et al., 2021), 기후모델의 모의성능을 파악하기 위한 기본 변수로써 연구커뮤니티에서 널리 사용되고 있는 변수이다. 또한, 강수량은 지구시스템 여러 요소들의 비선형 반응에 따라 모의결과가 달라지기 때문에 기후모델의 모의성능을 평가함에 있어서 중요하고, 특히, 동아시아지역과 같은 계절몬순이 나타나는 지역에서는 몬순이 아주 중요한 대기순환 시스템(Chen and Fraenfeld, 2014; Xin et al., 2020)이기 때문에 핵심 분석변수로 꼽히고 있다. 38개의 모델과 2개의 관측 자료의 직접적인 비교를 위해 192×144 수평해상도로 동일하게 변경하여 사용하였다. 전지구와 동아시아(20 ~ 50°N, 100 ~ 145°E) 영역을 분석

지역으로 정의하였고, 기온 및 강수 상태에 대한 공간 분포 및 패턴 상관계수(Pattern Correlation Coefficient, 이후 PCC) 계산을 통해 상관성을 살펴보았으며, 각각 월별 기온 및 강수에 대해 모델과 관측치를 비교하여 여름철, 겨울철 등 계절적 모의 성능을 분석하였다. 38개 모델 중 일최고기온(Tmax), 일최저기온(Tmin) 자료가 제공되는 28개 모델을 이용하여 각 모델의 극한기후 모의 성능을 평가하였다. 극한기후지수 값에 대한 Taylor (Taylor, 2001)의 기능 평점(Skill Score, 이후 TSS)을 구하여 평가 방법으로 사용하였다.

$$S = \frac{4(1+R)}{(\sigma+1/\sigma)^2(1+R_0)} \quad (1)$$

S는 TSS, R은 PCC를 나타내며, σ 는 정규화 된 표준편차(Normalized Standard Deviation, 이후 NSD)로 1에 가깝게 나타날수록 관측치와 유사하다. R_0 는 최대 PCC를 나타내며 1로 설정하여 사용하였다. 이 관계식은 모의성능평가와 관련된 많은 선행연구들에서 활용되고 있다. 또한, 기준이 되는 관측 값과 평가하고자 하는 모델이 낮은 상관관계와 낮은 표준편차를 동시에 나타낼 경우에 엄격한 평가기준이 적용되는 특징이 있다(Taylor, 2001).

WMO에서 제시하는 ETCCDI 극한기후지수 중 기온관련 2개(일 최고기온과 일 최저기온의 연최고값)와 강수관련 2개(상위 5퍼센트 강수와 연 최대 5일 강수)의 지수를 선정하여 기능 평점을 구해 모델의 성능을 평가하였다 (Table 2).

Table 2. List of 4 extreme temperature and precipitation indices and their definitions

Label	Index name	Index definition	Unit
TXx	Hottest day	Annual maximum daily maximum temperature	℃
TNn	Coldest night	Annual minimum daily minimum temperature	℃
R95p	Very wet days	The daily precipitation amount on when precipitation > 95th percentile on wet days ($\geq 1\text{mm}$)	mm
Rx5day	Max 5 day precipitation	The precipitation amount of annual maximum 5-day precipitation	mm

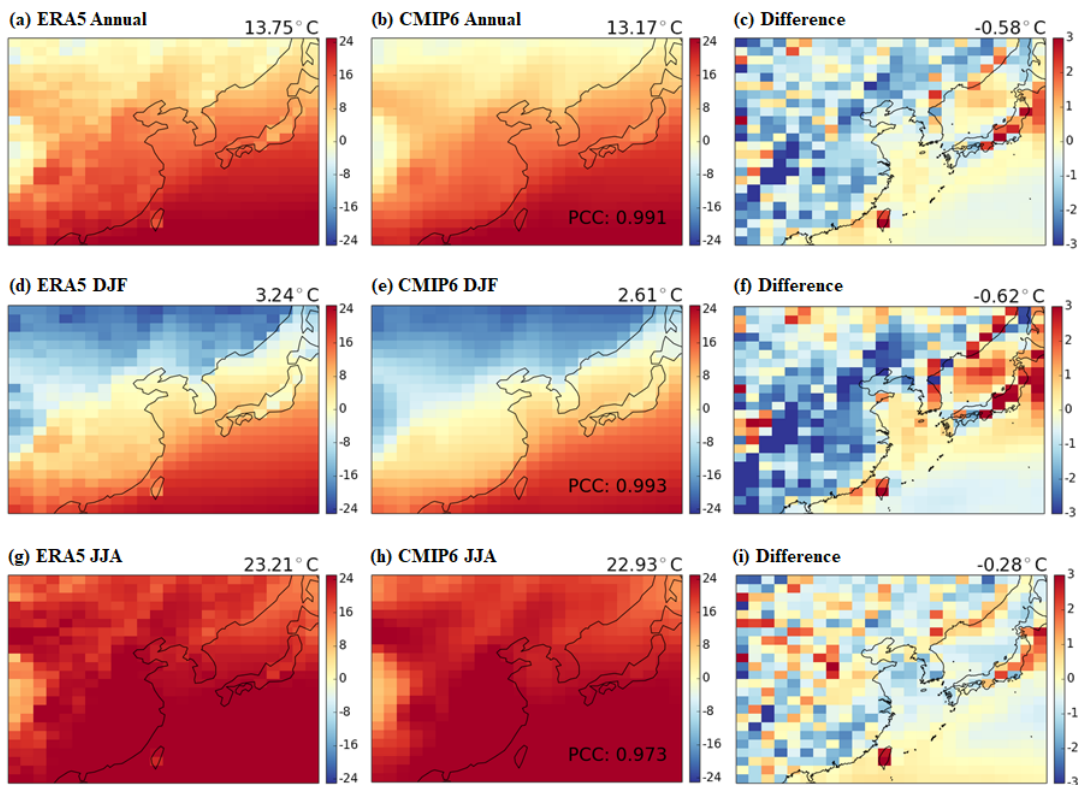


Fig. 1. Spatial distribution of mean temperature (unit:℃) in annual (first row), winter (December to February, DJF; second row), and summer (June to August, JJA; third row) season obtained from ERA5 observation data (first column) and the ensemble mean of 38 CMIP6 models (second column), and their difference (model minus observation; third column) during the present day period (1995–2014). The domain average value is shown in the upper right corner and PCC indicates pattern correlation coefficient between CMIP6 model ensemble and ERA5 (b, e, h).

3. 결과

3.1. CMIP6 기후모델에서 모의된 동아시아 평균 현재 기후

본 연구에서는 CMIP6 과거기후실험을 통해 산출된 38개 기후모델 앙상블의 현재기후기간(1995~2014; 20년 평균)에 대한 평균 기온 공간분포를 구한 뒤, ERA5 재분석 자료와 비교하였다(Fig. 1). 전반적으로 CMIP6 앙상블에서 나타난 동아시아 지역의 평균기온 분포는 ERA5 자료(Fig. 1a)와 0.991의 높은 상관관계(Fig. 1b)를 보였으며, -0.58°C 의 편차 영역평균 값이 나타났고, 지역적으로도 3°C 이하의 편차(Fig. 1c)를 나타냈다. 겨울철 기온분포(Fig. 1d, e, f)를 살펴보면, 중국내륙지역은 전반적으로 음의 편차를 보이는 가운데, 남

한과 일본을 중심으로는 양의 편차가 나타났다. 공간분포의 상관계수는 0.993으로 높은 상관(Fig. 1e)이 나왔지만, 높은 산맥을 포함하는 복잡한 지형에서는 편차값이 다른 지역에 비해 크게 나타난 점에서 CMIP6 모델들이 이전 페이즈의 CMIP에서 나타난 기후모델의 특성(IPCC, 2013; Yan et al., 2013, Yang et al., 2021)을 유사하게 가지고 있음을 확인할 수 있다. 여름철의 경우(Fig. 1g, h, i)에는 -0.28°C 의 편차 영역평균의 값이 나타났고, 이는 겨울철보다 여름철 동아시아 지역의 기온모의가 재분석자료와 유사하게 나타났음을 의미한다. 또한, 지역적으로는 2°C 이하의 기온 편차가 나타났으며(Fig. 1i; 대만지역 제외) 공간분포의 상관계수는 0.974로 평균과 겨울철보다 다소 낮은 상관계수가 나타났다(Fig. 1h). 여름철의 모의 결과에서는 겨울철 보다 높게 나타나는 개별 모델 사이의 편차에 의해 더 낮은 상관관계를 보이고 있다.

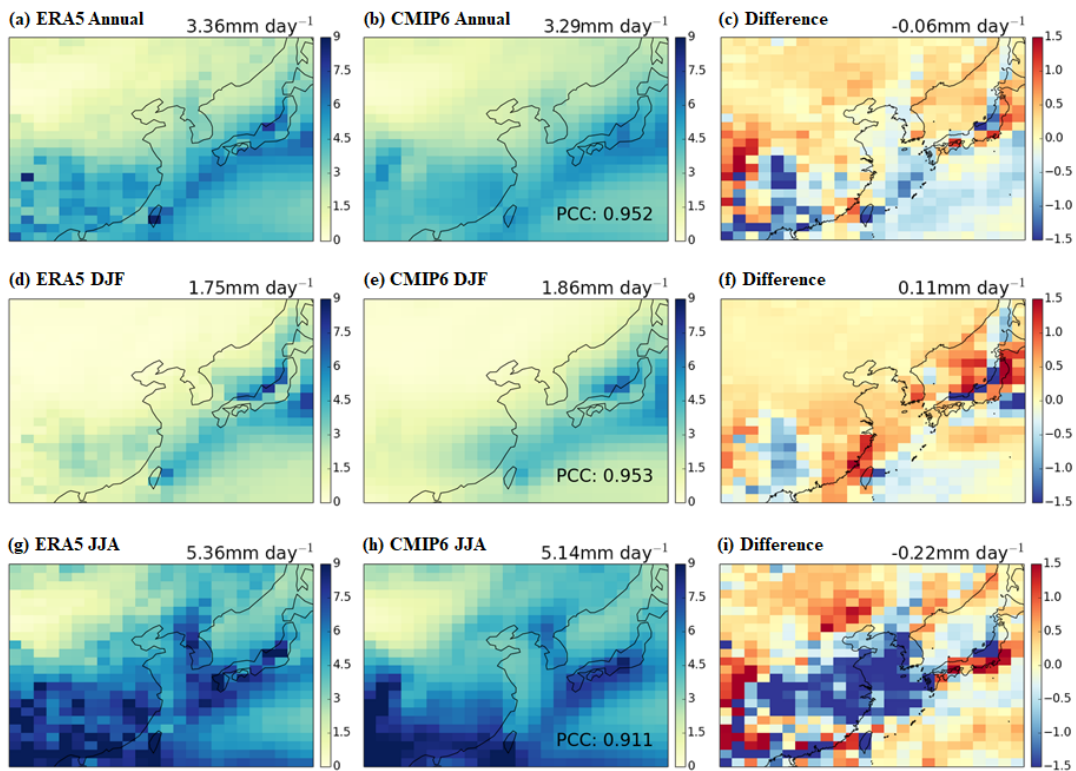


Fig. 2. Same as Fig. 1. except for precipitation (unit: mm day^{-1}).

ERA5 자료(Fig. 2a)와 CMIP6 앙상블 결과(Fig. 2b)의 현재기후 연평균 강수량을 살펴보면, 북위 35도를 중심으로 북쪽지역보다 남쪽지역에서 많은 강수량이 나타났다. 이는 동아시아 지역 강수의 주요 기여요인인 여름몬순밴드와 관련되어 있으며, 여름몬순은 북서태평양 고기압의 가장자리를 따라 강수밴드가 북상하는 형태를 가지기 때문에 북쪽지역보다는 남쪽지역에 강수가 집중되는 분포를 나타낸다(Sui et al., 2013). 또한, CMIP6 모델(Fig. 2h)에서도 동아시아 몬순 특성이 잘 모의되고 있음을 확인할 수 있다. 연평균 강수량의 편차(Fig. 2c)를 살펴보면, 북위 35도를 기준으로 북쪽지역은 양의 편차(서해와 만주 일부지역 제외)가 나타났고, 남쪽지역은 음의 편차가 나타나는 경향을 보였다. 지역별 편차 값들은 대부분 약 1 mm day^{-1} 보다 작게 나타났으며, 이는 CMIP6 기후모델에서 모의된 동아시아지역의 강수가 이전 페이즈의 CMIP 모델들보다 관측자료와의 편차가 작아졌다는 최근 선행연구들(Jiang et al., 2020; Zhu et al., 2020, Yang et al., 2021)과 유사한 분석결과이다. 연평균 강수편차의 영역평균 값은 $-0.06 \text{ mm day}^{-1}$, PCC는 0.952로 분석되었다. 겨울철(Fig. 2d, e, f)과 여름철(Fig. 2g, h, i)을 비교해보면, 여름철 강수가 겨울철에 비해 약 3배 정도 많은 것으로 분석되었고, 이는 여름철에 집중된 동아시아 강수의 특성(Sui et al., 2013; Kwon et al., 2017)을 잘 나타내주는 결과이다. 겨울철의 강수편차 영역평균은 0.11 mm day^{-1} , 여름철은 $-0.22 \text{ mm day}^{-1}$ 로 각각 나타났으며, 여름철에는 양쯔강 유역부터 한반도까지의 지역에서 건조 편차(Dry bias)의 특징이 나타났다. 서해를 중심으로 한반도와 중국 동부해안을 포함하는 영역의 음의 편차는 지역기후모델에서도 비슷한 경향을 보임을 관련연구를 통해 확인하였다(Kim et al., 2021). 이는 CMIP6 기후모델들에서 모의되는 여름철 강수밴드가 충분히 북상하지 못하거나 강수량을 약하게 모의함(Park et al., 2020)을 의미하며, CMIP 기후모델이 개선의 여지가 아직 남아있음을 의미한다(Sperber et al., 2013).

3.2. 모의된 평균기후의 불확실성 및 성능평가

3.2.1. 평균 오차 평가

관측자료(재분석자료)의 현재기후와 비교하여 CMIP6 기후모델들의 개별 오차를 정량적으로 분석하기 위하여 기온과 강수에 대한 편차(bias)와 평균 제곱근 오차(RMSE)의 산포도를 Fig. 3에 제시하였다. 전체 앙상블 평균은 각 기후모델의

편차와 RMSE를 구한 뒤, 평균(simple averaging)을 취하여 계산하였다(Fig. 3의 별표). 먼저, 편차의 산포도를 살펴보면(Fig. 3a), 연평균 기온과 강수량은 각각 약 3°C 의 범위($-2 \sim +1^{\circ}\text{C}$)와 약 1.5 mm day^{-1} 의 범위($-0.5 \sim +1 \text{ mm}$)에서 대부분의 기후모델이 분포함을 확인할 수 있다. 겨울철의 경우(Fig. 3b), 기온편차는 연평균 편차와 비슷한 크기와 범위를 나타냈고(GISS-E2-1모델(약 2°C) 제외), 강수편차는 연평균 편차보다 다소 작은 값과 범위를 나타냈다(INM-CM4-8 모델(약 1.2 mm day^{-1}) 제외). 하지만, 여름철의 경우(Fig. 3c)에는 강수편차 범위가 음의 편차방향으로 뚜렷하게 확대되면서, 기온편차와 강수편차가 선형비례 관계의 특징을 나타냈다(Fig. 3c). 특히, BCC-CSM2-MR, BCC-ESM1, CAMS-CSM1-0, CAS-ESM2-0, FGOALS-f3-L, FGOALS-g3, GFDL-ESM4, GISS-E2-1, IITM-ESM의 모델들에서 여름철 강수편차가 CMIP6 다중모델로부터 구한 연평균과 겨울철 분포에 비해 크게 나타나는 특징을 확인할 수 있다. 편차의 관점에서 기온의 편차가 증가할수록 강수의 편차도 증가하는 기온-강수의 편차 간 상관관계를 확인할 수 있으며, 경향성은 여름철에 가장 크게 나타난다.

연평균 RMSE의 산포도(Fig. 3d)에서는 대부분의 기후모델이 $1 \sim 2^{\circ}\text{C}$ 범위의 기온오차와 $0.5 \sim 0.8 \text{ mm day}^{-1}$ 범위의 강수오차를 확인할 수 있다. 하지만, CNRM-CM6-1, CNRM-CM6-1-HR, E3SM-1-0, GFDL-ESM4, IPSL-CM SA-LR의 모델에서 2°C 이상의 양의 기온오차가 나타났고, CAMS-CSM1-0, IITM-ESM, INM-CM4-8, INM-CM5-0에서 약 1 mm day^{-1} 정도의 양의 강수오차가 나타나면서 CMIP6 기후모델이 나타내는 경향분포에서 벗어나는 모델들도 확인할 수 있다. 겨울철(Fig. 3e)의 기온오차는 연평균보다 크게, 강수오차는 연평균보다 작게 나타났다. 연평균 분포에서 큰 기온오차(GFDL-ESM4 제외)와 강수오차(CAMS-CSM1-0, IITM-ESM 제외)를 보인 모델들이 겨울철 오차분석에서 더욱 큰 값을 나타내는 특징을 보였다. 하지만, 여름철(Fig. 3f)에는 기온오차가 연평균보다 작은 값을 나타냈고, 강수오차는 연평균보다 큰 값을 나타내면서, 겨울철과는 반대의 경향성을 보였다. 오차의 관점에서는 기온의 오차가 커질수록 강수의 오차가 작아지는 기온-강수의 오차 간 상관관계를 확인할 수 있으며, 편차의 경향성과 유사하게 여름철에 가장 큰 상관관계를 보였다.

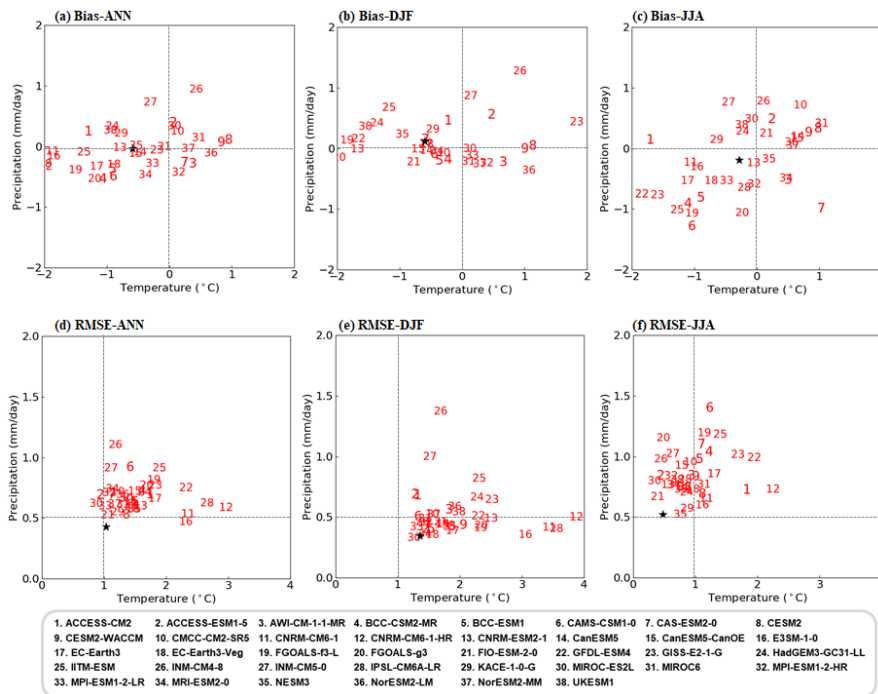


Fig. 3. Scatter plots of temperature and precipitation for bias (top row) and RMSE (bottom row) in the annual mean (left column), winter (middle column), and summer (right column) over East Asia.

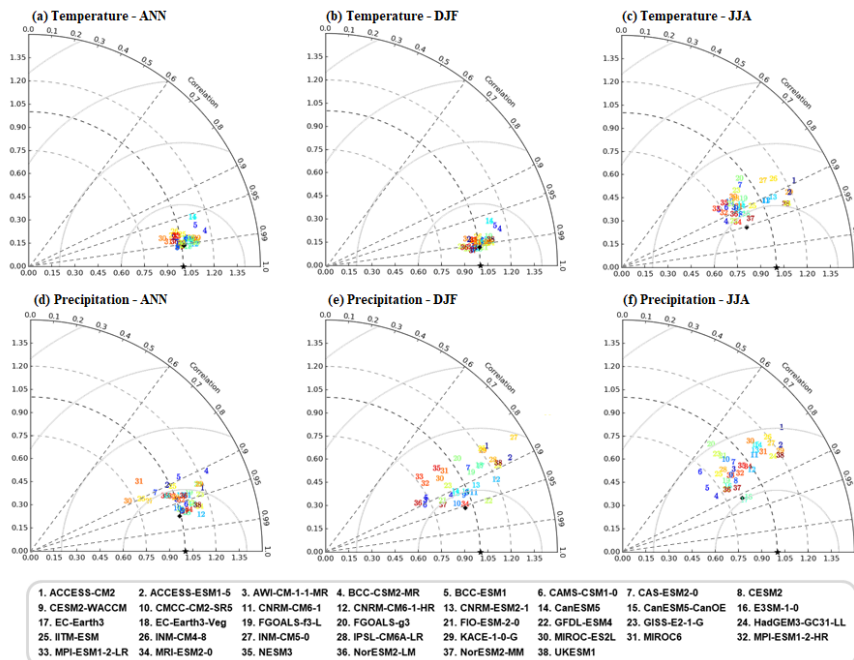


Fig. 4. Taylor diagram of temperature (top row) and precipitation (bottom row) in the annual mean (left column), winter (middle column), and summer (right column) over East Asia.

3.2.2. 모의성능평가

현재기후의 기온과 강수의 공간패턴에 대한 모의성능을 평가하기 위하여 테일러 다이어그램과 TSS를 활용하였고, 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 제시하였다. 먼저, Fig. 4a의 테일러 다이어그램을 살펴보면, 연평균 기온은 0.99의 PCC와 1의 NSD에 대부분의 기후모델들이 수렴하고 있음을 확인할 수 있다. 이 중에서 BCC-CSM2-MR, BCC-ESM1, CanESM5 모델은 대부분의 CMIP6 모델들 보다 다소 낮은 PCC와 높은 NSD를 보였다. 겨울철 기온의(Fig. 4b) 분포는 연평균 테일러 다이어그램과 유사하게 나타났지만, 여름철(Fig. 4c)의 경우에는 모든 모델들이 PCC 값은 작아지고, NSD의 값은 1로부터 멀어지는 경향이 나타났다. 연평균

강수의 테일러 다이어그램(Fig. 4d)을 살펴보면, 대부분의 모델들이 0.9 이상의 PCC 값을 나타냈고, BCC-ESM1, MIROC-ES2L, MIROC6 모델들이 0.9보다 다소 작은 PCC 값을 보였다. 반면에, 겨울철(Fig. 4e)과 여름철(Fig. 4f)에는 각각 0.8~0.95, 0.6~0.8의 PCC 범위를 나타냈고, 여름철의 PCC값이 연평균과 겨울철보다 낮게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 2i에서 나타난 여름철 건조 편차(dry bias)의 영향으로 판단되며, PCC값은 연평균과 여름철, 겨울철이 서로 다른 범위를 나타냈지만 NSD는 계절에 상관없이 0.7~1.2의 범위에 모든 모델들이 분포하는 것으로 분석되었다. 기온과 비교하여 강수의 PCC가 작게 나타났으며, 이는 선행연구들과 유사한 분석결과이다(Yang et al., 2021).

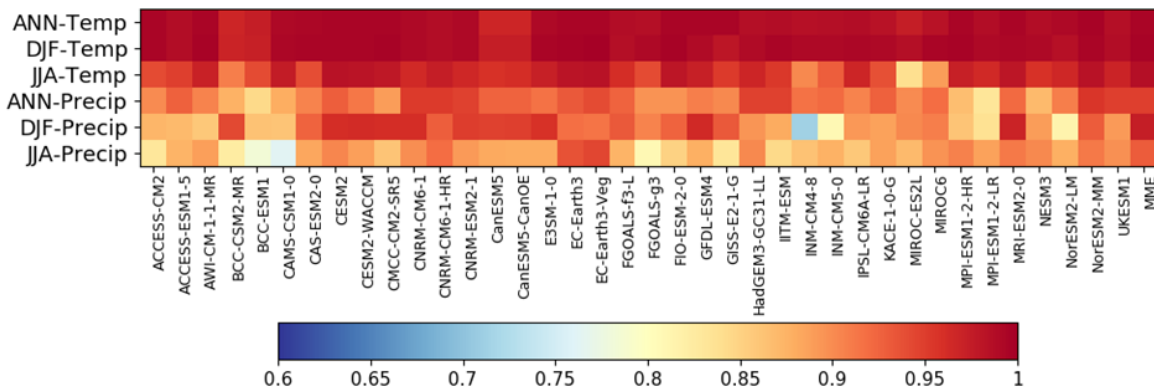


Fig. 5. The portrait plot using Taylor Skill Score of temperature and precipitation over East Asia in the Annual mean, Winter (DJF), and Summer (JJA).

Fig. 5는 연평균과 겨울철, 여름철의 기온과 강수에 대해 각 모델별로 TSS 값을 구하여 나타낸 그림으로 빨간색을 나타낼수록 해당변수에 대한 기후모델의 모의성능이 좋음을 의미한다. 기온의 TSS는 전반적으로 0.9 이상의 값을 보여 관측자료의 기온분포를 CMIP6 기후모델들에서 잘 모의하는 것으로 판단할 수 있다. 테일러 다이어그램(Fig. 4b-c)와 비교해보면, 겨울철(0.97~0.99)이 여름철(0.84~0.98)보다 모델 양상불의 NSD 범위가 좁게 나타났기 때문에, 겨울철 기온의 TSS 값이 여름철보다 크게 나타났다고 할 수 있다. 강수의 TSS는 기온과 다르게, 기

후모델별로 큰 차이를 보인다. 연평균(0.83~0.95), 겨울철(0.71~0.97), 여름철(0.76~0.94) 순으로 큰 값을 보이며, 겨울철에는 INM-CM4-8 (0.71), INM-CM5-0 (0.81), NorESM 2-LM (0.82) 모델이 낮은 TSS 값을 보였고, 여름철에는 ACCESS-CM2 (0.83), BCC-CSM2-MR (0.82), BCC-ESM1 (0.78), CAMS-CSM1-0(0.76), FGOALS-g3 (0.87) 모델들이 낮은 TSS 값을 보였다. 테일러 다이어그램(Fig. 4e-f)와 비교해보면, NSD값이 다른 CMIP6 기후모델들 보다 1에서 멀어질수록 낮은 TSS 값을 나타냄을 확인할 수 있다.

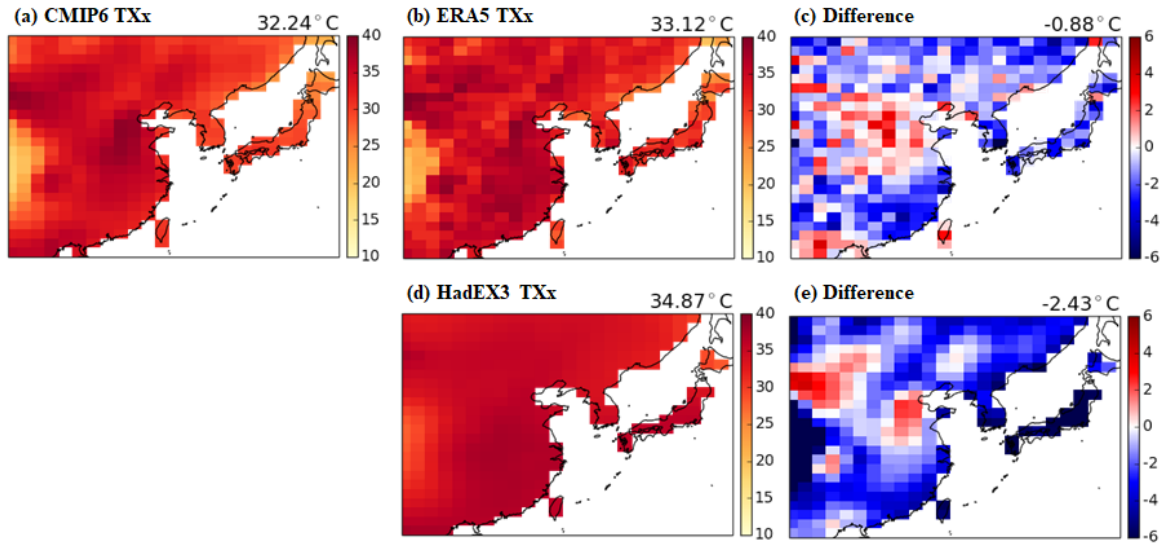


Fig. 6. The spatial distributions (only land) of the annual maximum of daily maximum temperature (TXx; upper panel) and daily minimum temperature (TNn; lower panel), respectively averaged the present day period (1995–2014) from CMIP6 ensemble mean (first column), ERA5 and HadEX3 data (second column), and their difference (third column; Model minus reanalysis data).

3.3. CMIP6 모델에서 모의된 극한기후 분석

본 절에서는 CMIP6 기후모델들의 과거실험을 통해 산출된 현재기후에 대한 일 최고기온의 연 최대값(TXx)과 일 최저기온의 연 최소값(TNn)을 ERA5 및 HadEX3 자료의 값과 비교하였다(Fig. 6). 극한기후지수는 지수의 특성을 고려하여 육지에 대한 값만을 이용해서 계산되기 때문에 본 연구에서는 모의성능평가의 정확성을 높이기 위해서 재분석자료 뿐만 아니라, 관측자료 기반의 극한기후지수 값을 제공하는 HadEX3 자료를 이용하여 동아시아 지역의 극한기후지수를 비교하였다. TXx 값을 살펴보면 (Fig. 6a-e), 관측자료들과 CMIP6 앙상블의 공간분포가 유사함을 확인할 수 있다. 동아시아 지역에 대한 CMIP6 모델(Fig. 6a)의 평균값은 32.2°C로써 ERA5자료(33.12°C; Fig. 6b) 및 HadEX3자료(34.9°C; Fig. 6d)와 비교해보면, 각각 -0.9°C, -2.4°C의 음의편차(Fig. 6c, 6e)를 보였다. 반면에, TNn값은 CMIP6 모델(Fig. 6f)의 평균값은 -16.9°C로써 ERA5자료(-16.7°C; Fig. 6g) 및 HadEX3자료(-17.1°C; Fig. 6i)와 비교해보면, 각각 -0.2°C, -0.4°C의 음의편차(Fig. 6h, j)를 보였다. 일 최고기온보다는 일 최저기온의 극한값에서 훨씬 작은 편차가 나타났다. 남한과 일본 중국 남동해안지역 및 대만을 중심으로 편차 값이 크게

나타났고, 중국 서쪽 내륙의 높은 산맥을 경계로 두고 있는 복잡한 지형이 위치한 곳에서 극한기온의 편차 값이 크거나 주변지역들과 큰 차이를 나타내는 경향을 보였다 (Fig. 6). 또한, 이러한 경향성 때문에, 평균값과 극한값은 수평적인 분포는 유사한 경향이 나타났으나, 편차(bias)와 오차(RMSE)의 관점에서는 본 연구의 분석영역에서는 상관관계가 낮은 것으로 나타났다(Fig. A1-2).

Fig. 7은 ERA5, HadEX3 및 CMIP6 앙상블에서 산출된 상위 5%의 강수일의 총 강수량(R95p)과 연 최대 5일 강수량(Rx5day)의 동아시아지역 분포를 나타낸 그림이다. R95p 값을 살펴보면, CMIP6 앙상블(Fig. 7a)에서는 214.9 mm의 값이 나타나 ERA5 (241.1 mm), HadEX3 (241.1 mm)의 계산결과와는 -26.2 mm의 음의 편차를 보였다. 평균값과 극한값의 수평적인 분포를 살펴보면 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있고, 이러한 경향은 극한강수의 결과에서 더 강하게 나타남을 확인할 수 있다(A2-3). 동아시아 여름 몬순 시스템의 영향으로 중국 화남지역부터 한반도, 일본에 이르는 위도대에 강수가 집중되는 특징적인 분포는 선행연구들(Freychet et al., 2016; Shim et al., 2021)과 유사하게 나타났다. 또한, 관련 선행연구(Shim et al., 2021)에 따르면, 일부 기후모델에서 산출된 동아시아지역 강수모의는 여름몬순 시스템의 영향을 많이 받는 지역에서 다소

과다모의하는 경향을 나타냈다. 하지만, 본 연구에서 더 많은 CMIP6 앙상블을 활용하여 분석해 본 결과, CMIP6 모델들에서 모의되는 동아시아 여름몬순은 재분석자료에 비해 과소모의하는 것으로 분석되었고, 이는 많은 수의

CMIP6 기후모델에서 모의되는 동아시아 몬순시스템은 충분히 복잡하지 못하거나 강수밴드의 강도가 과소모의하는 경향을 가짐을 의미한다.

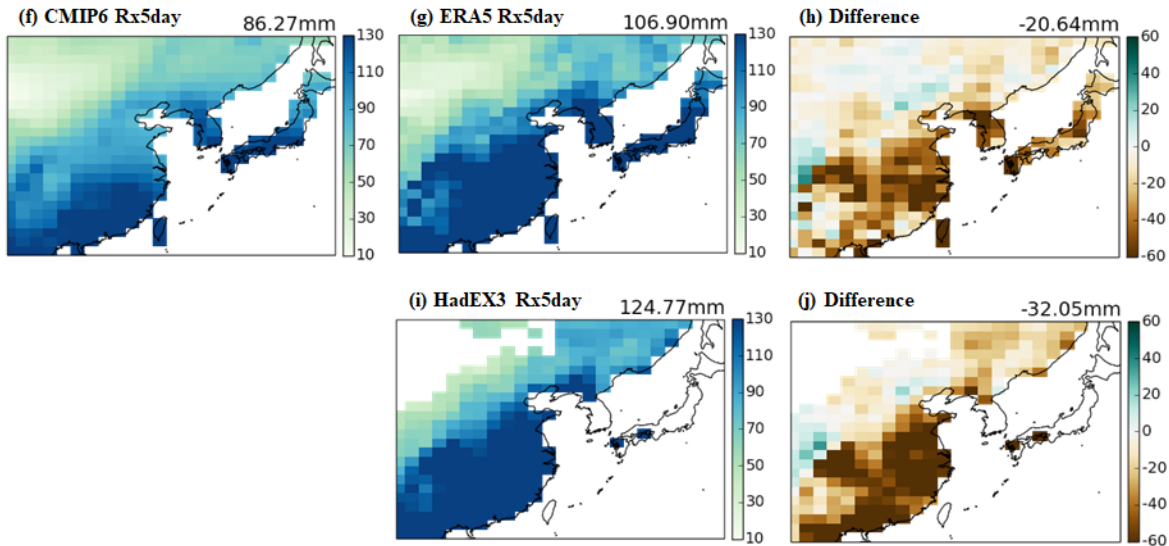


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for R95p (the daily precipitation amount of 95th percentile wet days) and Rx5day (annual maximum 5-day precipitation).

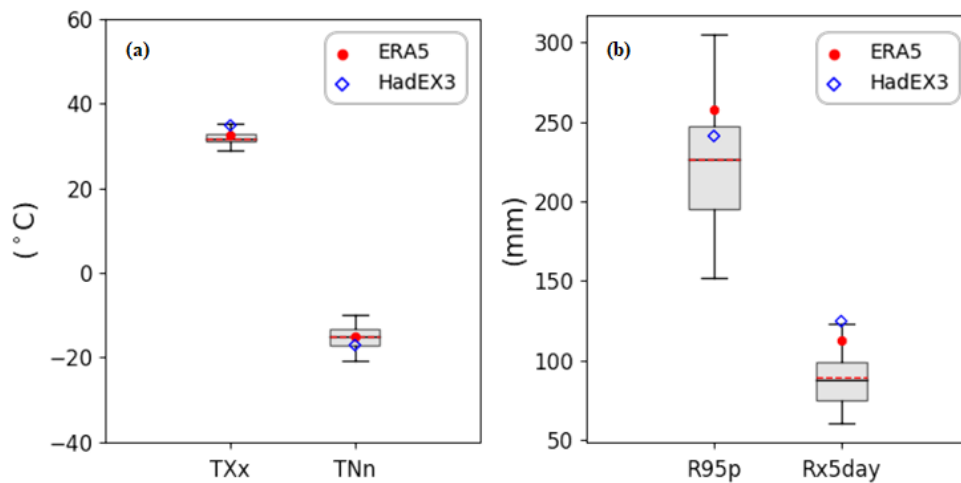


Fig. 8. Box plots of extreme indices over East Asia during present day (1995–2014), (a) temperature-related indices such as TXx, TNn (b) precipitation-related indices such as R95p, Rx5day from CMIP6 models with HadEX3 observation (blue diamond) and ERA5 reanalysis (red circle). The gray solid line and the red dashed line indicate median and mean, respectively.

기후모델에서 산출된 현재기후의 기온 및 강수극한의 모의성능을 재분석자료와 비교한 결과, 지역별로 편차의 경향성이 다르게 나타났지만 전반적인 공간분포는 유사하게 나타났음을 확인하였다(Fig. 6, 7). 하지만, 앞의 분석에서 확인한 바와 같이, 극한기후에 대한 CMIP6 기후 모델들의 개별 모의경향은 차이가 있기 때문에 분석영역에 대한 극한기후지수 값을 비교하였고, 그 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 현재기후에 대한 TXx 값은 ERA5자료, HadEX3자료 및 CMIP6 앙상블 평균의 순서대로 32.5°C, 34.9°C, 31.7°C의 값이 나타났다(Fig. 8a). TNn값은 순서대로 -15.0°C, -17.1°C, -15.1°C로 나타났다(Fig. 8a). HadEX3에서 계산된 TXx 값은 CMIP6 앙상블 범위의 최고수준의 값과 비슷하게 나타났고, ERA5의 TXx 값은 사분위수범위(IQR, interquartile range)에 포함되었다. 하지만, TNn 값은 HadEX3와 ERA5자료에서 계산된 값이 모두 사분위수범위에 포함되었다. 이 비교를 통해, HadEX3자료의 극한기온이 ERA5와 CMIP6 모델들 보다 일 최대기온은 더 높게, 일 최저기온은 더 낮게 나타남을 확인할 수 있었고, CMIP6 모델들에서 모의되는 극한기온은 관측자료들과 유사함을 확인하였고, 선행연구들과 유사한 분석결과임을 확인하였다(Cui et al., 2021).

현재기후에 대한 R95p는 ERA5자료, HadEX3자료 및 CMIP6 앙상블 평균의 순서대로 257.4 mm, 241.1 mm, 226.8 mm의 값이 나타났다. Rx5day의 값은 순서대로, 112.5 mm, 124.8 mm, 87.9 mm의 값이 나타났다(Fig. 8b). 극한기온과는 다르게 HadEX3의 R95p 값을 제외한 재분석자료에서 계산된 극한강수는 CMIP6 모델 앙상블의 사분위수범위를 상회하는 것으로 나타났다. 특히, Rx5day의 극한강수량은 CMIP6 모델 앙상블 범위의 최고수준과 유사하게 나타났다. 이 비교를 통해 CMIP6 모델에서 계산

된 극한강수는 재분석자료에 비하여 다소 과소모의경향을 가지고 있음을 확인할 수 있고, 앞 절의 분석(Fig. 2)과 같이 동아시아 지역강수의 큰 부분을 차지하는 여름철 몬순시스템의 이동과 강수밴드의 모의경향에 따른 결과라고 판단할 수 있다. 또한, CMIP6 모델들이 가지고 있는 약한 강수를 빈번하게 발생시키는 특성의 영향이 반영된 결과라고 분석할 수 있다(Chen et al., 2021).

자세한 정량적인 성능평가를 위해 CMIP6 개별모델의 TSS 값을 구하여 Table 3에 제시하였다. 기온이 강수보다 TSS 값이 높게 나타났고, 극한기후값 보다는 평균기후값의 TSS가 1에 가까운 값을 보임을 확인할 수 있다. TSS 값이 1에 가까울수록 기후모델에서 모의된(후처리 계산된) 값이 관측자료에 가깝다는 의미이기 때문에, 기온이 강수보다, 평균기후값이 극한기후값보다 관측자료에 가깝게 모의되었음을 확인할 수 있다. 분석된 변수의 TSS 평균범위는 0.76에서 0.90의 범위를 보였고, 모의성능이 관측자료와 가장 유사하게 나타난 5개 기후모델은 UKESM1 (0.90), K-ACE (0.89), NorESM2-MM (0.89), GFDL-ESM4 (0.87), CNRM-CM6-1-HR (0.87)이며, 관측자료와 다소 차이를 보인 5개 기후모델은 HadGEM3-GC31-LL (0.76), CanESM5 (0.79), NorESM2-LM (0.80), MRI-ESM2 (0.80), EC-Earth3-Veg (0.81)로 나타났다. 이 평가결과는 많은 선행연구들에서 수행되고 있는 연구들과 유사한 성격을 가지고 있으나 동아시아 지역에 국한된 평가결과라는 차이점을 가지고 있다. 국제기후프로젝트(CMIP)가 회차를 거듭할수록 기후모델이 기존물리과정의 개선, 신규 개발된 추가물리과정, 해상도가 높아지는 등의 모델링 연구그룹들의 노력을 통해 발달하고 있지만, 지역기후를 분석하거나 미래기후를 전망할 경우에는 지역특성을 잘 반영하는 모델을 활용하는 것이 중요하며, 이를 도와줄 수 있는 분석결과라고 할 수 있다.

Table 3. Taylor skill score (TSS) of analysis indices from each CMIP6 models

No.	Model	Tas	TXx	TNn	Precip.	R95p	Rx5day	Mean
1	ACCESS-CM2	0.99	0.81	0.87	0.91	0.85	0.79	0.87
2	ACCESS-ESM1-5	1.00	0.86	0.67	0.96	0.84	0.57	0.82
3	BCC-CSM2-MR	1.00	0.84	0.85	0.92	0.77	0.58	0.83
4	BCC-ESM1	0.99	0.83	0.85	0.90	0.79	0.81	0.86
5	CanESM5	0.99	0.82	0.84	0.91	0.77	0.42	0.79
6	CMCC-CM2-SR5	0.99	0.81	0.88	0.95	0.72	0.77	0.85
7	CNRM-CM6-1	0.99	0.86	0.88	0.94	0.79	0.49	0.82
8	CNRM-CM6-1-HR	0.99	0.83	0.79	0.95	0.83	0.85	0.87
9	CNRM-ESM2-1	0.98	0.82	0.79	0.94	0.80	0.83	0.86
10	EC-Earth3	0.99	0.81	0.69	0.96	0.84	0.83	0.85
11	EC-Earth3-Veg	1.00	0.82	0.67	0.95	0.81	0.58	0.81
12	FGOALS-f3-L	0.99	0.80	0.86	0.89	0.79	0.66	0.83
13	FGOALS-g3	0.99	0.83	0.83	0.84	0.74	0.71	0.82
14	GFDL-ESM4	0.99	0.83	0.81	0.95	0.83	0.83	0.87
15	HadGEM3-GC31-LL	0.99	0.70	0.64	0.93	0.67	0.61	0.76
16	INM-CM4-8	0.99	0.75	0.77	0.93	0.76	0.78	0.83
17	INM-CM5-0	1.00	0.76	0.85	0.93	0.82	0.50	0.81
18	IPSL-CM6A-LR	0.99	0.85	0.74	0.90	0.77	0.76	0.83
19	KACE-1-0-G	0.99	0.87	0.88	0.94	0.85	0.81	0.89
20	MIROC6	0.99	0.77	0.83	0.95	0.82	0.53	0.82
21	MIROC-ES2L	0.99	0.79	0.88	0.90	0.81	0.57	0.82
22	MPI-ESM1-2-HR	1.00	0.79	0.83	0.94	0.78	0.74	0.85
23	MPI-ESM1-2-LR	1.00	0.79	0.88	0.92	0.76	0.60	0.83
24	MRI-ESM2-0	1.00	0.85	0.87	0.94	0.70	0.42	0.80
25	NESM3	0.98	0.81	0.86	0.92	0.81	0.70	0.85
26	NorESM2-LM	1.00	0.85	0.85	0.94	0.74	0.39	0.80
27	NorESM2-MM	1.00	0.86	0.88	0.97	0.80	0.84	0.89
28	UKESM1	0.99	0.88	0.88	0.95	0.86	0.82	0.90

4. 요약 및 결론

기후모델에서 산출되는 결과는 모델의 구성(결합구성, 사용되는 생지화학 모듈 등)과 입력되는 외부 강제력의 영향을 주로 받는다(Allen et al., 2000). 하지만, CMIP 참여를 위해 산출된 결과들은 국제표준의 기후강제력을 입력 자료로 사용하기 때문에, 외부 강제력의 다양성에 대한 영향력은 배제가 가능하다. 이와 같은 배경을 기반으로 다양한 커뮤니티에서 CMIP 모델자료를 활용하여 미래 전망을 산출하고, 기후변화와 관련 정책을 지원하고 있다. 미래전망을 산출하기 전에는 현재기후에 대한 기후모델의 성능평가가 필수불가결하며, CMIP의 회차가 거듭될수록 물리과정이 개선되거나 고려되지 않았던 물리 과정들이 신규추가 되는 등을 고려한 기후모델의 평가가 이루어지고 있다. 전지구 규모 뿐만 아니라, 지역적인 분석도 필요하기 때문에 본 연구에서는 38개 CMIP 기후모델 앙상블을 이용하여 동아시아 지역에 대한 현재기후의 모의성능을 확인하였다. 기온과 강수의 2가지 평균기후와 기후변화 대응정책에 많이 활용되는 4가지 극한기후지수를 계산하여, ERA5 및 HadEX3 자료와 비교하였다.

전지구 혹은 다른 대륙을 중심으로 현재기후 모의성능을 비교한 선행 연구들과 유사하게, 동아시아 지역의 현재기후에 대한 CMIP6 기후모델 앙상블의 모의성능은 관측자료와 유사한 분포를 가지고 있음을 확인하였다. 먼저, 평균기후에 대한 성능평가 결과를 살펴보면, 모델에서 모의되는 기온분포는 다소 과소모의(음의편차)됨을 확인하였고, 강수분포는 북위 30도를 기준으로 북쪽으로는 양의 편차, 남쪽으로는 음의편차가 나타나면서 지역별 차이가 있음을 확인하였다. 여름철과 겨울철의 비교에서는 겨울철은 연평균의 경향성과 유사한 반면, 여름철의 경우는 기온의 편차가 작아졌고, 강수의 편차는 앙상블 범위가 더 넓어졌다. 특히, 모의된 여름철 동아시아 몬순시스템의 이동이나 주요 강수밴드의 강수량이 모델별로 차이가 나는 것을 RMSE와 Bias 분석을 통해서 확인하였고, CMIP6 기후모델에서 대체로 동아시아 지역의 여름철 몬순을 과소모의함을 확인하였다.

모델 앙상블 결과로부터 계산한 현재기후의 기온과 강수 극한기후지수를 재분석자료와 비교한 결과, 일 최고기온은 음의 편차를 일 최저기온은 양의 편차를 보였지만, 전반적인 공간분포는 유사하게 나타났음을 확인하였다(Zhou et al., 2014; Chen et al., 2018). 관련선행연구들의 결과(Sui et al., 2013; Kwon et al., 2017; Jiang et al.,

2020; Zhu et al., 2020; Shim et al., 2021; Yang et al., 2021)들과 비슷하게, CMIP6 기후모델들은 일 최고기온을 다소 낮게, 일 최저기온은 관측과 유사하게 모의하는 경향을 보임을 확인하였다. 또한, 강수의 극한기후지수는 CMIP6 기후모델 모의결과가 관측자료에 비해 전반적인 과소모의 경향을 보였다. 동아시아 지역강수의 큰 부분을 차지하는 여름철 몬순시스템의 이동과 강수밴드의 모의 경향이 원인으로 판단되었으며, CMIP 모델들이 가지고 있는 약한 강수를 빈번하게 발생시키는 특성의 영향이 반영된 결과라고 할 수 있다(Chen et al., 2021).

본 연구는 CMIP6 국제기후프로젝트에 제출된 38개의 기후모델을 활용하여 분석한 연구로써, 앙상블 평균과 불확실성 평가를 통해서 CMIP6 기후모델의 현재기후 모의에 대한 성능을 확인하고, 동아시아 지역의 기후특성을 반영한 기후모델을 이용한 분석을 해야 한다는 주의점과 관련 정보를 제공하기 위한 연구이다. 본 연구를 통해 분석된 동아시아 현재기후 재현성의 분석 결과는 대학 및 연구 커뮤니티의 과학적 관점뿐만 아니라 국가 기후변화 적응정책 수립의 기초자료로 활용하고, 미래 기후변화 대응 자료로서의 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술 개발연구」 “기후변화 시나리오 개발·평가(KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Allen MR, Stott PA, Mitchell JF, Schnur R, Delworth TL. 2000. Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change. *Nature*, 407(6804), 617-620.
- Almazroui, M, Saeed F, Saeed S, Islam MN, Ismail M, Klutse NAB, Siddiqui MH. 2020a. Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4(3), 455-475.
- Almazroui M, Saeed S, Saeed F, Islam MN, Ismail M. 2020b. Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4(2), 297-320.

- Almazroui M. 2020c. Rainfall trends and extremes in Saudi Arabia in recent decades. *Atmosphere*, 11(9), 964.
- Aloysius NR, Sheffield J, Saiters JE, Li H, Wood EF. 2016. Evaluation of historical and future simulations of precipitation and temperature in central Africa from CMIP5 climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(1), 130-152.
- Bao Y, Song Z, Qiao F. 2020. FIO-ESM version 2.0: Model description and evaluation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC016036.
- Bi D, Dix M, Marsland S, O'Farrell S, Sullivan A, Bodman R, Law R, Harman I et al. 2020. Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model. *Journal of Southern Hemisphere Earth System Science*, 70, 25-251.
- Boucher O, Servonnat J, Albright AL, Aumont O. et al. 2020. Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 12(7), e2019MS002010.
- Cao J, Wang B, Yang Y-M, Ma L, Li J, Sun B, Bao Y, He J, Zhou X, Wu L. 2018. The NUIST Earth System Model (NESM) version3: description and preliminary evaluation. *Geoscientific Model Development*. 11(7), 2975-2993.
- Chen L, and Frauenfeld OW. 2014. A comprehensive evaluation of precipitation simulations over China based on CMIP5 multimodel ensemble projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(10), 5767-5786.
- Chen L, Xu C, Li X. 2021. Projections of temperature extremes based on preferred CMIP5 models: a case study in the Kaidu-Kongqi River basin in Northwest China. *Journal of Arid Land*, 1-13.
- Chen Y, Moufouma-Okia W, Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A. 2018. Recent progress and emerging topics on weather and climate extremes since the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 35-59.
- Cherchi A, Fogli PG, Lovato T, Peano D, Iovino D, Gualdi S, Masina S, Scoccimarro E, Materia S, Bellucci A, Navarra A. 2018. Global mean climate and main patterns of variability in the CMCC-CM2 Coupled Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 11(1), 185-209.
- Coumou D, and Rahmstorf S. 2012. A decade of weather extremes. *Nature climate change*, 2(7), 491-496. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>
- Cui T, Li C, Tian F. 2021. Evaluation of temperature and precipitation simulations in CMIP6 models over the Tibetan Plateau. *Earth and Space Science*, e2020EA001620. <https://doi.org/10.1029/2020EA001620>
- Danabasoglu G, Lamrque J-F, Bacmeister J, Bailey DA, DuVivier AK, et al. 2020. The Community Earth System Model Version2 (CESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 12(2), e2019MS001916.
- Diffenbaugh NS, Singh D, Mankin JS, Horton DE, Swain DL, Touma D, Charland A, Liu Y, Haugen M, Tsiang M, Rajaratnam B. 2017. Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(19), 4881-4886. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618082114>
- Doscher R, Acosta M, Alessandri A, Anthoni P, Arneth A, Arsouze T. et al. 2020. The EC-Earth3 Earth System model for the climate model intercomparison project 6. *Geoscientific Model Development*. doi.org/10.5194/gmd-2020-446.
- Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ, Taylor KE. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development (Online)*, 9 (LLNL-JRNL-736881).
- Fan X, Miao C, Duan Q, Shen C, Wu Y. 2020. The performance of CMIP6 versus CMIP5 in simulating temperature extremes over the global land surface. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,

- 125(18), e2020JD033031. <https://doi.org/10.1029/2020JD033031>
- Forster PM, Andrews T, Good P, Gregory JM, Jackson LS, Zelinka M. 2013. Evaluating adjusted forcing and model spread for historical and future scenarios in the CMIP5 generation of climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(3), 1139-1150.
- Freychet N, Hsu HH, Wu CH. 2016. Extreme precipitation events over East Asia: Evaluating the CMIP5 model. *Atmospheric Hazards—Case Studies in Modeling, Communication, and Societal Impacts*.
- Held IM, Guo H, Adcroft A, Dunne JP, Horowitz LW, Krasting J. et al. 2019. Structure and performance of GFDL's CM4.0 climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 11(11), 3691-3727.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F. et al. Eds., Cambridge University Press, 1535 pp.
- Jiang D, Hu D, Tian Z, Lang X. 2020. Differences between CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate over China and the East Asian monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(10), 1102-1118.
- Kelly M, Schmidt GA, Nazarenko LS. et al. 2020. GISS-E2.1: Configurations and Climatology. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 12(8), e2019MS002025.
- Kim D-H, Kim J-U, Byun Y-H, Kim T-J, Kim J-W, Kim Y-H, Ahn J-B, Cah D-H, Min S-K, Chang E-C, 2021. Future projection of extreme climate over the Korean Peninsula using multi-RCM in CORDEX-EA Pase 2 project. *Atmosphere* (in Korean with English abstract; in review).
- Kim M-K, Yu D-G, Oh J-S, Byun Y-H, Boo K-O, Chung I-U, Park J-S, Park D-S, Min S-K, Sung HM. 2020. Performance evaluation of CMIP5 and CMIP6 models on heatwaves in Korea and associated teleconnection patterns. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(23), e2020JD032583. <https://doi.org/10.1029/2020JD032583>
- Krishnan R, Swapna P, Vellore R, Narayanasetti S. et al. 2019. The IITM Earth System Model (ESM): Development and future roadmap. *springer singapore*.
- Kwon S-H, Boo K-O, Shim S, Byun Y-H. 2017. Evaluation of the East Asian summer monsoon season simulated in CMIP5 models and the future change. *Atmosphere*, 27(2), 133-150.
- Lee J, Kim J, Sun M-A, Kim B-H, Moon H, Sung HM, Kim J, Byun Y-H. 2020. Evaluation of the Korea meteorological administration advanced community earth-system model (K-ACE). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56(3), 381-395. <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00144-7>
- Ma Y, Ma B, Jiao H, Zhang Y, Xin J, Yu Z. 2020. An analysis of the effects of weather and air pollution on tropospheric ozone using a generalized additive model in Western China: Lanzhou, Gansu. *Atmospheric Environment*, 224, 117342.
- Mauritsen T, Bader J, Becker T, Behrens J. et al. 2019. Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1.2) and Its Response to Increasing CO₂. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(4), 998-1038.
- NOAA, 2020. Earth System Research Laboratory Website. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html> (accessed september 13, 2021).
- O'Neill BC, Tebaldi C, Van Vuuren DP, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque J-F, Lowe J. 2016. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6.
- Papalexiou SM, Rajulapati CR, Clark MP, Lehner F. 2020. Robustness of CMIP6 historical global mean temperature simulations: Trends, long-term persistence, autocorrelation, and distributional shape. *Earth's Future*, 8(10), e2020EF001667.
- Park J, Kim H, Wang SYS, Jeong J-H, Lim K-S, LaPlante M, Yoon J-H. 2020. Intensification of the East Asian summer monsoon lifecycle based on

- observation and CMIP6. *Environmental Research Letters*, 15(9), 0940b9.
- Pu Y, Liu H, Yan R, Yang H, Xia K, Li Y, Dong L. et al. 2020. CAS FGOALS-g3 model datasets for the CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP). *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 1081-1092.
- Rasch PJ, Xie S, Ma P-L, Lin W, Wang H, Tang Q, Burrows SM. et al. 2019. An Overview of the atmospheric component of the Energy Exascale Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems.*, 11(8). 2377-2411.
- Rong X, Li J, Chen H, Su J, Hua L, Zhang Z, Xin Y. 2021. The CMIP6 historical simulation datasets produced by the climate system model CAMS-CSM. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38, 285-295.
- Seferian R, Nabat P, Michou M, Saint-Martin D, et al. 2019. Evaluation of CNRM Earth system model, CNRM-ESM2-1: Role of earth system processes in present-day and future climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems.* 11(12), 4182-4227.
- Seland O. et al. 2020. Overview of the Norwegian Earth System Model(NorESM2) and key climate response of CMIP6 DECK, historical, and scenario simulations. *Geoscientific Model Development.* 13, 6165-6200.
- Sellar AA, Jones CG, Mulcahy J, Tang Y, Yool A, Wiltshire A, O'connor FM., Stringer M, Hill R, Palmieri J. 2019. UKESM1: Description and evaluation of the UK Earth System Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems.*
- Semmler T, Danilov S, Gierz P, Goessling HF, Hegewald J, Hinrichs C et al. 2020. Simulations for CMIP6 with the AWI climate model AWI-CM-1-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems.* 12(9), e2019MS002009.
- Shim S, Sung HM, Kwon S-H, Kim J, Lee J-H, Sun M-A, Song J, Ha J, Byun Y-H, Kim Y, Turnock ST, Stevenson DS, Allen RJ, O'Connor FM, Teixeira JC, Williams J, Johnson B, Keeble J, Mulcahy J, Zeng, G. 2021. Regional Features of Long-Term Exposure to PM_{2.5} Air Quality over Asia under SSP Scenarios Based on CMIP6 Models. *International journal of environmental research and public health*, 18(13), 6817.
- Sperber KR, Annamalai H, Kang IS, Kitoh A, Moise A, Turner A, Zhou T. 2013. The Asian summer monsoon: an intercomparison of CMIP5 vs. CMIP3 simulations of the late 20th century. *Climate dynamics*, 41(9-10), 2711-2744.
- Sui Y, Jiang D, Tian Z. 2013. Latest update of the climatology and changes in the seasonal distribution of precipitation over China. *Theoretical and applied climatology*, 113(3), 599-610.
- Sun M-A, Sung HM, Kim J, Boo K-O., Lim Y-J, Marzin C, Byun Y-H. 2020. Climate Sensitivity and Feedback of a New Coupled Model (K-ACE) to Idealized CO₂ Forcing. *Atmosphere*, 11(11), 1218. <https://doi.org/10.3390/atmos11111218>
- Sung HM, Kim J, Shim S, Seo J-B, Kwon S-H, Sun M-A, Byun Y-H. 2021. Climate Change Projection in the Twenty-First Century Simulated by NIMS-KMA CMIP6 Model Based on New GHGs Concentration Pathways. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13143-021-00225-6>
- Swart NC et al. 2019. The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5). *Geoscientific Model Development.* 12(11), 4823-4873.
- Taylor KE. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
- Tatebe H, Ogura T, Nitta T, Komuro Y, Ogochi K. et al. 2019. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 12, 2727-2765.
- Voldoire A, Sain-Martin D, Senesi S, Decharme B, Alias A, Chevallier M. et al. 2019. Evaluation of CMIP6 DECK Experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems.* 11(7),

- 2177-2213.
- Volodin E, Gritsun A. 2018. Simulation of observed climate changes in 1850-2014 with climate model INM-CM5. *Earth System Dynamics*, 9, 1235-1242.
- Wehner M, Gleckler P, Lee J. 2020. Characterization of long period return values of extreme daily temperature and precipitation in the CMIP6 models: Part 1, model evaluation. *Weather and Climate Extremes*, 30, 100283.
- WMO, 2019. WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018. WMO-No.1233
- Wu T, Lu Y, Fang Y, Xin X, Li L, Li W, Jie W et al. 2019a. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 12, 1573-1600.
- Wu T, Zhang F, Zhang J, Jie W, Zhang Y, Wu F, Li L et al. 2020. Beijing Climate Center Earth System Model version1 (BCC-ESM1): model description and evaluation of aerosol simulations. *Geoscientific Model Development*, 13, 977-1005.
- Xin X, Wu T, Zhang J, Yao J, Fang Y. 2020. Comparison of CMIP6 and CMIP5 simulations of precipitation in China and the East Asian summer monsoon. *International Journal of Climatology*, 40(15), 6423-6440.
- Yan G, Wen-Jie D, Fu-Min R, Zong-Ci Z, Jian-Bin H. 2013. Surface air temperature simulations over China with CMIP5 and CMIP3. *Advances in climate change research*, 4(3), 145-152.
- Yang J, Ren J, Sun D, Xiao X, Xia JC, Jin C, Li X. 2021. Understanding land surface temperature impact factors based on local climate zones. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102818.
- Yukimoto S, Kawai H, Koshiro T, Oshima N, Yoshida K. et al. 2019. The meteorological research institute earth system model version 2.0(MRI-ESM2.0): Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 97(5), 931-965.
- Zhang H, Zhang M, Jin J, Fei K, Ji D, Wu C, Zhu J, et al. 2020. Description and Climate simulation performance of CAS-ESM version2. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 12(12), e2020MS002210.
- Zelinka MD, Myers TA, McCoy DT, Po-Chedley S, Caldwell PM, Ceppi P, Taylor KE. 2020. Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models. *Geophysical Research Letters*, 47(1), e2019GL085782. <https://doi.org/10.1029/2019GL085782>
- Zhou B, Wen QH, Xu Y, Song L, Zhang X. 2014. Projected changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 multimodel ensembles. *Journal of Climate*, 27(17), 6591-6611.
- Zhu YY, and Yang S. 2020. Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5. *Advances in Climate Change Research*, 11(3), 239-251.