미래 극한강우량 산정을 위한 기후모델의 선정

Selecting Climate Models to Determine Future Extreme Rainfall Quantiles

김성훈* · 신주영** · 안현준*** · 허준행****

Kim, Sunghun*, Shin, Ju-Young**, Ahn, Hyunjun***, and Heo, Jun-Haeng****

Abstract

Many countries have been undertaking research on adaptation to the impacts of climate change. This study evaluated the performance of global climate models (GCMs) and regional climate models (RCMs) in terms of selecting the proper climate model to determine future extreme rainfall quantiles. This analysis used 60 sites with more than 30 years of rainfall data. Precipitation data were extracted from 19 models (13 GCMs and 6 RCMs) for the historical period 1976-2005, as provided by the Climate Change Adaptation for Water Resources (CCAW) research group. Observed data were also extracted for the same period and hydrological statistics for the annual maximum (AM) were calculated to compare the performances of the climate models applied. The simulated data was bias-corrected using daily and AM data, with each result used to compare the characteristics of the climate models. It was found that the conventional bias-correction method using daily data had a limitation application in frequency analysis of extreme rainfall quantiles. As a result, the MRI-CGCM3 and HadGEM3-RA (12.5 km) climate models were found to properly simulate the statistical characteristics of extreme rainfall quantiles in Korea. It is expected that these models might be appropriate to estimate future rainfall quantiles.

Key words : Climate Change, Bias Correction, Extreme Rainfall Quantile, Climate Model Selection

요 지

현재 많은 국가에서 기후변화 영향에 적응하기 위하여 시나리오 기반의 다양한 연구를 진행하고 있다. 본 연구에서는 미래 극한강우량을 산정하기 위한 기후모델을 선정하고자 전지구기후모델(Global Climate Models, GCMs)과 지역기후모델(Regional Climate Models, RCMs)의 모의 성능을 평가하였다. 분석을 위하여 기후변화대비수자원적용기술개발연구단(Climatic Change Adaptation for Water Resources, CCAW)에서 제공하고 있는 19개의 모델(GCMs 13개, RCMs 6개)의 자료로부터 관측 기간이 30년 이상인 기상청 60개 지점을 대상으로 과거기간(1976~2005)의 강수(Precipitation) 자료를 추출하였다. 또한, 동일 기간에 대한 관측 자료를 구축하여 연 최대값(Annual Maximum, AM)에 대한 수문통계량을 산정하였고, 이를 각 기후모델에서 산정된 수문통계량과 비교·분석하였다. 자료의 편의보정은 일자료를 이용한 방법과 연최대자료를 이용한 방법으로 구분하여 진행하였고, 그 결과를 이용하여 기후모델의 특성을 비교·분석하였다. 기존 일자료 기반의 편의보정 방법은 극치 수문자료의 빈도해석에 적용하는데 한계가 있음을 확인했다. 또한, MRI-CGCM3, HadGEM3-RA (12.5 km) 기후모델의 결과가 우리나라 극치 강우 자료의 통계적 특성을 잘 모의하는 것으로 나타났으며, 이를 이용하여 미래 확률강우량 산정 시 보다 합리적인 결과를 도출할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기후변화, 편의보정, 극한강우량, 기후모델 선정

*정회원, 연세대학교 건설환경공학과 박사과정(E-mail: sunghun@yonsei.ac.kr)

Member, Ph.D Candidate, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

**정회원, 국립기상과학원 응용기상연구과 연구원(E-mail: ausran@naver.com)

Member, Researcher, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences

***정회원, 연세대학교 건설환경공학과 박사과정(E-mail: kamjakang@yonsei.ac.kr)

Member, Ph.D Candidate, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

****교신저자, 정회원, 연세대학교 건설환경공학과 교수(Tel: +82-2-2123-2805, Fax: +82-2-6280-1597, E-mail: jhheo@yonsei.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

1. 서 론

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)에서 배포하는 제5차 평가 종합보고서에서는 최근 발생하고 있는 폭염, 가뭄, 홍수, 태풍 등과 같은 극한 현상은 더욱 빈번하게 발생할 것이며, 변화의 속도는 예상보다 빠르게 나타날 것으로 전망하고 있다. 기후변화는 세계 곳곳에서 다양한 형태로 나타나고 있으며, 앞으로도 계속 변화할 것으로 전망된다. 이와 같은 기후변화로 인한 극한 수문 사상의 변화는 강우 강도와 빈도의 변화로 이어졌고, 해마다 막대한 피해를 일으키고 있다. 국내외 다양한 연구에서 기후변화가 수문 현상에 미치는 영향을 분석하고 평가하여 미래 수자원의 변화를 전망하는 연구가 수행되어왔다(Prudhomme and Davies, 2008a, 2008b; Bae et al., 2011; Jang et al., 2015; Tye and Cooley, 2015). 일반적으로 기후변화에 따른 수문 영향을 분석하는 연구는 전지구기후모델(Global Climate Models, GCMs) 또는 지역기후모델(Regional Climate Models, RCMs)에서 생산된 자료를 활용하여 다양한 수문자료 분석 방법에 적용하여 수행된다.

기후변화 시나리오 기반의 극치 수문자료 분석에 관한 연구를 살펴보면, Kim et al. (2011)은 기상청에서 제공하는 A1B (Fourth Assessment Report, AR4) 시나리오를 이용하여 9개 지점을 대상으로 미래 확률강우량을 세 가지 방법으로 산정하고 각 지점에 적합한 방법을 제시하였다. Seo et al. (2012)는 CGCM3.1, CNRM-CM3, CSIRO-MK3.0, ECHAM5 / MPI-OM 모델의 연강수량과 관측된 연최대강수량 사이의 관계를 이용하여 양상불 확률강우량을 산정하는 방법을 제안하였고, 10개 지점에 적용하여 일반적인 확률강우량 산정방법 보다 향상된 결과를 확인했다. Park et al. (2013)은 HadGEM3-RA(12.5 km) 모델의 RCP4.5 시나리오 자료를 이용하여 우리나라 30개 저수지 유역의 미래 Intensity-Duration-Frequency (IDF)곡선을 산정하여 기후변화에 따른 영향을 분석하였다. Lee et al. (2017)는 충주댐 유역을 대상으로 기상청에서 제공하는 RCM 모델인 HadGEM3-RA (12.5 km) 자료를 이용하여 미래 Probable Maximum Precipitation (PMP)를 산정하여 변화 경향을 전망하였다. Kim et al. (2018)은 HadGEM3-RA (12.5 km) 모델의 RCP 8.5 시나리오 3-, 24-시간 자료와 부산지점의 관측 강수량 자료를 이용하여 RCM의 시간해상도가 미래 IDF 곡선의 추정에 미치는 영향을 분석하였다. Bae et al. (2011)는 기후변화 연구결과가 가지는 불확실성을 고려하기 위해 IPCC SRES A2, A1B, B1 시나리오와, 13개 GCMs 자료, 3개의 수문모형(2~3개의 증발산량 방법) 등 총 312개의 결과를 다중 모델 앙상블(Multiple Model Ensemble, MME)기법에 적용하여 앙상블 평균과 불확실성을 동시에 제시하였다. Yoon and Cho (2015)는 CMIP5 9개 GCMs를 사용하여 근 미래(2011~2040년)의 극치 강수전망과 빈도분석을 수행하였고, MME를 통한 불

확실성을 분석하여 100년 빈도 확률강수량이 최대 10.9% 증가할 것으로 분석하였다.

기후변화의 영향을 고려하기 위하여 기후모델(GCMs, RCMs)의 모의 결과를 이용한 다양한 연구가 진행되고 있지만 GCMs의 선택에 따라 결과가 다르게 나타날 수 있다. 기후변화에서 내재한 여러 가지 불확실성 요소 중 GCMs 선택에 따른 불확실성이 가장 큰 비중을 차지하며, 일반적으로 저감 시나리오(emission scenarios), 다운스케일링기법(downscaling techniques)이 갖는 불확실성보다 크게 나타난다(Prudhomme and Davies, 2008b). 국내에서는 각 연구에서 사용 가능한 기후모델과 다운스케일링기법을 나름대로 적용하여 수행하고 있으며(Lee and Kim, 2010), 기후모델의 결과를 관련 분야에 적용하기에 앞서서 기후모델을 평가하고 선정하기 위한 연구도 꾸준히 진행되고 있다. 기후모델 선정에 관한 연구를 살펴보면, Lee and Kim (2010)은 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 4차 보고서(AR4)에서 제공하는 51개의 GCMs를 이용하여 한반도 지역의 월평균 온도와 강수량을 산정하였고, 효율성 계수, 확률밀도함수, Relative Entropy를 이용하여 이수기에 활용 가능한 4개의 GCMs를 선정하고 미래 강수량 변화를 전망하였다. Hwang (2014)은 미국 남동부 지역을 대상으로 17개 GCMs 자료를 이용하여 강수량, 일 최대·최저기온, 풍속에 대한 모의 결과를 관측값과 비교하여 기후모델의 모의 성능을 평가하였고, 다양한 기후모델의 불확실성을 고려한 합리적인 전망을 위해서 모델 평가가 선행되어야 함을 강조한 바 있다. Eum and Cannon (2017)은 CMIP5 20개 GCMs를 이용하여 우리나라 기상청 60개 지점을 대상으로 강수(precipitation, PRCP), 최저온도(minimum temperature, TMIN), 최고온도(maximum temperature, TMAX)를 네 가지 다운스케일링기법을 적용하여 생산하였고, Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)를 이용하여 모델과, 다운스케일링기법을 평가하였다. Hwang et al. (2018)은 29개 GCMs를 이용하여 한반도 지역에 대한 강우특성 공간분포를 분석하고, GCMs 산출물의 재현성을 평가하였고, 한반도 지역만을 대상으로 평가한 경우 MPI_ESM_MR과 CMCC center 계열 모델의 재현성이 높게 나타나는 것을 확인하였다.

위와 같이 기후변화 시나리오를 적용하기 위한 기후모델의 평가 및 선정에 관한 연구는 꾸준히 수행되고 있으나, 대부분의 기후모델은 일자료(daily rainfall data)를 기반으로 생산되어 관측값과의 보정도 일자료를 이용하고 있다. 일자료를 이용하여 보정된 자료를 극한강수량 산정과 같은 수문 통계분석 방법에 적용할 경우 기후모델의 선정에서와는 다른 불확실성이 발생할 수 있다. 또한, 보정된 기후모델 자료가 극치 값이 갖는 통계적 특성을 재현하는 데에는 한계가 있다. Um et al. (2016)은 일자료 기반으로 편의보정된 자료를 극치 수문분석에 적용할 경우 발생하는 한계를 보완하고자 기존 gamma분포를 이용하여 quantile mapping 적용

한 방법과 AM 자료에는 GEV분포를 적용한 방법을 결합한 hybrid quantile mapping 방법을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 미래 확률강우량 산정 시 극치 자료에서 발생할 수 있는 불확실성 문제를 보완하고자 편의보정시 일자료를 이용한 방법과 AM 자료를 이용한 방법을 비교·검토하였다. 기후모델 자료는 기후변화수자원적응기술개발(Climate Change Adaptation for Water Resources, CCAW) 연구단에서 선정한 13개 GCMs 자료와 COordinated Regional climate Downscaling EXperiment-East Asia (CORDEX-EA) 에서 제공하는 5개의 RCMs 자료 및 기후정보포털에서 제공하는 RCP한반도(12.5 km) RCM 자료를 이용하여 기후모델의 모의 성능을 평가하였다. 기후모델 자료의 현재모의기간(historical period) 자료와 관측 자료로부터 산정된 수문통계량을 비교·분석하였다. 이를 통하여 기후변화 시나리오 기반의 극한강우량 산정에 있어서 적절한 기후모델을 제시하고자 한다.

2. 연구 범위 및 자료

2.1 관측 자료

본 연구는 전술한 바와 같이 극한강우량 산정을 위한 적정 기후모델을 선정하기 위한 목적으로 분석을 진행하였

다. 분석을 위하여 기상청에서 제공하는 종관관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 자료 중 30년 이상의 강우 관측 자료를 보유한 60개 지점을 대상 지점으로 선정하였다(Fig. 1, Table 1). 각 지점의 관측 강우 자료는 1961~2017년의 자료가 존재하고 있으나, 기후모델에서 생산된 현재모의기간의 자료(GCMs: 1976~2005년 /RCMs: 1979~2005년)와 시간적 범위를 동일 조건으로 맞추기 위하여 1976/1979~2005년의 관측 자료를 분석에 이용하였다.

2.2 기후변화 시나리오 자료

본 연구에서는 Table 2와 같이 총 19개의 기후모델 자료(GCMs 13개, RCMs 6개)를 이용하여 분석을 진행하였다. 13개의 GCMs 자료는 CCAW 연구단에서 26개의 GCMs 자료를 평가하여 선정된 기후변화 시나리오 자료로 APEC 기후센터(APEC Climate Center, APCC)의 APEC Climate Center Data Service System (ADSS)를 통해 제공하고 있다. 또한, CORDEX-EA 홈페이지(cordex-ea.climate.go.kr)에서는 5개의 RCMs 자료를 제공하고 있으며, RCP한반도(12.5 km) 자료는 기후정보포털(www.climate.go.kr)을 통하여 제공하고 있다. Table 2에 본 연구에서 이용한 기후모델 자료의 상세정보를 정리하였다.

Fig. 1. The Location of Used ASOS Stations

Table 1. Information of the Used ASOS Stations

No.	Station code	Name	Latitude	Longitude	No.	Station code	Name	Latitude	Longitude
1	90	Sokcho	38° 15'	128° 34'	31	202	Yangpyeong	37° 29'	127° 30'
2	100	Daegwallyeong	37° 40'	128° 43'	32	203	Icheon	37° 16'	127° 29'
3	101	Chuncheon	37° 54'	127° 44'	33	211	Inje	38° 03'	128° 10'
4	105	Gangneung	37° 45'	128° 54'	34	212	Hongcheon	37° 41'	127° 53'
5	108	Seoul	37° 34'	126° 58'	35	221	Jecheon	37° 09'	128° 12'
6	112	Incheon	37° 28'	126° 38'	36	226	Boeun	36° 29'	127° 44'
7	114	Wonju	37° 20'	127° 57'	37	232	Cheonan	36° 47'	127° 07'
8	119	Suwon	37° 16'	125° 59'	38	235	Boryeong	36° 19'	126° 34'
9	127	Chungju	36° 58'	127° 57'	39	236	Buyeo	36° 16'	126° 55'
10	129	Seosan	36° 46'	126° 30'	40	238	Geumsan	36° 06'	127° 29'
11	130	Ulsin	36° 59'	129° 25'	41	243	Buan	35° 44'	126° 43'
12	131	Cheongju	36° 38'	127° 27'	42	244	Imsil	35° 37'	127° 17'
13	133	Daejeon	36° 22'	127° 22'	43	245	Jeongeup	35° 34'	126° 52'
14	135	Chupungnyeong	36° 13'	128° 00'	44	247	Namwon	35° 24'	127° 20'
15	138	Pohang	36° 02'	129° 23'	45	256	Suncheon	35° 04'	127° 14'
16	140	Gunsan	36° 00'	126° 45'	46	260	Jangheung	34° 41'	126° 55'
17	143	Daegu	35° 53'	128° 37'	47	261	Haenam	34° 33'	126° 34'
18	146	Jeonju	35° 49'	127° 09'	48	262	Goheung	34° 37'	127° 17'
19	152	Ulsan	35° 33'	129° 19'	49	272	Yeongju	36° 52'	128° 31'
20	156	Gwangju	35° 10'	126° 54'	50	273	Mungyeong	36° 37'	128° 09'
21	159	Busan	35° 06'	129° 02'	51	277	Yeongdeok	36° 32'	129° 25'
22	162	Tongyeong	34° 51'	128° 26'	52	278	Uiseong	36° 21'	128° 41'
23	165	Mokpo	34° 49'	126° 23'	53	279	Gumi	36° 08'	128° 19'
24	168	Yeosu	34° 44'	127° 45'	54	281	Yeongcheon	35° 58'	128° 57'
25	170	Wando	34° 24'	126° 42'	55	284	Geochang	35° 40'	127° 55'
26	184	Jeju	33° 31'	126° 32'	56	285	Hapcheon	35° 34'	128° 10'
27	188	Seongsan	33° 23'	126° 52'	57	288	Miryang	35° 29'	128° 45'
28	189	Seogwipo	33° 15'	126° 34'	58	289	Sancheong	35° 25'	127° 53'
29	192	Jinju	35° 09'	128° 02'	59	294	Geoje	34° 53'	128° 36'
30	201	Ganghwa	37° 42'	126° 27'	60	295	Namhae	34° 49'	127° 56'

Table 2. Selected Climate Models (13 GCMs, 6 RCMs)

No.	Models		Resolution	Institution
1	GCMs	CanESM2	2.813 × 2.791	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
2		CESM1-BGC	1.250 × 0.942	National Center for Atmospheric Research
3		CMCC-CM	0.750 × 0.748	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
4		CMCC-CMS	1.875 × 1.865	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
5		CNRM-CM5	1.406 × 1.401	Centre National de Recherches Meteorologiques
6		GFDL-ESM2G	2.500 × 2.023	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
7		HadGEM2-AO	1.875 × 1.250	Met Office Hadley Centre
8		HadGEM2-ES	1.875 × 1.250	Met Office Hadley Centre
9		INM-CM4	2.000 × 1.500	Institute for Numerical Mathematics
10		IPSL-CM5A-LR	3.750 × 1.895	Institut Pierre-Simon Laplace
11		IPSL-CM5A-MR	2.500 × 1.268	Institut Pierre-Simon Laplace
12		MRI-CGCM3	1.125 × 1.122	Meteorological Research Institute
13		NorESM1-M	2.500 × 1.895	Norwegian Climate Centre
14	RCMs	HadGEM3-RA	0.440 × 0.440 (50 km)	National Institute of Meteorological Research
15		RegCM		Kongju National University
16		SNU-RCM		Seoul National University
17		SNU-WRF		Seoul National University
18		YSU-RSM		Yonsei University
19		HadGEM3-RA	0.110 × 0.110 (12.5 km)	National Institute of Meteorological Research

3. 분석 방법

본 연구는 Fig. 2와 같은 절차로 분석·평가를 진행하였고 관측 강우 자료는 기후모델의 현재 모의기간인 1976~2005년의 자료를 적용하였다. 분석은 편의보정 방법에 따라 두 가지 경우로 구분하여 진행하였다. CASE 1은 지점별로 생산된 일자료를 관측값의 일자료를 이용하여 편의보정(Bias Correction)을 수행하고, AM 자료를 추출하여 분석에 이용한 방법이다. SNU-WRF(17), YSU-RSM(18) 모델은 일부 변수에 대한 문제로 일자료 기반의 다운스케일링에서 부적합하다고 판단되어 분석에서 제외되었다([ftp://adss.apcc21.org/CMIP_CAT/cordex_nc/](http://adss.apcc21.org/CMIP_CAT/cordex_nc/)). CASE 2는 각 지점별 일자료를 생산한 후 연최대값(Annual Maximum, AM)을 추출하여 이를 관측값의 AM 자료 기반으로 편의보정을 수행한 방법이다.

Fig. 2. Procedure of this Study

19개 기후모델과 관측값으로부터 AM 자료를 추출하고 수문통계량을 산정하였고, 이를 절대오차(Absolute Error, AE), 절대상대오차(Absolute Relative Error, ARE), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 평균상대제곱근오차(Relative Root Mean Square Error, RRMSE) 등을 이용하여 비교·분석하였다. 이를 통하여 기후변화 시나리오를 이용한 극한강우량 산정에 적절한 모델을 선정하고자 한다.

3.1 적합도 검정

적합도 검정(Goodness of fit test, GOF test)은 각 관측지점

의 강우 자료에 대하여 확률분포형별 유의수준(5%)에 대한 적합도를 검토하는 것으로 빈도해석의 중요한 절차 중 하나이다. 기후모델에서의 강수(precipitation) 자료는 대부분 일(daily) 단위로 생산되기 때문에, 본 연구에서는 우리나라 기상청 60개 지점을 대상으로 1961년부터 2017년까지의 일자료를 이용하여 AM 자료를 추출하였고, 이를 χ^2 -검정(CS), Kolmogorov-Smirnov검정(K-S), Cramer von Mises검정(CVM), PPCC검정(PPCC), modified Anderson-darling검정(MAD) 등을 적용하여 적정 확률분포형을 선정하였다. 우리나라의 극치 수문 자료의 빈도해석에서는 GEV (Generalized Extreme Value), Gumbel, GLO (Generalized Logistic) 분포형이 자주 이용되며, 이들 분포형에 대한 적합도 검정 결과는 Table 3과 같다.

GEV 분포형의 경우, K-S검정, CVM검정, MAD검정 등에서 60개 지점 모두 적합도 검정을 통과하였고, Gumbel 분포 및 GLO분포와 비교하여 통과율이 가장 높게 나타났다. 그러나, Gumbel 분포형은 CVM검정에서는 60개 지점 모두 통과하였으나 다른 분포형과 비교하여 통과율이 가장 작게 나타나는 것을 확인했다(Table 4).

따라서, 기후변화 시나리오 기반의 미래 확률강우량 산정 시 GEV 분포가 가장 적합할 것으로 판단되며, 극치 수문 자료의 편의보정에도 관측 자료의 적합도 검정 결과가 우수한 GEV 분포 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

3.2 편의보정(Bias Correction)

미래 수문 현상을 전망하기 위하여 기초자료로 사용되는 GCMs 및 RCMs의 강수 자료는 실제 관측값과 비교하여 편의(Bias)를 보정 하는 것은 기후변화 연구에 있어서 필수적인 과정 중 하나이며, 편의를 보정 하기 위한 다양한 방법들이 존재한다. 본 연구에서는 기후모델 자료는 Bias Correction / Spatial disaggregation (BCSD)와 기후시나리오 내 장기추세를 반영하기 위한 Quantile Delta Mapping (QDM) 방법을 결합한 Spatial Disaggregation with Quantile Delta Mapping (SDQDM) 기법으로 공간적 상세화를 수행한 자료를 활용하였다(Eum and Cannon, 2017). CASE 1은 일자료를 기반으로 편의보정을 수행하고 AM 자료를 추출하여 수문 통계분석에 적용한 방법이다. ADSS에서는 CORDEX-EA 자료 중 SNU-WRF(17), YSU-RSM(18)은 일부 변수에 대한 문제로 일자료를 기반으로한 다운스케일링에서 부적합하다고 판단하여 두 모델의 자료를 제외한 자료를 제공한다. 따라서, SNU-WRF(17), YSU-RSM (18) 모델은 CASE 1의 분석에서 제외되었다. 그러나 강우의 AM 자료가 존재하는 경우 강우 빈도해석이 가능하기 때문에, CASE 2에서는 19개 모델로부터 각 지점별 강수(PRCP) 일자료를 생산한 후, 연최대값(AM)을 기반으로 편의보정을 수행한 자료를 이용하여 분석을 진행하였다. 편의보정된 일자료로부터 AM 자료를 추출하였고, 수문 통계량 산정에 이용하였다.

Table 3. Results of GOF Test for 60 ASOS Stations

No.	Code	GEV					GUM					GLO				
		CS	K-S	CVM	PPCC	MAD	CS	K-S	CVM	PPCC	MAD	CS	K-S	CVM	PPCC	MAD
1	90	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
2	100	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O
3	101	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
4	105	X	O	O	O	O	X	X	O	X	X	X	O	O	O	X
5	108	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
6	112	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
7	114	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
8	119	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
9	127	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
10	129	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
11	130	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
12	131	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O
13	133	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
14	135	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
15	138	O	O	O	O	O	X	O	O	X	X	O	O	O	O	O
16	140	O	O	O	O	O	X	O	O	O	X	X	O	O	O	O
17	143	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
18	146	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
19	152	X	O	O	O	O	O	O	O	X	X	X	O	O	O	O
20	156	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
21	159	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
22	162	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O
23	165	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O
24	168	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
25	170	X	O	O	O	O	X	O	O	O	X	X	O	O	O	X
26	184	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
27	188	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
28	189	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
29	192	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
30	201	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
31	202	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
32	203	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
33	211	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
34	212	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
35	221	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
36	226	O	O	O	O	O	X	O	O	O	X	O	O	O	O	O
37	232	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
38	235	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
39	236	O	O	O	X	O	O	O	O	X	X	O	O	O	O	O
40	238	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
41	243	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
42	244	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
43	245	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O
44	247	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
45	256	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X
46	260	O	O	O	O	O	O	O	O	X	X	O	O	O	O	O
47	261	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O
48	262	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O
49	272	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
50	273	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O
51	277	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
52	278	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
53	279	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
54	281	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
55	284	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
56	285	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O
57	288	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
58	289	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O
59	294	O	O	O	O	O	X	O	O	O	X	O	O	O	O	O
60	295	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

Table 4. Results of GOF Test (GEV, GUM, GLO)

KMA		GEV					GUM					GLO				
60 sites		CS	K-S	CVM	PPCC	MAD	CS	K-S	CVM	PPCC	MAD	CS	K-S	CVM	PPCC	MAD
%	O	91.7	100.0	100.0	98.3	100.0	90.0	98.3	100.0	83.3	83.3	86.7	100.0	100.0	100.0	95.0
	X	8.3	0.0	0.0	1.7	0.0	10.0	1.7	0.0	16.7	16.7	13.3	0.0	0.0	0.0	5.0
No.	O	55	60	60	59	60	54	59	60	50	50	52	60	60	60	57
	X	5	0	0	1	0	6	1	0	10	10	8	0	0	0	3

3.3 기후모델 모의 성능 평가

기후 모델의 모의 성능을 평가하기 위하여 지점별 관측 자료와 19개 모델의 자료로부터 연최대 강우자료를 추출하였다. 자료의 기본 통계특성을 나타내는 평균(mean), 분산(variance, var.), 왜곡도(skewness, skew.), 첨예도(kurtosis, kurt.) 등의 수문통계량을 산정하였고, 정량적인 비교를 위하여 절대오차(AE, Eq. (1)), 절대상대오차(ARE, Eq. (2)) 등을 사용하였다.

$$AE = |X_{sim,i} - X_{obs,i}| \quad (1)$$

$$ARE = \left| \frac{X_{sim,i} - X_{obs,i}}{X_{obs,i}} \right| \times 100 \quad (2)$$

여기서 $X_{sim,i}$ 와 $X_{obs,i}$ 는 각 지점의 GCM 자료와 관측값을 의미한다.

또한, 평균제곱근오차(RMSE, Eq. (3))와 평균상대제곱근오차(RRMSE, Eq. (4))를 사용하여 19개 모델의 전망 자료와 관측값의 차이를 비교하여 모델의 적합도를 평가하였다. RMSE 및 RRMSE 값이 작을수록 기후모델 자료와 관측값 사이의 오차가 작은 것으로 평가할 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{sim,i} - X_{obs,i})^2}{n}} \quad (3)$$

$$RRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{sim,i} - X_{obs,i}}{X_{obs,i}} \right)^2} \quad (4)$$

여기서 n 은 지점 수를 나타낸다.

4. 분석 결과

4.1 기본 통계량 비교(CASE 1)

기상청 60개 지점에서의 기후모델 자료와 관측값으로 수문통계량을 산정하고, AE 및 ARE 등을 사용하여 정량적인 차이를 비교하고자 box-plot으로 나타내었다(Figs. 3~4). 기후모델에 따라 지점별 AE 및 ARE 값은 다르게

산정되기 때문에 기후모델별 평균값을 이용하여 기후모델을 평가하였다. 각 지점에서 모델과 관측값의 AE를 산정한 결과는 Fig. 3과 같다. GFDL-ESM2G(6), HadGEM2-ES(8), NorESM1-M(13) 모델은 평균의 AE가 6.545, 5.258, 6.485 등으로(하위 3개) 나타나며 다른 모델과 비교하여 상대적으로 작게 나타났다. HadGEM3-RA(14), RegCM(15), HadGEM3-RA(17) 모델은 AE 값이 12.667, 14.627, 12.978 등으로(상위 3개) 17개의 기후모델 중 가장 크게 나타났다(Fig. 3(a)). 분산의 경우 CMCC-CMS(4), INM-CM4(9), NorESM1-M(13) 모델은 AE가 작은 하위 3개의 모델로 나타났고, CNRM-CM5(5), HadGEM3-RA(14), RegCM(15) 모델은 AE가 큰 상위 3개의 모델로 나타났다. 왜곡도와 첨예도의 결과는 유사하게 나타났다. CMCC-CMS(4), HadGEM2-ES(8), NorESM1-M(13) 모델은 AE가 가장 작게 나타났고, CMCC-CM(3), GFDL-ESM2G(6), IPSL-CM5A-LR(10) 모델은 AE가 가장 크게 나타났다(Figs. 3(c) and 3(d)). 앞에서 언급한 AE 및 ARE 값이 작게 나타난 하위 모델은 기후모델과 관측값 간 차이가 작게 나타나는 모델로 극한 수문 자료의 통계적 특성을 적절히 모의하는 것으로 판단된다.

기후모델의 결과와 관측값을 이용하여 ARE를 산정한 결과는 Fig. 4와 같다. CMCC-CMS(4), HadGEM2-ES(8), NorESM1-M(13) 모델은 평균의 ARE 값이 5.321, 3.746, 4.617 등으로 다른 모델보다 상대적으로 작게 나타났고, HadGEM3-RA(14), RegCM(15), HadGEM3-RA(19) 모델은 ARE 값이 9.511, 10.509, 9.538 등으로 다른 모델들과 비교하여 크게 나타남을 확인했다(Fig. 4(a)). 분산의 경우 CMCC-CMS(4), HadGEM2-ES(8), INM-CM4(9), NorESM1-M(13), SNU-RCM(16) 모델의 ARE가 작게 나타났으나, INM-CM4(9), SNU-RCM(16) 모델은 평균에 대한 ARE 값이 다소 크게 산정되며 CMCC-CMS(4), HadGEM2-ES(8), NorESM1-M(13) 모델과 비교하여 모의 성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한, CNRM-CM5(5), HadGEM3-RA(14), RegCM(15), HadGEM3-RA(19) 모델은 분산의 ARE가 다른 모델과 비교하여 현저히 크게 나타났다(Fig. 4(b)). 왜곡도와 첨예도는 CMCC-CMS(4), NorESM1-M(13), SNU-RCM(16) 모델의 ARE 값이 작게 나타났고, CMCC-CM(3), GFDL-ESM2G(6), IPSL-CM5A-LR(10), RegCM(15) 모델의 ARE 값은 다른 모델의 결과보다 크게 나타났다(Figs. 4(c) and 4(d)).

Fig. 3. Absolute Error (AE) of 17 Climate Models for 60 KMA Sites (CASE 1)

Fig. 4. Absolute Relative Error (ARE) of 17 Climate Models for 60 KMA Sites (CASE 1)

앞서 비교한 CASE 1에 해당하는 17개 기후모델로부터 우리나라 60개 지점별 수문통계량을 산정하였고, 산정된 AE, ARE 값은 기후모델별로 산술평균하여 Table 5에 나타내었다. CASE 1의 기후모델 중 CMCC-CMS(4), HadGEM2-ES(8), NorESM1-M(13) 모델의 결과가 다른 모델들과 비교하여 AE, ARE 값이 작게 산정되었으며, 이는 관측 AM 자료에 대한 모의 성능이 좋은 모델로 판단할 수 있다(Table 5의 노란색 음영). 또한, SNU-RCM(16) 모델은 전술한 세 모델과 비교할 만하며, CASE 1에 해당하는 RCM 모델 중에서는 가장 좋은 성능을 나타냈다.

4.2 기본 통계량 비교(CASE 2)

CASE 2는 기상청 60개 지점에서의 기후모델 자료로부터 AM 자료를 추출한 후 관측값의 AM 자료를 이용하여 편의보정 하였다. AM 자료로 보정된 자료를 이용한 것 외에는 CASE 1의 분석과정과 동일하게 수행하였고, 수문통계량의 AE 및 ARE 등의 정량적인 차이는 Figs. 5~6에 비교하였다. 평균을 비교해보면 MRI-CGCM3(12), SNU-WRF(17), HadGEM3-RA(19) 모델의 AE가 0.590, 0.628, 0.598 등으로 다른 모형들과 비교하여 작게 나타났고, CanESM2(1), IPSL-CM5A-LR(10), NorESM1-M(13) 모델의 AE가 1.171, 1.086, 1.136 등으로 상대적으로 크게 나타났다(Fig. 5(a)). 분산의 경우 INM-CM4(9), MRI-CGCM3(12), HadGEM3-RA(19) 모델의 AE가 작게 나타났고, CanESM2(1), CMCC-CMS(4), IPSL-CM5A-LR(10) 모델의 AE가 크게 나타났다(Fig. 3(b)). 왜곡도와 첨예도는 대체로 CNRM-CM5(5), HadGEM2-ES(8), INM-CM4(9), SNU-WRF(17) 모델의 결과가 작게 나타났고, CanESM2(1), CMCC-CMS(4), IPSL-CM5A-LR(10), HadGEM3-RA(14) 모델의 결과가 크게 나타났다(Figs. 5(c) and 5(d)).

ARE 값을 비교한 결과를 살펴보면, AE의 결과와 동일하게 MRI-CGCM3(12), SNU-WRF(17), HadGEM3-RA(19) 모델이 평균의 ARE 결과가 작게 나타났고, CanESM2(1), IPSL-CM5A-LR(10), NorESM1-M(13) 모델의 ARE 값이 상대적으로 크게 나타남을 확인했다(Fig. 6(a)). 분산의 경우 HadGEM2-

ES(8), MRI-CGCM3(12), HadGEM3-RA(19) 모델의 ARE가 작게 나타났고, CanESM2(1), IPSL-CM5A-LR(10), NorESM1-M(13) 모델에서 ARE가 크게 나타났다(Fig. 6(b)). 왜곡도와 첨예도는 HadGEM2-ES(8), MRI-CGCM3(12), SNU-RCM(16) 모델의 ARE 값이 다른 모델들과 비교하여 작게 나타났고, CanESM2(1), CMCC-CMS(4), HadGEM2-AO(7), IPSL-CM5A-LR(10), NorESM1-M(13), HadGEM3-RA(14) 모델의 ARE는 상대적으로 크게 나타났다(Figs. 6(c) and 6(d)).

Table 5와 같은 방법으로 CASE 2에 해당하는 19개 기후모델로부터 산정된 AE, ARE 값을 정리하여 Table 6에 나타내었다. 19개 기후모델 중 CanESM2(1), CMCC-CMS(4), HadGEM2-AO(7), IPSL-CM5A-LR(10), NorESM1-M(13), HadGEM3-RA(14) 모델은 다른 기후모델과 비교하여 관측값과의 차이가 크게 나타났으며, 관측 자료의 특성을 모의하는 것에 한계가 있는 것으로 생각된다. 반면, HadGEM2-ES(8), MRI-CGCM3(12), SNU-RCM(16), SNU-WRF(17), HadGEM3-RA(19) 모델의 결과는 AE, ARE 값이 상대적으로 작게 나타나며 관측 AM 자료의 통계적 특성을 적절히 모의하는 것으로 판단된다(Table 6의 노란색 음영).

4.3 기후모델의 적용성 평가

CASE 1과 CASE 2의 결과를 종합하여 AE, ARE의 값(Tables 5~6)을 크기순으로 순위를 매기면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 7에서 1~2행은 AE, ARE를 나타내고, 1~2열은 CASE 1과 CASE 2를 나타낸다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 CASE 1보다 CASE 2의 순위가 전반적으로 더 낮게 나타났으며, 평균과 분산을 비교하였을 때 CASE 2에서 가장 성능이 떨어지는 모델이 CASE 1의 모델보다 좋은 결과를 나타냈다. 또한, CASE 1에서 CMCC-CMS(4), HadGEM2-ES(8), NorESM1-M(13) 모델의 결과가 관측값의 AM 자료와 비교하여 AE, ARE 값이 작게 나타났고, CASE 2의 경우에는 HadGEM2-ES(8), MRI-CGCM3(12), SNU-WRF(17), HadGEM3-RA(19) 모델의 결과가 AE, ARE 값이 작게 나타났다.

Table 5. Comparison of Hydrological Statistics Using Climate Models and Observed Data (Case 1)

		Models																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Mean AE	mean	9.345	11.539	9.219	7.253	12.236	6.545	10.942	5.258	11.323	9.165	8.078	8.807	6.485	12.667	14.627	8.611	12.978
	var.	3520.7	2889.8	3371.1	1528.5	5042.4	2216.6	2595.6	1596.4	1532.7	2663.9	2090.7	2556.3	1212.1	6035.4	5768.6	1972.5	4693.5
	skew.	0.695	0.642	0.969	0.588	0.882	1.175	0.682	0.610	0.723	0.981	0.727	0.653	0.678	0.746	0.963	0.603	0.863
	kurt.	2.585	2.514	4.263	2.235	3.301	5.721	2.731	2.175	3.040	4.424	2.761	2.466	2.613	2.536	3.801	2.427	3.097
Mean ARE	mean	6.974	8.646	6.899	5.321	9.014	4.673	8.387	3.746	8.207	6.572	5.794	6.554	4.617	9.511	10.509	6.243	9.538
	var.	110.5	95.6	111.6	43.3	157.5	74.1	87.8	43.0	30.2	92.0	73.2	83.9	26.3	189.0	168.3	54.3	146.0
	skew.	124.1	128.0	190.8	67.3	156.8	228.2	133.8	130.5	121.2	179.9	138.8	115.3	72.6	122.1	155.8	83.9	156.3
	kurt.	60.7	53.2	124.5	39.6	78.7	162.8	65.1	51.7	67.6	113.5	63.8	50.5	47.7	60.8	97.5	49.6	84.0

Fig. 5. Absolute Error(AE) of 19 Climate Models for 60 KMA Sites (CASE 2)

Fig. 6. Absolute Relative Error (ARE) of 19 Climate Models for 60 KMA Sites (CASE 2)

Table 6. Comparison of Hydrological Statistics Using Climate Models and Observed Data (Case 2)

		Models																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Mean AE	mean	1.171	0.828	0.812	1.017	0.802	0.918	0.930	0.753	1.012	1.086	0.884	0.590	1.136	0.865	0.951	0.744	0.628	0.789	0.598
	var.	1439.1	770.9	734.0	1108.5	902.8	1086.0	1042.2	755.9	712.3	1131.7	919.8	687.6	1064.8	1064.7	1067.3	806.6	807.1	788.9	606.6
	skew.	0.655	0.542	0.523	0.609	0.443	0.557	0.595	0.494	0.472	0.605	0.588	0.499	0.590	0.667	0.627	0.506	0.475	0.532	0.516
	kurt.	3.435	2.714	2.433	3.045	2.044	2.515	2.998	2.384	2.177	3.285	2.842	2.401	2.720	3.221	2.812	2.424	2.263	2.394	2.496
Mean ARE	mean	0.813	0.585	0.555	0.706	0.537	0.655	0.675	0.515	0.692	0.762	0.628	0.416	0.789	0.609	0.657	0.520	0.441	0.551	0.424
	var.	24.47	15.71	14.25	20.61	14.47	18.54	19.94	13.74	15.18	22.08	17.67	11.81	22.89	22.01	18.76	14.15	14.62	14.90	14.07
	skew.	63.87	59.16	52.57	70.16	44.10	51.93	64.91	43.12	48.90	56.81	53.80	38.98	60.59	72.92	53.10	41.92	43.82	51.18	54.10
	kurt.	76.45	61.37	47.69	73.94	41.91	45.95	67.28	43.52	49.36	73.22	56.66	38.66	59.79	81.15	58.40	45.84	48.31	52.05	59.38

Fig. 7. Rank of AE and ARE for Climate Models

기후모델은 물리적 법칙을 이용하여 만들어지고 현재 기후와 과거 기후변화를 재현하는 능력을 바탕으로 모델의 신뢰성을 평가한다. 따라서, RMSE와 RRMSE 값의 결과를 순위별로 정량화하여 Fig. 8과 같이 나타내었고, 이를 통해 기후모델의 모의 성능을 평가하였다. 앞선 AE, ARE의 결과와 유사하게 CASE 2의 결과가 CASE 1의 결과보다 RMSE와 RRMSE 값이 전반적으로 작게 산정되었다. 이는 일자료를 이용하여 편의보정을 수행한 CASE 1 방법은 관측된 AM 자료의 통계적인 특성을 표현하는데 있어서 한계가 있음을 의미한다. 따라서 기후변화 시나리오 기반의 극한강우량 산정 시 AM 자료를 이용한 편의보정 방법(CASE 2)은 일자료를 기반의 편의보정 방법(CASE 1)보다 적합할 것으로 판단된다. 또한, Table 7은 CASE 2의 결과를 정리하여 나타낸 것으로 19개 기후모델에서 산정된 수문통계량에 대한

RMSE 및 RRMSE 값이다. Table 7의 결과를 토대로 정리하면, 기후변화 시나리오 기반의 극한강우량 산정에는 GCMs 자료를 이용할 경우 HadGEM2-ES(8), MRI-CGCM3(12) 모델이 RCMs 자료의 경우는 SNU-WRF(17), YSU-RSM(18), HadGEM3-RA(19) 모델의 자료가 관측 AM 자료와의 차이가 작게 나타나며 기후모델에 대한 신뢰성이 좋을 것으로 생각된다. 특히, MRI-CGCM3(12), HadGEM3-RA(19) 모델의 결과는 관측값과의 차이가 가장 작게 나타나며 극한강우 사상의 통계적 특성을 적절하게 모의하는 것으로 판단된다(Table 7의 노란색 음영). Table 7에서 평균에 대한 RMSE 값을 비교하면 두 모델의 결과는 큰 차이가 나타나지 않았으나, 분산의 결과를 비교하면 HadGEM3-RA(19)의 결과가 가장 작게 나타났다. 이는 HadGEM3-RA(19) 기후모델이 갖는 불확실성의 범위가 MRI-CGCM3(12) 모델과 비교

Fig. 8. Results of RMSE and RRMSE for Climate Models

Table 7. Result of RMSE and RRMSE for Hydrological Statistics

Model No.	RMSE of Hydrological Statistics				RRMSE of Hydrological Statistics			
	Mean	Var.	Skew.	Kurt.	Mean	Var.	Skew.	Kurt.
1	2.237	3585.800	0.904	5.032	1.474	41.424	96.461	113.126
2	1.246	1397.418	0.776	4.102	0.868	26.241	113.157	106.481
3	1.365	1401.134	0.666	3.423	0.875	21.583	89.803	64.148
4	1.758	2418.568	0.796	4.199	1.170	33.672	126.416	108.249
5	1.669	2281.746	0.593	2.954	1.028	21.203	74.241	56.157
6	1.573	2336.034	0.719	3.750	1.144	28.590	91.236	58.695
7	1.563	2018.414	0.851	4.505	1.143	33.589	141.925	109.943
8	1.246	1465.144	0.683	3.529	0.819	22.371	75.911	65.808
9	1.680	1237.948	0.595	2.863	1.107	23.468	70.103	66.857
10	1.726	2569.645	0.873	5.035	1.204	40.132	83.452	120.214
11	1.409	1629.464	0.783	4.147	0.997	26.714	102.216	85.046
12	0.853	1302.461	0.688	3.701	0.585	16.821	56.542	51.384
13	1.851	1807.719	0.793	3.945	1.271	38.534	90.198	87.265
14	1.547	2447.074	0.883	4.439	1.045	39.146	111.183	122.049
15	1.479	2013.874	0.828	4.137	1.001	25.850	73.247	97.549
16	1.319	1427.318	0.690	3.543	0.893	20.153	57.395	61.724
17	1.089	1510.859	0.657	3.483	0.757	22.461	70.840	78.031
18	1.173	1491.085	0.733	3.463	0.798	22.551	77.361	79.751
19	0.864	910.146	0.661	3.322	0.605	19.728	78.846	83.087

하여 상대적으로 작은 것으로 간주할 수 있다. 기후모델의 선정에 따라 미래 극한강우량 산정의 결과는 크게 달라질 수 있으므로, 현재 관측된 극한 강우 사상의 특성을 가장

잘 모의하는 HadGEM3-RA(19), MRI-CGCM3(12) 모델의 결과를 사용하는 것이 기후변화 시나리오 기반의 극한강우량 산정 시 보다 합리적일 것으로 판단된다.

기후모델에서 각 지점별로 산정된 ARE 값을 공간적으로 나타내면 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 1열은 관측 자료의 통계적 특성을 비교적 잘 모의하는 것으로 나타나는 HadGEM3-RA(19) 모델의 결과이며, 2열은 관측값과 큰 차이를 보이며 적합하지 않다고 판단되는 CanESM2(1) 모델의 결과를 나타낸다. 각 지점별 ARE 값은 Table 8에 나타난 바와 같이 4개로 구분하였고, ARE 값이 작게 산정되어 적합하다고 생각되는 Class 1은 초록색으로 표시하였다. Fig. 9(a)는 앞서 언급한 두 모델로부터 산정된 평균에 대한 ARE 값을 지점별로 나타낸

것으로 CanESM2(1) 모델은 HadGEM3-RA(19) 모델의 결과와 비교하여 ARE 값이 큰 Class 4(빨간색)에 해당하는 지점이 상대적으로 많이 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 분산에 대한 ARE 결과도 유사한 수준으로 나타나며 CanESM2(1) 모델의 결과는 대체로 지점별 ARE 값이 크게 나타남을 확인할 수 있다(Fig. 9(b)). 따라서, 관측 자료의 통계적 특성을 전반적으로 잘 반영하는 HadGEM3-RA(19) 모델의 결과를 극한강우량 산정에 이용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

Fig. 9. The result of ARE (mean, var.) for 60 Sites

Table 8. Classification of ARE (mean, var.) Results

Mean			Var.		
0.0 ≤	Class 1	< 0.5	0.0 ≤	Class 1	< 15.0
0.5 ≤	Class 2	< 1.0	15.0 ≤	Class 2	< 30.0
1.0 ≤	Class 3	< 1.5	30.0 ≤	Class 3	< 45.0
1.5 ≤	Class 4		45.0 ≤	Class 4	

5. 결 론

본 연구에서는 13개의 GCMs 자료와 6개의 RCMs 자료를 이용하여 AM 자료의 수문통계량을 산정하였고, 실제 관측 강우 자료와 비교·분석하였다. 19개 기후모델의 모의 성능 평가를 위해 기상청 60개 지점을 대상으로 현재모의기간(1976~2005년)에 대한 AM 자료를 추출하였고, 각 지점의 자료로부터 계산된 수문통계량으로 관측값에 대한 AE, ARE, RMSE, RRMSE 등의 값을 산정하여 모델의 성능을 평가하였다. 자료의 분석은 일자료를 기반으로 편의보정한 CASE 1과 AM 값을 이용하여 편의보정한 CASE 2로 구분하여 수행하였고, 이를 통해 편의보정 방법에 따른 결과를 비교·분석하였다.

우리나라 60개 지점을 대상으로 관측 AM 자료를 이용하여 적합도 검정을 수행하였고, CS, K-S, CVM, PPCC, MAD 검정 방법을 적용하여 적정 확률분포형을 선정하였다. 적합도 검정 결과 GEV 분포가 K-S, CVM, MAD 검정에서 모든 지점이 검정을 통과하였고, 다른 분포형과 비교하여 통과율이 가장 높게 나타났다. 따라서, 기후변화 시나리오 기반의 미래 확률강우량 산정과 극치 수문 자료의 편의보정 시 GEV 분포를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

또한, 편의보정한 자료를 분석한 결과를 살펴보면 CASE 1은 일자료 기반으로 편의보정을 수행하였으나 관측 AM 자료와의 편의를 보정하는데에는 한계가 있었고, CASE 2가 CASE 1의 방법보다 관측된 극치 수문 자료의 통계적 특성을 잘 표현하는 것으로 나타났다. 따라서, 기후변화 시나리오를 이용하여 수문 자료의 빈도해석을 수행할 때에는 AM 자료를 이용하여 편의보정한 CASE 2 방법이 보다 적절할 것으로 판단된다.

기후모델의 결과는 현재 기후와 과거 기후변화를 재현하는 능력을 바탕으로 모델의 신뢰성을 평가할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 기후모델의 자료와 관측값에서 수문통계량을 산정하여 AE, ARE, RMSE, RRMSE 등으로 모델의 성능을 평가하였다. 일부 모델의 모의 결과는 우리나라 극치 수문자료의 특성과는 크게 차이가 나타나며, 극한강우량 산정에 한계가 있을 것으로 판단된다. CASE 2의 19개 기후 모델에 대한 RMSE 및 RRMSE 비교한 결과, HadGEM2-ES(8), MRI-CGCM3(12), SNU-WRF(17), YSU-RSM(18), HadGEM3-RA(19) 모델의 결과가 다른 모형들과 비교하여 상대적으로 모의 성능이 우수한 것으로 나타났다. 특히,

MRI-CGCM3(12), HadGEM3-RA(19) 모델의 결과가 RMSE 및 RRMSE 값이 가장 작게 나타나며 극한 강우 사상의 통계적 특성을 적절히 모의하는 것으로 판단된다.

기후변화 시나리오 기반의 미래 극한강우량 산정에는 기후모델의 선택에 따른 불확실성이 항상 내포되어있다. 본 연구에서는 모델 선택에 따른 불확실성을 최소화하고자 극한 강우의 통계적 특성에 적절한 편의보정 방법을 제시하였고, 관측값과 비교하여 현재모의기간에 대한 모의 성능이 우수한 기후모델을 선정하였다. 미래 극한강우량 산정에 적절한 기후모형의 자료는 보다 합리적인 기후변화 적응 대책을 수립하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호 18AWMP-B083066-05).

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.
- Eum, H.-I., and Cannon, A.J. (2017). Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: Application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble. *International Journal of Climatology*, Vol. 37, No. 8, pp. 3381-3397.
- Hwang, S. (2014). Assessing the performance of CMIP5 GCMs for various climatic elements and indicators over the Southeast US. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 11, pp. 1039-1050.
- Hwang, S., Cho, J., and Yoon, K.S. (2018). Assessing the skills of CMIP5 GCMs in reproducing spatial climatology of precipitation over the coastal area in East Asia. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 8, pp. 629-642.
- Jang, S.-S., Ahn, S.-R., Joh, H.-K., and Kim, S.-J. (2015).

- Assessment of climate change impact on Imha-Dam watershed hydrologic cycle under RCP scenarios. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 18, No. 1, pp. 156-169.
- Kim, K., Choi, J., Lee, J., and Kim, S. (2018). Effect of RCM temporal resolution on estimating future IDF curves. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 4, pp. 341-352.
- Kim, Y., Yeo, C.G., Seo, G.S., and Song, J.W. (2011). Estimation of regional probable rainfall based on climate change scenarios. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 3, pp. 29-35.
- Lee, J.-K., and Kim, Y.-O. (2010). A study on selection of standard scenarios in Korea for climate change. *Climate Change Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 59-73.
- Lee, O., Jo, D. J., and Kim, S. (2017). Future PMP estimation of Chungjudam watershed under KMA climate change scenarios. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 1, pp. 365-373.
- Park, J., Kang, M.S., Song, I., Hwang, S.H., and Song, J.-H. (2013). Development of IDF curves based on RCP4.5 scenario for 30-reservoirs in South Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 6, pp. 145-159.
- Prudhomme, C., and Davies, H. (2008a). Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 1: baseline climate. *Climatic Change*, Vol. 93, No. 1-2, pp. 177-195.
- Prudhomme, C., and Davies, H. (2008b). Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: future climate. *Climatic Change*, Vol. 93, No. 1-2, pp. 197-222.
- Seo, L., Jeon, M., Kim, T.-W., and Kim, S. (2012). Ensemble prediction of future design rainfalls considering climate change. *J. Korea Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 2, pp. 159-171.
- Tye, M.R., and Cooley, D. (2015). A spatial model to examine rainfall extremes in Colorado's Front Range. *Journal of Hydrology*, Vol. 530, pp. 15-23.
- Um, M.-J., Kim, H., and Heo, J.-H. (2016). Hybrid approach in statistical bias correction of projected precipitation for the frequency analysis of extreme events. *Advances in Water Resources*, Vol. 94, pp. 278-290.
- Yoon, S.-K., and Cho, J. (2015). The uncertainty of extreme rainfall in the near future and its frequency analysis over the Korean Peninsula using CMIP5 GCMs. *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 48, No. 10, pp. 817-830.

Received	November 2, 2018
Revised	November 6, 2018
Accepted	November 20, 2018