pISSN 1226-6280

eISSN 2287-6138

# Calculation of future rainfall scenarios to consider the impact of climate change in Seoul City's hydraulic facility design standards

Yoon, Sun-Kwon<sup>a</sup> · Lee, Taesam<sup>b\*</sup> · Seong, Kiyoung<sup>c</sup> · Ahn, Yujin<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Research Fellow, Department of Disasters Prevention Research, Seoul Institute of Technology, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Professor, ERI, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

<sup>e</sup>Master Student, ERI, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

<sup>d</sup>Master Student, ERI, Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

Paper number: 21-023

Received: 1 April 2021; Revised: 11 May 2021; Accepted: 11 May 2021

#### Abstract

In Seoul, it has been confirmed that the duration of rainfall is shortened and the frequency and intensity of heavy rains are increasing with a changing climate. In addition, due to high population density and urbanization in most areas, floods frequently occur in flood-prone areas for the increase in impermeable areas. Furthermore, the Seoul City is pursuing various projects such as structural and non-structural measures to resolve flood-prone areas. A disaster prevention performance target was set in consideration of the climate change impact of future precipitation, and this study conducted to reduce the overall flood damage in Seoul for the long-term. In this study, 29 GCMs with RCP4.5 and RCP8.5 scenarios were used for spatial and temporal disaggregation, and we also considered for 3 research periods, which is short-term (2006-2040, P1), mid-term (2041-2070, P2), and long-term (2071-2100, P3), respectively. For spatial downscaling, daily data of GCM was processed through Quantile Mapping based on the rainfall of the Seoul station managed by the Korea Meteorological Administration and for temporal downscaling, daily data were downscaled to hourly data through k-nearest neighbor resampling and nonparametric temporal detailing techniques using genetic algorithms. Through temporal downscaling, 100 detailed scenarios were calculated for each GCM scenario, and the IDF curve was calculated based on a total of 2,900 detailed scenarios, and by averaging this, the change in the future extreme rainfall was calculated. As a result, it was confirmed that the probability of rainfall for a duration of 100 years and a duration of 1 hour increased by 8 to 16% in the RCP4.5 scenario, and increased by 7 to 26% in the RCP8.5 scenario. Based on the results of this study, the amount of rainfall designed to prepare for future climate change in Seoul was estimated and if can be used to establish purpose-wise water related disaster prevention policies.

Keywords: Climate change, Annual maximum precipitation, Temporal disaggregation, Probable precipitation

## 서울시 수리시설 설계기준의 기후변화 영향 고려를 위한 미래강우시나리오 산정

윤선권<sup>a</sup>· 이태삼<sup>b\*</sup>·성기영<sup>c</sup>· 안유진<sup>d</sup>

\*서울기술연구원 안전방재연구실 연구위원 b경상국립대학교 토목공학과 교수, °경상국립대학교 토목공학과 석사과정, '경상국립대학교 토목공학과 석사과정

#### 요 지

최근 서울시의 강수특성이 변하고 있으며, 폭우의 발생빈도와 강도가 점차 증가 추세임이 확인되고 있다. 또한, 대부분의 지역이 도시화가 이루어 져 불투수 비율이 높고 인구와 재산이 밀집되어 있어 폭우 발생 시 직접유출에 의한 홍수피해가 가중되고 있는 실정이다. 서울시는 이러한 홍수피해에 적극적으로 대응하기 위하여 침수취약지역 해소사업을 추친 중이며, 구조물적·비구조물적 다양한 대응책을 제시하고 있다. 본 연구에서는 서울시의 미래 기후변화영향을 고려한 수공구조물의 방재성능 목표 설정을 위하여 29개의 GCM의 강수량자료를 활용하여 자료 기간을 단기 (2006-2040, P1), 중기(2041-2070, P2), 및 장기(2071-2100, P3)로 구분하여 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 대한 시공간적 상세화를 실시하였다. 공간상세화는 기상청에서 관리하는 서울관측소의 강우량을 기준으로 GCM의 일자료를 Quantile Mapping을 통하여 처리하였으며, 시간 상세화는 K-Nearest Neighbor Resampling 방법과 유전자알고리즘 방법을 이용한 비매개변수 시간상세화 기법을 통하여 일자료를 시간자료로 상세화하였다. 시간상세화를 통해 각 GCM 시나리오별로 100개의 상세화 시나리오가 산출되어 총 2,900개의 상세화 시나리오를 바탕으로 IDF 곡선을 산출하고 이를 평균하여 미래 극치 강우량의 변화를 산출하였다. 산정결과, 재현기간 100년 지속시간 1시간의 확률강우량은 RCP4.5 시나리오에서 8~16%의 증가 특성을 보이고 있음을 확인하였으며 RCP8.5 시나리오의 경우 7~26%의 증가가 이루어짐을 확인하였다. 본 연구결과는 서울시의 미래 기후변화를 대비한 설계강우량 산정 및 수준목표별 수방정책을 수립하는데 활용이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어: 기후변화, 연 최대강수량, 시간분해, 확률강우량

\*Corresponding Author. Tel: +82-55-772-1797

E-mail: tae3lee@gnu.ac.kr (T. Lee)

## 1. 서 론

기후변화로 인하여 지구상에서 다양한 극치사상이 발생하고 있으며 그 빈도와 강도가 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 또한, 최근 자연재해의 형태가 다양하게 변화되어 가고 있는 양상을 보이고 있으며, 특히 강우를 기반으로 하는 자연재해(홍수, 가뭄 등)는 그 변동특성과 영향력이 타 자연재해에 비하여 범위도 넓고 강도도 강해질 수 있음을 시사하고 있다(IPCC, 2013; Wood et al., 2011; Sillmann et al., 2013; Kim et al., 2019).

기후변화에 따른 현재 및 미래의 기상 및 수문특성 변화 분석 을 위하여 전 지구 기후모델(Global Climate Models, GCMs) 자료가 활용되고 있으며, GCMs 모형별로 제공하는 온실가 스 배출 시나리오에 따른 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 자료의 사용이 필요하고, 전 세계 적으로 관련 분야 연구가 활발히 진행되고 있다(Fowler et al., 2005; Villarini et al., 2013; Rim and Kim, 2014; Yoon and Cho, 2015; Lee and Kim, 2016). Kay et al. (2006)은 영국의 HadRM3H 모형으로 모의된 강수량을 이용하여 15개 유역의 유출 및 홍수빈도 해석을 통해 주요 하천의 50년 빈도 첨두홍 수량 산정 및 장래에 약 50% 가까이 증가를 제시 한 바 있고, (Kingston et al., 2009)은 전 지구 기후모형을 이용한 수문순 환 변화에 따라 21세기에 평균 잠재증발산량이 열대지역 및 동아시아지역이 각각 14.1%, 15.4% 증가를 보인 바 있으며, Villarini et al. (2013)은 결합모델 상호비교 프로젝트 5(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5) 모델을 적용한 RCP 4.5 및 RCP8.5에 대한 계절에 따른 강수량 변화에 대한 분석을 수행한 바 있다.

국내의 경우 Kwon et al. (2007)은 과거 10년간(1996 ~ 2005년) 한반도의 평균기온이 0.6°C 상승 및 전체와 여름철 강수량이 각각 11% 및 18% 증가됨을 제시였고, Jang et al. (2011)은근 미래보다 먼 미래로 구분한 구간별 극한강수량의 비교연구를 수행한 바 있으며, Rim and Kim (2014)은 RCP 4.5 및 RCP 8.5에 따른 미래 기간별 강수량, 평균기온, 잠재증 발산량의 비교를 통해 서울지역 건조 및 습윤 특성 변화 연구를 수행하였다.

Yoon and Cho (2015)은 CMIP5 GCMs 자료를 활용하여 한반도 강우관측 지점별 근 미래(2011 ~ 2040년) 연 최대치 강수량의 불확실성 평가와 빈도해석을 수행한 바 있으며, Yoon et al. (2017)은 기후변화시나리오 자료 분석을 통한 우리나라의 토사 재해 위험지역에 대한 미래 극치강우 패턴 변화를 분석하였다. Lee et al. (2020)은 우리나라 남양주시를

대상으로 미래 기후변화의 강우 패턴에 대한 연구를 수행한 바 있으며, 비매개변수적 상세화 기법을 적용하여 기후변화 시나리오 일강수량자료를 시간강수량으로 분해시켜 연최대 치 시계열 자료를 바탕으로 미래 확률강수량 전망 및 강우강도-지속시간-빈도(Intensity-Duration-Frequency, IDF) 곡 선을 작성하여 제시하였다.

앞서 제시한 바와 같이 기후변화와 관련하여 수자원 분야 다양한 연구가수행된 바 있으나, 서울시와 같은 도시지역의 강우 -유출 모의 등에 적용하기 위해서는 일(Daily) 단위로 제공되고 있는 미래 전망 강수량자료의 시간(Hourly) 단위로 상세화시킬 필요성이 있다. 현재 서울시를 대상으로 다양한 기후모형에 의한 기후변화시나리오 자료의 시간 상세화 연구는 수행된바 없으며, 미래 강수의 불확실성 전망 및 확률강우량변화분석을 위해서는 기후변화시나리오 자료의 시간 분해 결과를 바탕으로 수공구조물의 방재성능 목표를 제시할 필요가 있다. 따라서본 연구에서는 앞서 제시한 Lee et al. (2020)의 연구 방법론을 바탕으로 서울지역의 기후변화시나리오 자료의 시간상세화를 실시하였으며, 미래 2100년까지 지속시간별 연최대치강수량계열을 추출하여 재현기간별 IDF 곡선을 제시하여서울시의수준목표별수방 정책수립에 활용할 수 있도록하였다.

## 2. 연구 대상지역

서울시의 경우 시가지가 넓어 강수가 토양에 흡수되지 못하고 배수시설로 곧바로 흘러듦으로 강수량이 많은 경우 침수 피해가 발생한다. 서울시의 과거 35년간(1984 ~ 2018년)의 풍수해 피해 특성을 살펴보면 태풍에 의한 피해보다 집중호우에 의한 침수피해가 더욱 크게 발생하였음을 확인할 수 있다. 지난 10년간(2009 ~ 2018년) 서울에는 국지성 호우에 의한 내수침수 피해가 많이 발생하였고, 과거 2010, 2011년에는 서울지역에 대규모 도심 침수(강남역, 광화문 등)와 산사태(우면산등)가 발생하였으며, 이후에는 소규모 피해가 발생하였다. 최근 서울의 집중호우 피해는 3년간(2015.5 ~ 2017.7) 총 11 회로 2015년 3회, 2016년 4회, 2017년 4회 발생하였고, 배수지원 출동 건수는 1,301건 발생하였다.

Fig. 1은 2016년 서울시 풍수해 저감종합계획 보고서를 참고하여 서울시의 128개 침수취약지역 현황을 나타내었다. 서울시는 풍수해로부터 안전한 서울을 만들기 위해 침수취약지역 34곳, 침수우려지역 43곳, 침수경미지역 51곳의 총 128개소, 1,191 ha를 선정하였고, 최근 2017년 1,270억원, 2018년 956억원, 2019년 918억원, 2020년 659억원 정도의 상당한 예

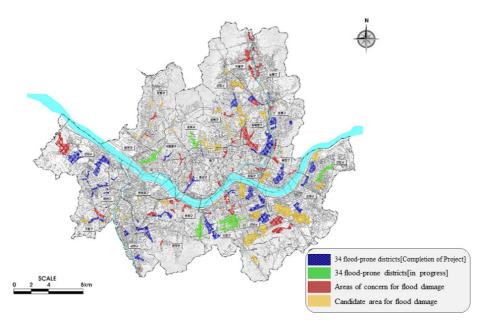


Fig. 1. Current status of 128 flood-prone areas in Seoul

산을 투입을 통하여 시간당 95 mm/hr에 해당하는 폭우에 대비할 수 있도록 구조적 저감 대책을 추진 중이다.

따라서, 본 연구에서는 서울시를 중심으로 미래 기후변화를 고려한 수리시설 설계기준을 마련하기 위해 강우 시나리오를 생성하여 미래의 패턴을 확인하는 연구를 수행하였다.

## 3. 연구방법 및 이론

본 연구에서는 서울시 기후변화에 따른 확률강우량 산정 및 시간당 목표 강우량 설정을 위하여 서울지점 관측 강우량 자료를 바탕으로 극치강우 변동분석을 실시하였고, 미래 기후변화에 따른 발생 가능한 폭우 영향을 평가하였다. 먼저, 서울시의 강우특성 분석을 위하여 기상청에서 제공하는 종관기 상관측 장비(Automated Surface Observing System, ASOS)에서 관측된 자료를 통계적 접근방법을 수행을 통한 서울시의 극치 강수량에 대한 최근 특성 분석을 수행하였다.

또한, 서울지점의 기후변화에 따른 확률강우량 산정을 위하여 CMIP5에서 제공하는 29개 GCMs으로부터 추출된 기후변화 시나리오 자료를 바탕으로 시공간적 상세화(Downscaling) 및 편이보정(Bias Correction)을 실시하였다. 이렇게 얻어진시간 강우자료를 바탕으로 2100년까지 연최대치 계열을 추출하여 빈도해석을 수행하였으며, 최적확률분포형 적용을 통한 확률강우량 산정으로 미래 기간별 IDF 곡선을 작성하였다. 본 연구의 추진 절차는 다음 Fig. 2와 같고, 사용된 기후모

형 정보를 Table 1에 나타내었다.

#### 3.1 편이보정

대부분의 GCM 원자료들은 강우를 모의하는 시스템적 에 러를 포함하고 있다. 이를 관측자료에 기반하여 보정하지 않 을 경우 심각한 편차를 지니고 있어 문제가 된다. 기후모형으 로부터 모의 된 시나리오 자료와 관측자료와의 차이가 발생하 므로 관측기간(Historical Period)에 대하여 기후모형 결과와 관측결과의 차이를 보정하는 작업이 필요하며, 이를 편이보 정(Bias Correction)이라고 한다. 본 연구에서는 GCMs 모형 별로 다양한 그리드(Grid) 형태의 강우자료를 바탕으로 서울 지역과 가장 가까운 위치의 격자를 선택하여 2100년까지 모 의된 일강우자료를 추출하였으며, 각 GCMs 모형별 격자 강 수량 자료의 추출은 Cho et al. (2018)이 개발한 AIMS (APCC Integrated Modeling Solution, http://aims.apcc21.org/) 모델 의 간편분위사상법(Simple Quantile Mapping, SQM)방법 을 사용하였다. 비매개변수방법(non-parametric approach) 인 SQM방법은 지상 관측지점의 관측자료에 대하여 독립적 으로 상세화 과정을 수행하게 되어있으며, 원시 GCM 값을 경험적 분위사상법(Empirical Quantile Mapping)을 이용하 여 관측자료와의 누가분포함수 편차로부터 GCM에 포함되 어 있는 시스템 오차를 보정하는 방법이다.

본 연구에서 사용한 분위사상법은 비초과확률을 바탕으로 하여 GCM의 기상정보를 편이보정하는 기법이다. 검증기간 (1976~2005년)을 대상으로 전 지구기후모형의 모의 된 강

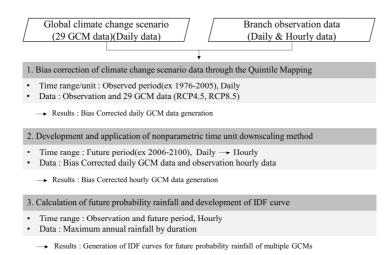


Fig. 2. Research promotion procedure

Table 1. Used climate model information and related organizations

NI	Climate Model	Grid Size		Poloted Ousenirations / Poference					
Number	(GCMs)	Lat (°)	Long (°)	Related Organizations / Reference					
1	CCSM4	0.9420	1.2500	N. d. d. C. d. d. d. D. d. d.					
2	CESM1-BGC	0.9420	1.2500	National Center for Atmospheric Research /					
3	CESM1-CAM5	0.9420	1.2500	Gent et al. (2011), Doney et al. (2009), Neale et al. (2010)					
4	CMCC-CM	0.7480	0.7500	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici /					
5	CMCC-CMS	1.8650	1.8750	Scoccimarro et al. (2011), Manzini et al. (2012)					
6	CNRM-CM5	1.4010	1.4060	Centre National de Recherches Meteorologiques / Voldoire et al. (2013)					
7	CSIRO-Mk3-6-0	1.9000	1.9000	CSIRO Marine and Atmosphere Research (Melbourne), Australia / Rotstayn <i>et al.</i> (2010)					
8	CanESM2	2.7910	2.8130	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis / Chylek et al. (2011)					
9	FGOALS-g2	1.6590	2.8130	Institute of Atmosphere physics, Chinese Academy of Sciences (TAP), and Tsinghua University (THU), China / Li et al. (2013)					
10	FGOALS-s2	1.6590	2.8130	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences / Bao et al. (2013)					
11	GFDL-CM3	2.0230	2.5000	Combanies I Florid Domestics Laboratory LICA					
12	GFDL-ESM2G	2.0230	2.5000	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA / Donner et al. (2011), Dunne et al. (2012)					
13	GFDL-ESM2M	2.0230	2.5000	Doinier et al. (2011), Dunne et al. (2012)					
14	HadGEM2-AO	1.2500	1.8750	Met Office Hadley Centre /					
15	HadGEM2-CC	1.2500	1.8750	Collins et al. (2008), Martin et al. (2011), Jones et al. (2011)					
16	HadGEM2-ES	1.2500	1.8750	Commis et al. (2006), Martin et al. (2011), Jones et al. (2011)					
17	IPSL-CM5A-LR	1.8950	3.7500						
18	IPSL-CM5A-MR	1.2680	2.5000	Institut Pierre-Simon Laplace / Dufresne et al. (2013)					
19	IPSL-CM5B-LR	1.8950	3.7500						
20	MIROC-ESM	2.7910	2.8130	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology,					
21	MIROC-ESM-CHEM	2.7910	2.8130	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) /					
22	MIROC5	1.4010	1.4060	Watanabe <i>et al.</i> (2011a, b), Watanabe <i>et al.</i> (2010)					
23	MPI-ESM-LR	1.8650	1.8750	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) /					
24	MPI-ESM-MR	1.8650	1.8750	Giorgetta et al. (2013), Jungclaus et al. (2006)					
25	MRI-CGCM3	1.1220	1.1250	Meteorological Research Institute / Yukimoto et al. (2012)					
26	NorESM1-M	1.8950	2.5000	Norwegian Climate Centre / Tjiputra et al. (2013)					
27	BCC-CSM1-1	2.7910	2.8130	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration /					
28	BCC-CSM1-1-M	1.1220	1.1250	Wu et al. (2010, 2014)					
29	INM-CM4	1.5000	2.0000	Institute for Numerical Mathematics / Volodin et al. (2010)					

우자료(GCM,  $X_i$ )를 기상청 관할 관측소의 강우관측자료 (Obs.)와 가장 잘 맞는 누적확률분포(Cumulative distribution function, CDF)를 결정하고 누적확률분포의 역함수를 이용 하여 모의 된 기후자료의 편이보정( $X_i$ )을 수행하는 기법이다. SQM 계산방법은 다음 Eq. (1)과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$X_{i}^{'} = F_{obs}^{-1}(F_{GCM}(X_{i})) \tag{1}$$

## 3.2 상세화 기법

본 연구에서는 극치패턴을 고려한 상세화 모델을 바탕으로 일자료(Daily)를 시간자료(Hourly)로 상세화시켰다. 상세화를 위하여 사용된 모델은 k-nearest neighbor resampling (KNNR)과 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 혼합한 비모수 통계적 시간 상세화 모형을 사용하였다. 이 모형에서 일단위 변수를  $Y_i$ 로 설정하면, 이에 상응하는 시간단위 변수를  $X_i$ 라 정의할 수 있다. 일단위 변수  $Y_i$ 와 시간단위 변수  $X_i$ 는 Eqs. (2) and (3)과 같다.

$$Y_{i} = [y_{i,1}, y_{i,2}, ...y_{i,n}] = [y_{i,d}]_{d \in \{1,n\}}$$
(2)

$$X_{i} = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots x_{i,m}] = [x_{i,h}]_{h \in \{1, n \times 24\}}$$
(3)

여기서, i=1,...,N, N은 자료의 길이, n은 특정 다중 일의 개수(예, 5일), m은 특정 다중 일의 시간 개수(24시간)를 의미한다. 즉, 특정 다중 일의 강수량  $Y_t$ 에 대하여시간 상세화를 하게되면  $X_t=[x_{t,1},x_{t,2},...x_{t,m}]$ 가된다. KNNR의 변수 k는 Lee and Ouarda (2011)에 의해 가장 일반적으로 적용되고 있는 선택 방식인  $k=\sqrt{N}$ 로 설정하여 분석을 수행하였다. Fig. 3은일 강우자료의 시간적 상세화 모식도를 나타내었다.

본 연구에서 수행한 KNNR 기법을 이용한 기후변화 시나

리오 자료의 시간적 상세화 과정을 정리하면 다음과 같다.

Step 1. 시간 상세화를 위해 첫 번째로 특정 다중 일의 강수  $Y_t$  와 관측된 다중 일 강수  $y_{i,d} = \sum_{h=1}^m x_{i,h}$ 의 거리(distance) 를 Eq. (4)과 같이 계산한다.

$$D_{i,d} = \sum_{d=1}^{n} (Y_{t,d} - y_{i,d})^2, i = 1, 2, ...N$$
(4)

Step 2. 산정된 거리를 오름차순으로 정리하고 k번째까지 최소거리를 가지는 시간지표(인덱스)를 저장한다.

Step 3. 결정된 k시간 인덱스들 중 임의로 하나를 추출하고 Eq. (5)와 같이 가중확률을 준다.

$$w_r = \frac{1/r}{\sum_{j=1}^{k} 1/j}, r = 1, \dots k$$
 (5)

Step 4. Step 3의 가중확률을 가지고 시간인덱스 k개 중에서 하나를 선택하고, 해당 시간의 일 자료에 대응하는 시간 단위 자료를 다음과 같이 할당한다.  $(X_p = [x_{p,h}]_{h \in 1,24})$  여기서 선택된 시간 인덱스가 p임을 가정한다.

Step 5. 유전 알고리즘 혼합과정은 다음과 같다.

Step 5.1 재생: 위의 첫 번째에서 세 번째까지의 분석절차를 통해 하나의 부가적인 시간지표를 추가로 선택하고 이를  $p^*$ 로 할당하며 Eq. (6)와 같다.

$$X_{n^*} = [x_{n^* h}]_{h \in \{1, n \times 24\}} \tag{6}$$

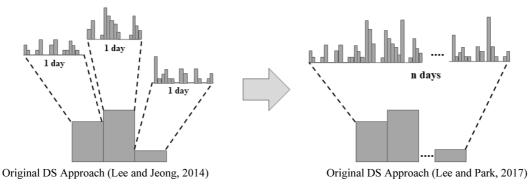


Fig. 3. Schematic diagram of daily rainfall data (Daily → Hourly)

Step 5.2 교차:  $x_{p,h}$ 의 각 요소를 Eq. (7)의 조건식을 통해  $x_{p^*,h}$ 로 교체한다.

$$x_{t,h}^* = \begin{cases} x_{p^*,h} & \text{if } \varepsilon < P_c \\ x_{p,h} & otherwise \end{cases}$$
 (7)

여기서,  $\epsilon$ 은 0과 1 사이에 균등하게 분포된 난수를 의미한다. (uniform random number)이다.

Step 5.3 변이:  $x_{p,h}$ 의 각 요소를 Eq. (8)의 조건식을 통해  $x_{\xi,h}$ 로 교체한다.

$$x_{t,h}^* = \begin{cases} x_{\xi,h} & \text{if } \varepsilon < P_m \\ x_{p,h} & otherwise \end{cases}$$
 (8)

Step 6. GA로 혼합된 시간 단위 값들을 다음 Eq. (9)의 합산조 건이 보존되도록 조정하고 마지막으로 필요한 자료가 생성될 때까지 Step 1에서 Step 6까지를 반복한다.

$$x_{t,h} = \frac{x_{t,h}^*}{\sum_{j=1}^{24} x_{t,j}^*} Y_t \tag{9}$$

#### 3.3 IDF 곡선

본 연구에서는 상세화된 연 최대치 시간강우량 자료를 바탕으로 Gumbel 분포형과 확률가중모멘트(Probability Weighted Moment, PWM) 방법을 적용하여 지속시간과 재현기간별 미래 확률강우량을 산정하였다. 우리나라의 최적확률분포형으로 「한국확률강우량도작성, 2012. 국토교통부」보고서에서는 Gumbel 분포로 채택한 바 있으며, 이번 서울시 연 최대 강수량계열의 적합도 검정결과에서도 Gumbel 분포형이 선정되었다. 그리고 확률가중모멘트(PWM)는 다른 방법에 비해서 적은 자료 수에 의한 영향이 적고 안정적이며, 극대강우사상이 포함된 자료계열에도 큰 왜곡특성이 나타나지 않고, 간단하기 때문에 최근에 많이 사용되고 있는 방법이다.

이렇게 산정된 확률강우량을 바탕으로 모델별, RCP 시나리오별, 그리고 미래 목표연도별로 IDF 곡선을 작성하였다. 본 연구를 통하여 구축된 서울시의 미래 기후변화 시나리오시 간상세화 데이터베이스(D/B)는 29개 GCM 모형에 대한 RCP 시나리오별, 미래 목표연도별로 100개씩 모의 된 결과이며, 전체 자료는 17,400개에 해당한다. 이를 RCP 시나리오와 미래 목표연도별로 각각 평균하여 하나의 시간 상세화된 기후변

화 시나리오 자료로부터 빈도해석을 수행하였으며, 이렇게 산정된 확률강우량 값을 바탕으로 IDF 곡선을 작성하였다.

## 4. 분석 결과

#### 4.1 서울시 기후변화 시나리오 자료 편이보정 결과

Fig. 4(a)는 편이보정 전과 후의 29개 전체 GCM 모델에서 추출된 연 최대강우량의 평균값을 비교한 결과이고, Fig. 4(b) 는 편이보정 전과 후의 29개 전체 GCM 모델에서 추출된 연 최대강우량을 비교한 결과이다. Fig. 4(a)의 붉은색 점선은 과거 Base 기간(1976~2005년)에 대한 편이보정 전과 후의 연최대치 계열의 평균치를 표시하고 있으며, 편이보정 전에는 연최대강우량 값의 평균이 매우 낮게 나타나고 있으며 모델간 편차가 큼을 확인할 수 있으나, 편이보정 후에는 값이 관측자료 평균(검은색실선) 수준으로 증가하였고 모델간 편차가크지 않아 안정화되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 4(b)의 검정색 선과 x마커를 가진 붉은색 점선이 겹치는 이유는 두 개의 값이 같음을 의미하며, 이는 Base 기간 동안에는 새로운 값을 나타내지 못해 항상 동일한 극치값을 보이고 있음을 의미하고 비매개변수적 편이보정 방법의 특징이라할 수 있다. 연최대치의 평균과 마찬가지로 대부분이 편이보정 후에 값이 전반적으로 커지고 있음을 확인할 수 있으며, RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에서 나타나는 일반적인 특징인 Base 기간 자료에 비하여 값이 커지고 있음을 확인할 수 있다(10, 17, 20번 GCM 제외). 다만, RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 간에는 모델별로 연상이한 특징을 보이고 있음이 확인되었다.

## 4.2 시간 상세화된 연 최대 강우자료의 통계적 특성 분석 결과

본 연구에서 사용된 29개 GCM을 대상으로 Current (Historical: 1976~2005): Base Period, RCP4.5(Future: 2006~2099), RCP8.5(Future: 2006~2099) 기간에 대하여 추출된 연 최대강우를 바탕으로 일 강수량자료를 시간자료로 상세화시켰다. 상세화된 자료에 대하여 각 지속시간별 연 최대치 강우자료를 추출하였으며, 적용한 지속시간은 1, 2, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24 그리고 48시간이다. 그리고 연 최대치 시계열 자료들의 통계학적 특성을 분석하기 위하여 경험적 누가분포함수(Empirical-CDF, ECDF)와 기본 통계치(평균: mean, 표준편차: standard deviation, 왜곡도: skewness, 최댓값: maximum) 분석을 바탕으로 상세화된 시간강우자료를 검증하였다. Fig. 5에는 지속시간별 연 최대치 자료들의 경험적 누가분포함수는

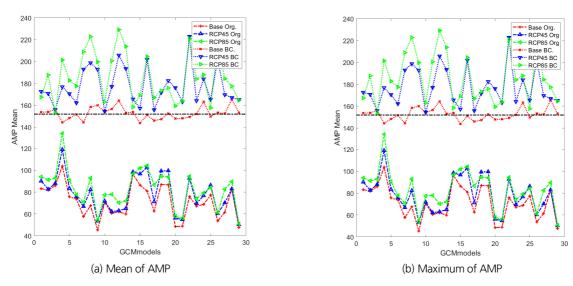


Fig. 4. Comparison result of average annual maximum rainfall and annual maximum rainfall before and after bias correction of 29 GCM Models

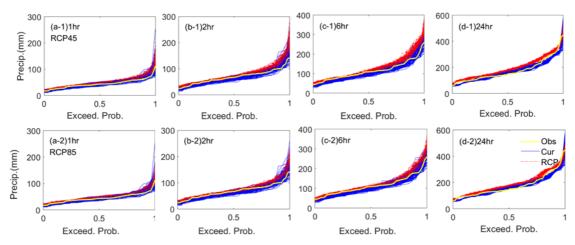


Fig. 5. ECDF of the annual maximum hourly precipitation per duration (1, 2, 6, 24 hr) of the RCP (4.5, 8.5) scenario for GCM-1 (CCSM4)

자료의 값이 나타내는 분포형의 특성을 보여줄 수 있으며, 전 체적으로 관측치(노란색 선)의 ECDF는 관측기간(청색선) 동 안의 시간 상세화 자료를 잘 따르고 있는 것으로 확인되었다.

그리고 Fig. 6은 사용된 29개 GCM 모델로부터 생산한 지속시간별 연최대치강수량계열의 통계적 특성을 상자수염도 (Box-Whisker Plot)로 나타낸 결과이다. 관측기간(Current) 에는 평균과 표준편차가 지속시간별로 관측치(적색점선)의 중앙값(Median)과 유사한 패턴을 보이고 있는 것으로 보아모델들의 편이보정이 잘 이루어져 관측기간의 통계적 특성을 적절히 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

표준편차의 경우 지속시간이 길어질수록 RCP8.5에서 RCP 4.5보다 커지는 경향이 있는 것을 확인할 수 있으며, 이는 자료의 분산과 불확실성이 커짐을 의미하므로 설계강우량 산정

시 사용되는 통계치에서 평균값보다는 표준편차의 영향이 크 게 작용되고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 전체적으로 왜곡 도의 경우 RCP4.5나 RCP8.5에서 관측기간(Current)에 비하 여 큰 차이는 보이지 않음을 확인할 수 있다.

### 4.3 서울시 미래 확률강우량 산정 및 IDF 곡선 작성 결과

본 연구에서는 Figs. 7(a) ~ 7(c)는 RCP4.5 시나리오에 대하여 서울시의 미래 목표연도별 단기(2006-2040년, P1), 중기(2041-2070년, P2), 장기(2071-2100년, P3)에 대한 IDF곡선의 변화를 관측기간(Historical Periods: 1976~2005)에 대하여 분석된 IDF곡선 결과와 비교하여 나타내었으며, Figs. 7 (d)~7(f)는 RCP8.5 시나리오에 대한 결과이다. 관측 기간의 재현기간별 확률강우량은 10, 30, 50, 80, 100년(회색실선)으로 나

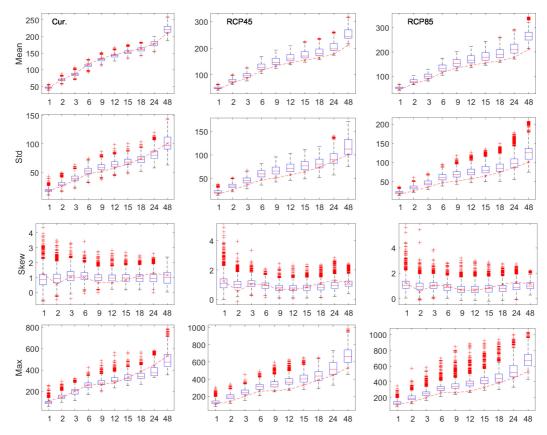


Fig. 6. Statistical characteristics analysis result by duration of maximum annual rainfall data temporal downscaling by GCM model (duration time 1, 2, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 24, 48 hr), observation period (left), RCP4.5 (Center), RCP8.5 (right), -x-marked red dotted line: observation data. The box in a boxplot represents the interquartile range (IQR) from 25 percentile to 75 percentile, and the whiskers extend to the maximum and minimum values. The data values beyond the whiskers (1.5 × IQR) are indicated by plus sign. The horizontal line inside the box represents the median

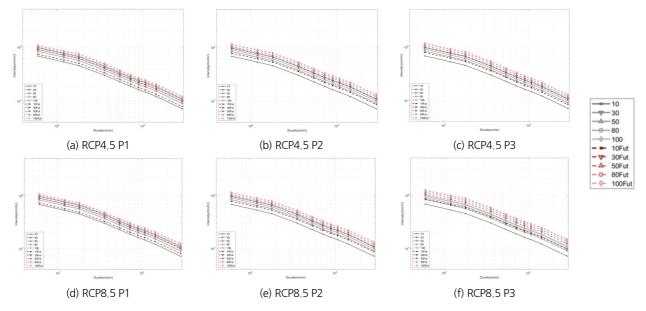


Fig. 7. Seoul city's future target year IDF curve creation results (RCP4.5 and 8.5)

Table 2. Results on the future probable precipitation during target periods in Seoul (RCP4.5)

Future	Return Periods	Hist.	Duration (hr)									
Periods	(Year)	(1 hr)	1	2	3	6	9	12	15	18	24	48
P1	10	67.8	72.9	114.7	149.5	197.8	224.1	245.3	265.1	286.4	317.0	377.6
	20	77.4	83.5	131.6	172.7	227.9	257.1	282.1	305.8	332.0	369.3	439.8
	30	83.0	89.5	141.2	186.0	245.3	276.1	303.4	329.3	358.2	399.3	475.6
	50	89.9	97.1	153.3	202.6	267.0	299.9	329.9	358.6	391.0	436.8	520.3
	80	96.3	104.1	164.4	217.8	286.8	321.7	354.1	385.4	421.0	471.2	561.2
	100	99.3	107.4	169.6	225.0	296.2	332.0	365.6	398.1	435.2	487.5	580.6
	200	108.6	117.6	185.9	247.4	325.3	363.9	401.3	437.5	479.2	537.9	640.7
P2	10	67.8	76.9	121.0	157.5	210.5	240.3	264.4	286.9	310.3	345.4	413.2
	20	77.4	88.3	139.0	182.1	243.1	276.4	304.9	331.8	360.3	402.9	481.9
	30	83.0	94.8	149.4	196.3	261.8	297.1	328.2	357.6	389.1	436.0	521.4
	50	89.9	103.0	162.4	214.0	285.2	323.1	357.3	389.9	425.0	477.3	570.8
	80	96.3	110.5	174.2	230.2	306.7	346.9	383.9	419.5	458.0	515.2	616.0
	100	99.3	114.0	179.8	237.9	316.8	358.1	396.5	433.5	473.5	533.1	637.4
	200	108.6	125.0	197.3	261.7	348.3	393.0	435.7	476.9	521.9	588.7	703.8
P3	10	67.8	77.8	122.6	160.4	213.7	242.0	264.7	285.4	307.7	339.2	402.1
	20	77.4	89.4	141.1	185.9	247.2	278.6	305.2	330.1	357.2	395.4	468.5
	30	83.0	96.1	151.7	200.5	266.5	299.6	328.6	355.7	385.7	427.7	506.6
	50	89.9	104.5	165.0	218.9	290.5	325.9	357.8	387.8	421.3	468.1	554.3
	80	96.3	112.1	177.2	235.6	312.6	350.0	384.5	417.2	453.9	505.0	598.0
	100	99.3	115.8	183.0	243.6	323.0	361.4	397.1	431.1	469.3	522.5	618.7
	200	108.6	127.0	200.8	268.2	355.4	396.7	436.4	474.2	517.2	576.8	682.8

Table 3. Results on the future probable precipitation during target periods in Seoul (RCP8.5)

Future	Return Periods	Hist.	Duration (hr)									
Periods	(Year)	(1 hr)	1	2	3	6	9	12	15	18	24	48
P1	10	67.8	72.3	112.7	146.0	194.6	222.5	244.9	265.5	287.9	320.9	385.9
	20	77.4	82.7	129.1	168.4	224.3	255.5	282.0	306.7	334.2	374.5	450.4
	30	83.0	88.6	138.5	181.2	241.3	274.5	303.4	330.4	360.8	405.3	487.5
	50	89.9	96.1	150.2	197.3	262.7	298.2	330.1	360.1	394.1	443.7	533.9
	80	96.3	103.0	161.0	212.1	282.2	320.0	354.5	387.2	424.5	479.0	576.4
	100	99.3	106.2	166.1	219.0	291.4	330.3	366.1	400.0	439.0	495.7	596.5
	200	108.6	116.3	181.9	240.7	320.1	362.2	402.0	439.9	483.7	547.4	658.8
P2	10	67.8	77.1	121.7	158.5	211.4	241.0	264.7	287.1	310.6	346.7	412.7
	20	77.4	88.3	139.5	182.8	243.3	276.2	304.1	330.8	359.6	403.5	480.2
	30	83.0	94.8	149.7	196.8	261.6	296.4	326.8	356.0	387.7	436.2	518.9
	50	89.9	102.8	162.4	214.2	284.6	321.7	355.2	387.5	422.9	477.0	567.4
	80	96.3	110.2	174.1	230.2	305.6	344.9	381.1	416.3	455.2	514.3	611.8
	100	99.3	113.7	179.6	237.7	315.5	355.9	393.4	430.0	470.4	532.0	632.8
	200	108.6	124.5	196.8	261.2	346.3	389.9	431.5	472.3	517.7	586.9	698.0
Р3	10	67.8	84.3	133.5	174.9	234.6	267.4	293.7	319.5	345.4	386.7	462.8
	20	77.4	96.7	153.4	202.2	270.6	307.1	338.0	368.8	400.3	450.5	540.0
	30	83.0	103.9	164.8	217.9	291.3	330.0	363.5	397.2	431.9	487.3	584.5
	50	89.9	112.8	179.1	237.6	317.2	358.6	395.4	432.7	471.4	533.2	640.0
	80	96.3	121.0	192.1	255.5	340.9	384.7	424.5	465.1	507.6	575.2	690.8
	100	99.3	124.9	198.3	264.0	352.2	397.1	438.4	480.5	524.7	595.1	714.9
	200	108.6	136.9	217.5	290.4	387.0	435.5	481.2	528.2	577.8	656.8	789.5

타내었고, 미래 재현기간별 확률강우량은 10, 30, 50, 80, 100 Fut (붉은색 점선)으로 구분하여 나타내었다. 또한, Tables 2 and 3은 각각 서울지점을 대상으로 RCP4.5, 8.5 시나리오에 대하여 미래 목표연도(P1~P3)에 대한 재현기간과 지속시간별확률강우량을 산정한 결과이다. 여기서 관측기간에 해당하는 Historical Periods는 1976-2005년으로 설정하였다.

도출된 결과에서 확인할 수 있듯이 전반적으로 관측기간에 비하여 미래기간에 산정된 확률강우량이 증가한 것을 확인할 수 있다. RCP4.5 시나리오의 경우 미래 기간 P2에서 증가폭이 가장 크게 나타났고 RCP8.5 시나리오의 경우 점진적인증가 경향을 보이는 것으로 확인되었으나, 미래 기간 P3에서가장 크게 증가한 것으로 나타났다. 대표적으로 미래 100년 빈도 지속시간 1시간에 대한 서울시의 확률강우량 전망결과를 살펴보면, RCP4.5 시나리오에서는 P1: 8.1% 증가, P2: 14.7% 증가, P3: 16.5% 증가한 것으로 분석되었으며, RCP8.5 시나리오에서는 P1: 6.9% 증가, P2: 14.4% 증가, P3: 26.5% 증가한 것으로 분석되었다. 서울시의 미래 기후변화에 따른확률강우량은 최대 26.5%(RCP8.5 시나리오)까지 증가 특성을 보이는 것으로 분석되었다.

## 5. 결론 및 토론

본 연구에서는 서울시의 기후변화를 고려한 미래 확률강 우량을 산정하기 위하여 관측된 기간(1976~2005년)의 일단 위 자료들을 편이보정을 하고, GCM 자료를 통계적 특성을 분석하였다. 그리고 기후변화 시나리오 자료의 극치패턴을 고려한 시간 상세화를 위해 KNNR과 유전 알고리즘을 혼합한 비모수 통계적 시간 상세화 모형을 사용하였으며, 이를 적용하여 기후변화 시나리오 자료를 시간단위(Hourly)로 상세화시킨 후 IDF 곡선을 작성하였다. 본 연구의 주요 결과 및 토론내용을 정리하면 다음과 같다.

1) 서울시의 미래확률강우량 산정을 위하여 RCP4.5, RCP8.5 시나리오로부터 기후변화 영향을 분석한 결과, 전반적으로 관측기간에 비하여 미래기간 산정된 확률강우량이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 서울시의 기후변화에 따른 확률강우량은 최대 6.9%~26.5%(RCP8.5 시나리오 기준)까지 증가 특성을 보이는 것으로 확인되었으며, 미래 강우량 증가에 따른 수공구조물 설계 등 지속적인 대비책 마련이 필요하며, 도출된 결과는 서울시의 기후변화 영향을 고려한 수준목표별 수방정책 수립에 활용이 가능하다.

- 2) 29-GCM의 기후변화 전망자료를 바탕으로 서울지역의 미래 강수량 변동특성을 분석한 결과, 증가 경향을 보이고, 이를 반영하여 도심지 침수방지를 목적으로 설치되고 있는 서울시의 하수관거, 저류시설, 빗물유출 저감시설 및 하천 등의 수공구조물 설계빈도 진단 및 재평가에 적용될수 있으며, 이를 기반으로 수방안전 분야 정책 수립을 위한기초자료로 활용이 가능하다.
- 3) 확률강우량은 하천 정비 기본계획 및 풍수해 저감종합계 획수립 등 수공구조물 설계 시 매우 중요한 인자로 사용되고 있으나, 매년 관측되는 강우자료의 반영과 확률분포형 선정 및 매개변수 추정 시 적용 방법에 따라 값이 조금씩 달라지게 된다. 따라서 지속적인 강우자료 수집과 검증된 방법으로 매년 서울지점 확률강우량을 산정하여 고시한다면 서울시 수방행정 및 관련 계획 수립에 도움이 될 것이다.
- 4) 전 지구적 기후변화 영향에 따른 홍수 및 가뭄 발생빈도와 강도가 증가 추세이므로 서울시도 기후변화 대응을 위한 보다 적극적인 수방 대응책 마련이 필요하다. 앞서 제시한 다양한 GCMs 모형과 시간 상세화 기법을 활용한 앙상블 전망과 비정상성 빈도해석 기법 등을 활용한 과학적이며 체계적인 방법으로 서울시 기후변화 불확실성 평가 및 수 문전망이 필요하며, 이를 바탕으로 도시하천 유역별 수재 해 안전대책을 체계적으로 구축해나갈 것을 제안한다.

## 감사의 글

이 논문은 서울기술연구원의 지원(2019-MR-03) 및 한국 연구재단의 중견연구사업 지원(2018R1A2B600179914)을 받아 수행되었고, 이에 감사드립니다.

#### References

- Bao, Q., Lin, P., Zhou, T., Liu, Y., Yu, Y., Wu, G., He, B., He, J., Li, L., Li, J., Li, Y., Liu, H., Qiao, F., Song, Z., Wang, B., Wang, J., Wang, P., Wang, X., Wang, Z., and Zhou, L. (2013). "The flexible global ocean-atmosphere-land system model, spectral version 2: FGOALS-s2." Advances in Atmospheric Sciences, Vol. 30, No. 3, pp. 561-576. doi: 10.1007/s00376-012-2113-9
- Cho, J., Jung, I., Cho, W., and Hwang, S. (2018). "User-centered climate change scenarios technique development and application of Korean peninsula." *Journal of Climate Change Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 13-29. doi: 10.15531/ksccr.2018. 9.1.13

- Chylek, P., Li, J., Dubey, M., Wang, M. and Lesins, G., (2011). "Observed and model simulated 20th century arctic temperature variability: Canadian earth system model CanESM2." Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, Vol. 11, No. 8, pp. 22893-22907.
- Collins, W.J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Hinton, T., Jones, C.D., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Totterdell, I., Woodward, S., Reichler, T., and Kim, J. (2008). *Evaluation of HadGEM2 model*. Technical Note 74, Meteorological Office Hadley Centre, UK, p.47.
- Doney, S.C., Lima, I., Feely, R.A., Glover, D.M., Lindsay, K., Mahowald, N., Moore, J.K., and Wanninkhof, R. (2009). "Mechanisms governing interannual variability in upper-ocean inorganic carbon system and air-sea CO2 fluxes: Physical climate and atmospheric dust." *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Vol. 56, No. 8-10, pp. 640655. doi: 10.1016/j.dsr2.2008.12.006
- Donner, L.J., Wyman, B.L., Hemler, R.S., Horowitz, L.W., Ming, Y., Zhao, M., Golaz, J.-C., Ginoux, P., Lin, S.-J., Schwarzkopf, M.D., Austin, J., Alaka, G., Cooke, W.F., Delworth, T.L., Freidenreich, S.M., Gordon, C.T., Griffies, S.M., Held, I.M., Hurlin, W.J., Klein, S.A., Knutson, T.R., Langenhorst, A.R., Lee, H.-C., Lin, Y., Magi, B.I., Malyshev, S.L., Milly, P.C.D., Naik, V., Nath, M.J., Pincus, R., Ploshay, J.J., Ramaswamy, V., Seman, C.J., Shevliakova, E., Sirutis, J.J., Stern, W.F., Stouffer, R.J., Wilson, R.J., Winton, M., Wittenberg, A.T., and Zeng, F. (2011). "The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL global coupled model CM3." *Journal of Climate*, Vol. 24, No. 13, pp. 3484-3519. doi: 10.1175/2011JCLI3955.1
- Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J.-P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichefet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.-Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M.-P., Lefevre, F., Levy, C., Li, Z.X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N., and Vuichard, N. (2013). "Climate change projections using the IPSL-CM5 earth system model: From CMIP3 to CMIP5." Climate Dynamics, Vol. 40, No. 9-10.doi: 10.1007/s00382-012-1636-1
- Dunne, J.P., John, J.G., Adcroft, A.J., Griffies, S.M., Hallberg, R.W., Shevliakova, E., Stouffer, R.J., Cooke, W., Dunne, K.A., Harrison, M.J., Krasting, J.P., Malyshev, S.L., Milly, P.C.D., Phillipps, P.J., Sentman, L.T., Samuels, B.L., Spelman, M.J., Winton, M., Wittenberg, A.T., and Zadeh, N. (2012). "GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models.

- Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics." *Journal of Climate*, Vol. 25, No. 19, pp. 6646-6665. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00560.1
- Fowler, H.J., Ekström, M., Kilsby, C.G., and Jones, P.D. (2005). "New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 1. Assessment of control climate." *Journal of Hydrology*, Vol. 300, No. 1-4, pp. 212-233. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.06.017
- Gent, P.R., Danabasoglu, G., Donner, L.J., Holland, M.M., Hunke, E.C., Jayne, S.R., Lawrence, D.M., Neale, R.B., Rasch, P.J., Vertenstein, M., Worley, P.H., Yang, Z.L., and Zhang, M. (2011). "The community climate system model version 4." *Journal of Climate*, Vol. 24, No. 19, pp. 4973-4991. doi: 10. 1175/2011JCLI4083.1
- Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., Legutke, S., Bader, J.,
  Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K.,
  Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T.,
  Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz,
  U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S.,
  Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segschneider,
  J., Six, K.D., Stockhause, M., Timmreck, C., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K.-H., Claussen, M., Marotzke, J., and
  Stevens, B. (2013). "Climate and carbon cycle changes from
  1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model
  Intercomparison Project phase 5." Journal of Advances in
  Modeling Earth Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 572-597. doi: 10.
  1002/jame.20038
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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, Cambridge University Press, NY, USA.
- Jang, S.-W., Seo, L., Kim, T.-W., and Ahn, J.-H. (2011). "Non-stationary rainfall frequency analysis based on residual analysis." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 5B, pp. 449-457. doi: 10.12652/Ksce.2011.31. 5B 449
- Jones, C.D., Hughes, J.K., Bellouin, N., Hardiman, S.C., Jones, G.S., Knight, J., Liddicoat, S., O'Connor, F.M., Andres, R.J., Bell, C., Boo, K.-O., Bozzo, A., Butchart, N., Cadule, P., Corbin, K.D., Doutriaux-Boucher, M., Friedlingstein, P., Gornall, J., Gray, L., Halloran, P.R., Hurtt, G., Ingram, W.J., Lamarque, J.-F., Law, R.M., Meinshausen, M., Osprey, S., Palin, E.J., Parsons Chini, L., Raddatz, T., Sanderson, M.G., Sellar, A.A., Schurer, A., Valdes, P., Wood, N., Woodward, S., Yoshioka, M., and Zerroukat, M. (2011). "The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations." *Geoscientific Model Development*, Vol. 4, No. 3, pp. 543-570. doi: 10.5194/gmd-4-543-2011
- Jungclaus, J.H., Keenlyside, N., Botzet, M., Haak, H., Luo, J.J., Latif, M., Marotzke, J., Mikolajewicz, U., and Roeckner, E. (2006). "Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM." *Journal of Climate*, Vol. 19, No.

- 16, pp. 3952-3972. doi: 10.1175/JCLI3827.1
- Kay, A.L., Jones, R.G., and Reynard, N.S. (2006). "RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate change results." *Journal of Hydrology*, Vol. 318, No. 1-4, pp. 163-172. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.06.013
- Kim, J.S., Jain, S., Lee, J.H., Chen, H., and Park, S.Y. (2019). "Quantitative vulnerability assessment of water quality to extreme drought in a changing climate." *Ecological Indicators*, Vol. 103, pp. 688-697. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.04.052
- Kingston, D.G., Todd, M.C., Taylor, R.G., Thompson, J.R., and Arnell, N.W. (2009). "Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change." *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, No. 20, pp. 3-8. doi: 10.1029/2009GL040267
- Kwon, M.H., Jhun, J.G., and Ha, K.J. (2007). "Decadal change in east Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s." *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, No. 21, pp. 1-6. doi: 10.1029/2007GL031977
- Lee, O., and Kim, S. (2016). "Future PMPs projection under future dew point temperature variation of RCP 8.5 climate change scenario." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 2, pp. 505-514. doi: 10.9798/kosham.2016.16.2.505
- Lee, T., and Jeong, C. (2014). "Nonparametric statistical temporal downscaling of daily precipitation to hourly precipitation and implications for climate change scenarios." *Journal of Hydrology*, Vol. 510, pp. 182-196. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.12.027
- Lee, T., and Ouarda, T.B.M.J. (2011). "Prediction of climate nonstationary oscillation processes with empirical mode decomposition." *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Vol. 116, No. 6, pp. 1-15. doi: 10.1029/2010JD015142
- Lee, T., and Park, T. (2017). "Nonparametric temporal downscaling with event-based population generating algorithm for RCM daily precipitation to hourly: Model development and performance evaluation." *Journal of Hydrology*, Vol. 547, pp. 498-516. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.049
- Lee, T., Son, C., Kim, M., Lee, S., and Yoon, S. (2020). "Climate change adaptation to extreme rainfall events on a local scale in Namyangju, South Korea." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 25, No. 5, 05020005. doi: 10.1061/(asce)he.1943-5584. 0001906.
- Li, L., Lin, P., Yu, Y., Wang, B., Zhou, T., Liu, L., Liu, J., Bao, Q., Xu, S., Huang, W., Xia, K., Pu, Y., Dong, L., Shen, S., Liu, Y., Hu, N., Liu, M., Sun, W., Shi, X., Zheng, W., Wu, B., Song, M., Liu, H., Zhang, X., Wu, G., Xue, W., Huang, X., Yang, G., Song, Z., and Qiao, F. (2013). "The flexible global ocean-atmosphere-land system model, Grid-point Version 2: FGOALS-g2." Advances in Atmospheric Sciences, Vol. 30, No. 3, pp. 543-560. doi: 10.1007/s00376-012-2140-6
- Manzini, E., Cagnazzo, C., Fogli, P.G., Bellucci, A., and Mller, W.A. (2012). "Stratosphere-troposphere coupling at inter-decadal time scales: Implications for the North Atlantic Ocean." *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, No. 5, pp. 1-6. doi: 10. 1029/2011GL050771
- Martin, G.M., Bellouin, N., Collins, W.J., Culverwell, I.D., Halloran,

- P.R., Hardiman, S.C., Hinton, T.J., Jones, C.D., McDonald, R.E., McLaren, A.J., O'Connor, F.M., Roberts, M.J., Rodriguez, J.M., Woodward, S., Best, M.J., Brooks, M.E., Brown, A.R., Butchart, N., Dearden, C., Derbyshire, S.H., Dharssi, I., Doutriaux-Boucher, M., Edwards, J.M., Falloon, P.D., Gedney, N., Gray, L.J., Hewitt, H.T., Hobson, M., Huddleston, M.R., Hughes, J., Ineson, S., Ingram, W.J., James, P.M., Johns, T.C., Johnson, C.E., Jones, A., Jones, C.P., Joshi, M.M., Keen, A.B., Liddicoat, S., Lock, A.P., Maidens, A.V., Manners, J.C., Milton, S.F., Rae, J.G.L., Ridley, J. K.. Sellar, A., Senior, C.A., Totterdell, I.J., Verhoef, A., Vidale, P.L., and Wiltshire, A. (2011). "The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations." *Geoscientific Model Development*, Vol. 4, No. 3, pp. 723-757. doi: 10.5194/gmd-4-723-2011
- Neale, R.B., Richter, J.H., Conley, A.J., Park, S., Lauritzen, P.H., Gettelman, A., and Williamson, D.L. (2010). "Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 4.0)." Asthetische Zahnmedizin, Vol. 55, No. 8, pp. 926-930.
- Rim, C.-S., and Kim, S.-Y. (2014). "Climate aridity/humidity characteristics in Seoul according to changes in temperature and precipitation based on RCP 4.5 and 8.5." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 5, pp. 421-433. doi: 10.3741/JKWRA.2014.47.5.421
- Rotstayn, L.D., Collier, M.A., Dix, M.R., Feng, Y., Gordon, H.B., O'Farrell, S.P., Smith, I.N., and Syktus, J. (2010). "Improved simulation of Australian climate and ENSO-related rainfall variability in a global climate model with an interactive aerosol treatment." *International Journal of Climatology*, Vol. 30, No. 7, pp. 1067-1088. doi: 10.1002/joc.1952
- Scoccimarro, E., Gualdi, S., Bellucci, A., Sanna, A., Fogli, P.G., Manzini, E., Vichi, M., Oddo, P., and Navarra, A. (2011). "Effects of tropical cyclones on ocean heat transport in a high-resolution coupled general circulation model." *Journal* of Climate, Vol. 24, No. 16, pp. 4368-4384. doi: 10.1175/ 2011JCLI4104.1
- Sillmann, J., Kharin, V.V., Zwiers, F.W., Zhang, X., and Bronaugh, D. (2013). "Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections." *Journal* of Geophysical Research Atmospheres, Vol. 118, No. 6, pp. 2473-2493. doi: 10.1002/jgrd.50188
- Tjiputra, J.F., Roelandt, C., Bentsen, M., Lawrence, D.M., Lorentzen, T., Schwinger, J., Seland, Ø., and Heinze, C. (2013). "Evaluation of the carbon cycle components in the Norwegian Earth System Model (NorESM)." *Geoscientific Model Development*, Vol. 6, No. 2, pp. 301-325. doi: 10.5194/gmd-6-301-2013
- Villarini, G., Scoccimarro, E., and Gualdi, S. (2013). "Projections of heavy rainfall over the central United States based on CMIP5 models." *Atmospheric Science Letters*, Vol. 14, No. 3, pp. 200-205. doi: 10.1002/asl2.440
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-

- Martin, D., Szopa, S., Tyteca, S., Alkama, R., Belamari, S., Braun, A., Coquart, L., and Chauvin, F. (2013). "The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation." *Climate Dynamics*, Vol. 40, No. 9, pp. 2091-2121. doi: 10. 1007/s00382-011-1259-y
- Volodin, E., Dianskii, N., and Gusev, A. (2010). "Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations." *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, Vol. 46, No. 4, pp. 414-431.
- Watanabe, M., Suzuki, T., O'Ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H., and Kimoto, M. (2010). "Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity." *Journal of Climate*, Vol. 23, No. 23, pp. 6312-6335. doi: 10.1175/2010JCLI3679.1
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., and Kawase, H. (2011a). "MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments." *Geoscientific Model Development*, Vol. 4, No. 4, p. 845.
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., and Kawamiya, M. (2011b). "MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments." Geoscientific Model Development, Vol. 4, pp. 845-872, doi: 10.5194.gmd-4-845-2011.
- Wood, E.F., Roundy, J.K., Troy, T.J., van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., Blyth, E., Roo, A. de, Döll, P., Ek, M., Famiglietti, J., Gochis, D., van de Giesen, N., Houser, P., Jaffé, P.R., Kollet, S., Lehner, B., Lettenmaier, D.P., Peters-Lidard, C., Sivapalan, M., Sheffield, J., Wade, A., and Whitehead, P., (2011). "Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand

- challenge for monitoring Earth's terrestrial water." *Water Resources. Research*, Vol. 47, W05301, doi:10.1029/2010WR 010090.
- Wu, T., Song, L., Li, W., Wang, Z., Zhang, H., Xin, X., Zhang, Y., Zhang, L., Li, J., Wu, F., Liu, Y., Zhang, F., Shi, X., Chu, M., Zhang, J., Fang, Y., Wang, F., Lu, Y., Liu, X., Wei, M., Liu, Q., Zhou, W., Dong, M., Zhao, Q., Ji, J., Li, L., and Zhou, M. (2014). "An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies." *Journal of Meteorological Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 34-56. doi: 10. 1007/s13351-014-3041-7
- Wu, T., Yu, R., Zhang, F., Wang, Z., Dong, M., Wang, L., Jin, X., Chen, D., and Li, L. (2010). "The Beijing climate center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate." *Climate Dynamics*, Vol. 34, No. 1, pp. 123-147. doi: 10.1007/s00382-008-0487-2
- Yoon, S., 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 the Korean Water Resources Association*, Vol. 48, No. 10, pp. 817-830. doi: 10. 3741/JKWRA.2015.48.10.817
- Yoon, S., Jang, S., Rhee, J., and Cho, J. (2017). "Analysis of future extreme rainfall under climate change over the landslide risk zone in urban areas." *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 5, pp. 355-367. doi: 10.9798/kosham.2017.17.5.355
- Yukimoto, S., Adachi, Y., Hosaka, M., Sakami, T., Yoshimura, H., Hirabara, M., Tanaka, T.Y., Shindo, E., Tsujino, H., Deushi, M., Mizuta, R., Yabu, S., Obata, A., Nakano, H., Koshiro, T., Ose, T., and Kitoh, A. (2012). "A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3: -Model description and basic performance-." *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 90, No. A, pp. 23-64. doi: 10. 2151/jmsj.2012-A02