CMIP5 GCMs 자료의 비정상성을 고려한 한반도 미래 극치강우 빈도해석

Non-Stationary Frequency Analysis of Future Extreme Rainfall using CMIP5 GCMs over the Korean Peninsula

정민수* · 윤선권** · 박서연*** · 정재욱**** · 이주헌*****

Jeong, Minsu*, Yoon, Sunkwon**, Park, Seoyeon***, Jung, JaeWook****, and Lee, JooHeon*****

Abstract

In this study, we performed stationary and non-stationary frequency analysis of daily rainfall extreme series based on climate change scenarios by CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase5) 8 GCMs (General Circulation Models). We extracted the annual maximum daily rainfall and it was conducted tendency test for the abnormality verification. The data consisted of 30 sets according to 30 years in units and sequential to year and to derive each set rank, the number of rainfall occurrences over 80 mm and the summer rainfall were calculated. For the stationary and non-stationary frequency analysis, Gumbel distribution was adopted and average precipitation, location and scale parameters were calculated for each set. As a result of the analysis, it is considered that the stationary frequency analysis in RCP 4.5 and the non-stationary frequency analysis in RCP 8.5 are valid, and it is expected that various scenarios will be reviewed in the near future.

The results of this study are expected to be useful for the future climate change policies.

Key words : CMIP5, GCMs, Gumbel, Non-stationary Frequency Analysis, Probability Precipitation

요 지

본 연구에서는 근 미래의 극치강수량 변동 특성을 파악하기 위하여 CMIP (Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5) GCMs (General Circulation Models)에 따른 연최대 일강우 자료의 정상성 및 비정상성 빈도분석을 수행하였다. RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오별로 8개 GCM 모형을 적용하였고, 일강우 연최대치 계열 추출 및 경향성 검정을 수행하였다. 또한 30년 기준으로 자료를 1년씩 이동하여 30개 세트를 구성하였고, 순위 도출을 위해 각 세트의 80 mm 이상 강수 발생횟수 및 여름철(6월~9월) 강수량을 산정하였다. 정상성 빈도분석을 위해 Gumbel 분포의 모형별/세트별로 평균강수량과 위치 및 축척매개변수를 산정하였고, 산정된 매개변수와 선형회귀 적용을 통한 비정상성 빈도분석을 수행하였다. 분석결과 RCP 4.5에서는 정상성 빈도해석, RCP 8.5에서는 비정상성 빈도해석이 타당성을 가지며, 근 미래의 다양성 있는 시나리오 검토가 이루어질 것으로 판단되었다.

본 연구의 결과는 미래 기후 변화 정책 마련을 위한 활용성을 가질 것으로 판단되었다.

핵심용어 : CMIP5, GCMs, 검벨, 비정상성 빈도분석, 확률강수량

*정회원, (사)방재관리연구센터 책임연구원(E-mail: jminsoo03@naver.com)

Member, Research Engineering, Disaster Management Research Center

**정회원, APEC 기후센터 기후사업본부 융합기술팀 팀장(E-mail: skyoon@apcc21.org)

Member, Team Leader, Integrative Climate Research Team, APEC Climate Center

***중부대학교 가뭄센터 연구원(E-mail: bin_t@naver.com)

Research Fellow, Jungbu Drought Research Center

****정회원, (사)방재관리연구센터 센터장(E-mail: jwj6345@hanmail.net)

Member, Center Chief Manager, Disaster Management Research Center

*****교신저자, 정회원, 중부대학교 공과대학 토목공학과 교수(Tel: +82-31-8675-1615, Fax: +82-31-8675-1620, E-mail: leejh@joongbu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Joongbu University, Goyang 10279, Korea

1. 서 론

지난 100년간(1996~2005년)의 전지구 평균 온도는 0.74°C 상승하였고 이러한 온도 상승은 온실효과의 영향으로 파악되고 있으며, 장래에는 이러한 상승 경향이 가속화되어 진행될 것으로 예측되고 있다(IPCC, 2013; Baek et al., 2011). 전지구 기온 상승은 극한 해수면 증가 및 호우 빈도와 평균 강수량 증가로 나타나며, 이로 인한 상당한 홍수 및 침수피해 가능성이 나타나고 있어 이에 대한 선제적 대응책 마련이 필요한 실정이다(IPCC, 2013).

많은 연구결과에 의하면, 기후역학적인 측면에서 온실가스의 증가는 기온증가로 이어지며, 이에 따른 대기 수분 강화로 강수량의 증가가 나타날 수 있다(Douville et al., 2000; Meehl and Arblaster, 2003; Ashrit et al., 2005; IPCC, 2013). IPCC 5차 보고서에 따르면, 1900년대 이후로 전지구 평균 온실가스 농도의 증가 경향은 전지구 온도의 증가와 함께 장래 2100년까지 선형적인 관계로의 증가를 제시하고 있다(IPCC, 2013). IPCC는 온실가스와 온도 증가의 측면에서 온실가스 배출 시나리오에 따른 미래 기후변화 시나리오를 개발하고자 하였으며, 이에 따른 온실가스 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오를 마련하고, 5단계 결합모델 상호비교 프로젝트(Coupled Model Inter-comparison Project Phase 5, CMIP5)를 통해 전지구 기후변화 시나리오 실행에 따른 강수량, 기온, 풍속 등의 다양한 기상 변수들의 장래 전망결과를 제시하고 있다(Giorgi et al., 2009; Baek et al., 2011; Yoon et al., 2015). 현재 여러 기상 변수들의 예측결과는 기후변화에 따른 미래 지구환경 변화와 관련한 다양한 연구들에 활용이 이루어지고 있다.

수문 분야에서도 GCMs에 따른 강수량 자료를 활용하여 연구가 활발히 진행되고 있다(Fowler et al., 2005; Oden and Prudhomme, 2002; Villarini et al., 2013; Rim and Kim, 2014; Yoon et al., 2015; Lee et al., 2016). 특히 Fowler et al. (2005)은 HadRM2, HadRM3H 자료를 적용하여 50년 이상의 극한강우에 대한 확률강우량 변화를 분석한 바 있으며, Yoon et al. (2015)은 9개 GCMs에 따른 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오에 대한 2011년에서 2040년까지 근 미래의 극치 강수 및 빈도분석 연구를 수행하였다. 또한 Lee et al. (2016)은 미래 2045년을 기준으로 한 RCM (HEDGEM3-RA) RCP 8.5 일자료를 이용한 이동평균된 변화인자를 활용한 미래 PMPs를 산출한 바 있다.

이러한 분석들은 근 미래의 한 시점에 대한 분석결과를 제시한 반면, Jang et al. (2011)은 근 미래(2020~2049년) 및 보다 먼 미래(2070~2099년)로 자료기간을 구분하여 구간별 극한강수량의 비교 연구를 수행한 바 있으며, 극한 강수량에 대한 분석에는 연최대치 자료에 따른 GEV (Generalized Extreme Value) 분포를 적용하였다. Villarini et al. (2013)은

CMIP5 모델을 적용한 RCP 4.5 및 RCP 8.5에 대한 계절에 따른 강수량 변화에 대한 분석을 수행한 바 있으며, Rim and Kim (2014)은 RCP 4.5 및 RCP 8.5에 따른 미래 기간별 2011~2040년, 2041~2070년, 2071~2100년에 대한 미래기간 월별 강수량, 평균기온, 잠재증발산량의 비교를 통해 서울지역 건조 및 습윤 특성에 대한 변화 연구를 수행하였다.

기후변화 시나리오에 따른 생산된 GCM 자료에는 불확실성을 내포하고 있는 것으로 알려져 있으며, 미래 발생 가능한 극한 수문사상으로 인하여 정상성 빈도해석을 적용하는 경우 재해위험도 반영에 현실성이 결여될 수 있는 것으로 알려져 있다(Yoon et al., 2015; Kim et al., 2014; Lee et al., 2010; Khaliq et al., 2006). GCM 자료의 불확실성을 극복하기 위해 Kwon et al. (2009)은 비정상성 강우빈도해석 방법으로 1개년 자료 이동에 따른 평균과 매개변수 간의 관계를 이용한 목표연도의 확률강우량을 추정하였으며, Lee et al. (2010)은 제시된 비정상성 빈도해석에 대한 적용성과 신뢰성에 대한 검토 수행을 통해 목표연도의 확률 강우량에 대한 값의 적절성을 확인한 바 있다. 또한, Stedinger and Crainiceanu (2000)는 비정상성을 고려하여 연 최대 홍수량의 선형 추세 산정에 따른 2변수 Log-normal분포를 제안한 바 있다.

본 연구에서는 GCMs 모델별 연 최대 일강수량을 추출하여 정상성 및 비정상성 빈도분석을 수행하고 빈도별 확률강수량을 산정하였다. 정상성 및 비정상성 분석을 위해 모델별 연최대치 일강우 자료를 산정하고, 모델별 경향성 검정을 수행하였다. 또한 각 모델별로 2021년부터 30년을 기준으로 1개년씩 자료이동을 통해 30세트를 구성하고, 각 세트별 80 mm 이상의 강우의 평균 발생횟수 및 여름철(6월~9월) 평균 강우 총량의 산정을 통해 순위 도출에 적용하였다. 경향성 검정 및 순위도출 결과를 토대로 8개 GCMs 자료 중에서 4개의 GCMs를 선정하였고, 시나리오별 세트 구성에 따른 연 최대 일 강우량의 평균 및 Gumbel 분포형의 위치 및 축척매개변수를 산정하였으며, 이를 토대로 서울지역을 대상으로 위치 및 축척 매개변수 추정에 따른 비정상성 빈도분석을 수행하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 대상지역

본 연구는 GCMs를 활용한 서울지역의 미래 확률강우량을 추정하기 위한 비정상성 빈도분석을 수행하였다. 미래 확률강우량 추정을 위해 CMIP5 RCP 4.5 및 RCP 8.5에 따른 33개 GCMs 자료 중에서 강우량을 포함한 6개의 기상정보(강수량, 최고 및 최저기온, 평균풍속, 상대습도, 일사량)가 제공되는 GCMs 모형들 중에서 8개의 GCMs를 사용하였으며, 다음 Table 1로 나타내었다.

Table 1. Selected GCM Models (Yoon et al., 2017)

GCMs	Resolution (o)	Institution
HadGEM2-AO (KMA-12.5km)	1.875×1.250	Met Office Hadley Centre, UK (Korea Meteorological Agency, Korea)
CanESM2	2.813×2.791	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada
GFDL-ESM2G	2.500×2.023	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
GFDL-ESM2F	2.500×2.023	
INM-CM4	2.000×1.500	Institute for Numerical Mathematics, Russia
IPSL-CM5A-LR	3.750×1.895	Institut Pierre-Simon Laplace, France
MIROC-ESM	2.813×2.791	Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Japan
MIROC-ESM-CHEM	2.813×2.791	

대상 지점인 서울지역의 분석에 앞서 기상청에서 제공되는 94개 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS)의 관측지점 중에서 30년 이상의 강우 관측 자료를 보유하고 있는 59개 지점의 CMIP5 기후전망 자료를 사용하였으며, 다음 Fig. 1과 Table 2로 나타내었다(Cho, 2013, Yoon, 2017). 온실가스 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)에 따라 RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 등 4종의 기후전망 시나리오가 제공되고 있다. 이 중에서 RCP 2.5는 인간활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복하는 것이며, RCP 4.5는 온실가스 저감정책이 상당히 실현을 의미하고, RCP 8.5는 저감없이 온실가스가 배출되는 경우로 가장 극한 상황으로 가정될 수 있다. 본 연구에서는 RCP 4.5와 RCP 8.5의 두 시나리오에 따른 59개 관측 지점의 장래 발생 가능한 강수의 특성을 파악하였다(기상청 기후정보, http://www.climate.go.kr/home/snr_greeting/rcp.php).

Fig. 1. Location of KMA ASOS Rainfall Station in Used**Table 2.** Location ID and Station name of the Automated Synoptic Observing System in Used

ID	Station	ID	Station
ID_90	Sokcho	ID_203	Icheon
ID_100	Taeganrung	ID_211	Inje
ID_101	Chunchun	ID_212	Hongchun
ID_105	Kangreung	ID_221	Jechun
ID_108	Seoul	ID_226	Boeun
ID_112	Inchun	ID_232	Asan
ID_114	Wonju	ID_235	Boryung
ID_115	Ulleungdo	ID_236	Buyeo
ID_119	Suwon	ID_238	Geumsan
ID_127	Chungju	ID_243	Buan
ID_129	Susan	ID_244	Imsil
ID_130	Uljin	ID_245	Jungeup
ID_131	Chungju	ID_247	Namwon
ID_133	Taejun	ID_256	Sunchun
ID_135	Chunpungrung	ID_260	Jangheung
ID_136	andong	ID_261	Haenam
ID_138	Pohang	ID_262	Goheung
ID_140	Kunsan	ID_272	Ypungju
ID_143	Taegu	ID_273	Mungyeong
ID_146	Junju	ID_277	Youngduk
ID_152	Ulsan	ID_278	Eusung
ID_156	Kangju	ID_279	Gumi
ID_159	Pusam	ID_281	Yeongcheon
ID_162	Tongyongung	ID_284	Kuvhsnh
ID_165	Mokpo	ID_285	Hapcheon
ID_168	Teosu	ID_288	Milysng
ID_170	Wando	ID_289	Sancheong
ID_192	Jinju	ID_294	Geoje
ID_201	Kanghwa	ID_295	Namhae
ID_202	Yangpyeong	total	59

2.2 연구방법

2.2.1 자료 처리

기후변화에 따른 시나리오를 적용하여 미래 기후 자료를 생산하는데 있어 다양한 시나리오가 제공되는 반면에 생산된 자료는 불확실성을 갖는 것으로 알려져 있다. Cho (2013)는 이러한 자료의 불확실성 개선을 위해 기후변화 시나리오 자료의 표준화 방법을 제안하였으며, 산정절차는 다음 Fig. 2와 같이 자료 추출, 자료 클리핑, 지점별 시계열 자료 추출 및 상세화 및 편이보정(Bias Correction) 절차를 거쳐 보정된 시나리오에 따른 자료 생산을 제안하였다.

Fig. 2. GCMs Data Creation Procedure

GCMs 자료의 편이보정은 모의된 결과와 동일 간에 해당하는 관측자료의 비교 검증을 통한 계통오차의 보정이며, 자료의 재현성 및 이에 따른 신뢰성 확보를 이룬다. 편이보정을 위해 다음 Eq. (1)과 같이 분위사상법(Quantile Mapping)을 적용하였다(Canon et al., 2015; Cho, 2013).

$$\hat{x}_{m,p}(t) = F_{o,h}^{-1}\{F_{m,h}[x_{m,p}(t)]\} \quad (1)$$

여기서, $x_{m,p}(t)$ 는 시간 t 에서의 편이보정 전의 값, $\hat{x}_{m,p}(t)$ 는 시간 t 에서의 편이보정 후의 값, $F_{m,h}$ 는 과거기간 GCMs에 따라 모의된 자료의 누적확률밀도함수, $F_{o,h}^{-1}$ 는 과거기간 자료의 누적확률밀도함수의 역함수이다. p 는 전망(Projection), h 는 과거기간(Historical duration), m 은 GCMs 모형, o 는 관측을 의미한다. 또한, 강우자료의 편이보정은 다음 Eq. 2로 나타내었다.

$$\hat{x}_{m,p}(t) = F_{o,h}^{-1}\left\{F_{m,h}\left[\frac{\bar{x}_{m,h} \cdot x_{m,p}(t)}{\bar{x}_{m,p}(t)}\right]\right\} \frac{\bar{x}_{m,p}(t)}{\bar{x}_{m,h}} \quad (2)$$

여기서, $\bar{x}_{m,p}$ 와 $\bar{x}_{m,h}$ 는 GCMs 모형에 따른 과거 및 미래 기간 모의 결과의 평균이다.

2.2.2 자료의 경향성 검정

본 연구에서는 비정상성 빈도해석을 통한 빈도별 확률 강우량 산정을 위해 CMIP5 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오 자료에 대한 통계적 검정을 실시하였다. 대상 자료는 HadGEM2-AO (G1), CanESM2 (G2), GFDL-ESM2G (G3), GFDL-ESM2F (G4), INM-CM4 (G5), IPSL-CM5A-LR (G6), MIROC-ESM (G7), MIROC-ESM-CHEM (G8) 등 8개 모형이며, 각각에 대한 ASOS 59개 지점별 자료를 추출하였다.

자료의 정상성 및 비정상성 유무의 판단을 위해 일반적으로 수행되는 경향성 분석을 수행하였다(Kim et al., 2012;

Kwon et al., 2009). 경향성 분석에는 다양한 방법이 적용되었으며, 이 중에서 Mann-Kendall 검정결과를 Table 3으로 제시하였다.

경향성 검정 결과, RCP 4.5에서는 G7에서 59개소 중 23개소가 경향성을 보인 반면에 나머지는 각각이 7개 이하로 대부분이 경향성을 보이지 않는 것으로 나타났다. 이와 달리 RCP 8.5의 경우에는 G2가 59개소 중에서 50개소에서 경향성을 보이는 등 G2, G4, G6 G8에서 RCP 4.5에 비해 상대적으로 경향성이 높은 것으로 나타났다.

경향성 검정 결과에 따라 자료별로 정상성 및 비정상성으로 구분하여 빈도해석을 실시하는 것이 타당하나 본 연구는 미래 강우량 자료를 적용한 근 미래 및 먼 미래까지의 확률강우량 변화 양상을 살펴보고자 하는 것으로, 이를 위해 분석 대상 자료에 비정상성 빈도해석을 동일하게 적용하였으며, 그 결과에 대한 비교 검토를 수행하였다.

2.2.3 정상성 및 비정상성 빈도해석

본 연구에서는 GCMs 자료를 이용한 근 미래의 빈도분석을 수행하고 주어진 자료의 경향성을 반영한 비정상성 빈도 해석 수행으로 먼 미래의 확률강우량을 추정하고자 하였으며, 이에 대한 구체적인 절차는 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3. Procedure of Non-stationary Frequency Analysis using Moving Average

자료 기간은 2021년부터 2100년까지의 일강우 자료를 수집하였다. 비정상성 빈도해석을 위해 연도별 일최대 강우를 추출하였으며, 이에 따른 동일 자료 구간 30년에 대한 연속성 있는 51개 자료 세트를 구성하였다. 각 세트별로 매개변수 추정 및 빈도해석의 수행을 하였으며, 원자료의 회귀계수 및 세트별 일최대 강우의 평균과 해당 매개변수를

Table 3. Results of RCP 4.5 Mann-kendall Test of 59 KMA ASOS

ID	RCP 4.5 Kendal test (: Trend / : No-trend)								ID	RCP 8.5 Kendal test (: Trend / : No-trend)							
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
90	0.99	0.18	0.32	0.27	0.05	0.11	0.12	0.85	90	0.06	0.01	0.47	0.09	0.16	0.00	0.16	0.16
100	0.96	0.13	0.31	0.18	0.10	0.37	0.26	0.37	100	0.72	0.01	0.69	0.09	0.44	0.11	0.08	0.14
101	0.18	0.41	0.31	0.46	0.36	0.10	0.81	0.70	101	0.62	0.06	0.30	0.10	0.63	0.03	0.55	0.13
105	0.89	0.15	0.34	0.17	0.08	0.41	0.23	0.71	105	0.08	0.00	0.67	0.14	0.29	0.04	0.12	0.18
108	0.70	0.66	0.34	0.83	0.99	0.72	0.84	0.87	108	0.44	0.03	0.35	0.00	0.96	0.12	0.40	0.11
112	0.23	0.43	0.29	1.00	0.92	0.87	0.89	0.91	112	0.22	0.05	0.28	0.00	0.32	0.16	0.24	0.15
114	0.40	0.89	0.33	0.30	0.46	0.95	0.67	0.98	114	0.29	0.05	0.79	0.09	0.34	0.13	0.67	0.08
115	0.44	0.78	0.64	0.19	0.03	0.14	0.07	0.45	115	0.61	0.01	0.48	0.02	0.54	0.02	0.20	0.00
119	0.06	0.35	0.37	0.97	0.95	0.60	0.99	0.56	119	0.47	0.08	0.29	0.00	0.23	0.18	0.19	0.14
127	0.10	0.47	0.52	0.19	0.06	0.59	0.48	0.70	127	0.22	0.31	0.66	0.52	0.18	0.12	0.03	0.01
129	0.65	0.96	0.63	0.91	0.45	0.93	0.59	1.00	129	0.61	0.04	0.55	0.02	0.31	0.01	0.11	0.05
130	0.73	0.17	0.38	0.13	0.48	0.07	0.10	0.68	130	0.12	0.00	0.43	0.12	0.11	0.05	0.08	0.21
131	0.44	0.50	0.51	0.48	0.11	0.53	0.96	0.64	131	0.88	0.02	0.27	0.00	0.46	0.00	0.22	0.06
133	0.62	0.47	0.98	0.60	0.13	0.53	0.85	0.62	133	0.52	0.04	0.39	0.02	0.23	0.03	0.42	0.16
135	0.17	0.20	0.61	0.12	0.10	0.53	0.03	0.30	135	0.76	0.00	0.25	0.08	0.22	0.19	0.07	0.00
136	0.28	0.42	0.62	0.12	0.01	0.53	0.55	0.52	136	0.99	0.00	0.40	0.20	0.13	0.00	0.26	0.03
138	0.10	0.48	0.64	0.15	0.59	0.15	0.03	0.81	138	0.98	0.00	0.22	0.02	0.09	0.01	0.27	0.02
140	0.69	0.70	0.61	0.79	0.78	0.36	0.08	0.76	140	0.66	0.03	0.43	0.03	0.46	0.17	0.81	0.00
143	0.63	0.61	0.77	0.06	0.19	0.16	0.02	0.77	143	0.21	0.00	0.20	0.01	0.34	0.27	0.08	0.00
146	0.36	0.89	0.54	0.89	0.57	0.33	0.05	0.90	146	0.67	0.05	0.69	0.01	0.23	0.28	0.59	0.01
152	0.24	0.97	0.80	0.10	0.28	0.07	0.01	0.52	152	0.94	0.00	0.12	0.01	0.57	0.11	0.23	0.01
156	0.64	0.80	0.86	0.54	0.21	0.10	0.08	0.96	156	0.37	0.06	0.38	0.02	0.00	0.12	0.97	0.00
159	0.57	0.88	0.93	0.06	0.04	0.18	0.01	0.30	159	0.01	0.00	0.27	0.02	0.85	0.17	0.11	0.00
162	0.27	0.97	0.82	0.01	0.65	0.05	0.06	0.04	162	0.38	0.00	0.39	0.01	0.87	0.04	0.14	0.00
165	1.00	0.91	0.73	0.90	0.19	0.29	0.03	0.73	165	0.39	0.01	0.19	0.02	0.03	0.39	0.30	0.02
168	0.40	0.75	0.81	0.00	0.55	0.18	0.17	0.95	168	0.24	0.04	0.27	0.00	0.49	0.13	0.12	0.00
170	0.17	0.61	0.42	0.83	0.72	0.38	0.03	0.87	170	0.83	0.02	0.14	0.03	0.97	0.64	0.54	0.02
192	0.36	0.45	0.89	0.08	0.42	0.14	0.01	0.49	192	0.85	0.00	0.23	0.02	0.24	0.25	0.05	0.00
201	0.94	0.28	0.41	0.18	0.34	0.13	0.32	0.90	201	0.24	0.00	0.54	0.14	0.85	0.03	0.13	0.13
202	0.35	0.87	0.64	0.78	0.33	0.98	0.51	0.89	202	0.97	0.04	0.43	0.03	0.32	0.02	0.30	0.04
203	0.66	0.64	0.33	0.86	0.22	0.99	0.74	0.99	203	0.58	0.04	0.42	0.01	0.24	0.08	0.23	0.11
211	0.12	0.42	0.37	0.40	0.24	0.11	0.42	0.98	211	0.94	0.00	0.58	0.08	0.66	0.00	0.12	0.07
212	0.02	0.68	0.35	0.43	0.23	0.74	0.67	0.98	212	0.35	0.08	0.63	0.05	0.64	0.02	0.36	0.06
221	0.11	0.27	0.32	0.25	0.41	0.53	0.31	0.71	221	0.37	0.01	0.60	0.15	0.11	0.20	0.06	0.03
226	0.62	0.63	0.66	0.12	0.14	0.70	0.84	0.65	226	0.31	0.03	0.79	0.30	0.40	0.04	0.30	0.18
232	0.49	0.77	0.76	0.91	0.15	0.61	0.68	0.63	232	0.80	0.03	0.56	0.02	0.34	0.04	0.21	0.09
235	0.44	0.76	1.00	0.96	0.93	0.73	0.99	0.77	235	0.86	0.03	0.39	0.05	0.62	0.01	0.35	0.10
236	0.10	0.62	0.74	0.69	0.82	0.53	0.17	0.90	236	0.47	0.03	0.11	0.02	0.28	0.12	0.87	0.00
238	0.17	0.74	0.51	0.98	0.05	0.39	0.04	0.96	238	0.51	0.10	0.81	0.00	0.21	0.11	0.69	0.00
243	0.81	0.96	0.81	0.97	0.16	0.20	0.04	0.81	243	0.35	0.02	0.34	0.03	0.01	0.32	0.56	0.00
244	0.29	0.76	0.69	0.85	0.27	0.34	0.04	0.97	244	0.88	0.10	0.24	0.01	0.23	0.35	0.99	0.01
245	0.18	0.73	0.66	0.61	0.13	0.13	0.02	0.53	245	0.81	0.02	0.14	0.08	0.00	0.17	0.42	0.00
247	0.72	0.93	0.70	0.81	0.33	0.16	0.07	0.93	247	0.57	0.03	0.69	0.02	0.24	0.08	0.92	0.01
256	0.07	0.96	0.75	0.98	0.28	0.32	0.04	0.98	256	0.24	0.02	0.30	0.02	0.26	0.48	0.99	0.01
260	0.04	0.63	0.16	0.95	0.15	0.22	0.02	0.86	260	0.79	0.01	0.24	0.04	0.04	0.25	0.49	0.02
261	0.07	0.84	0.53	0.88	0.13	0.29	0.03	0.83	261	0.89	0.01	0.22	0.03	0.03	0.39	0.48	0.02
262	0.12	0.54	0.14	0.96	0.15	0.14	0.06	0.75	262	0.95	0.01	0.33	0.06	0.60	0.23	0.35	0.02
272	0.06	0.63	0.60	0.11	0.05	0.72	0.33	0.97	272	1.00	0.00	0.63	0.42	0.17	0.07	0.15	0.02
273	0.34	0.26	0.60	0.06	0.05	0.35	0.24	0.79	273	0.72	0.00	0.23	0.39	0.13	0.02	0.21	0.05
277	0.38	0.36	0.40	0.21	0.35	0.12	0.19	0.51	277	0.86	0.00	0.83	0.07	0.11	0.02	0.08	0.04
278	0.97	0.58	0.76	0.20	0.02	0.78	0.22	0.84	278	0.27	0.00	0.31	0.04	0.39	0.05	0.03	0.01
279	0.30	0.47	0.79	0.06	0.11	0.73	0.04	0.71	279	0.34	0.00	0.16	0.02	0.25	0.02	0.13	0.00
281	0.41	0.77	0.80	0.08	0.23	0.30	0.03	0.42	281	0.35	0.00	0.25	0.01	0.32	0.25	0.09	0.00
284	0.46	0.86	0.75	0.08	0.13	0.16	0.03	0.90	284	0.32	0.01	0.20	0.06	0.36	0.15	0.66	0.01
285	0.89	0.71	0.69	0.10	0.12	0.18	0.04	0.57	285	0.34	0.00	0.21	0.06	0.42	0.15	0.19	0.01
288	0.81	0.25	0.92	0.11	0.37	0.37	0.04	0.24	288	0.85	0.00	0.23	0.02	0.33	0.30	0.08	0.00
289	0.84	0.83	0.83	0.13	0.11	0.37	0.04	0.76	289	0.78	0.02	0.23	0.06	0.30	0.42	0.88	0.01
294	0.02	0.78	0.89	0.00	0.59	0.03	0.05	0.01	294	0.18	0.35	0.29	0.00	0.95	0.04	0.47	0.01
295	0.16	0.89	0.94	0.02	0.52	0.15	0.07	0.55	295	0.32	0.03	0.23	0.03	0.19	0.23	0.20	0.01
num.	3	0	0	4	7	1	23	2		1	50	0	36	4	21	3	39

통해 회귀계수를 추정하였다. 산정된 결과를 토대로 2100년까지에 대한 확률강우량을 산정하였다.

정상성 빈도해석을 위한 분포함수는 극치분포(Generalized Extrem value Distribution, GEV)의 Type-I 분포형인 Gumbel 분포를 적용하였다.

GEV 분포형은 3개의 매개변수인 위치매개변수(Location Parameter), 축척매개변수(Scale Parameter), 형상매개변수(Shape Parameter)로 구분되며, 형상매개변수가 0인 경우가 GEV Type-I인 Gumbel 분포이다. Gumbel 분포의 확률밀도 함수 및 누적분포함수는 다음 Eqs. (3), (4)와 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-x_o}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-x_o}{\alpha}\right)\right], \quad (3)$$

$$-\infty < x < \infty$$

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-x_o}{\alpha}\right)\right] \quad (4)$$

여기서, x_o 는 위치매개변수이며, α 는 축척 매개변수이다.

비정상성 빈도해석에는 정상성과 동일 분포형인 GEV에 따른 Non-stationary GEV를 적용하였다. 비정상성 빈도분석 수행을 위한 위치 및 축척 매개변수 산정은 선형 회귀식을 적용하였으며, 적용된 식은 다음 Eq. (5)로 나타낼 수 있다 (kim et al., 2012).

$$\bar{x}_Y = c \times R_Y + d \quad (5)$$

여기서, $\bar{x}_Y$ 는 산정된 매개변수를 의미하며, R_Y 는 평균 강수량, c 와 d 는 각각 도출된 회귀계수의 기울기와 절편을 의미한다.

3. 분석 결과

3.1 자료구축 및 미래 극치강우 분석

미래 극치강우에 대한 비정상성 빈도분석을 위해 2021년부터 2079년까지 79년 일 강우자료를 이용해 분석을 수행하였다. 자료는 RCP 4.5 및 8.5에 대한 각각 8개 GCMs별 자료 및 GCMs 별로 59개 지점별 자료가 적용되었다. 빈도분석을 위한 자료기간은 30년 단위로 1세트를 구성함에 따라 RCP 4.5 및 8.5 시나리오별, 모델별 및 59개 각 지점별로 30개의 세트를 구성하였다.

또한, RCP 4.5 및 8.5 구분 및 8개 GCM 모델 각각에 대한 지점별 일강수량 80 mm 이상인 날의 횟수, 여름철 6월-9월 사이의 강우 총량을 59개 지점별로 산정하고, 다음 Fig. 4로 나타내었다. 또한 지점별로 산정된 결과에 대한 평균을 통해 다음 Table 4로 나타내었으며, 순위(Rank) 도출을 위한 인자로 적용하였다.

산정결과 RCP 4.5에서는 G1과 G2가 80 mm 이상인 날의 횟수와 여름철 강우량이 뚜렷한 증가추세를 보이면서 상위

Fig. 4. Plot of RCP 4.5 and RCP 8.5 According to Occurrences of More than 80mm day and Summer Precipitation

Table 4. Rank of Occurrences of More than 80mm day and Summer Precipitation According to RCP 4.5 and RCP 8.5

year			total Scenario							
			HadGEM2-AO (G1)	CanESM2 (G2)	GFDL-ESM2G (G3)	GFDL-ESM2M (G4)	inmcm4 (G5)	IPSL-CM5A-LR (G6)	MIROC-ESM (G7)	MIROC-ESM-CHEM (G8)
RCP 4.5	rank 80 over	ave.	3.82	3.38	2.71	3.02	2.30	2.71	2.58	3.40
		rank	1	2	5	4	8	6	7	3
	rank sum precip.	ave.	1152.6	1200.0	996.2	957.5	886.6	1051.5	888.0	1027.2
		rank	2	1	5	6	8	3	7	4
RCP 8.5	rank 80 over	ave.	3.00	3.70	2.96	2.79	2.53	3.34	2.51	3.90
		rank	4	2	5	6	7	3	8	1
	rank sum precip.	ave.	1023.1	1243.2	1023.8	864.4	927.2	1054.1	836.1	1114.0
		rank	5	1	4	7	6	3	8	2
sum			12	6	19	23	29	15	30	10

에 위치하였고, RCP 8.5에서는 G6과 G8에서 증가 추세와 함께 높게 나타났으며, 전체적으로 G1, G2, G6, G8이 상위를 나타내었다. 특히, G2, G6, G8은 Mann-Kendall 검정을 통해 경향성을 가짐에 따라 서울지역 비정상성 빈도분석은 G1, G2, G6, G8을 적용하여 분석하였다.

3.2 비정상성 빈도분석

3.2.1 대상지점의 빈도해석 자료 구축

경향성 분석 및 순위도출 결과에 따라 G1, G2, G6, G8의 4개 시나리오를 적용한 서울지역 빈도분석을 수행하였다. 기간은 2021~2079년으로 30년 기준으로 연속된 30개 세트를 구성하였고, RCP 4.5 및 8.5에 대한 모델별 연 최대 일강우 자료 및 30년 단위 평균 강우량을 Fig. 5로 나타내었다.

강우자료 도시 및 추세분석 결과 RCP 8.5에서는 G1을 제외하고는 증가 추세를 보였고, RCP 4.5는 G1에서만 다소의 증가를 보이는 것으로 나타났다. 또한 30년 단위 평균 도시 결과 연 단위보다 선형의 증감이 확연하게 나타났다. 대부분에서 연도별 및 30년 단위별 증감이 동일한 움직임을 보인 반면에 G1의 RCP 4.5는 연단위에서는 증가 추세를 보인 반면에 30년 단위에서는 감소를 보임에 따라 시계열 자료에 포함된 800 mm에 달하는 이상치 등의 발생에 따른 것으로 판단되었다.

이와 달리 RCP 8.5는 원자료에서 적은 경사를 보인 반면에 30년 평균에 대한 도시 결과, 가파른 증가를 보였고, RCP 4.5 G2와 RCP 8.5인 G6에서 자료가 감소되는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

3.2.2 매개변수 추정

G1, G2, G6, G8의 4개 시나리오에 대한 30년 단위 30개 세트에 대한 일최대 평균 강수량 및 Gumbel 분포의 위치매개

변수와 축척매개변수를 산정하였고, 다음 Table 5에 나타내었다.

서울지점의 RCP 4.5를 적용한 모델의 경우 앞서 제시된 Fig. 5의 30년 단위 연 최대 일평균 강수량 도시 결과와 동일한 것으로 RCP 4.5 G6과 G8에서 증가를 보이며, RCP 8.5에서는 G6을 제외하고는 증가를 보이는 것으로 나타났다. 반면에 자료의 구간별 증가 및 감소에 따른 변동성이 다소 큰 것으로 판단되며, 이는 정상성 빈도해석 결과에 따른 확률 강수량의 미래 증가를 담보하는데에는 어려움이 있을 것으로 판단되었다.

산정된 매개변수를 이용하여 비정상성 빈도해석을 위한 매개변수를 추정하였다. 이를 위해 일최대 강수량의 평균 및 위치매개변수와 강수량 평균 및 축척 매개변수 간의 선형회귀를 하였으며, 다음 Fig. 6으로 나타내었다.

두 변수간의 선형회귀 결과 대부분의 모델에서 강수량 증가에 따른 위치 및 축척 매개변수가 증가되는 양상을 보인 반면에 RCP 4.5의 G2 축척매개변수와 RCP 8.5의 G6의 축척매개변수에서는 감소되는 것으로 나타났다.

3.2.3 정상성 및 비정상성 빈도해석

RCP 4.5 및 RCP 8.5에 따른 연 최대 일강우 자료를 이용한 일최대 평균 극치 강수량 및 Gumbel의 위치, 축척매개변수를 산정을 통해 정상성 빈도해석을 수행하였고, 매개변수 추정에 따른 비정상성 빈도해석을 수행하였다. RCP 4.5에 따른 정상성 및 비정상성 빈도해석 및 재현기간별 확률강수량을 Fig. 7과 Table 6로 나타내었고, RCP 8.5는 Fig. 8과 Table 7로 나타내었다. 분석기간은 30년으로 2021~2050년 인 경우 2050년을 목표연도로 2050년, 2059년, 2069년, 2079년으로 구분하여 정상성 및 비정상성 확률강수량을 제시하고, 비정상성 빈도해석의 경우에는 미래 매개변수 추정에 따른 목표연도 2089년과 2099년을 추가 제시하였다.

(a) G1 Daily Precip.(up) & MA 30 year(down)

(b) G2 Daily Precip.(up) & MA 30 year(down)

(c) G6 Daily Precip.(up) & MA 30 year(down)

(d) G8 Daily Precip.(up) & MA 30 year(down)

Fig. 5. Time Series Plot of Daily Precipitation in Seoul (GCMs: G1, G2, G6, G8)

Table 5. Average Precipitation and Parameters of RCP 4.5 vs 8.5 of HadGEM2-AO and CanESM2 in Seoul (Moving Average, 30year)

Year		Seoul (Ave.: Average precipitation / Lo.: Location parameter / Sc.: Scale parameter)											
		G1						G2					
		RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
from	to	Ave.	Lo.	Sc.	Ave.	Lo.	Sc.	Ave.	Lo.	Sc.	Ave.	Lo.	Sc.
2021	2050	160.5	200.2	70.0	155.6	184.3	51.8	216.6	234.7	84.4	207.5	230.9	73.3
2022	2051	165.4	162.7	87.5	159.9	188.6	53.2	214.8	233.9	80.5	206.3	229.4	74.7
2023	2052	166.6	165.3	88.1	157.8	165.9	71.6	211.8	227.3	86.0	201.4	222.4	76.8
2024	2053	166.5	165.4	88.4	157.8	165.9	71.6	213.3	231.0	83.6	206.1	228.0	81.0
2025	2054	166.8	165.4	88.0	156.2	186.8	55.7	212.6	232.0	82.1	213.0	233.1	95.7
2026	2055	190.0	254.2	111.6	162.1	194.9	60.9	214.9	234.8	83.8	216.8	237.8	97.3
2027	2056	189.8	254.0	111.7	164.1	196.1	59.3	210.3	225.1	92.9	215.6	238.6	98.3
2028	2057	189.1	253.2	111.7	161.1	193.6	62.7	209.6	223.6	92.3	216.3	238.9	99.3
2029	2058	188.1	252.3	111.4	160.5	193.1	63.4	204.2	212.2	99.8	216.8	240.1	99.4
2030	2059	185.8	250.6	112.3	159.9	192.7	58.2	211.6	224.0	98.3	219.9	244.6	95.4
2031	2060	176.8	238.4	107.0	157.6	190.1	59.3	212.6	224.0	101.5	217.1	240.2	98.5
2032	2061	188.7	255.2	115.4	149.8	181.0	55.9	210.5	221.9	99.7	217.7	241.1	97.4
2033	2062	192.2	259.0	116.0	151.4	182.2	54.9	211.9	225.2	96.2	217.0	239.8	97.7

Table 5. (Continued)

Year		Seoul (Ave.: Average precipitation / Lo.: Location parameter / Sc.: Scale parameter)											
		G1						G2					
		RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
from	to	Ave.	Lo.	Sc.	Ave.	Lo.	Sc.	Ave.	Lo.	Sc.	Ave.	Lo.	Sc.
2034	2063	192.4	259.1	115.9	148.8	180.5	56.7	215.3	227.6	100.9	219.9	244.1	97.5
2035	2064	194.2	260.4	115.1	147.2	179.2	57.7	220.4	238.0	95.0	225.3	250.9	91.7
2036	2065	196.7	262.5	114.2	146.6	178.8	58.1	223.9	244.9	87.8	227.2	253.0	89.8
2037	2066	195.1	260.8	114.2	144.6	177.1	59.5	220.1	237.0	93.2	225.0	249.9	92.0
2038	2067	196.8	262.3	113.7	148.7	181.0	57.2	223.7	241.4	96.2	223.4	247.8	93.8
2039	2068	201.5	267.7	115.0	154.2	188.6	62.0	223.8	241.5	96.1	226.9	252.6	93.1
2040	2069	201.8	268.0	115.0	156.6	171.6	82.1	224.7	243.8	93.2	226.9	252.7	93.1
2041	2070	200.9	267.4	115.5	157.1	172.1	82.6	225.2	244.3	93.5	225.5	250.8	91.5
2042	2071	201.7	268.1	115.2	156.3	190.9	66.5	230.9	254.2	91.1	218.3	241.4	94.2
2043	2072	200.4	267.0	115.6	156.2	190.9	66.6	230.1	254.3	91.4	223.2	246.8	99.8
2044	2073	197.0	264.2	116.8	161.2	198.9	67.3	221.6	238.1	96.2	234.1	259.2	100.1
2045	2074	193.3	261.1	117.6	162.8	177.8	91.0	219.8	233.6	101.6	229.1	252.9	97.0
2046	2075	193.1	260.9	117.7	162.4	177.2	90.6	214.1	222.8	108.6	225.2	247.5	100.4
2047	2076	182.2	246.1	111.3	161.2	175.7	91.6	217.2	225.4	110.6	224.5	246.5	100.8
2048	2077	182.6	246.4	111.1	158.9	197.4	68.9	217.1	226.5	111.2	231.8	256.1	101.7
2049	2078	181.7	245.5	110.7	166.1	181.1	98.6	219.6	228.9	110.8	232.7	257.2	102.4
2050	2079	184.0	247.5	110.5	166.6	180.8	98.3	212.8	219.0	110.8	230.1	253.1	104.5

		G6						G8					
		Ave.	Lo.	Sc.	Ave.	Lo.	Sc.	Ave.	Lo.	Sc.	Ave.	Lo.	Sc.
2021	2050	155.3	166.8	71.2	158.8	175.5	61.8	155.9	171.9	54.8	159.5	186.5	55.8
2022	2051	154.4	165.1	72.3	164.0	182.4	59.7	157.6	174.3	54.0	160.8	173.7	64.4
2023	2052	157.2	169.9	68.8	167.2	185.0	56.5	157.2	173.9	54.4	162.4	176.0	64.3
2024	2053	161.2	173.8	72.8	168.2	185.9	56.0	157.4	174.2	54.4	160.1	172.9	64.3
2025	2054	158.1	169.9	74.8	172.4	186.4	54.2	157.8	175.1	53.7	165.8	196.3	62.9
2026	2055	156.6	167.9	74.1	172.6	186.6	54.1	156.6	173.1	52.6	168.9	182.4	73.4
2027	2056	154.3	164.1	75.8	171.9	185.4	55.2	156.3	172.9	52.1	171.5	200.9	54.8
2028	2057	153.2	163.1	75.6	172.4	186.3	54.7	159.6	177.4	52.5	172.4	201.5	54.0
2029	2058	156.2	158.3	79.0	175.5	191.4	52.4	160.3	178.1	53.8	176.9	206.8	55.4
2030	2059	153.3	154.6	75.5	177.8	193.1	49.9	159.9	177.8	54.2	179.2	194.9	70.3
2031	2060	155.8	158.0	72.4	175.0	189.3	52.9	163.1	181.3	57.6	181.0	193.0	68.7
2032	2061	158.1	161.6	71.7	178.3	194.4	50.4	167.6	185.1	54.1	181.8	193.8	68.6
2033	2062	162.2	166.6	74.5	174.8	190.3	46.7	169.9	188.4	51.5	179.0	193.7	71.7
2034	2063	158.4	160.7	76.3	178.4	194.9	43.5	172.5	191.3	49.3	181.3	196.3	70.1
2035	2064	158.6	160.6	76.3	174.1	189.6	46.1	171.9	190.4	49.7	184.9	200.9	70.7
2036	2065	161.6	165.8	74.0	175.3	191.1	44.7	177.6	195.1	63.0	186.6	203.3	68.6
2037	2066	156.7	160.4	70.0	176.4	191.4	48.7	175.0	193.2	66.0	181.5	197.2	66.4
2038	2067	155.0	158.3	69.1	174.5	190.0	51.0	177.3	196.1	65.7	178.3	206.2	56.0
2039	2068	153.3	157.3	67.8	173.5	188.5	51.3	183.3	203.6	64.4	173.3	186.6	68.0
2040	2069	155.2	158.6	68.9	173.8	188.9	51.3	186.3	207.0	62.3	171.2	184.1	65.8
2041	2070	155.7	159.7	68.4	176.4	192.4	52.3	183.3	204.5	65.1	172.8	186.5	66.0
2042	2071	152.8	153.4	72.5	173.2	188.1	51.5	187.0	209.5	64.3	174.3	201.2	54.5
2043	2072	147.5	149.5	70.8	171.8	185.8	53.9	184.3	205.6	65.6	172.6	186.0	65.1
2044	2073	150.9	151.6	71.6	172.0	186.2	53.6	181.6	202.3	64.2	173.4	201.6	55.3
2045	2074	144.1	145.8	61.6	173.2	185.5	53.1	183.2	204.2	63.5	172.0	200.4	57.9
2046	2075	150.4	149.6	73.1	173.7	186.5	52.4	183.6	204.5	63.0	172.6	200.9	56.6
2047	2076	156.4	156.7	78.3	169.1	179.8	54.9	189.9	209.7	59.8	174.3	202.3	54.1
2048	2077	158.6	159.5	79.7	168.3	179.5	55.8	189.9	209.7	59.8	173.1	200.9	57.3
2049	2078	160.0	159.2	79.8	166.3	176.1	56.2	187.5	206.5	60.6	172.0	199.8	60.3
2050	2079	159.5	155.2	84.9	161.6	169.2	56.4	187.2	206.3	60.6	170.4	198.9	62.0

Fig. 6. Linear Regression for Location and Scale parameter according to RCP 4.5 and RCP 8.5 in Seoul(G1, G2, G6, G8)

Fig. 7. Stationary Probability Precipitation of RCP 4.5 According to G1, G2, G6 & G8in Seoul

Table 6. Probability Precipitation Amount of Stationary & Non-stationary of RCP 4.5 to Target Year According to G1, G2, G6 & G8 in Seoul

Return Period (year)		Stationary											
		G1			G2			G6			G8		
from	to	30	50	100	30	50	100	30	50	100	30	50	100
2021	2050	437.2	473.5	522.4	520.2	563.8	622.7	407.9	444.8	494.5	357.4	385.8	424.1
2030	2059	630.8	688.9	767.4	556.7	607.6	676.2	410.1	449.2	501.9	361.1	389.1	427.0
ratio(%)		22.1	22.8	23.4	3.5	3.9	4.3	0.3	0.5	0.8	0.5	0.4	0.3
2040	2069	657.2	716.7	797.0	559.3	607.6	672.7	391.7	427.3	475.4	417.7	450.0	493.5
ratio(%)		25.2	25.7	26.3	3.8	3.9	4.0	-2.0	-2.0	-1.9	8.4	8.3	8.2
2050	2079	621.6	678.8	755.9	593.9	651.2	728.5	442.7	486.7	546.0	411.5	442.9	485.3
ratio(%)		21.1	21.7	22.4	7.1	7.7	8.5	4.3	4.7	5.2	7.6	7.4	7.2

Return Period (year)		Non-Stationary											
		G1			G2			G6			G8		
from	to	30	50	100	30	50	100	30	50	100	30	50	100
2021	2050	458.3	502.0	561.0	553.2	602.8	669.7	405.4	443.1	493.9	357.4	384.7	421.5
2030	2059	538.1	588.5	656.3	562.5	611.6	677.9	411.8	450.1	501.8	379.2	408.1	447.1
ratio(%)		8.7	8.6	8.5	0.8	0.7	0.6	0.8	0.8	0.8	3.0	3.0	3.0
2040	2069	626.9	684.5	762.2	572.8	621.5	687.0	419.0	458.0	510.6	403.4	434.1	475.6
ratio(%)		18.4	18.2	17.9	1.8	1.5	1.3	1.7	1.7	1.7	6.4	6.4	6.4
2050	2079	715.7	780.6	868.1	583.2	631.3	696.2	426.1	465.8	519.4	427.6	460.1	504.0
ratio(%)		28.1	27.7	27.4	2.7	2.4	2.0	2.5	2.6	2.6	9.8	9.8	9.8
2060	2089	736.3	802.9	892.8	593.5	641.1	705.3	417.6	456.5	509.0	451.8	486.1	532.5
ratio(%)		30.3	30.0	29.6	3.6	3.2	2.7	1.5	1.5	1.5	13.2	13.2	13.2
2070	2099	740.8	807.8	898.1	603.8	650.9	714.5	429.3	469.4	523.4	476.0	512.2	560.9
ratio(%)		30.8	30.5	30.0	4.6	4.0	3.3	3.0	3.0	3.0	16.6	16.6	16.5

(a) G1 Non-Stationary

(b) G2 Non-Stationary

(c) G6 Non-Stationary

(d) G8 Non-Stationary

Fig. 8. Non-Stationary Probability Precipitation of RCP 8.5 According to G1, G2, G6 & G8 in Seoul

Table 7. Probability Precipitation Amount of Stationary & Non-stationary of RCP 8.5 to Target Year According to G1, G2, G6 & G8 in Seoul

Return Period (year)		Stationary											
		G1			G2			G6			G8		
from	to	30	50	100	30	50	100	30	50	100	30	50	100
2021	2050	359.7	386.6	422.8	479.1	517.0	568.2	384.6	416.6	459.7	375.2	404.1	443.0
2030	2059	389.7	419.8	460.5	567.5	616.9	683.5	361.9	387.7	422.6	432.8	469.2	518.3
ratio(%)		4.2	4.3	4.5	9.2	9.7	10.1	-2.9	-3.5	-4.0	7.7	8.1	8.5
2040	2069	449.3	491.8	549.1	567.7	615.8	680.8	362.5	389.0	424.9	406.9	441.0	487.0
ratio(%)		12.5	13.6	14.9	9.2	9.6	9.9	-2.9	-3.3	-3.8	4.2	4.6	5.0
2050	2079	513.4	564.3	632.9	606.8	660.9	733.9	360.0	389.2	428.6	408.8	440.9	484.2
ratio(%)		21.4	23.0	24.9	13.3	13.9	14.6	-3.2	-3.3	-3.4	4.5	4.6	4.7

Return Period (year)		Non-Stationary											
		G1			G2			G6			G8		
from	to	30	50	100	30	50	100	30	50	100	30	50	100
2021	2050	344.8	370.2	404.6	370.2	404.6	438.8	488.4	536.9	602.2	380.7	411.1	452.2
2030	2059	383.4	414.2	455.9	414.2	455.9	497.4	472.0	513.0	568.3	405.7	438.1	481.8
ratio(%)		5.6	5.9	6.3	5.9	6.3	6.7	-1.7	-2.2	-2.8	3.3	3.3	3.3
2040	2069	426.2	463.1	513.0	463.1	513.0	562.6	453.8	486.5	530.5	433.4	468.1	514.8
ratio(%)		11.8	12.5	13.4	12.5	13.4	14.1	-3.5	-4.7	-6.0	6.9	6.9	6.9
2050	2079	469.1	512.0	570.0	512.0	570.0	627.8	435.6	459.9	492.7	461.1	498.0	547.8
ratio(%)		18.0	19.2	20.5	19.2	20.5	21.5	-5.4	-7.2	-9.1	10.6	10.6	10.6
2060	2089	496.4	543.3	606.5	543.3	606.5	669.5	417.4	433.4	455.0	488.9	528.0	580.7
ratio(%)		22.0	23.4	25.0	23.4	25.0	26.3	-7.3	-9.6	-12.2	14.2	14.2	14.2
2070	2099	518.6	568.5	635.9	568.5	635.9	703.1	399.2	406.9	417.2	516.6	557.9	613.7
ratio(%)		25.2	26.8	28.6	26.8	28.6	30.1	-9.1	-12.1	-15.4	17.8	17.9	17.9

RCP 4.5에 대한 정상성 빈도해석 결과, 재현기간 100년 확률강수량에서 G1은 목표연도 2050년 대비 2059, 2069, 2079년 모두에서 20% 이상 증가 비율을 보인 반면에 3개의 목표연도에서 증가 경향을 보이지는 않았다. 이외에 G2, G6, G8에서도 -1.9%~ 8.5%로 적은 범위에서의 증가율 변화를 보였으나 증가 경향은 나타나지 않았다. 이와 달리 RCP 4.5 비정상성 빈도해석의 100년 빈도 확률강수량 결과는 G1이 2050년 대비 2079년에 27.4%로 정상성과 유사한 범위의 증가율을 보였고, G2, G6, G8에서도 증가를 보였으나, 2079년 대비 정상성 빈도해석 결과와 유사한 증가폭으로 나타났다. 또한, 2099년에서도 G1에서는 2021년 대비 30%의 증가를 보인 반면에 G2, G6, G8에서는 각각 3.3%, 3.0%, 16.5%로 증가를 보였으나 증가폭은 G1에 비해 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다.

RCP 4.5에서는 온실가스 저감 효과를 반영하는 경우 기후 변화로 인한 장래 강수량의 변화에 다소의 증가를 보이는 반면에 증가폭이 크지는 않을 것으로 판단됨에 따라 정상성 빈도해석이 타당성을 갖을 것으로 판단하였다. RCP 4.5의

정상성 빈도해석에 따른 확률강수량도는 Fig. 7로 나타내었다. 도시 결과 G1, G8은 목표연도 2079년에서 강수량이 상대적으로 크지 을 보이지 않았으며, G6, G8에서는 목표연도 2050년이 가장 작은 강수량을 보이지 않음에 따라 모델별로 연도별 강수량의 변동 양상이 서로 다르게 나타났다.

RCP 8.5에 대한 정상성 빈도해석 결과, 100년 빈도 확률강수량이 G1, G2, G8 각각이 2050년 대비 2079년에 증가율 24.9%, 14.6%, 4.7% 증가를 보인 반면에 G6에서는 2079년 -3.4% 등 감소로 나타났다. 이와 달리, 비정상성 빈도해석 산정결과, 100년 빈도 확률강수량이 G1, G2, G8에서 각각 18.0%, 21.5%, 10.6%로 증가되는 경향을 보인 반면에 Fig. 9 (d)와 같이 축척 매개변수가 감소되는 G6에서는 -9.1%로 감소되는 것으로 나타났다.

RCP 8.5 비정상성 빈도해석 결과 목표연도 2050년에는 G8이 100년 빈도 강수량이 가장 크게 나타났고, G2, G1의 순으로 나타난 반면에 2079년에는 G2가 G8보다 값이 상향되는 것으로 나타났다.

빈도해석 결과 G1에서는 목표연도별로 정상성 및 비정상

성 모두 유사한 값의 범주에서 일정한 증가상태를 보인 반면에 G2에서는 정상성 빈도해석에서 2059년과 2069년에서 값의 역전을 보였고, G8에서도 2059년이 가장 크고 2069, 2079년으로 갈수록 값이 작아짐에 따라 미래 강수량의 증가를 가정하는 RCP 8.5에 대한 분석결과에 타당성을 갖지 못하는 것으로 판단되었다. 이와 달리 Fig. 8의 비정상성 빈도해석 결과는 감소경향을 갖는 G6을 제외한 G1, G2, G8에서 목표연도별 확률강수량의 증가 경향을 반영하는 것으로 나타났다.

온실가스 저감이 없는 극한기후에 따른 RCP 8.5에서는 장래 강우의 증가 상태를 반영하는 비정상성 빈도해석이 타당성을 가질 것으로 판단하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 미래의 극치강수량 변동 특성을 파악하기 위하여 CMIP5 기후변화 시나리오에 따라 다양성 있는 미래 강우 자료의 특성을 파악하고, 정상성 및 비정상성 빈도해석을 통한 빈도별 확률강수량을 산정하였다. 미래 강우 자료는 기후모형이 갖는 불확실성을 고려하여 RCP 4.5 및 RCP 8.5 시나리오별 8개 GCM 모형에 대한 검토를 통해 결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 경향성 검정을 수행한 결과 RCP 8.5의 G2, G4, G6, G8에서 증가되는 경향성을 보였으며, G2, G6, G8 모형에서는 80 mm 이상의 평균 발생횟수 및 여름철 평균 강수량이 높게 나타났고, 80 mm 이상 및 여름철 강수량이 높은 G1을 포함해 G1, G2, G6, G8의 4개 GCMs 자료를 극치강우의 분석 대상으로 선정하였다.
- (2) 30년 기준 1년씩 자료 이동에 따른 30세트를 구성에 따른 위치 및 축척 매개변수의 거동을 분석한 결과, 평균 강수량에 대한 위치 매개변수는 모두 선형적인 증가 추세를 보인 반면에 축척 매개변수는 RCP 4.5 G1, RCP 8.5 G6에서 감소를 보였다. RCP 4.5 G1에서는 정상성 및 비정상성 빈도해석에 따른 확률강수량 산정 결과 2050년 대비 2079년에 증가를 보인 반면에 RCP 8.5 G6에서는 감소를 보임에 따라 비정상성 빈도 해석의 경우 위치매개변수와 상관없이 축척매개변수에 따른 자료의 증감에 영향관계를 보였으며, 이러한 강수량의 변화에 따라 RCP 8.5에 따른 G6의 비정상성 빈도해석은 타당성을 갖지 못하는 것으로 판단되었다.
- (3) RCP 4.5의 정상성 빈도해석 결과 증가 경향을 보이는 반면에 목표연도 2050년에는 확률강수량이 낮은 측에서 발생하였고, 2079년에는 높은 측면에서 발생양상을 갖지만 일정한 증가상태를 반영하지는 않는 것으로 나타났다. 반면에 비정상성 빈도해석을 수행한 결과

각 모델별 정상성 빈도해석과 유사한 범위에서 시간 흐름에 따른 일정한 증가상태를 보였다. RCP 4.5에 따른 온실가스 저감 효과를 고려하는 경우 정상성 빈도해석이 타당성을 갖는 것으로 판단되나 비정상성 빈도해석을 통한 비교 검토의 필요성을 가질 것으로 판단되었다.

- (4) 이와 달리 RCP 8.5의 경우 경향성 검정을 통한 G2, G6, G8에서 선형적인 증가를 보였고, 축척매개변수가 감소되는 G6을 제외한 G1에서는 정상성 및 비정상성 모두에서 강수의 증가를 보였고, G2와 G8에서는 정상성에서는 목표연도별 확률강수량 값이 역전되는 구간이 발생하는 반면에 비정상성 빈도해석은 선형성 검정에 따른 미래 확률강수량이 일정한 증가 양상을 보여 RCP 8.5에 대한 비정상성 빈도해석이 타당한 것으로 판단되었다. 100년 빈도 확률강수량은 모델에 따라 2050년에는 404.6 mm에서 452.2 mm, 2079년 547.8 mm에서 570.0 mm로 강수량 증가를 보였다. 이러한 결과는 불확실한 미래에 발생할 수 있는 다양성 있는 시나리오 및 그에 따라 발생 가능한 위험범위 결과로 판단되었다.

본 연구결과는 장래 발생 가능한 극치분석을 위해 다양성 있는 모델을 선택하고, 선택된 모델의 정상성 및 비정상성 빈도분석의 수행 및 비교/검토 결과로 기후시나리오에 따른 미래 강수의 특성을 살펴보았다. 결과적으로 미래 발생 가능한 다양성 있는 시나리오 제공이 나타났다. 본 연구결과는 다양성 있는 모델의 검증결과를 토대로 근 미래에 대한 수자원 이수 및 치수 관련 정책, 수해로 인한 재산 방지 기준 마련을 위한 검토, 기후변화를 고려한 장기적인 물관리 정책 등에 충분한 활용성을 가질 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단(MOIS-재난-2013-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ashrit, R.G., Kitoh, A., and Yukimoto, S. (2005) Transient Response of ENSO-monsoon Teleconnection in MRI-CGCM2 Climate Change Simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 83, pp. 273-291.
- Baek, H.J., Cho, C.H., Kwon, W.T., Kim, S.K., Cho, J.Y., and Kim, Y.S. (2011) Development Strategy for New Climate Change Scenarios based on RCP. *Journal of Climate Change Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 55-68.
- Cannon, A.J., Sobie, S.R., and Murdock, T.Q. (2015) Bias

- Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*, Vol. 28, pp. 6938-6959. doi:10.1175/JCLI-D-14-00754.1
- Cho, J.P. (2013) *Impact Assessment of Climate Change for Agricultural Reservoirs Considering Uncertainty*. Research Report 2013-05, APEC Climate Center. (in Korean with English abstract)
- Douville, H., Royer, J.F., Polcher, J., Cox, P., Gedney, N., Stephenson, D.B., and Valdes, P.J. (2000) Impact of CO₂ Doubling on the Asian Summer Monsoon: Robust Versus Model-dependent Responses. *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 78, pp. 421-439.
- Fowler, H.J., Ekström, M., Kilsby, C.G., and Jones, P.D. (2005) New Estimates of Future Change in Extreme Rainfall Across the UK Using Regional Climate Model Intergraiton: 1. Assessment of Control Climate. *Journal of Hydrology*, Vol. 300, No. 1-4, pp. 212-233.
- Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G.R. (2009) Addressing Climate Information Needs at the Regional Level: The CORDEX Framework. *WMO Bulletin*, Vol. 58, No. 3, pp. 175-183.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panle 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 Engineer*, Vol. 31, No. 5B, pp. 449-457.
- Khalique, M.N., Ouarda, T.B.M.J., Ondo, J.-C., Gachon, P., and Bobée, B. (2006) Frequency Analysis of a Sequence of Dependent and/or Non-stationary Hydrometeorological Observations: A Review. *Journal of Hydrology*, Vol. 329, No. 3-4, pp. 534-552.
- Kim, G.S., and Lee, G.C. (2012) Application of a Non-stationary Frequency Analysis Method for Estimating Probable Precipitation in Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 54, No. 5, pp. 141-153. doi:10.5389/KSAE.2012.54.5.141
- Kim, T.J., Kwon, H.H., Lee, D.R., and Yoon, S.K. (2014) Development of Stochastic Downscaling Method for Rainfall Data Using GCM. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 9, pp. 825-838.
- Kwon, Y.M., Park, J.W., and Kim, T.W. (2009) Estimation of Design Rainfalls Considering an Increasing Trend in Rainfall Data. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 2B, pp. 131-139.
- Lee, C.H., Ahn, J.H., and Kim, T.H. (2010) Evaluation of Probability Rainfalls Estimated from Non-Stationary Rainfall Frequency Analysis. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 2, pp. 187-199.
- Lee, O.J., Park, M.W., Lee, J.H., and Kim, S.D. (2016) Future PMPs Projection According to Precipitation Variation under RCP 8.5 Climate Change Scenario. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 2, pp. 107-119.
- Meehl, G.A., and Arblaster, J.M. (2003) Mechanisms for Projected Future Changes in South Asian Monsoon Precipitation. *Climate Dyn.*, Vol. 21, pp. 659-675.
- Oden, J.T., and Prudhomme, S. (2002) Estimation of Modeling Error in Computational Mechanics. *Journal of Computational Physics*, Vol. 182, No. 2, pp. 496-515.
- 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. 421-434.
- Stedinger, J.R., and Crainiceanu, C.M. (2000) Climate Variability and Flood-risk Management. *Proceedings of the 9th United Engineering Foundation Conference on Risk-based Decision Making in Water Resources*, pp. 77-86.
- Villarini, G., Scoccimarro, E., and Gualdi, S. (2013) Projections of Heaby Rainfall over the Central United States based on CMIP5 Models. *Atmospheric Science Letters*, Vol. 14, pp. 200-205.
- Yoon, S.K., and Cho, J.P. (2015) The Uncertainty of Extreme Rainfall in the Near Future and its Frequency Analysis over the Korean Peninsula using CMIP5 GCMs. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 10, pp. 817-830.
- Yoon, S.K., Jang, S.M., Rhee, J.Y., and Cho, J.P. (2017) Analysis of Future Extreme Rainfall Under Climate Change Over the Landslide Risk Zone in Urban Areas. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 5, pp. 355-367.

Received	February 19, 2018
Revised	February 27, 2018
Accepted	March 21, 2018