



Prospects of future extreme precipitation in South-North Korea shared river basin according to RCP climate change scenarios

Yeom, Woongsun^a · Park, Dong-Hyeok^b · Kwon, Minsung^c · Ahn, Jaehyun^{d*}

^aGraduated Student, Department of Urban Infrastructure and Disaster Prevention Engineering, Seokyeong University, Seoul, Korea

^bResearcher, Urban Risk Management Research Center, Seokyeong University, Seoul, Korea

^cResearcher, National Disaster Management Research Institute, Ministry of the Interior and Safety, Ulsan, Korea

^dProfessor, Department of Civil and Architectural Engineering, Seokyeong University, Seoul, Korea

Paper number: 19-068

Received: 21 August 2019; Revised: 11 September 2019; Accepted: 11 September 2019

Abstract

Although problems such as river management and flood control have occurred continuously in the Imjin and Bukhan river basin, which are shared by South and North Korea, efforts to manage the basin have not been carried out consistently due to limited cooperation. As the magnitude and frequency of hydrologic phenomena are changing due to global climate change, it is necessary to prepare countermeasures for the rainfall variation in the shared river basin area. Therefore, this study was aimed to project future changes in extreme precipitation in South-North Korea shared river basin by applying 13 Global Climate Models (GCM). Results showed that the probability rainfall compared to the reference period (1981-2005) of the shared river basin increased in the future periods of 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100 under the Representative Concentration Pathways (RCP)4.5 and RCP8.5 scenarios. In addition, the rainfall frequency over the 20-year return period was increased in all periods except for the future periods of 2041-2070 and 2071-2100 under the RCP4.5 scenario. The extreme precipitation in the shared river basin has increased both in magnitude and frequency, and it is expected that the region will have a significant impact from climate change.

Keywords: Climate change, South-North Korea shared river basin, Extreme precipitation, Return period

RCP 기후변화 시나리오를 활용한 남북공유하천유역 미래 극한강수량 변화 전망

염웅선^a · 박동혁^b · 권민성^c · 안재현^{d*}

^a서경대학교 대학원 도시기반방재안전공학과 석사과정, ^b서경대학교 도시안전연구소 박사후연구원, ^c국립재난안전연구원 선임연구원,

^d서경대학교 이공대학 토목건축공학과 교수

요지

남한과 북한이 군사분계선을 경계로 공동으로 점유하고 있는 남북공유하천유역은 과거부터 하천관리, 홍수조절 등 다양한 문제가 지속적으로 발생해 왔다. 그러나 협력과 조정에 한계가 있어 유역 관리에 대한 지속적인 연구와 협력이 진행되지 못하였다. 기후변화로 인해 수문현상의 규모와 빈도가 변화하고 있어 공유하천유역의 강수변동성에 관한 대비책 마련이 필요하지만, 이에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 13개 전 지구 기후 모델의 RCP (Representative Concentration Pathway, 이하 RCP)4.5와 RCP8.5 시나리오를 공유하천유역 인접 11개 관측소에 적용하여 극한강수량 변동성을 규모와 빈도의 측면에서 분석하였다. 분석 결과 공유하천유역의 참조기간(1981-2005) 대비 확률강우량은 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오 모두 전 기간에서 증가하였다. 또한 재현기간 20년 규모의 강수 빈도는 RCP4.5 시나리오의 중반기(2041-2070)와 후반기(2071-2100)를 제외하고 전 기간에서 증가하여 극한강수의 출현빈도가 점차 빨라지고 있음을 확인할 수 있었다. 결과적으로 공유하천유역 내 극한강수량은 그 규모와 빈도가 모두 증가하여 기후변화로 인한 상당한 영향이 있을 것으로 전망되며, 이에 대한 대비가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어: 기후변화, 남북공유하천, 극한강수량, 재현기간

*Corresponding Author. Tel: +82-2-940-7770

E-mail: wr21@naver.com (J. Ahn)

1. 서론

최근 기후변화로 인한 수문현상의 규모와 빈도는 전 지구적으로 변하고 있다. 우리나라는 집중호우로 인해 수공구조물 및 홍수방어시스템을 통한 홍수방어능력을 초과하는 강우를 발생시켜 홍수 피해를 증가시키고 있다(Jang et al., 2011). 또한, 북한은 관측 기후를 활용하여 기후변화로 인한 위험도를 평가한 Global Climate Risk Index 2013에서 세계 7위를 기록하였다(Harmeling and Eckstein, 2013). 이와 같은 한반도 강수특성의 변화는 남한과 북한의 국경을 따라 흐르는 공유하천유역의 수문특성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 공유하천유역에 대한 미래 극한강수량의 변화를 수문학적으로 분석하여 관리하여야 한다.

기후변화를 예측하기 위해, 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental panel of climate change, 이하 IPCC)의 제 5차 결합 기후모델 비교사업(The 5th phase of the coupled model intercomparison project, 이하 CMIP5)에서는 대표 농도 경로(Representative Concentration Pathway, 이하 RCP) 시나리오에 기반한 전지구기후모델(Global Climate Model, 이하 GCM)을 생성하였다(Taylor et al., 2012). GCM은 온실가스 배출 시나리오에 기반하여 기후변화를 물리적으로 해석하여 전 지구 규모에서 과학적인 전망결과를 제공하며(Jung et al., 2018), 기후변화 영향 평가 및 취약성 평가 연구에 활용되고 있다(Shin and Jung, 2015). Shin and Jung (2015)은 GCM 모델을 분석하여 동북아시아 지역에 대한 기온, 강수량, 일사량의 미래 변화를 정량적으로 평가하였으며, 동북아시아 지역의 기온 및 강수량 증가량이 전 지구 평균보다 큰 것으로 예측하였다. Hong and Ahn (2015)은 GCM 모델을 기반으로 한반도의 지역적 강수특성 변화를 조사하였으며, 21세기 말(2071-2100)의 극한강수량이 22~38% 증가할 것으로 전망하였다.

GCM 모델은 시-공간적 특성 변화나 모델 간 성능차이에 따라 다양한 결과가 도출되는 등 많은 불확실성 요소를 가지고 있다. 따라서 분석 목적에 따른 적절한 상세화 기법의 선정이 필수적이다. Eum and Cannon (2017)은 GCM 모델의 장기 추세를 보존하는 데 유리한 상세화 기법인 SDQDM (Spatial Disaggregation with Quantile Delta Mapping)을 제안하였으며, Cho et al. (2018)은 SDQDM 방법을 한반도에 적용하여 GCM 모델을 지점별로 상세화하였다. Jung et al. (2018)은 SDQDM 방법으로 상세화된 GCM 모델 간 과거기간 재현성 평가를 실시하여 한반도 지역기후 설명력에 대한 우선순위를 산정하였으며, 군집분석 기법을 사용하여 최종적으로 한반도의 공간특성에 적합한 13개 GCM 모델을 선정하였다.

Kwon et al. (2019)은 SDQDM 방법을 통해 상세화된 25개

GCM 자료를 북한지역에 적용하여 미래 극한강수량의 변화를 정량적으로 평가하는 방법론을 제시하였다. 분석 결과 북한지역의 강수변동성이 점차 커지고 있음을 확인하였다. 그러나 GCM 모델 간 성능차이를 고려하여 선정된 13개 GCM 모델을 활용한 연구는 현재까지 진행된 바 없다. 또한 북한지역의 강수변동성으로 인해 직접적인 영향을 받을 것으로 예상되는 공유하천유역에 대한 연구 또한 미비한 실정이다.

국제 공유하천을 둘러싼 물이용과 관련한 분쟁은 과거부터 지속되고 있으며 국제적으로 심각한 문제 중 하나이다(ME and K-water, 2019). 국제 공유하천의 수자원 개발과 이용은 협력과 공평성에 기초해야 한다는 1966년의 Helsinki 규칙 이후 협의를 통해 문제를 해결하려는 노력이 증가하였다. 그러나 협력과 조정에 한계가 있는 국제하천에서의 분쟁은 심하며, 하천관리, 홍수조절 등 다양한 문제가 발생한다. 특히 남북공유하천유역에서는 하천 상류인 북한지역의 댐건설과 무단 방류로 인한 피해가 지속적으로 발생해 왔으나, 관리와 협력의 노력이 지속적으로 추진되지 못하였다. 그러나 기후변화로 인해 한반도의 강수량이 증가하고, 집중호우의 빈도와 양이 예측 불가한 수준으로 변화하여 공유하천유역의 재해위험성이 커질 것으로 전망되기 때문에 수문학적 분석을 통한 대책 마련이 시급한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 한반도의 공간특성에 적합한 13개 GCM 모델의 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오를 기후변화 대비 수자원 적응기술 개발 연구단(Climate Change Adaption for Water Resources, 이하 CCAW)으로부터 제공받아 공유하천유역의 극한강수량 변화를 정량적으로 평가하여 재해위험성을 평가하는 데 기초자료로 활용될 수 있도록 하였다. 모델의 장기적 추세를 반영하기 위해 SDQDM 방법으로 상세화된 자료를 사용하였으며, 공유하천유역인 임진강유역 및 북한강유역 인접 11개 관측소에 대한 빈도해석을 실시하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 13개 GCM 모델을 공유하천유역에 적용하여 극한강수량 변화를 정량적으로 평가하기 위해 Fig. 1과 같은 과정을 통하여 연구를 수행하였다. GCM 모델 간 성능차이를 고려하여 선정된 13개 GCM 자료를 CCAW로부터 제공받아 분석에 사용하였으며, 남한과 북한의 공유하천유역 반경 20 km 내 11개 강우관측소를 선정하였다. 다음, 기간별 추세를 확인하기 위해 GCM 자료를 Reference (1981-2005), Future 1 (2011-2040), Future 2 (2041-2070), Future 3 (2071-2100)로 구분하였다. 1981년~2005년 사이의 실제 관측값과 GCM 자료의 Reference (1981-2005)기간 월강우량 평균 및 연최대

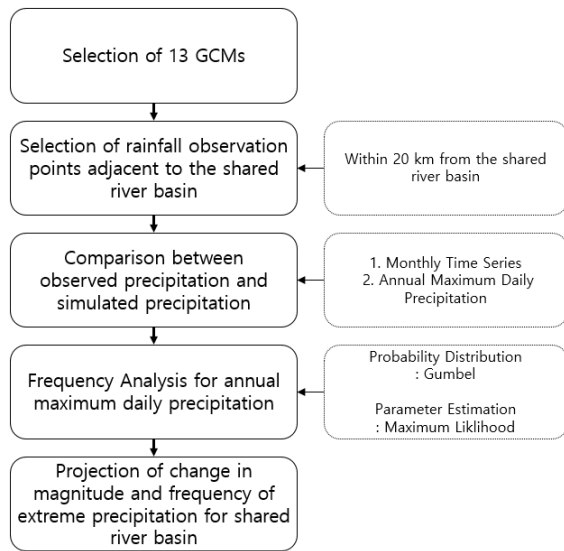


Fig. 1. Research flowchart of this study

강우량을 비교하여 자료의 적합성을 검토하였으며, 지속기간 24시간 빈도해석을 실시하여 그 결과를 기간별로 비교하였다.

2.1 대상지점

남한과 북한의 국경을 걸쳐 흐르는 주요 하천으로는 북한강과 임진강을 들 수 있다. 북한강유역은 전체 유역면적 10,124 km²중 북한 23.1%, 남한 76.9%를 각각 점유하고 있으며, 임진강유역은 전체 유역면적 8,118 km²중 북한 62.9%, 남한 37.1%를 점유하고 있다. 하천 및 유역의 유로연장 및 유역면적 정보는

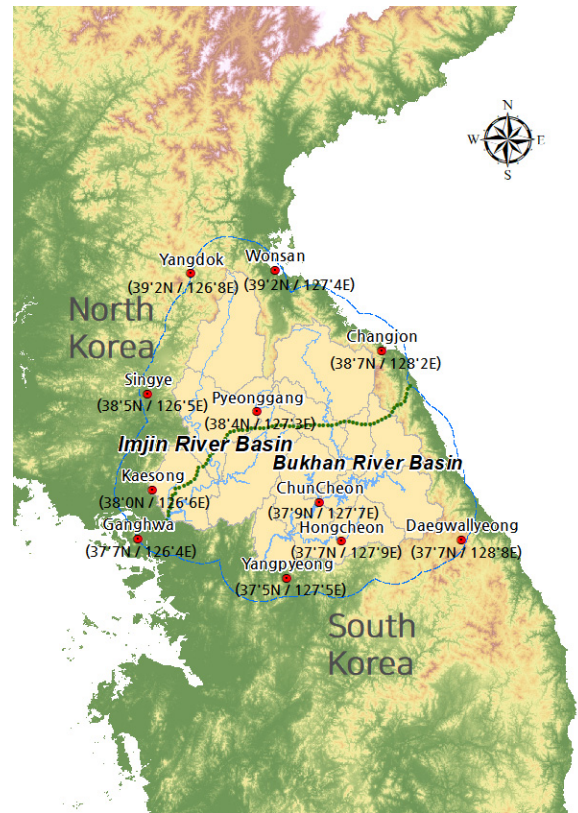


Fig. 2. Study area and meteorological stations

Table 1에 제시하였다. 임진강유역 및 북한강유역에 인접한 강우관측소는 Fig. 2와 같이 반경 20 km 내 11개소이며, Table 2에 강우관측소별 위경도와 관측소번호 등의 정보를 제시하였다.

Table 1. Specification of South-North shared river basin

Basin	Basin Factor	Total	South Korea	North Korea
Bukhan River	Channel length (km)	291.3	158.8	132.5
	Area(km ²) (Share Ratio (%))	10,124	7,787 (76.9)	2,337 (23.1)
Injin River	Channel length (km)	254.6	92.0	162.6
	Area (km ²) (Share Ratio (%))	8,118	3,009 (37.1)	5,109 (62.9)

Table 2. Weather observation sites around South-North shared river basin (20 km)

No.	Sta.	Latitude	Longitude	Station ID	First year of observation
1	Yangdok	39°2'N	126°8'E	52	1981
2	Wonsan	39°2'N	127°4'E	55	1973
3	Changjon	38°7'N	128°2'E	61	1981
4	Singye	38°5'N	126°5'E	67	1981
5	Kaesong	38°0'N	126°6'E	70	1973
6	Pyeonggang	38°4'N	127°3'E	75	1981
7	Daegwallyeong	37°7'N	128°8'E	100	1973
8	Chuncheon	37°9'N	127°7'E	101	1973
9	Ganghwa	37°7'N	126°4'E	201	1973
10	Yangpyeong	37°5'N	127°5'E	202	1973
11	Hongcheon	37°7'N	127°9'E	212	1973

2.2. 기후변화시나리오

본 연구에서는 CCAW로부터 제공받은 13개 GCM 모델을 적용하여 분석을 진행하였으며, 사용된 모델에 대한 정보는 Table 3에 제시하였다. CMIP5 모델은 제시된 Table 4와 같이 RCP 시나리오에 따라 4가지로 구분된다. 본 연구에서는 온실가스 저감 정책에 따른 공유하천유역 미래 극한강수량 변화를 비교하기 위하여 정책이 상당히 실행되는 경우인 RCP4.5 시나리오와 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우인 RCP8.5 시나리오를 선정하여 분석을 실시하였다. 또한 21세기 전, 중, 후반 변화 추세를 확인하기 위하여 GCM 자료를 RCP 시나리오별(RCP 4.5, 8.5), 기간별로 Reference (1981-2005), Future 1 (2011-2040, 이하 F1), Future 2 (2041-2070, 이하 F2), Future 3 (2071-2100, 이하 F3)로 구분하였다.

분석을 실시하기에 앞서, 자료의 적합성 검토를 위해 13개 강우관측소의 실제 관측값(1981-2005)과 GCM 모델의 Reference (1981-2005)간 월강수량 평균과 연최대강수량을 비교하였다. 월강수량 평균 비교 결과 Fig. 3에 제시된 바와 같이 GCM 자료의 월강수량 평균이 관측값과 유사한 형태를 보였다. Fig. 4에 제시된 비교 결과를 보면, 검은 실선으

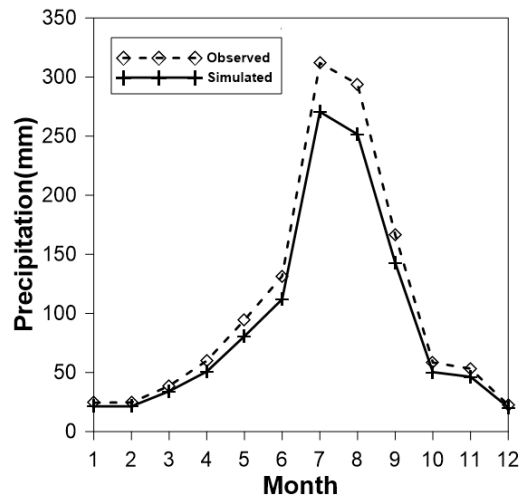


Fig. 3. Comparison of the observed precipitation (dotted line plot) with simulated precipitation (line plot) from 1981 to 2005 in 13 GCMs (Monthly precipitation)

로 표시된 관측자료의 연최대강수량이 전 지점에서 GCM 자료 분포의 1~3사분위 내에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로, 본 연구에서 사용한 GCM 자료는 실제 관측값의

Table 3. 13 GCMs of CMIP5

No.	GCM	Institution
1	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
2	CESM1-BGC	National Center for Atmospheric Research, USA
3	CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climantici
4	CMCC-CMS	
5	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques, France
6	GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA
7	HadGEM2-AO	Met Office Hadley Centre for Climate Change, UK
8	HadGEM2-ES	
9	INM-CM4	Institute of Numerical Mathematics, Russia
10	IPSL-CM5A-LR	Institute Pierre Simon Laplace, France
11	IPSL-CM5A-MR	
12	MRI-CGCM3	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
13	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre

Table 4. Classification of RCP scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)

Scenario	CO2 concentration (ppm)	Explanation for each RCP scenarios
RCP2.6	420	One pathway where radiative forcing peaks at approximately 3 W/m ² before 2100 and then declines
RCP4.5	540	Two intermediate stabilization pathways in which radiative forcing is stabilized at approximately 4.5 W/m ² and 6.0 W/m ² after 2100
RCP6.0	670	
RCP8.5	940	One high pathway for which radiative forcing reaches greater than 8.5 W/m ² by 2100 and continues to rise for some amount of time

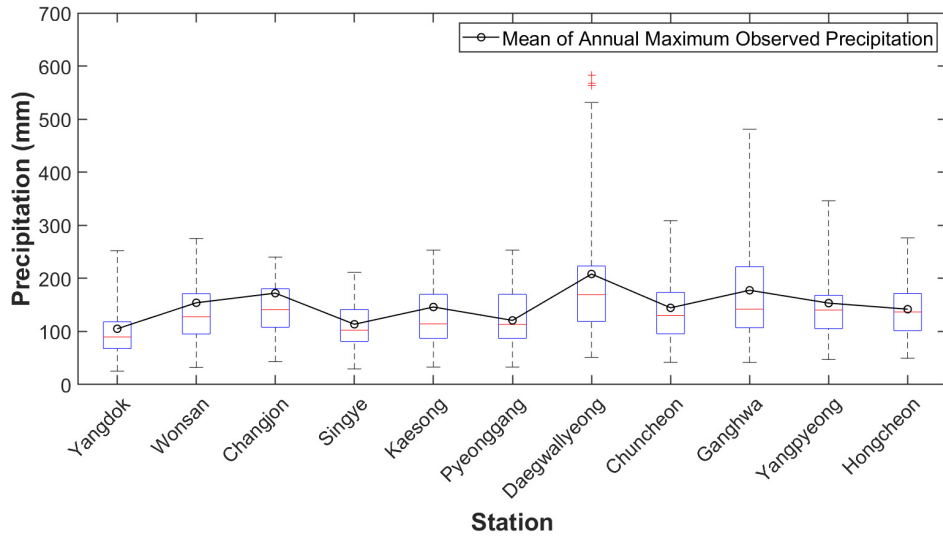


Fig. 4. Comparison of the observed precipitation (line plot) with simulated precipitation (box-plot) from 1981 to 2005 in 13 GCMs (Annual maximum daily precipitation)

기후적 요소와 변화 양상을 잘 반영하고 있다는 것을 확인하였다.

2.3 확률분포함수 및 매개변수 추정

본 연구에서는 GCM 자료의 강우빈도해석 시에 Type-1 극치분포인 Gumbel 분포를 이용하였다. 홍수량 산정 표준지침 (ME, 2019)에서 지점빈도해석 확률강우량 산정에 최적 확률 분포형으로 Gumbel 분포로 통일하여 채택하는 것을 원칙으로 제시한 바 있다. Gumbel 분포의 확률밀도함수와 누적확률 분포 함수는 Eqs. (1) and (2)에 각각 제시하였다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{x-x_0}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right], -\infty < x < \infty \quad (1)$$

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right] \quad (2)$$

여기서, α 는 축척매개변수(scale parameter)이고, x_0 는 위치 매개변수(location parameter)이다. 매개변수 α 와 x_0 의 추정 방법으로 모멘트법, 최우도법, 확률가중모멘트법이 널리 사용되고 있다. 모멘트법은 표본이 충분하지 못할 경우 이상치에 지나치게 민감한 문제점이 있으며, 확률가중모멘트법은 재현기간이 큰 경우 지나치게 큰 설계값이 산정되는 경우가 있다(Yoon, 2008). 최우도법은 표본자료들의 발생결합확률 또는 확률분포 모수의 함수로 정의되는 우도함수를 결정하고 이 우도함수를 최대화하는 모수를 최적치로 결정하는 방법이며 이상치가 있는 경우에도 왜곡특성을 크게 나타내지 않고

자료수가 충분하지 못한 경우에도 영향을 크게 받지 않는다 (Kwon et al., 2011). 따라서 본 연구에서는 최우도법을 적용하여 빈도해석을 수행하였다.

3. 결 과

본 연구에서는 기간별로 구분한 RCP4.5, RCP8.5 시나리오 자료를 활용하여 공유하천유역 인접 11개 지점의 일강우에 대한 빈도해석을 실시하였으며, 전 지점 평균 확률강우량 및 참조기간 대비 변화율을 RCP 시나리오별로 Table 5, Table 6에 제시하였다. 먼저, RCP4.5 시나리오에서는 F1와 F2에서 증가 경향을 보이거나 F3에 증가폭이 감소하여 F2와 유사한 결과를 보였다. 기간별 평균 변화율은 F1기간에서 11%, F2에서 18.3%, F3에서 19.0%로 나타났다. RCP8.5 시나리오에서는 F1, F2, F3 모두에서 증가 경향을 보이며 F3로 갈수록 증가폭이 커지는 결과를 보였다. 또한 기간별 평균 변화율은 F1에서 10.4%, F2에서 19.6%, F3에서 35.0%로 나타났다.

Fig. 5는 본 연구에서 실시한 빈도해석 결과 중 20년 빈도의 확률강우량을 지역분포한 결과이다. 공간내삽을 위해 역거리 가중법을 사용하였다. 그림에서 알 수 있듯, RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 모두 참조기간의 지역분포와 유사한 형태를 보였다. 대관령 지점에 인접한 북한강유역 동남부가 가장 높은 분포를 보였으며, 임진강유역 서부로 갈수록 20년 빈도 확률강우량이 작아지는 결과가 나타났다. 다음 Fig. 6은 참조기간 대비 21세기 F3의 증가량을 RCP 시나리오별로 계산하여 지역

Table 5. Frequency analysis results of simulated precipitation of 24 hours duration (RCP 4.5 scenarios)

Return Period (Year)	Reference precipitation (mm)	RCP4.5					
		F1		F2		F3	
		precipitation (mm)	Rate of change (%)	precipitation (mm)	Rate of change (%)	precipitation (mm)	Rate of change (%)
2	131.1	146.2	11.6	154.1	17.6	158.0	20.5
10	218.9	243.2	11.1	258.8	18.2	260.8	19.1
20	252.5	280.3	11.0	298.7	18.3	300.1	18.8
30	271.8	301.6	10.9	321.7	18.4	322.7	18.7
50	296.0	328.2	10.9	350.5	18.4	351.0	18.6
80	318.1	352.6	10.9	376.8	18.5	376.9	18.5
100	328.6	364.2	10.8	389.3	18.5	389.1	18.4

Table 6. Frequency analysis results of simulated precipitation of 24 hours duration (RCP 8.5 scenarios)

Return Period (Year)	Reference precipitation (mm)	RCP8.5					
		F1		F2		F3	
		precipitation (mm)	Rate of change (%)	precipitation (mm)	Rate of change (%)	precipitation (mm)	Rate of change (%)
2	131.1	147.1	12.3	159.1	21.4	178.0	35.8
10	218.9	242.2	10.6	262.3	19.8	295.7	35.1
20	252.5	278.6	10.3	301.7	19.5	340.7	34.9
30	271.8	299.5	10.2	324.4	19.3	366.6	34.8
50	296.0	325.6	10.0	352.7	19.2	398.9	34.8
80	318.1	349.5	9.9	378.7	19.0	428.5	34.7
100	328.6	360.9	9.8	391.0	19.0	442.5	34.7

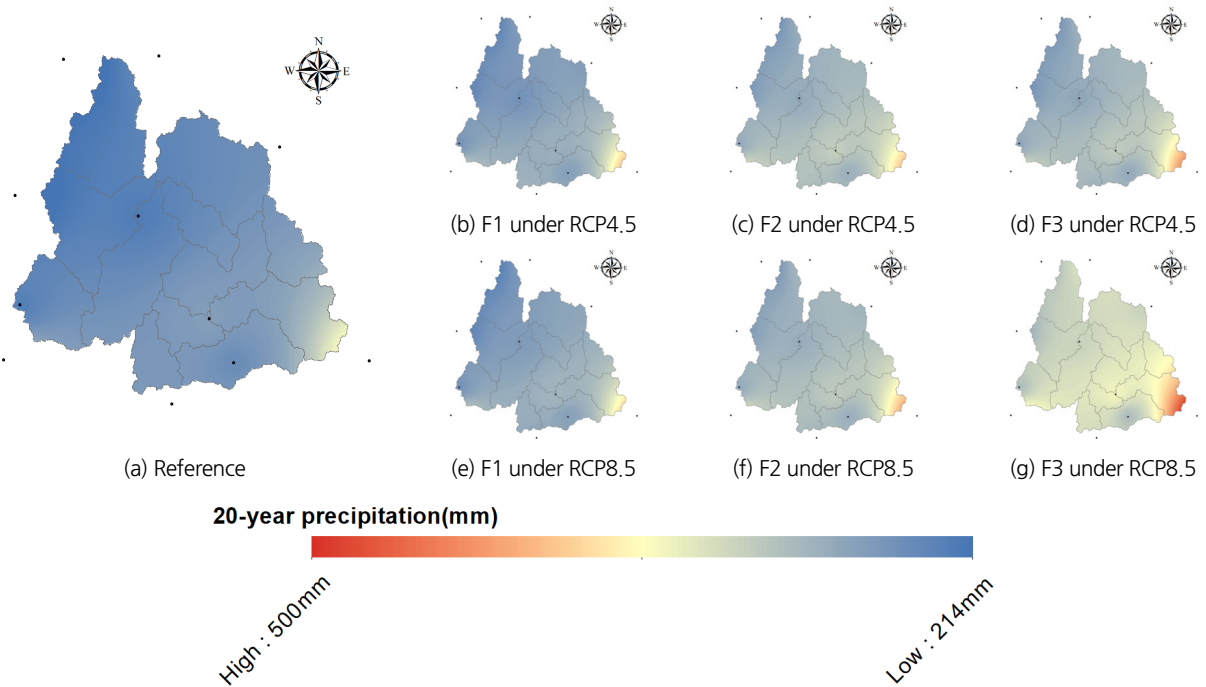


Fig. 5. Spatial distributions of 20-year precipitation (mm) for 13 GCMs

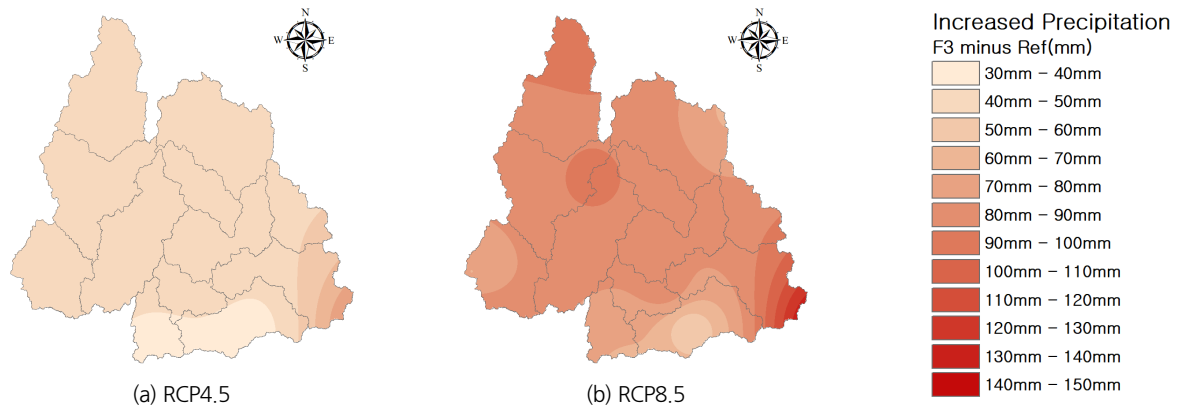


Fig. 6. Spatial distributions of increased precipitation F3 minus Reference (mm)

Table 7. Average of 20-year return period changes at 11 stations

	RCP4.5			RCP8.5		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Return Period	11.6	8.9	8.9	12.1	8.4	5.3
Standard Deviation	1.89	1.31	1.54	1.52	1.45	0.98

분포한 결과이다. 20년 빈도 확률강우량의 증가량은 북한강유역 동남부에서 가장 높았으며 임진강유역과 북한강유역 상류 또한 높은 분포를 나타내었다. 특히, 북한강유역 동남부와 임진강유역 북부는 RCP8.5에서 100 mm 이상의 변화량을 보였다.

본 연구에서는 미래기간의 극한강수량 빈도 변화 양상을 확인하기 위해 20년 빈도 강우의 재현기간 변화를 기간별로 분석하였다. Table 7은 지점별로 계산된 재현기간 변화의 평균값을 나타낸 것이다. 공유하천유역에서 재현기간 20년 규모 강우의 빈도는 RCP4.5 시나리오에서는 평균적으로 F1 11.6년, F2 8.9년, F3 8.9년으로 변화하였으며, RCP8.5 시나리오에서는 평균적으로 F1 12.1년, F2 8.4년, F3 5.3년으로 변화하였다. 또한 Fig. 7에 제시된 그래프를 보면 RCP4.5 시나리오에서는 F2와 F3 사이에 큰 차이가 없이 유지되는 양상을 보이나, 참조기간과 비교했을 때 전체적으로 감소 추세를 확인할 수 있다. Fig. 8은 재현기간 변화의 지역분포를 나타낸 것이다. RCP4.5와 RCP8.5 모두 유역 상류부에서 급격한 변화를 보이며, 북한강유역에 비해 임진강유역의 재현기간 변화가 큰 것으로 나타났다. 특히 임진강유역 인접 관측소인 신계, 평강지점은 RCP4.5에서 전 기간 감소를 보였으며, 20년 빈도의 극한강우가 RCP8.5의 F3에 각각 4.2년, 4.5년 빈도로 나타났다.

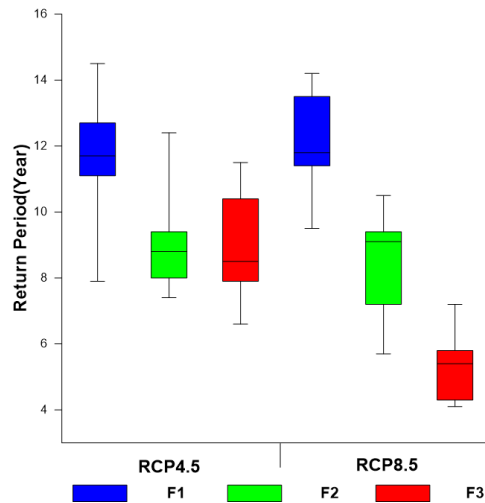


Fig. 7. Box plots of 20-year return period changes at 11 stations

4. 결론

본 연구에서는 CMIP5 모델에서 제공하는 GCM 자료 중 한반도의 공간특성에 적합한 13개 모델을 사용하여 남북공유하천유역의 미래 극한강수량의 변화를 평가하였다. 또한 미래 극한강수량의 변화를 지역분포하여 시각화하였다. 분석 결과 남북공유하천유역인 임진강유역과 북한강유역의 미래 극한강수량은 규모와 빈도 양면에서 모두 증가할 것으로 전망되었다. 먼저 극한강수량 규모의 변화를 살펴보면 RCP4.5 시나리오에서는 F3에 증가폭이 감소하는 경향을 보였으나 확률강우량 평균 증가율이 20%로 크게 나타났다, RCP8.5 시나리오에서는 후반기로 갈수록 증가하는 경향을 보여 F3의 증가율이 35%로 나타났다. 또한 20년 빈도 확률강우량의 지역분포 결과 북한강유역의 동남부와 임진강유역 북부는 참조기간 대비 RCP8.5 시나리오에서 100 mm 이상의 변화량을

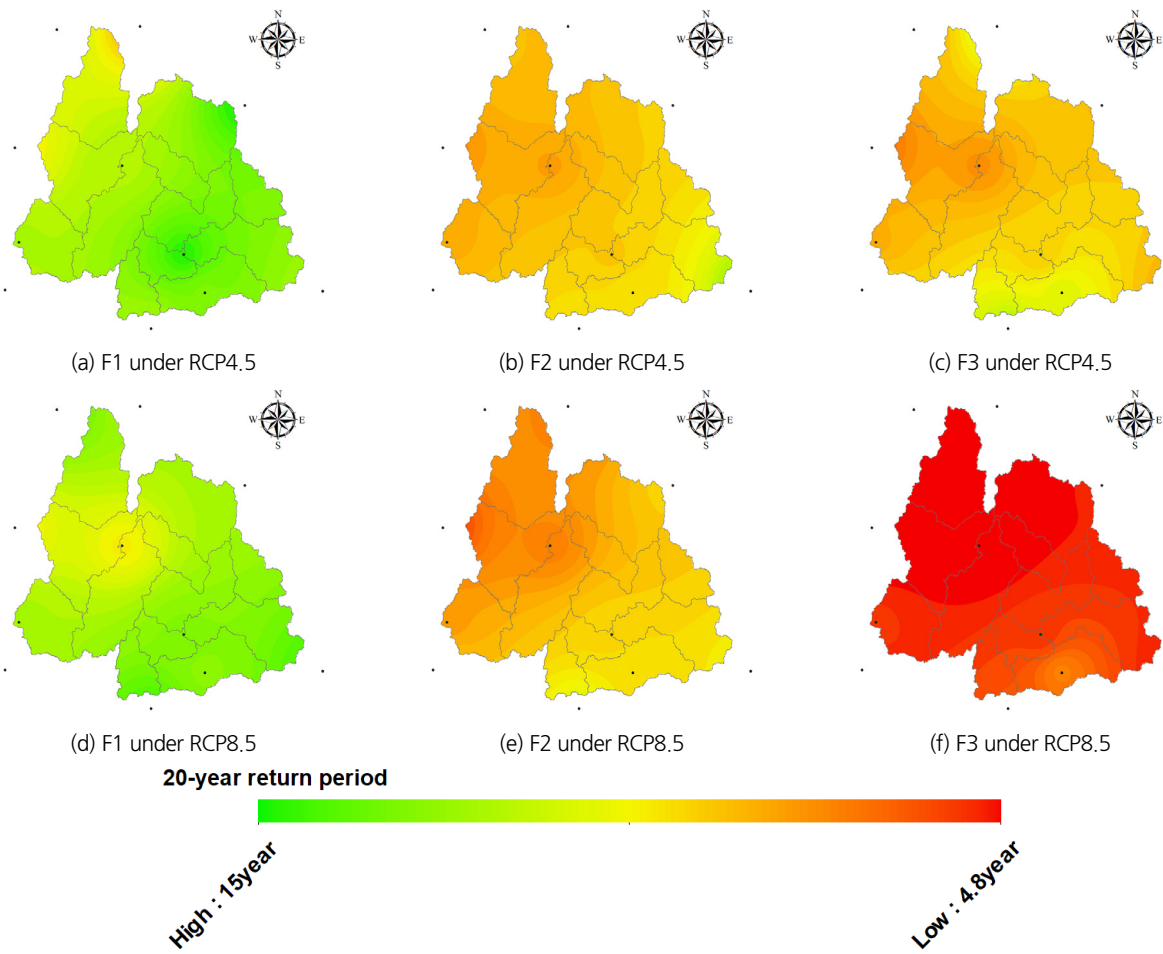


Fig. 8. Spatial distributions of future change in 20-year return period

보였다. 두 지역은 각각 임진강과 소양강의 상류이므로 이러한 변화가 유역의 총 유출량에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 다음으로 빈도의 변화를 살펴보면 RCP4.5 시나리오의 F2와 F3를 제외하고 전체적으로 증가 추세를 보였으며, 공유하천유역 상류에서 더 큰 변화를 보였다. 또한 RCP8.5의 F3에는 재현 기간 20년 규모의 강우가 평균 5.3년 빈도로 변화하는 것으로 나타나 공유하천유역 극한강수 빈도의 급격한 변화가 전망되었다. 극한강수량의 규모 및 빈도의 증가는 남한과 북한이 공동으로 점유하고 있는 공유하천유역의 재해위험성을 높일 가능성이 있다. 또한 북한이 점유하고 있는 유역 상류부의 변동성이 더 크게 전망되어 남한과 북한의 협력을 통한 유역통합관리의 필요성은 점차 커질 것으로 사료된다. 이를 위해서는 기후 변화로 인한 재해위험성 증가에 대한 분석이 선행되어야 할 것이며, 본 연구의 결과가 향후 남북공유하천유역의 재해위험성 평가에 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호 83901).

References

Cho, J. P., Jung, I. G., Cho, W. I., and Hwang, S. W. (2018). "User-centered climate scenarios technique development and application of Korean peninsula." *Journal of Climate Change Research*, KSCC, Vol. 9, No. 1, pp. 13-29.

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*, Royal Meteorological Society, Vol. 37, No. 8, pp. 3381-3397.

- Harmeling, S., and Eckstein, D. (2013). *Global climate risk index 2013*, ISBN 978-3-943704-04-4, Germanwatch, Bonn, Germany, p. 6.
- Hong, J. Y., and Ahn, J. B. (2015). "Changes of early summer precipitation in the Korean peninsula and nearby regions based on RCP simulations." *Journal of Climate, American Meteorological Society*, Vol. 28, No. 9, pp. 3557-3578.
- 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*, KSCE, Vol. 31, No. 5b, pp. 449-457.
- Jung, T. H., Kim, H. B., Kim, H. S., and Heo, J. H. (2018). "Selection of climate indices for nonstationary frequency analysis and estimation of rainfall quantile." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.39, No.1, pp. 165-174.
- Kown, M. S., Jang, H. S., and Ahn, J. H. (2019). "Change in extreme precipitation over North Korea using multiple climate change scenarios." *Water*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 11, No. 2, pp. 270-286.
- Kwon, H. H., So, B. J., Yoon, P. Y., Kim, T. W., and Hwang, S. H. (2011). "A comparison of nonstationary frequency analysis using successive average and moving average method." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 11, No. 6, pp.269-280.
- Ministry of Environment (ME), Korea Water Resources Corporation (K-water). (2019). *Water for the future*, Department of Water Resources Management Research & Planning, p. 26.
- Ministry of Environment (ME). (2019). *Standard guide for flood estimation*.
- Shin, Y. H., and Jung, H. C. (2015). "Assessing uncertainty in future climate change in Northeast Asia using multiple CMIP5 GCMs with four RCP scenarios." *Journal of Environmental Impact Assessment*, EIA, Vol. 24, No. 3, pp. 205-216.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012). "An overview of the CMIP5 and the experiment design." *Bulletin of the American Meteorological Society*, AMS, Vol. 93, No. 4, pp. 485-498.
- Yoon, Y. N. (2008). *Elementary hydrology*. Cheongmoon, pp. 523-528.