



Prospect of extreme precipitation in North Korea using an ensemble empirical mode decomposition method

Jung, Jinhong^a · Park, Dong-Hyeok^b · Ahn, Jaehyun^{c*}

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

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

^cProfessor, Department of Civil & Architectural Engineering, Seokyeong University, Seoul, Korea

Paper number: 19-069

Received: 21 August 2019; Revised: 15 September 2019; Accepted: 15 September 2019

Abstract

Many researches illustrated that the magnitude and frequency of hydrological event would increase in the future due to changes of hydrological cycle components according to climate change. However, few studies performed quantitative analysis and evaluation of future rainfall in North Korea, where the damage caused by extreme precipitation is expected to occur as in South Korea. Therefore, this study predicted the extreme precipitation change of North Korea in the future (2020-2060) compared to the current (1981-2017) using stationary and nonstationary frequency analysis. This study conducted nonstationary frequency analysis considering the external factors (mean precipitation of JFM (Jan.-Mar.), AMJ (Apr.-Jun.), JAS (Jul.-Sept.), OND (Oct.-Dec.)) of the HadGEM2-AO model simulated according to the Representative Concentration Pathway (RCP) climate change scenarios. In order to select external factors that have a similar tendency with extreme rainfall events in North Korea, the maximum annual rainfall data was obtained by using the ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method. Correlation analysis was performed between the extracted residue and the external factors. Considering selected external factors, nonstationary GEV model was constructed. In RCP4.5, four of the eight stations tended to decrease in future extreme precipitation compared to the present climate while three stations increased. On the other hand, in RCP8.5, two stations decreased while five stations increased.

Keywords: Climate change, EEMD, Non-stationary frequency analysis, Non-stationary GEV model

앙상블 경험적 모드분해법을 활용한 북한지역 극한강수량 전망

정진홍^a · 박동혁^b · 안재현^{c*}

^a서경대학교 대학원 도시기반방재안전공학과 석사과정, ^b서경대학교 도시안전연구센터 박사 후 연구원, ^c서경대학교 이공대학 토목건축공학과 교수

요 지

기후변화에 따른 수문순환 요소들의 변화로 인해 미래에는 전 세계적으로 수문사상의 규모 및 빈도가 증가할 것이라는 많은 선행연구들이 있다. 하지만 북한지역의 미래 강수량에 대한 정량적 연구와 평가는 미비한 실정이다. 북한지역 역시 우리나라와 마찬가지로 극한강수에 따른 피해가 발생할 것으로 예상되기 때문에 북한지역에 관한 연구는 지속적으로 진행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 정상성 및 비정상성 빈도해석을 통해 북한지역의 미래(2020-2060년) 극한강수를 산정하고 현재기후(1981-2017년)와 비교·분석하였다. 비정상성 빈도해석은 RCP기후변화시나리오에 따라 모의된 HadGEM2-AO모델의 외부인자(JFM(1-3월), AMJ(4-6월), JAS(7-9월), OND(10-12월)의 평균 강수량)를 고려하여 수행하였다. 북한지역 극치 강우 사상과 유사한 경향을 보이는 외부인자 선정에 위해 앙상블 경험적 모드분해법을 활용하여 연 최대 강우자료의 잔차를 추출하였다. 추출된 잔차와 외부인자 사이의 상관성분석을 실시하였다. 8개 지점(강계, 삼지연, 장진, 양덕, 함흥, 신포, 강전, 신계)에서 3개의 외부인자(AMJ, JAS, OND)가 경향이 있음을 확인하였다. 선정된 외부인자를 고려하여 비정상성 GEV모형을 구축하고 빈도해석을 수행하였다. 그 결과, RCP4.5에서는 8개 지점 중 4개 지점이 현재기후 대비 미래극한강수량이 감소하는 경향을 보였고 3개 지점이 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 RCP8.5에서는 2개 지점이 감소하는 경향을 5개 지점이 증가하는 것으로 분석되었다.

핵심용어: 기후변화, 앙상블 경험적 모드분해법, 비정상성 빈도해석, 비정상성 GEV모형

*Corresponding Author. Tel: +82-2-940-7770
E-mail: wr21@naver.com (J. Ahn)

1. 서론

최근 기후변화에 따른 기온, 강수 등 수문 순환 요소들의 변화로 인해 미래에는 수문사상의 규모와 빈도가 증가할 것이라는 선행연구들이 있으며(Solomon *et al.*, 2007; Sung *et al.*, 2012), IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 기후변화 문제에 대비하기 위하여 기후변화 리스크 평가 및 관리 조치를 수립하고 있다(IPCC, 2014). 우리나라 기상청에서는 한반도 강수량의 변동성 증가로 인해 가뭄과 호우와 같은 극한강수 현상이 잦아질 것으로 전망하였으나(Korean Meteorological Administration, 2018) 남한지역에 비해 북한 지역 대한 정량적 연구와 평가는 미비한 실정이다. Myeong (2018)은 북한의 경우, 남한보다도 더 빠른 속도로 기후변화가 진행되고 있으며, 기후변화의 영향으로 인해 북한은 평균 기온이 상승할 뿐 아니라 강우강도도 증가하고 있어 수문학적 위험이 더욱 커질 것으로 전망하였다. 실제 2016년 8월 함경북도 지역에서는 3일 동안 강수량이 지역에 따라 152-300 mm에 이르렀으며, 이는 1945년 이래 북한지역 최악의 홍수피해로 이어졌다. 따라서 미래 북한의 수자원 관리 및 이·치수를 위해 극한강수량이 고려될 필요가 있으며, 극한강수량 산정 방법역시 많은 연구가 이루어져야 한다.

전통적 빈도해석은 통계적 특성이 시간에 따라 변하지 않는다는 정상성을 기반으로 분석되어 왔다. 하지만 최근 전 지구적인 기후변화로 인하여 수문자료에 비정상성이 관측되고 있으며, 기존의 정상성 빈도해석은 확률강우량을 과소 산정한다는 문제가 제기되고 있다(Li and Tan, 2015). 이에 따라 수공구조물의 설계빈도를 상향 조정할 필요성이 대두되고 있으며, 정상성의 가정이 유효한가에 대한 점검과 비정상성을 고려한 빈도해석의 필요성에 관한 선행연구들이 진행되어 왔다(Jain and Lall, 2000; Franks and Kuczera, 2002; Milly *et al.*, 2002; Pizaro and Lall, 2002; Sankarasubramanian and Lall, 2003). 최근에는 기후변화 및 변동에 따른 외부 설명변수를 고려한 비정상성 빈도해석의 중요성이 강조되고 있다. 예를 들어 Ihara *et al.* (2007)은 EQWIN과 NINO3 등의 여름철 평균 기상인자를 연 단위 기상인자로 활용하여 인도 여름철 몬순 기후 강우가 EQWIN 및 NINO3와 관련이 있다는 것을 설명하였다. Aryal *et al.* (2009)은 기상인자를 고려한 계층적 공간모형을 개발한 뒤, Peak-Over-Threshold 분석을 수행하여 계절별 극한 강우량을 분석하였다. 우리나라에서는 Kim *et al.* (2011)이 외부상관 기상변수로 ENSO (El Nino Southern Oscillation)를 고려한 조건부 GEV 분포모형을 개발하고 비정상성 빈도해석을 수행하였다. Kwon and Lee (2011)는

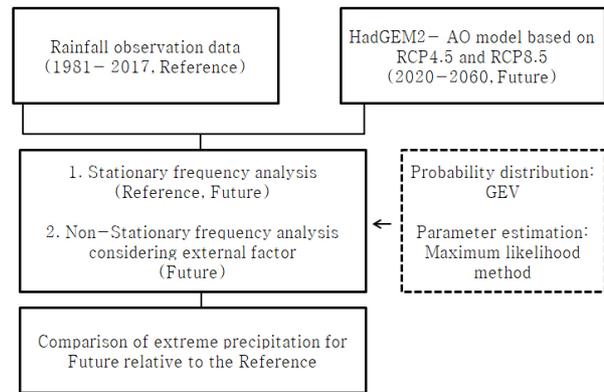


Fig. 1. Procedure for the study

Bayesian 통계기법을 이용한 비정상성 빈도해석 모형을 개발하고 외부 변동요인으로 기상인자를 활용하여 낙동강 유역의 여름철 계절 강수량을 전망하였다. Sung *et al.* (2012)은 RCP 기후변화 시나리오를 활용하여 여름철 강수량(JJA, 6-8월)을 외부인자로 고려한 비정상성 빈도해석을 실시하였다. 그러나 여름철 외부인자가 모든 지역 수문자료를 대표하는 것은 아니므로 다양한 외부인자를 고려할 필요가 있다. Thiombiano *et al.* (2018)은 AO (Arctic Oscillation)와 PNA (Pacific North American oscillation)의 1-12월 평균 및 3개월 이동평균을 연 단위 기상인자로 고려한 비정상성 빈도해석을 실시하고 기상인자 활용에 대한 중요성을 강조하였다. Lee *et al.* (2018)은 극한 일 강우량을 대상으로 기상변수(기온, 이슬점)가 포함된 비정상성 GEV 모형을 개발하였다. Jung *et al.* (2019)은 앙상블 경험적 모드분해법을 활용하여, 강우사상의 장기경향성에 영향을 미치는 기상인자를 선정하고 이를 활용하여 확률강우량을 산정하였다.

본 연구에서는 통계적 상세화 기법인 SDQDM (Spatial Disaggregation Quantile Delta Mapping)으로 생성된 RCP 기반의 HadGEM2-AO 모델의 계절 강수를 외부인자로 고려하여 비정상성 빈도해석을 실시하였다. 즉, 정상성을 고려한 현재 기후의 GEV분포에 온실가스 저감효과가 고려된 강수를 활용하여 미래의 새로운 북한지역 극한 강수를 전망하였으며 현재 기후(1981-2017년, Reference)와 비교·분석하였다. Fig. 1은 연구절차를 설명한 것이다.

2. 연구방법

2.1 앙상블 경험적 모드분해법

일반적으로 강우빈도해석을 위한 매개변수 추정에는 확률

가중모멘트법, 최우도법 등이 이용되고 있으나 이외에도 다양한 방법들이 연구되고 있다. 본 연구에서 활용한 앙상블 경험적 모드분해법(Ensemble Empirical Mode Deposition, EEMD)은 강우자료에 내재된 장기경향성을 매개변수 추정 에 고려하기 위해 개발된 방법이다(Wu and Huang, 2009).

Huang et al. (1998)에 의해 개발된 경험적 모드분해법(EMD)의 경우, 서로 다른 모드 내에 추정된 결과값이 유사하여 모드가 구분되지 않는 모드 혼합 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 EEMD는 시계열자료에 인위적으로 백색잡음(white Noise)을 추가하여 분해한 후, 앙상블 평균을 사용하여 인위적 잡음을 제거하였으며 알고리즘은 다음과 같다. 첫 번째로 분석대상 시계열 자료($d(t)$)에 백색잡음($w(t)$)을 더한다.

$$y(t) = d(t) + w(t) \tag{1}$$

두 번째로 분석자료($y(t)$)의 국소 최댓값과 국소 최솟값을 식별한 후, 각각 3차 스플라인보간법으로 상위 막(upper envelope, $u(t)$)과 하위 막(lower envelope, $l(t)$)을 생성한다. 세 번째로 상위 막($u(t)$)과 하위 막($l(t)$)의 평균($m(t)$)을 산출한다.

$$m(t) = (u(t) + l(t))/2 \tag{2}$$

네 번째로 분석자료($y(t)$)에서 평균($m(t)$)을 제거하여 추출된 함수는 내재모드함수(IMF, $I(T)$)가 된다.

$$I(t) = y(t) - m(t) \tag{3}$$

이 때, IMF는 두 가지 조건을 만족해야 한다. 첫 번째 조건은 국소 최댓값 및 최솟값의 수와 영점교차(zero crossing)의 수는 0 또는 1 이어야 한다. 두 번째 조건은 N번의 과정동안 동일한 계열로 유지되어야 한다. 만약 조건을 만족하지 않는다면, 만족될 때까지 반복한다. 이 과정을 통해 IMF 조건을 만족한 $I(t)$ 를 $c_1(t)$ 로 표기하면 원 자료 $y(t)$ 에서 첫 번째 IMF인 $c_1(t)$ 를 제거하여 잔차(Residue, $r(t)$)가 생성되는데, 이것이 자료의 경향성을 나타낸다.

$$r(t) = y(t) - c_1(t) \tag{4}$$

최종적으로 원자료 $y(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \tag{5}$$

여기서 n 은 추출된 IMF의 개수를 나타낸다.

2.2 Spearman 상관분석

Spearman 상관분석은 변수 간 상관성을 변수의 서열(rank)로 평가하는 비모수적 방법이다. Pearson 상관분석과 달리 Spearman 상관분석은 비선형 관계의 연관성을 파악할 수 있다는 장점이 있다. 또한 모든 가능 변수들에 대하여 70% 이상의 통계적 효율성을 가지므로 강건성과 효율성을 모두 고려한 좋은 대안이 될 수 있다(Croux and Dehon, 2010). Spearman 상관계수(ρ)는 Eq. (6)과 같다.

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}} \tag{6}$$

여기서, n 은 데이터 개수, x_i 는 변수 X에서 i 번째 데이터 순위, y_i 는 변수 Y에서 i 번째 데이터 순위, \bar{x}, \bar{y} 는 각각 x_i, y_i 의 평균을 의미한다.

2.3 정상성과 비정상성 GEV 모형 구축

일반화된 극치분포(GEV distribution)의 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)는 Eq. (7)과 같다.

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 - k\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{k}}\right\} \tag{7}$$

여기서, μ, σ, k 는 각각 위치모수(Location parameter), 규모모수(Scale parameter), 형상모수(Shape parameter)를 의미한다. 그러나 최근 수문학 및 수자원 분야에서는 형상모수 k 를 $-k$ 로 대체하여 사용하는 경우가 일반적이다(Coles, 2001; Koutsoyiannis, 2004). 따라서 본 연구에서는 k 대신 $-k$ 를 적용한 GEV 분포모형을 사용하였으며 누적분포함수(CDF)는 Eq. (8)과 같다.

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 + k\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{k}}\right\} \tag{8}$$

비정상성 GEV 모형은 위치모수의 비정상성을 고려하거나 규모모수의 비정상성을 고려하여 구축할 수 있다. 그러나 형상모수의 경우, 신뢰성 있는 추정이 어렵고 비정상성을 고려하더라도 그 결과에 차이가 미비하여 상수로 가정할 것을 제안하였다(Coles, 2001).

본 연구에서는 자료의 장기 경향성을 고려하기 위해 Eq. (9)와 같이 위치모수만 외부인자를 고려하여 연구를 수행하였다 (Jung *et al.*, 2019).

$$\mu_t = \mu_0 + \mu_1 c(t) \tag{9}$$

$c(t)$ 는 외부인자이다.

Eq. (8)의 μ 를 Eq. (9)의 μ_t 로 대체하여 비정상성 GEV 모형을 얻을 수 있으며 정상성 및 비정상성 모형을 다음과 같이 표기하였다.

- (1) S-GEV: 정상성 모형
- (2) NL-GEV: 위치모수의 비정상성을 고려한 모형

3. 적용 및 결과

3.1 대상지점 및 연구자료

본 연구의 목적은 정상성 및 비정상성 빈도해석을 통해 북한지역의 가까운 미래(2020-2060년)의 강수량을 추정하고 현재기후(1981-2017년)와 대비하여 변화를 분석하는 것이다. 비정상성 빈도해석은 외부인자를 고려하여 분석하였다. 여기서 말하는 외부인자는 1-12월의 3개월 평균 강수량을 의미한다. 즉 1-3월(JFM), 4-6월(AMJ), 7-9월(JAS), 10-12월

(OND)의 평균 강수량이다. 최근 기후변동으로 인해 외부변수를 고려한 비정상성 빈도해석이 강조되고 있다. 외부변수는 기온, 해수면 온도, 기후인자 등이 있으나 기후변화가 수자원에 미치는 가장 큰 영향은 변화된 기후로 인해 강수의 양이나 양상의 변화이다(Inha University, 2007). 따라서 본 연구에서는 현재기후에 온실가스 효과로 인한 지구온난화가 고려된 계절별 강수를 고려하여 미래 북한지역의 새로운 극한강수를 전망하고자 한다.

연구 대상지점은 북한 27개 지점이고 Fig. 2와 같다. 미래의 극한강수 전망을 위해 사용한 자료는 영국 기상청에서 개발한 대기-해양 결합모델인 RCP 기후변화 시나리오(RCP4.5, RCP8.5) 기반의 HadGEM2-AO 모델이다. 현재기후 빈도해석에는 1981-2017년의 관측자료를 기후변화 대비 수자원 적응 기술 개발 연구단(Climate Change Adaption for Water Resources, CCAW)으로부터 제공받아 수행하였다.

3.2 EEMD를 활용한 경향성 추출

EEMD는 자료에 내재된 주기와 경향성을 나타내는 잔차를 추출할 수 있는 분해분석법으로 비선형, 비정상성인 시계열인 경우 더욱 효과적으로 분해할 수 있다는 장점이 있으며, 본 연구에서는 강우자료에 내재된 경향성 추출을 목적으로 사용하였다. EEMD의 효율적 분해를 위해서는 백색잡음 진폭(표준편차)과 앙상블 멤버 수 결정이 중요하다. Wu and Huang (2009)이 권장한 표준편차 0.2를 사용하였으며 잔차

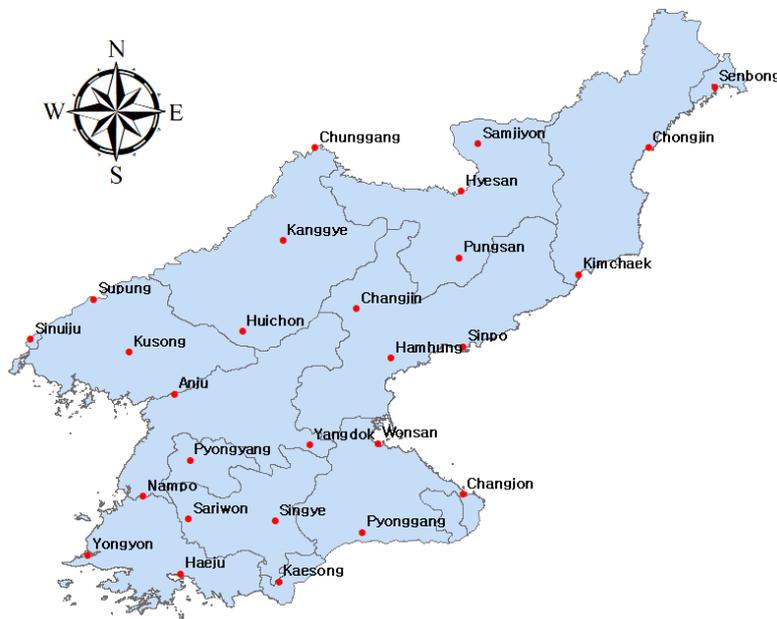


Fig. 2. Rainfall stations over North Korea

Table 1. Selected external factor (seasonal rainfall) and correlations with residue

External Factor	Period	Name	RCP4.5		RCP8.5	
			Significance level	Coefficient	Significance level	Coefficient
AMJ	Apr.-Jun.	Changjin	0.01	0.22	0.05	0.22
		Hamhung	0.02	0.26	0.05	0.22
		Sinpo	0.03	0.23	0.02	0.24
		Yangdok	0.03	0.24	0.05	0.21
		Changjon	0.04	0.22	0.03	0.23
JAS	Jul.-Sept.	Samjiyon	0.04	0.22	0.04	0.23
		Kanggye	0.03	0.23	0.009	0.29
OND	Oct.-Dec.	Singye	0.03	0.24	0.04	0.22

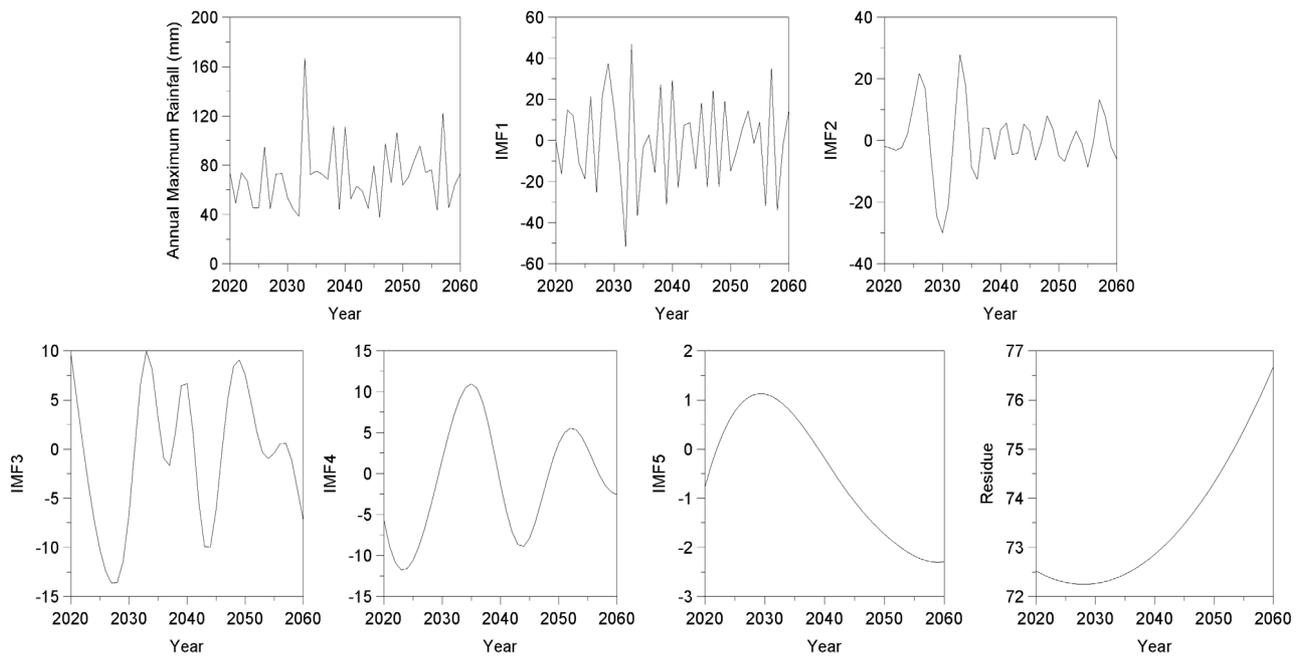


Fig. 3. Decomposed components by EEMD at Kanggye

의 동일한 계열 유지를 위해 앙상블 멤버 수는 1000개로 결정하였다. Fig. 3은 강계 지점의 연 최대 강우량을 EEMD를 통해 5개의 내재모드함수(IMF1 - IMF5)와 잔차로 분해한 결과를 대표적으로 나타낸 것이다. 잔차를 통해 강계 지점의 연 최대 강우량은 가파르게 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다.

3.3 Spearman 상관분석을 통한 분석지점 및 외부인자 선정

북한지역의 극치 강우 사상과 유사한 경향을 보이는 외부인자 선정을 위해 EEMD를 통해 산출된 연 최대 강우량의 잔차와 외부인자 사이의 Spearman 상관분석을 실시하였다. 외부인자는 3.1절에서 설명한 바와 같이 JFM, AMJ, JAS, OND

계절의 평균 강수량을 의미한다. Table 1은 상관분석을 통해 도출된 유의수준과 상관계수를 나타낸 것이다. 북한 27개 지점 중 8개 지점이 RCP4.5와 RCP8.5 모두에서 유의수준 5% 이내로 작게 산정되었다. 상관계수는 0.2를 넘었으며 최대 0.29까지 분포되어 있다. 이는 두 변수 사이의 약한 양의 상관관계를 갖음을 나타낸다.

강계, 삼지연의 강우 사상은 JAS 계절, 장진, 양덕, 함흥, 신포, 장전은 AMJ 계절, 신계는 OND 계절과 상관성이 있는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 북한지역 27개 지점 중 경향성이 파악되는 8개 지점을 최종 분석지점으로 선정하였다.

Table 2. Stationary and non-stationary frequency analysis results (RCP4.5)

Model	Return Period (year)									
	10	20	30	50	70	80	100	150	200	300
Changjin (mm/day)										
Reference	102.8	114.5	121.0	128.6	133.4	135.3	138.4	143.7	147.4	152.4
S-GEV	96.3	103.8	107.6	111.8	114.2	115.2	116.6	119.1	120.7	122.7
NL-GEV	91.2	98.8	102.5	106.7	109.2	110.1	111.6	114.0	115.6	117.7
Hamhung (mm/day)										
Reference	138.4	157.2	168.3	182.5	191.9	195.7	202.1	213.8	201.9	208.7
S-GEV	129.4	148.6	160.1	174.7	184.5	188.5	195.1	207.4	216.3	229.0
NL-GEV	111.1	130.4	141.8	156.5	166.3	170.3	176.9	189.2	198.0	210.8
Sinpo (mm/day)										
Reference	107.6	118.9	124.9	132.1	136.5	138.3	141.1	146.0	149.3	153.8
S-GEV	116.5	145.3	164.7	192.6	213.3	222.0	237.5	268.2	292.3	329.8
NL-GEV	98.6	127.3	146.8	174.7	195.3	204.1	219.6	250.3	274.3	311.9
Yangdok (mm/day)										
Reference	193.9	237.4	265.8	305.5	334.1	346.1	366.9	407.5	438.7	486.2
S-GEV	165.3	185.4	196.1	208.5	216.2	219.1	223.9	232.2	237.7	245.2
NL-GEV	131.4	151.5	162.1	174.6	182.3	185.2	190.0	198.2	203.8	211.3
Changjon (mm/day)										
Reference	277.7	331.0	363.8	407.0	436.8	448.9	469.6	508.6	537.3	579.5
S-GEV	216.6	238.7	250.4	264.0	272.4	275.6	280.8	289.8	295.8	303.9
NL-GEV	165.1	187.2	198.9	212.5	220.9	224.1	229.3	238.3	244.3	252.4
Samjiyon (mm/day)										
Reference	117.3	158.1	188.6	235.9	273.6	290.3	320.5	384.1	437.0	524.6
S-GEV	148.4	204.3	245.3	308.0	357.5	379.1	418.2	499.6	566.6	676.2
NL-GEV	219.9	275.8	316.8	379.5	428.9	450.6	489.7	571.0	638.0	747.7
Kanggye (mm/day)										
Reference	103.2	117.9	126.8	138.4	146.3	149.5	154.9	164.9	172.3	182.9
S-GEV	103.4	119.8	129.7	142.7	151.5	155.1	161.2	172.5	180.8	192.9
NL-GEV	175.3	191.7	201.6	214.6	223.4	227.0	233.1	244.4	252.7	264.8
Singye (mm/day)										
Reference	194.4	228.3	249.0	276.0	294.4	301.9	314.6	338.3	355.7	381.1
S-GEV	183.2	221.4	245.2	277.0	299.2	308.3	323.9	353.5	375.6	408.2
NL-GEV	117.3	155.4	179.2	211.1	233.3	242.4	258.0	287.6	309.6	342.3

3.4 북한지역 미래 극한강수 빈도해석

기후변화에 따른 북한지역 극한강수 변화 전망을 위해 현재 기후(1981-2017년, Reference)는 정상성 빈도해석을 통해 강수량을 산정하였고, 미래기후(2020-2060년)는 정상성(S-GEV)과 비정상성(NL-GEV) 빈도해석을 실시하였다. Fig. 4는 현재기후 대비 미래의 극한강수를 재현기간(10, 20, 30, 50, 70, 80, 100, 150, 200, 300년, T)별로 나타낸 것이며, Tables 2 and 3는 산정된 확률강우량이다. RCP4.5에 따르면 장진, 함

흥, 양덕, 장천은 현재기후 대비 미래의 강수량이 감소하는 것으로 나타났다(Figs. 4(a), 4(b), 4(d) and 4(e) 참고). 가장 큰 감소폭을 보인 지점은 장천으로 S-GEV 모형에서는 47.6% (300년), NL-GEV 모형에서는 56.4% (300년) 감소하였다. 이와는 다르게 신포, 삼지연, 강계는 현재기후 대비 미래 강수량이 증가하는 경향을 보였다(Figs. 4(c), 4(f) and 4(g) 참고). 현재기후 대비 S-GEV 모형에서는 재현기간(T)별 강수량의 평균 변화율이 신포, 삼지연, 강계 각각 58.7%, 29.7%, 3.4% 증

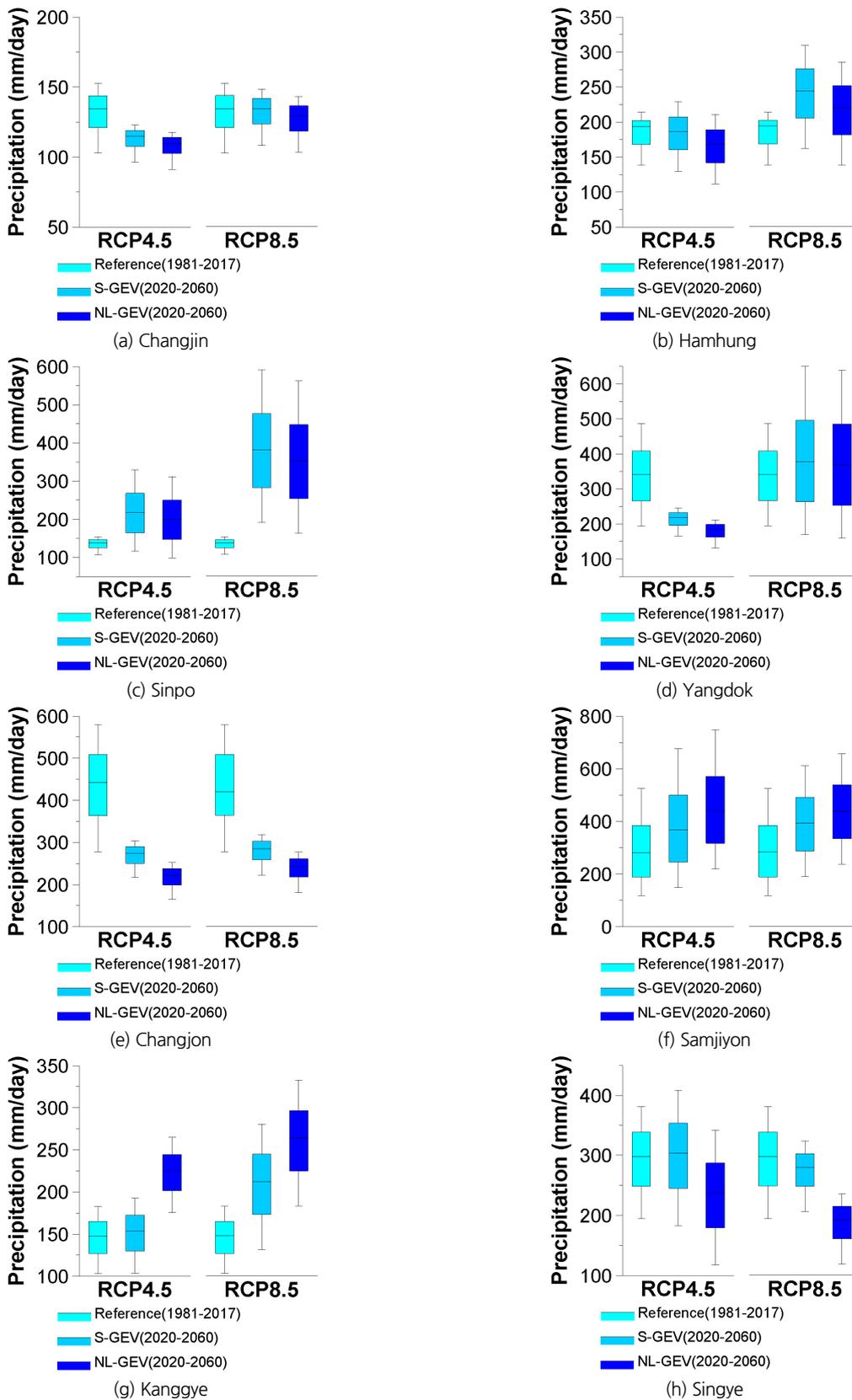


Fig. 4. Precipitation comparison by stationary and non-stationary frequency analysis

Table 3. Stationary and non-stationary frequency analysis results (RCP8.5)

Model	Return Period (year)									
	10	20	30	50	70	80	100	150	200	300
Changjin (mm/day)										
Reference	102.8	114.5	121.0	128.6	133.4	135.3	138.4	143.7	147.4	152.4
S-GEV	108.3	118.3	123.6	129.8	133.6	135.1	137.5	141.6	144.4	148.2
NL-GEV	103.2	113.1	118.4	124.7	128.5	130.0	132.3	136.5	139.3	143.0
Hamhung (mm/day)										
Reference	138.4	157.2	168.3	182.5	191.9	195.7	202.1	213.8	201.9	208.7
S-GEV	162.4	189.1	205.4	226.6	241.1	246.9	256.9	275.5	289.2	309.1
NL-GEV	138.3	165.1	181.3	202.5	217.0	222.9	232.9	251.5	265.1	285.0
Sinpo (mm/day)										
Reference	107.6	118.9	124.9	132.1	136.5	138.3	141.1	146.0	149.3	153.8
S-GEV	192.0	246.0	282.6	334.8	373.5	390.0	418.8	476.1	521.0	590.8
NL-GEV	163.1	217.1	253.7	305.9	344.6	361.0	389.9	447.2	492.1	561.9
Yangdok (mm/day)										
Reference	193.9	237.4	265.8	305.5	334.1	346.1	366.9	407.5	438.7	486.2
S-GEV	169.0	223.9	263.1	322.0	367.5	387.2	422.6	495.1	553.9	648.7
NL-GEV	158.3	213.2	252.4	311.3	356.8	376.5	411.9	484.4	543.2	638.1
Changjon (mm/day)										
Reference	277.7	331.0	363.8	407.0	415.7	424.2	438.4	508.6	537.3	579.5
S-GEV	221.8	245.8	258.6	273.6	282.9	286.4	292.2	302.3	309.1	318.2
NL-GEV	180.3	204.3	217.1	232.1	241.3	244.9	250.7	260.8	267.6	276.7
Samjiyon (mm/day)										
Reference	117.3	158.1	188.6	235.9	273.6	290.3	320.5	384.1	437.0	524.6
S-GEV	189.8	248.1	287.2	342.8	383.6	400.9	431.2	491.1	537.7	609.9
NL-GEV	236.0	294.4	333.5	389.0	429.9	447.2	477.4	537.3	583.9	656.1
Kanggye (mm/day)										
Reference	103.2	117.9	126.8	138.4	146.3	149.5	154.9	164.9	172.3	182.9
S-GEV	131.5	157.1	173.1	194.3	209.0	215.0	225.3	244.7	259.1	280.4
NL-GEV	183.2	208.9	224.8	246.0	260.7	266.7	277.0	296.4	310.9	332.2
Singye (mm/day)										
Reference	194.4	228.3	249.0	276.0	294.4	301.9	314.6	338.3	355.7	381.1
S-GEV	206.3	233.7	248.7	266.7	278.1	282.5	289.8	302.6	311.4	323.5
NL-GEV	118.6	146.0	161.0	179.0	190.4	194.8	202.1	214.9	223.7	235.8

가하였으며 NL-GEV모형은 45.3%, 59.3%, 54.1% 증가하였다. 신계는 현재기후 대비 S-GEV모형에서는 재현기간(T)별 강수량의 평균변화율이 1.4%로 증가하였으나 NL-GEV모형에서는 22.0%로 감소하였다. RCP8.5 시나리오에서는 5개 지점(함흥, 신포, 양덕, 삼지연, 강계)에서 현재기후 대비 미래 강수량이 증가하는 경향을 나타냈다. 함흥, 신포, 양덕, 삼지연, 강계 각각 재현기간(T)별 강수량의 평균변화율이 S-GEV 모형은 28.3%, 177.7%, 10.4%, 39.6%, 42.2%였으며 NL-

GEV 모형에서는 15.1%, 156.0%, 7.0%, 58.8%, 78.7% 증가로 나타났다. 강우량이 감소하는 지역은 RCP4.5보다 2개 지점이 줄었으며, 해당지역은 신계와 장전이다. S-GEV 모형에서는 신계와 장전 각각 평균변화율이 5.3%, 33.3%로 감소하였고 NL-GEV 모형은 36.4%, 43.5% 감소를 나타냈다. 장전은 RCP4.5의 신계와 같이 S-GEV모형에서는 증가(0.45%)를 NL-GEV 모형은 감소(3.5%)하였다.

4. 결론

통계학적 의미에서 정상성이란 매개변수가 시간에 따라 변하지 않는 것으로 상수로써 표현되는 것을 의미한다. 그러나 최근 기후변화 및 변동으로 인해 정상성의 가정이 유효한가에 대한 점검과 외부요인을 고려한 비정상성 빈도해석의 중요성이 강조되고 있다. 실제 극한강수는 다양한 요인으로 인하여 확률분포형의 매개변수나 분포자체가 시간에 따라 변하기 때문에 정상성을 가정한 전통적 빈도해석과는 다른 새로운 강우빈도해석 방법이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 RCP기후변화시나리오(RCP4.5, 8.5)를 기반으로 모의된 HadGEM2-AO 모델의 계절별 강수를 고려하여 북한지역의 미래 극한강수를 전망하고 현재기후와 비교·분석하였다.

RCP4.5에서는 8개 분석지점 중 4개 지점(장진, 양덕, 장전, 함흥)이 현재기후대비 미래강수가 감소하는 경향을 나타냈고 3개 지점(신포, 삼지연, 강계)은 증가하고 있음을 보였다. 이와 달리 RCP8.5에서는 미래 극한강수가 증가하는 지점이 5개 지점(함흥, 신포, 양덕, 삼지연, 강계)으로 RCP4.5 보다 2개 지점 늘어났으며 감소하는 지점은 기존의 4개 지점에서 2개 지점으로 줄어들었음을 확인하였다. 현재 기후 대비 강수량이 S-GEV 모형에서는 증가하고 NL-GEV 모형은 감소하는 경향이 나타났던 신계(RCP4.5)와 장진(RCP8.5)의 경우, 확률강우량의 증감에 대한 원인을 규명하기 위해서는 추후 계절별 강수와 극한 강우사상 그리고 RCP시나리오 사이의 물리적 영향력에 관한 분석이 필요할 것으로 확인된다.

감사의 글

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호 83091).

References

- Aryal, S. K., Bates, B. C., Campbell, E. P., Li, Y., Palmer, M. J., and Viney, N. R. (2009). "Characterizing and modeling temporal and spatial trends in rainfall extremes." *Journal of Hydro-meteorology*, AMS, Vol. 10, No. 1, pp. 241-253.
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer-Verlag, London, UK.
- Croux, C., and Dehon, C. (2010). "Influence functions of the spearman and Kendall correlation measures." *Statistical Method and Applications*, Vol. 19, No. 4, pp. 497-515.
- Franks, S. W., and Kuczera, G. (2002). "Flood frequency analysis: Evidence and implications of secular climate variability, New South Wales." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 38, No. 2, pp 432-439.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., and Liu, H. H. (1998). "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, Vol. 27, No. 2, pp. 903-995.
- Ihara, C., Kushnir, Y., Cane, M. A., and DE la Pena, V. H. (2007). "Indian summer monsoon rainfall and its link with ENSO and Indian Ocean climate indices." *International Journal of Climatology*, Vol. 27, No. 2, pp. 179-187.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *Climate change 2014: synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri, and L. A Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151.
- Inha University (2007). *Construction and transportation R&D report*. Ministry of Construction & Transportation.
- Jain, S., and Lall, U. (2000). "Magnitude and timing of annual maximum floods: Trends and large-scale climatic associations for the Blacksmith Fork river, Utah." *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 12, pp. 331-343.
- Jung, T. H., Kim, H. B., Kim, H. S., and Heo, J. H. (2019). "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.
- Kim, B. S., Lee, J. K., Kim, H. S., and Lee, J. W. (2011). "Non-stationary frequency analysis with climate variability using conditional Generalize Extreme Value distribution." *Journal of Wetland Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 499-514.
- Korean Meteorological Administration (2018). *Climate change outlook report on the Korean Peninsula*.
- Koutsoyiannis, D. (2004). "Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 49, No. 4, pp. 575-590.
- Kwon, H. H., and Lee, J. J. (2011). "Seasonal rainfall outlook of Nakdong River basin using nonstationary frequency analysis model and climate information." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 5, pp. 339-350.
- Lee, O. J., Sim, I. K., and Kim, S. D. (2018). "Non-stationary frequency analysis of daily rainfall depth using climate variables." *Journal of the Korean Society Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 7, pp. 639-647.
- Li, J., and Tan, S. (2015). "Nonstationary flood frequency analysis for annual flood peak series, adopting climate indices and check dam index as covariates." *Water Resources Management*, Vol. 319, pp. 573-574.
- Milly, P. C. D., Wetherald, R. T., Dunne, K. A., and Delworth, T. L. (2002). "Increasing risk of great floods in a changing climate." *Nature*, Vol. 415, No. 6871, pp. 514-517.

- Myeong, S. J. (2018). "KDI review of the North Korean economy." *Korea Development Institute*, Vol. 20, No. 3, pp. 41-59.
- Pizaro, G., and Lall, U. (2002). "El Nino and floods in the US west: What can we expect?" *Eos Trans, AGU*, Vol. 83, No. 32, pp. 349-352.
- Sankarasubramanian, A., and Lall, U. (2003). "Flood quantiles in a changing climate: Seasonal forecast and causal relations." *Water Resources Research*, Vol. 39, No. 5, pp. 1134.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Averyt, K., Marquis, M., Chen, Z., Tignor, M., and Miller, L. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis*, Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC, Cambridge university press. United Kingdom and New York, NY, USA.
- Sung, J. H., Kim, B. S., Kang, H. S., and Cho, C. H. (2012). "Non-stationary frequency analysis for extreme precipitation based on representative concentration pathway (RCP) climate change scenario." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 231-244.
- Thiombiano A. N., St-Hilaire, A., El, Adlouni, S., and Ouarda, T. B. J. (2018). "Nonlinear response of precipitation to climate indices using a non-stationary Poisson-generalized Pareto model: case study of southern Canada." *International Journal of Climatology*, Vol. 38, No. 1, pp. 878-888.
- Wu, Z., and Huang, N. E. (2009). "Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method." *Advances in Adaptive Data Analysis*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-41.