Journal of Environmental Science International
29(9); 871~883; September 2020

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.9.871

ORIGINAL ARTICLE

기후변화시나리오와 비정상성 빈도분석을 이용한 도시유형별 목표연도 설계강우량 제시 및 치수안전도 변화 전망

정세진 · 강동호[1)] · 김병식[1)*]
강원종합기술연구원, [1)]강원대학교 방재전문대학원 도시환경&재난관리전공

Predicting the Design Rainfall for Target Years and Flood Safety Changes by City Type using Non-Stationary Frequency Analysis and Climate Change Scenario

Se-Jin Jeung, Dong-Ho Kang[1)], Byung-Sik Kim[1)*]
Kangwon Institute of Inclusive Technology, Chuncheon 24341, Korea
[1)]Department of Urban Environmental & Disaster Management School of Disaster Prevention, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea

Abstract

Due to recent heavy rain events, there are increasing demands for adapting infrastructure design, including drainage facilities in urban basins. Therefore, a clear definition of urban rainfall must be provided; however, currently, such a definition is unavailable. In this study, urban rainfall is defined as a rainfall event that has the potential to cause water-related disasters such as floods and landslides in urban areas. Moreover, based on design rainfall, these disasters are defined as those that causes excess design flooding due to certain rainfall events. These heavy rain scenarios require that the design of various urban rainfall facilities consider design rainfall in the target years of their life cycle, for disaster prevention. The average frequency of heavy rain in each region, inland and coastal areas, was analyzed through a frequency analysis of the highest annual rainfall in the past year. The potential change in future rainfall intensity changes the service level of the infrastructure related to hand-to-hand construction; therefore, the target year and design rainfall considering the climate change premium were presented. Finally, the change in dimensional safety according to the RCP8.5 climate change scenario was predicted.

Key words : RCP climate change scenario, Climate change premium, Non-stationary

1. 서 론

2010년과 2011년 2012년 서울시 강남구에서 집중호우로 인해 설계강우량을 초과하여 홍수피해가 발생하였다. 이와 같이 최근 들어 기후변화로 인해 폭우 및 이상강우의 발생 빈도가 증가하고 있다. 이에 이러한 폭우 및 이상강우로부터 도시유역의 배수시설과 사회기반 구조물의 설계의 재조정이 이루어져야 한다는 목소리가 높아지고

Received 16 April, 2020; **Revised** 20 May, 2020;
Accepted 10 July, 2020
***Corresponding author**: Byung-Sik Kim, Department of Urban Environmental & Disaster Management School of Disaster Prevention, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea
Phone : +82-33-570-6819
E-mail: hydrokbs@kangwon.ac.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
ⓒ This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다. 하지만 도시폭우에 대한 명확한 정의가 뒷받침되어야 하나 아직 명확한 정의조차 내려져 있지 않은 상태이다(Korea Research Institute for Human Steelements, 2015). 도시폭우와 도시계획을 효과적으로 연계하기 위해서는 실무에서 이용되고 있는 설계강우량과 연계해야 할 필요성이 있으며 연계를 위해 설계강우량을 초과하여 피해를 준 홍수피해 사례를 제시할 필요가 있다. 2002년 태풍 루사는 강원도 영동지역에 지속시간 24시간 최대강우량이 334.0~944.5 mm로 Ministry of construction Transportation(2000)에서 제시한 강릉지역의 PMP (maximum possible precipitation) 강우량을 초과하여 그 예를 찾아볼 수 없는 재해를 유발하였다. 또한 2010년, 2011년, 2012년 서울 경기 지역에 3일 연속 강우량이 각각 587.5, 213.5, 302.5 mm 이상으로 도시배수시설의 설계강우량을 초과하는 집중호우가 발생하였다. 이에 많은 연구자 들은 도시배수설계지침 등을 개정하기 위해 다양한 수문학적 빈도분석 기법을 사용하고 있다.

관련 연구를 살펴보면 2005년도 이후 기후변화가 극한 사상에 미치는 영향에 대한 연구가 시작되었음을 알 수 있다. 또한 2007년 이후로는 유역의 특성과 유역내의 강우 관측소간의 공간적 상관성을 고려하여 기후모형으로부터 수문기상변수를 생산할 수 있는 다양한 형태의 일기발생 모형의 개발에 대한 연구를 진행 중에 있다(National Emergency Management Agency, 2011). 국외의 경우 Annette et al.(2008)가 기후변화시나리오와 DHI (Danishi Hydraulics Institute) MOUSE 모형을 이용하여 합류식 관거 시스템이 도시지역에 미치는 영향을 평가하였고, Alain et al.(2007)는 CRCM (Canadian Regional Climate Model)을 활용하여 연 최대 2시간, 6시간, 12시간, 24시간 강우량을 대상으로 지역빈도해석을 적용하여 IDF (Intensity - Duration - Frequency) 곡선을 작성하였다. 또한, Hans(2007)은 HIRHAM RCM (Regional Climate Model) 모형을 이용해서 기후변화가 강수와 유출량의 극한치값에 미치는 영향을 평가하였다. Robert and Buishand(2007)는 극치 홍수량의 모의에 필요한 연속강우를 RCM으로부터 추출할 수 있는지 여부를 연구하였고, Alison et al.(2006)는 홍수빈도해석에 유리한 RCM을 이용하여 기후변화가 영국의 첨두홍수량에 미치는 영향을 전망하였다. Fowler and Kilsby(2003)는 HadRM3H RCM모형의 극한강우 재현에 대한 적용성을 평가하고, 재현기간별 강우의 변화를 평가하였다.

방재적 관점에서 재해에 대응하기 위하여 극한의 사건을 고려한 분석이 필요하다. 지금까지 극한치 이론은 극한강우의 확률분포를 추정하고, 빈도별 설계규모를 산정하기 위해 이용되었다(Hershfield, 1973; Coles, 2001; Katz et al, 2002). 기존의 수문학적 빈도해석기법은 극치수문자료가 IID (independent and identically -distributed) 조건을 갖는 사상이라고 가정하고 최적 확률분포형을 활용하여 재현기간에 대응하는 확률수문량을 산정한다. 이를 EVT (Extreme Value Theory)이라 하한다(Kim et al., 2011). 그러나 전통적 극한치 이론은 수문자료의 통계적 특성이 시간에 따라 불변인 정상성(Stationarity)이라는 기본 가정을 기반으로 하고 있어 기후변화 에 의한 외부변수를 반영하기에는 한계가 있음이 지적되고 있다. 그러나 Kim et al.(2011)에 의하면 앞서 언급한 바와 같이 실제 강우 이벤트은 기후변화로 인해 확률분포형의 매개변수나 그 분포가 시간에 따라 변화하기 때문에 정상성에 근거한 빈도분석과는 다른 개념인 비정상성(non-stationarity)을 반영할 수 있는 빈도분석 방법이 요구된다(Jeung et al., 2015).

국내외의 비정상성 기반의 빈도분석 관련 사례를 보면 Stedinger and Crainiceanu(2001)은 연 최대 홍수량의 추정을 위해 비정상성을 기반의 이변수 대수정규분포모형과 대수정규 ARMA (autoregressive-moving-average) 모형을 제안하였다. Strupczewski et al.(2001)은 PDF (Probability Density Function)의 변수들을 시간에 따라 변화하는 변수로 해석하였으며, Burn(2003)은 홍수빈도해석을 위해 다차원의 비정상성 접근법을 제안하였다. He et al.(2006)은 과거 관측자료를 통해 산정한 매개변수에 비선형 회귀식을 적용하고자 하였지만, 과거자료 보다 최근 자료의 경향성이 클 경우 확률강우량의 과대산정되는 단점을 가지고 있다. Lee(2010)는 Gumbel 분포형 매개변수의 평균에 경향성을 반영하여 확률강우량을 산정하였으며, Lee and Kwon(2011)은 POT자료를 GEV (Generalized Extreme Value) 분포를 이용하여 비정상빈도분석을 하였다. 최근 극한사상의 경향성, 주기성, 안정성의 고려가 가능한 NSEV (Non-Stationary Extreme Value theory)와 관련한 연구가 지속적으로 진행되어져 오고 있다(Smith 1989; Karl and Knight,

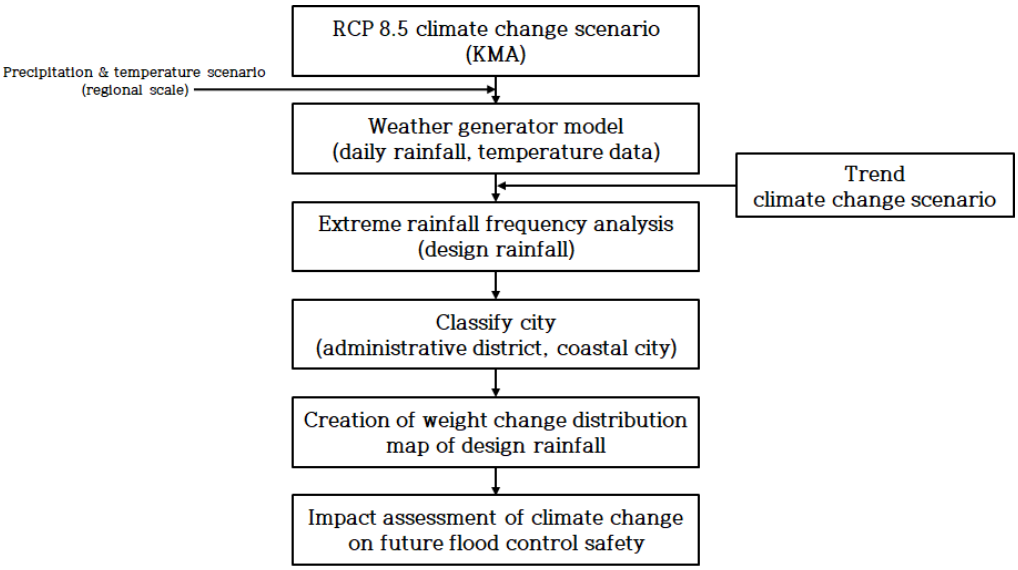


Fig. 1. Flowchart of study.

1998; Groisman et al., 1999). Jang and Lee(2013)은 강원도 산지지역을 대상으로 기후자료 분석 및 위성영상을 기반으로 하여 임상별 면적변화를 분석하였고, 임상변화 분석을 위한 PCC (Post Classification Comparison)을 이용하여 변화량을 분석하였다. Choi et al.(2014)는 한반도에서의 기후변화를 대응하기위한 정책수립과 기후변화의 감시 및 예측에 필요한 과학정보를 조사하여 기후변화에 대응하기 위한 활용전략을 제시하였다. Han et al.(2016)은 Bayesian Model Averaging를 이용하여 평창지역 기온에 대한 확률론적 예측을 하였다.

본 연구에서는 도시폭우를 특정 강우사상으로 인해 설계홍수량을 초과를 유발하여 재해와 재난을 발생시킬 경우라고 정의하였다. 폭우시나리오는 도시방재시설물의 유효기간를 고려한 목표연도 설계가중치의 설정을 위해 다양한 설계강우량 산정방법(경향성을 고려한 비정상성빈도해석, RCP기후변화 시나리오를 고려한 비정상성 빈도해석)을 이용하였다. 또한, 단시간에 많은 강우가 발생할 수 있을 수 있는 상황에 대해서도 적용하기위해 과거 지속시간 1시간 연 최고치 강우량 빈도분석을 통해 행정구역별, 내륙 및 해안지역 평균설계빈도를 분석하여 대응빈도를 제시하였다. 미래 강우강도의 변화는 수공관련 기반시설의 서비스 수준을 감소시키므로 목표연도와 기후변화프리미엄을 고려한 설계강우량을 제시하였고, RCP8.5기후변화시나리오에 따른 치수안전도 변화를 전망하였다. Fig. 1은 본 연구의 흐름도이다.

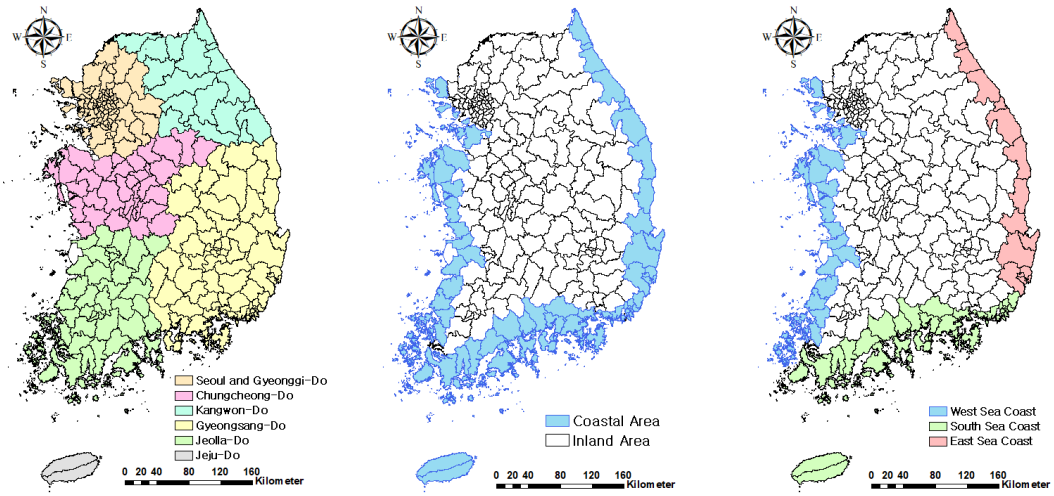
2. 대상지역 현황 및 기후변화 시나리오 수집

2.1. 대상지역 현황

본 연구에서는 설계강우량을 산정하기에 앞서 Fig.2와 같이 우리나라를 3개의 도시유형별로 구분하였다. 첫째로 행정구역별로 구분하였으며, 각 행정구역별 기상관측소 수는 Table 1과 같다. 둘째로 내륙 및 해안도시별로 구분하였으며, 기상관측소는 각각 29개소, 26개소이다. 셋째로 해안도시를 동해안, 남해안, 서해안으로 구분하였다.

2.2. 기상자료 및 기후변화시나리오 수집

본 연구에서는 도시방재시설물의 유효기간을 고려한 목표연도 설계가중치 설정을 위한 다양한 설계강우량을 산정하기위해 Fig. 3과 같이 기상청 산하 1976년부터 자료가 존재하고 있는 55개 기상관측소의 관측 자료를 사용하였다. 기후변화시나리오의 경우 기상청에서 제공하고 있는 HadGEM2-AO 모델 자료를 사용하였다(Baek et al., 2013). 또한 지속시간 1시간의 연최고치 강우량의



(a) Administrative district (b) Inland and coastal cities (c) Coastal cities

Fig. 2. Current status by administrative region and urban type.

Table 1. Status of observation stations by administrative region and urban type

Division		Number of station (EA)	Rate (%)
Administrative district	Capital	6	10.9
	Kangwon	7	12.7
	Chungcheong	8	14.5
	Gyeongsang	19	34.5
	Jeolla	13	23.6
	JeJu	2	3.6
City type	Inland	29	52.7
	Coastal land	26	47.3
Coast type	East sea	7	26.9
	West sea	8	30.8
	South sea	11	42.3

설계빈도를 산정하여 행정구역 및 도시유형별 설계빈도 상향에 활용하였다. 분석을 위한 시간적 범위로는 Fig.4와 같이 현재기간인 Current (1976y~2005y)와 미래기간인 Future 1 (2011y~2040y), Future 2 (2041y~2070y), Future 3 (2071~2100)으로 구분하여 분석을 실시하였다.

2.3. GEV 분포형을 이용한 설계강우량 산정

일반적으로 극한사상을 분석하기 위해서는 SAM (series of annual maximum) 방법과 특정 임계 이상의 값의 시계열자료를 이용하는 POT (Peak Over Threshold) 방법이 있다. POT 기법은 임계치의 설정이 어렵고 자료들 간의 자기상관성 때문에 빈도분석의 자료로 사용하기에 한계가 있다. 연최고치 계열을 이용하는 정상성 빈도분석 기법은 현재까지 가장 보편적으로 이용되는 기법으로 일반적으로 GEV 확률분포를 통해 극한강우를 통계적으로 표현한다(Coles, 2001). GEV 확률분포의 누가밀도함수는 식 (1)과 같으며 재현기간(T)에 대한 극한

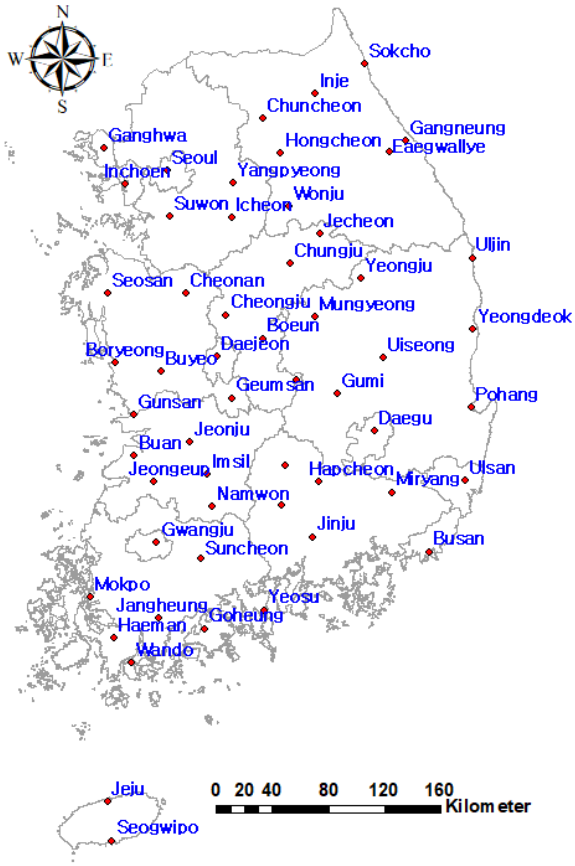


Fig. 3. Location of weather station.

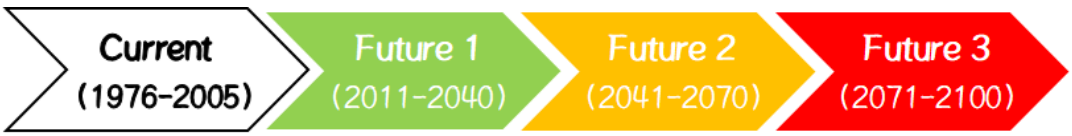


Fig. 4. Time range of study.

강우는 식 (2)와 같이 추정할 수 있다(Coles, 2001).

$$F(z) = \exp\left\{-[1+\xi(\frac{z-\mu}{\sigma})]^{-1/\xi}\right\} \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{[1-F(z)]} \quad (2)$$

여기서, μ, σ그리고 ξ는 위치매개변수(location parameter), 규모매개변수(scale parameter), 형상매개변수(shape parameter)를 의미한다.

재현기간은 식 (2)의 z보다 클 가능성이 있는 연최고치의 평균으로서 정상성(stationarity) 기반에서는 재현기간이 시간에 따라 독립적으로 활동한다. 이 개념은 특정 수공시설물의 서비스 수준(service level)의평가를 위해 이용된다. 즉, 200년 빈도 재현기간으로 되어 있다는 것은 통계학적으로 200년에 1번의 확률로 발생할 수 있는

Table 2. The change rate of the design rainfall in the target year by administrative region (%)

Type	Return period (year)	Tendency considerations	Consideration of climate change scenario		
			Future 1 (2011y-2040y)	Future 2 (2041y-2070y)	Future 3 (2071y-2100y)
Capital	10 years	20.6	9.0	9.3	10.9
	30 years	19.1	13.8	19.8	27.7
	50 years	19.1	34.5	33.7	27.0
	100 years	19.7	40.2	36.5	42.5
Kangwon	10 years	24.6	13.6	16.7	16.5
	30 years	21.6	7.0	11.7	9.0
	50 years	21.0	4.5	10.4	6.2
	100 years	20.9	1.6	9.3	3.0
Chungcheong	10 years	23.2	44.9	50.0	57.0
	30 years	19.9	35.3	40.4	49.4
	50 years	19.0	39.3	44.7	52.9
	100 years	18.3	42.8	48.6	56.1
Gyeongsang	10 years	22.2	3.5	5.6	9.8
	30 years	19.5	4.6	6.7	11.0
	50 years	18.8	6.0	8.3	13.0
	100 years	18.4	7.3	9.4	14.3
Jeolla	10 years	20.8	9.9	8.1	9.5
	30 years	19.4	5.8	4.2	5.9
	50 years	19.6	4.4	2.8	4.7
	100 years	20.5	3.0	1.3	3.7
JeJu	10 years	23.2	1.0	5.6	1.1
	30 years	22.1	2.9	7.3	3.0
	50 years	22.6	4.1	8.5	4.2
	100 years	23.9	5.9	10.5	6.0

이벤트에 대해 구조물이 충분히 대응하도록 설계되어 있다는 것을 의미한다. 그러나 비정상성은 극한강우의 발생빈도가 시간에 따라 변한다는 뜻으로 재현기간이 시간(t)에 따라 변한다는 것을 의미하며, 기후변화는 과거 극한사상의 경향을 벗어나 SAM이 정상성이라는 가정에 벗어날 것이라 판단된다. 비정상성은 확률분포형의 1차, 2차 모멘트 등이 모두 시간(t)에 따라 변하는 경우로 표현된다(Jeung et al., 2015). 본 논문에서는 조건부 GEV 확률분포를 이용하여 비정상성 빈도분석을 실시하였으며 식 (3)과 같은 형태로 표현된다(Kim et al., 2011).

$$F(z,t) = \exp\left\{-[1+\xi(t)(\frac{z-\mu(t)}{\sigma(t)})]^{-1/\xi(t)}\right\} \quad (3)$$

여기서, z는 자료(독립변수), $\mu(t)$는 시간(t)에 종속된 위치매개변수, $\sigma(t)$는 시간(t)에 종속된 규모변수, $\xi(t)$는 시간(t)에 종속된 형상매개변수이다.

GEV 확률분포형의 시간(t)에 종속된 매개변수들은 매개변수적 기법또는 비매개변수적 기법을 통해 추정된다. 그러나 시간(t)의 함수로서 재현수준(return level)을 추정하는데 있어서는 비매개변수적 방법으로는 모형의 변수들을 외삽 추정을 할 수 없기 때문에 매개변수적 기법을 이용하여 조건부 GEV 확률분포형의 변수를 추정한다(Coles, 2001; Mudersbach et al., 2010). 시간(t) 종속된 매개변수들을 추정하기 위해서는 여러 모형들이 이용될 수 있으나 외삽의 어려움과 복잡함을 피하기 위해 비교적 간단한 선형 및 지수모형을 이용할 것을 권하고

Table 3. The change rate of the design rainfall in the target years by urban type (%)

Type	Return period (year)	Tendency considerations	Consideration of climate change scenario		
			Future 1 (2011y-2040y)	Future 2 (2041y-2070y)	Future 3 (201y-2100y)
Coastal land	10 years	25.0	3.4	3.6	4.9
	30 years	22.2	3.3	4.0	5.8
	50 years	21.8	3.5	4.5	6.6
	100 years	21.7	3.9	5.4	8.0
Inland	10 years	19.7	21.1	24.0	27.8
	30 years	17.7	16.7	20.7	26.1
	50 years	17.4	21.8	24.5	25.7
	100 years	17.6	23.0	25.7	29.4

있다(Coles, 2001; Mudersbach et al., 2010). 본 논문에서는 위치매개변수와 규모매개변수에 대하여 외부설명 변수와 경향성을 적용하였다. 시간(t)에 종속된 위치매개변수 $\mu(t)$와 시간(t)에 종속된 규모변수 $\sigma(t)$ 는 다음과 같이 표현된다. 경향성을 고려한 경우는 식 (4) ~ (6)과 같다.

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \quad (4)$$

$$\log\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 t \quad (5)$$

$$\xi(t) = \xi \quad (6)$$

여기서, μ_0, μ_1, σ_0, σ_1는 시간모형의 매개변수이며, 각 매개변수와 ξ는 관측 자료를 이용하여 추정된다.

외부설명변수를 (7) ~ (9)와 같이 고려한다.

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 x(t) \quad (7)$$

$$\log\sigma(t) = \sigma_0 + \sigma_1 x(t) \quad (8)$$

$$\xi(t) = \xi \quad (9)$$

여기서, $x(t)$는 외부설명변수이다.

3. 기후변화가 미래 치수안전도에 미치는 영향 평가

3.1. 기후변화시나리오에 따른 확률강우량의 변화율 분석

3.1.1. 행정구역별

행적구역별 치수안전도 변화를 살펴본 결과 경향성을 고려한 경우 Table 2와 같이 전 권역이 약 20% 이상이 증가되는 것으로 분석되었다. 기후변화시나리오를 고려한 경우 전 지역이 미래로 갈수록 폭우위험성이 증가하는 것으로 분석되었며, 특히 수도권과 충청권에서 크게 증가할 것이라 전망되었다. 이는 다른 지역에 비해 폭우로 인한 홍수위험성 크게 증기하는 것을 의미하며, 이에 충분한 대비가 필요하다. Future 1의 경우 강원권에서 가중치가 가장 작게 분석되고, 충청권에서 Future 1기간에 40%, Future 3 기간에 54% 증가하는 것으로 가장 크게 분석되었다.

3.1.2. 해안도시 및 내륙도시

해안도시 및 내륙도시의 경우 Table 3과 같이 내륙도시의 목표연도 설계강우량의 변화율이 큰 것으로 전망된다. 경향성을 고려하였을 때 해안도시에서 가중치가 약 22% 이상 증가하였고 내륙도시의 경우 약 18% 이상 증가한다. 기후변화시나리오를 고려하였을 때 해안도시는 약 3% ~ 7% 정도 증가하였고, 내륙도시는 16% ~ 26% 정도 증가하였다.

3.1.3. 해안별

전반적으로 목표연도 설계강우량은 동해안, 서해안, 남해안 순으로 변화율이 큰 것으로 분석되었다(Table 4). 특히 태백산맥으로 인해 영서와 상이한 기상특성을 가지는 동해안에서 가장 크게 분석이 되었는데 이는 강원도 영동지역의 기상학적 특성이 잘 반영된 것이라 판단된다. 즉 태백산맥으로 인해 영서와 상이한 기상특성을 가지는 영동지역의 경우 같은 시기에 다른지역에 비해 큰 강우량을 가진다. 경향성을 고려한 비정상성빈도분석 결과도

Table 4. The variation rate of the design rainfall for the coastal year (%)

Tpye	Return period (year)	Tendency considerations	Consideration of climate change scenario		
			Future 1 (2011y~2040y)	Future 2 (2041y~2070y)	Future 3 (2071y~2100y)
East sea	10 years	33.6	4.1	5.7	6.1
	30 years	28.6	3.8	6.5	7.3
	50 years	27.3	3.9	7.3	8.3
	100 years	26.3	4.2	8.7	10.0
Wset sea	10 years	27.0	5.6	4.3	4.9
	30 years	24.1	6.4	6.0	6.6
	50 years	23.6	7.1	7.1	7.8
	100 years	23.7	8.4	9.0	9.8
South sea	10 years	18.1	1.3	1.9	4.3
	30 years	16.8	0.6	1.0	4.3
	50 years	16.9	0.5	0.8	4.7
	100 years	17.4	0.5	0.7	5.5

마찬가지로 동해안 서해안 남해안순으로 증가하는 것으로 전망되었다.

3.1.4. 도시방재성능목표강우량과 목표연도를 고려한 설계강우량 변화 전망

도시방재성능목표강우량은 행정안전부에서 제시하고 있는 지역별 방재성능목표 설정·운영기준 자료를 활용하였으며 Fig. 5는 서울, 부산 지역의 목표연도 설계빈도를 나타내고 있으며 목표연도 설계빈도가 도시마다 달라 일관성이 없으며 설정근거가 불분명하다는 것을 보여준다. 반면, 경향성 및 기후변화를 반영한 폭우시나리오는 설계빈도의 상향이 필요하지 않으며 기후변화에 대비한 설계강우량의 여유치 확보가 충분히 가능하다는 장점이 있다.

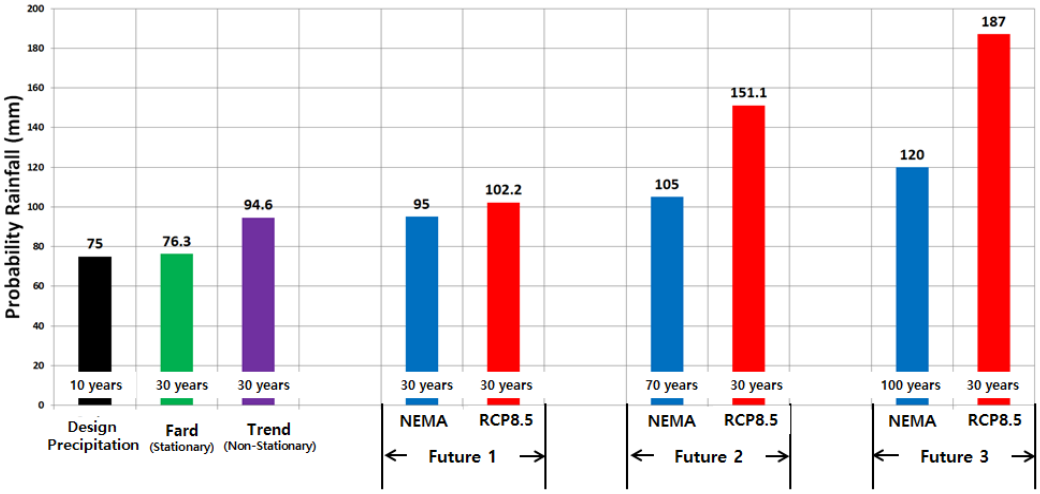
3.2. 기후변화가 미래 치수안전도에 미치는 영향 평가

기후변화는 기후를 비정상성(non -stationary) 개념으로 변화시키고 있으며, 배수관련 기반구조 설계의 가정 중 하나인 통계 매개변수의 정상성은 미래에는 더이상 유효하지 않는다. 본 절에서는 이러한 비정상성을 고려한 조건부 GEV 분포를 이용하여 분석하였다. 기후변화를 고려한 치수안전도의 경우 Table 5와 같이 분석되었으며 강원도의 경우 100년 빈도 강우가 Future 3 기간에 약 22년 빈도로 감소하였다. 특히, 수도권을 포함하는 경기, 서울 지역은 250년 빈도 강우가 Future 3 기간에 약 8년 빈도로 급격하게 감소하는 것으로 분석되었으며 전체 행정구역에서 미래로 갈수록 치수안전도가 감소하였다. 이는 현재의 높은 빈도의 강우가 미래에는 더 빈번하게 발생할 석으로 판단할 수 있으며 방재시설물, 수공시설물 등의 설계에 치수안전도를 고려하여 설계가 필요할 것으로 판단된다.

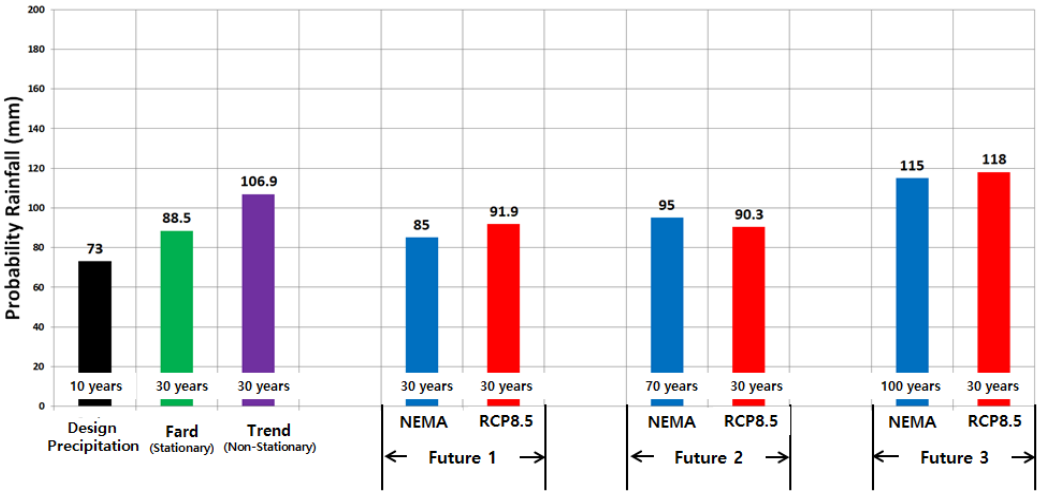
Fig. 6은 각 행정구역별 현재대비 미래 빈도강우량의 비율을 나타내는 그래프이며 미래에는 현재대비 증가비율이 증가하고, 수도권 및 경기 지역의 1,000년 빈도는 약 5배 이상 증가하는 것으로 분석되었다. 제주권은 100년 빈도 이상부터는 Future 2 기간의 빈도강우량이 Future 3 기간보다 더 크고, 현재대비 증가비율은 제주권에서 가장 크리라 전망되었다. 이러한 분석결과는 현재의 200년 빈도강우가 미래에는 50년, 100년 빈도에 해당되는 빈도가 될 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시폭우를 설계강우량을 기준으로 설정 할 경우 특정 강우 이벤트로 인해 설계홍수량을 초과하여 재해와 재난을 발생시키는 사상으로 정의하고, 방재시설물의 생애주기를 고려한 목표연도 설계가중치 설정을 위해 경향성과 RCP기후변화시나리오를 고려하여



(a) Seoul



(b) Busan

Fig. 5. Comparison of probability heavy rainfall by rainfall scenario.

GEV분포를 따르는 비정상성 빈도분석을 수행하였다. 먼저 과거 지속시간 1시간의 연최고치 강우량을 통해 행정구역별, 내륙 및 해안지역의 평균설계빈도를 분석하여 대응빈도를 제시하였고, 미래 강우강도의 변화는 수공관련 기반시설의 서비스 수준을 감소시키므로 목표연도와 기후변화프리미엄을 고려한 설계강우량을 제시하였다. 본 연구의 3개의 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 경향성을 고려한 경우 전 지역에서 설계강우량이 약 20% 이상 증가되는 것으로 분석되었으며, 이는 폭우의 지역적 편차를 충분히 반영하지 못한 것으로 판단된다. 기후변화시나리오를 고려한 경우 수도권 지역의 경우 미래의 폭우위험성이 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 다른 권역보다 폭우로 인한 홍수위험성 높아 이에 대비해야 한다는 점을 의미한다. 또한 내륙도시

Table 5. Changes in flood safety by administrative region

Administrative district	Future	Return period (years)							
		2	5	10	20	50	100	200	250
Kangwon-do	①	1.8	3.2	5.3	9.0	18.8	34.1	62.5	76.4
	②	1.7	2.7	4.2	6.8	14.1	26.1	49.0	60.5
	③	1.8	2.8	4.3	6.8	12.8	21.6	37.8	45.5
Seoul and Gyeonggi-do	①	1.9	3.4	5.7	9.4	18.6	31.5	54.2	64.8
	②	1.6	2.5	3.6	5.2	9.0	14.4	23.4	27.7
	③	1.5	1.9	2.4	3.1	4.3	5.5	7.2	7.8
Gyeongsangnam-do	①	2.2	4.4	8.0	14.4	31.7	58.0	106.8	130.1
	②	1.7	2.8	4.5	7.4	14.5	24.7	43.3	52.0
	③	1.8	3.0	5.0	8.3	16.1	27.1	46.4	55.4
Gyeongsangbuk-do	①	2.2	4.0	6.9	11.5	22.8	39.0	68.3	82.1
	②	1.8	3.2	5.4	9.0	17.8	30.5	53.9	65.4
	③	1.8	3.2	5.3	8.5	16.3	27.0	45.9	54.7
Jeollanam-do	①	2.1	3.9	6.4	10.7	21.3	36.8	66.0	80.3
	②	1.5	2.1	2.7	3.7	5.7	8.4	12.7	14.6
	③	1.3	1.8	2.5	3.5	5.6	8.4	12.9	15.0
Jeollabuk-do	①	1.9	3.6	6.3	11.1	23.9	43.5	80.3	98.0
	②	1.5	2.2	3.3	5.1	10.0	17.3	31.6	38.5
	③	1.4	2.0	3.0	4.5	8.4	13.8	23.2	27.6
Chungcheongnam-do	①	2.1	3.8	6.5	10.7	20.9	34.6	58.5	69.5
	②	1.7	2.8	4.1	6.2	10.6	16.3	25.9	30.3
	③	1.5	2.1	3.0	4.4	7.9	12.6	21.0	25.0
Chungcheongbuk-do	①	2.0	4.0	7.5	14.4	34.8	68.3	133.6	165.5
	②	1.7	2.5	3.7	5.6	10.1	16.2	26.8	31.6
	③	1.6	2.4	3.6	5.7	11.7	21.3	39.2	47.7
Jeju	①	1.9	4.1	8.2	15.8	36.5	68.4	126.6	154.8
	②	1.7	2.9	4.9	8.3	17.7	33.0	61.9	75.4
	③	1.5	2.4	4.0	7.3	16.4	30.8	60.4	76.1

※ Current : 1976-2005 years ① : Future 1(2011y-2040y years) ② : Future 2(2041y-2070y years) ③ : Future 3(201y-2100y years)

의 목표연도 설계강우량의 변화율이 가장 크며, 경향성을 고려한 경우 해안도시는 평균적으로 약 22% 증가하였다. 또한 내륙도시의 경우 약 18%가 증가하는 것으로 분석되었다. 기후변화시나리오를 고려하였을 때 해안도시는 약 3% ~ 8% 정도 증가하는 것으로 전망되었고, 내륙도시는 16% ~ 29% 정도 증가할 것으로 전망되었다. 해안도시의 목표연도 설계강우량은 남해안, 서해안, 동해안 순으로 변화율이 큰 것으로 전망되었다. 본 연구에서는 관측소, 지자체 폭우시나리오/빈도별 강수량을 산정하고 현재 설계강수량 대비 가중치를 제시하였으며 수공시설물 설계 시 기후변화 프리미엄을 고려하여 설계강우량의 여유치를 확보한다면 기후변화로 인해 미래에 설계강우 빈도의 변화에도 시설물의 안전도가 확보될 것으로 판단된다.

둘째, 기후변화를 고려한 치수안전도 분석결과 강원도의 경우 100년 빈도 강우가 Future 3 기간에 약 22년 빈도로 감소하였다. 특히, 수도권을 포함하는 경기, 서울 지역은 250년 빈도 강우가 Future 3 기간에 약 8년 빈도

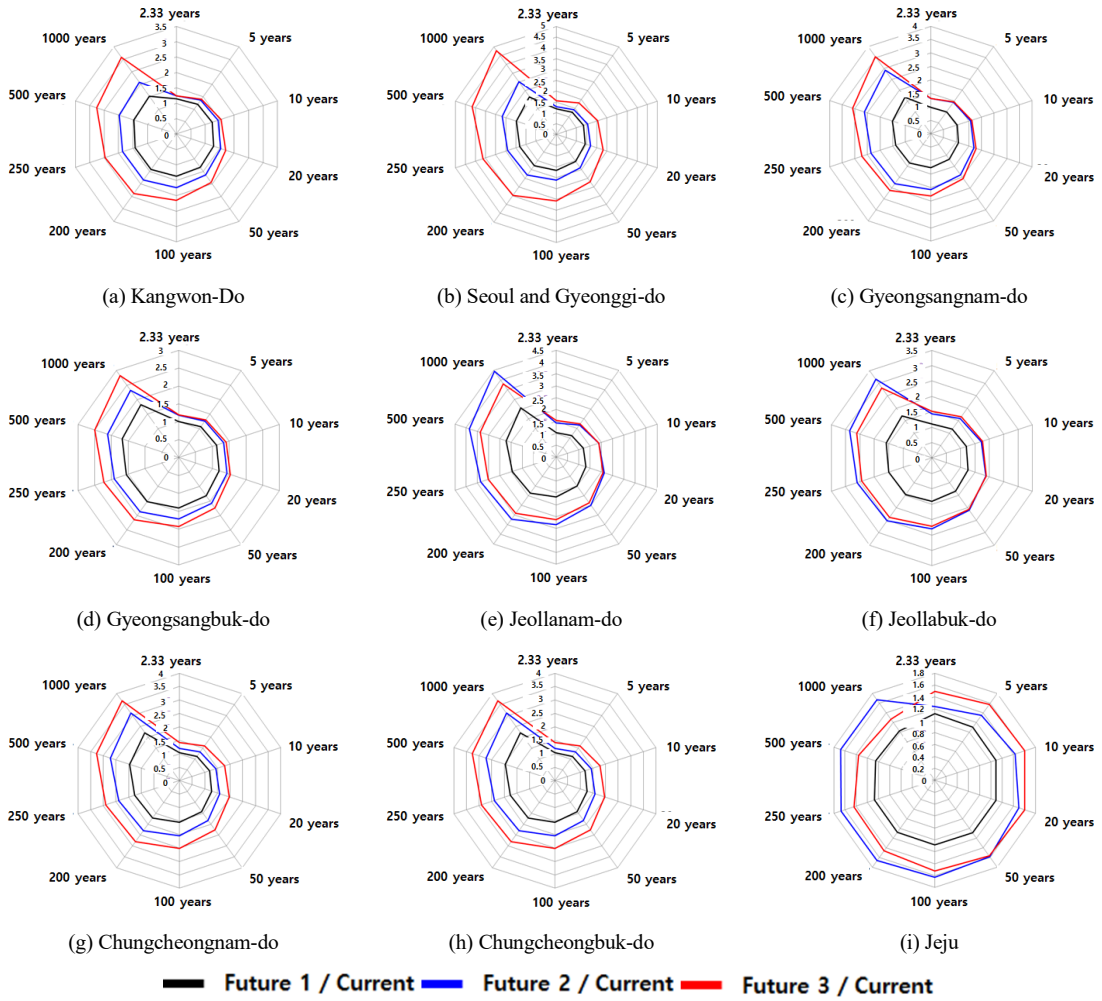


Fig. 6. Percentage of future frequency precipitation compare to the current region.

로 급격하게 감소하는 것으로 분석되었으며 전체 행정구역에서 미래로 갈수록 치수안전도가 감소하였다. 이는 현재의 높은 빈도의 강우가 미래에는 더 빈번하게 발생할 수 있는 것으로 판단된다.

셋째, 본 연구에서는 비정상성을 반영한 조건부 GEV 분포를 이용하여 지속시간별 확률강우량을 산정하였다. 수도권 및 경기지역의 빈도별 강우량을 분석한 결과, 전반적으로 미래로 갈수록 빈도별 강우량이 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 단순히 관측자료의 경향성만을 고려한 설계강우량 산정법은 현재 대비 증가율이 가장 크게 분석되었으나 과거의 경향이 미래에도 계속된다는 선형방정식을 기본 가정으로 설정하고 있기 때문에 기후변화의 주기성, 반복성을 반영한 목표연도강우량을 산정하는 것은 한계가 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C143007-01-000000)에 의해 수행되었습니다.

이 연구는 기상청 선진기술개발연구사업(KMI2018

-03010)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Alain, M., Sophie, D., Daniel, C., Guillaume, T., 2007, Assesment of future change in intensity-duration -frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM), Journal of Hydrology, 347(1), 197-210.

Alison, L. K., Richard, G. J., Nicholas, S., 2006, Reynard RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II, climate change results, Journal of Hydrology, 318, 163-172.

Annette, S. D., Claes, H., Gilbert, S., Gustafsson, L. G., 2008, The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system, Journal of Hydrology, 350(1), 100-113.

Baek, H. J., Lee, J. H., Lee, H. S., Hyun, Y. K., Cho, C. H., Kwon, W. T., Margin, C., Gan, S. Y., Kim, M. J., Choi, D. H., Lee, J. H., Lee, J. H., Boo, K. O., Kang, H. S., Byun, Y. H., 2013, Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways, Asia-Pacific J. Atmos. Sci., 49, 603-618.

Burn, D. H., Hag Elnur, M. A., 2003, Detection of hydrologic trends and variability, Journal of Hydrology, 255, 107-122.

Choi, Y. E., Kwon, W. T., Yun, W. T., Jung, H. J., Kim, K. H., Pakr, I. H., Lee, H. S., Pyeon, D. E., Kwon, J. I., 2014, Study on application strategies of scientific climate change information to build adaptation policies and climate monitoring-prediction-adaptation planning over the Republic of Korea, Journal of Climate Research, 9(1), 77-91.

Coles, S., 2001, An Introduction to statistical modeling of extreme values, Springer - Verlag, London, UK.

Fowler, H. J., Kilsby, C. G., 2003, A Regional frequency an of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. International Journal of Climatology, 23, 1313-1334.

Groisman, P. Y., Karl, T. R., Easterling, D. R., Knight, R. W., Jamason, P. F., Hennessy, K. J, Suppiah, R., Page, C. M., Wibig, J., Fortuniak, K., Razuvaev, V. N., Douglas, A., Forland, E., Zahi, P. M., 1999, Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change, Journal of Climatic Change, 42(1), 243-283.

Han, K. H., Choi, J. T., Kim, C. S., 2016, Calibration of probabilistic forecast of temperature in PyeongChang area using bayesian model averaging, Journal of Climate Research, 11(1), 49-67.

Hans, T., 2007, The influence of climate change on stream flow in Danish rivers, Journal of Hydrology, 333, 226-238.

He, Y., Bárdossy, A., Brommundt, J., 2006, Non-stationary flood frequency analysis in southern Germany, The 7th International Conference on HydroScience and Engineering, Philadelphia, USA. 1-16.

Hershfield, D. M., 1973, On the probability of extreme rainfall events, Bulletin of the American Meteorological Society, 54, 1013-1018.

Jang, D. H., Lee, S. H., 2013, Analysis of forest type changes for vulnerability assessment of climate changes in the mountainous regions of Gangwon-do, Korea, Journal of Climate Research, 8(2), 169-183.

Jeung, S. J., Hong, I., Kim, B. S., 2015, Non-stationary intensity-duration-frequency curves & design flood for drainage system design coping with climate change, Crisisonomy, 11(10), 237-255.

Karl, T. R., Knight, R. W., 1998, Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States, Bull. Amer. Meteor, Soc., 79, 231-241.

Katz, R. W., Parlange, M. B., Naveau, P., 2002, Statistics of extremes in hydrology, Advances in Water Resources, 25(8), 1287-1304.

Kim, B. S., Lee, J. K., Kim, H. S., Lee, J. W., 2011, Non-stationary frequency analysis with climate variability using conditional generalized extreme value distribution, Journal of Korean Wetlands Society, 13(3), 499-514.

Korea Research Institute for Human Steelements, 2015, Urban Design Technique Development Adapting to Climate Change Driven Heavy Rainfall Disaster.

Lee, C. H., 2010, Study on rainfall frequency analysis method under non-stationary condition considering climate change, Master thesis, Hanyang University (in Korean with English abstract).

Lee, J. J., Kwon, H. H., 2011, Analysis on spatio-temporal pattern and regionalization of extreme rainfall Data, Journal of Civil Engineering, 31(1), 13-20.

Ministry of construction Transportation, 2000, Estimation of probability rainfall in Korea, Basic Books.

Mudersbach, C., Jensen, J., 2010, Nonstationary extreme value analysis of annual maximum water levels for designing coastal structures on the German North Sea coastline. Journal of Flood Risk Management, 3, 52-62.

National Emergency Management Agency, 2011, Environmental Change Prediction of Natural Disaster and Design Criteria of the Measures for Natural Disaster Prevention and Contrl Under Climate Change.

Robert, L., Buishand, T. A., 2007, Resampling of regional climate model output for the simulation of extrem river flows, Journal of hydrology, 332, 387-496.

Smith, R. L., 1989, Extreme Value analysis of environmental time series: an application to trend detection in ground-level ozone, Journal of Statistical Science, 4(4), 367-377.

Stedinger, J. R., Crainiceanu, C. M., 2001, Climate variability and flood-risk management, risk-based decision making in water resources. IX Proceedings of the Ninth Conference, United Engineering Foundation, ASCE, Santa Barbara, CA, USA, https://doi.org/10.1061/40577(306)7.

Strupczewski, W. G., Singh, V. P., Feluch, W., 2001, Non-stationary approach to at-stie flood frequency modelling Ⅰ Maximum likelihood estimation, Journal of Hydrology, 248(1), 123-142.

Sung, J. H., Kim, B. S., Kang, H. S., Cho, C. H., 2012, Non-stationary frequency analysis for extreme precipitation based on representative concentration pathways(RCP) climate change scenarios, Korean Society of Hazard Mitigation, 12(2), 231-244.

• Researcher. Se-Jin Jeung
Kangwon Institute of Inclusive Technology
climate@kangwon.ac.kr
• Doctor's course. Dong-Ho Kang
Department of Urban Environment&Disaster Management
School of Disaster Prevention, Kangwon National University
kdh@kangwon.ac.kr
• Professor. Byung-Sik Kim
Department of Urban Environment&Disaster Management
School of Disaster Prevention, Kangwon National University
hydrokbs@kangwon.ac.kr