



비정상성을 고려한 원평천 유역의 미래 설계홍수량 산정

Estimation of Future Design Flood Under Non-Stationarity for Wonpyeongcheon Watershed

류정훈* · 강문성** · 박지훈* · 전상민* · 송정현* · 김계웅* · 이경도***

Ryu, Jeong Hoon · Kang, Moon Seong · Park, Jihoon · Jun, Sang Min · Song, Jung Hun · Kim, Kyeung · Kyeong-Do Lee

Abstract

Along with climate change, it is reported that the scale and frequency of extreme climate events show unstable tendency of increase. Thus, to comprehend the change characteristics of precipitation data, it is needed to consider non-stationary. The main objectives of this study were to estimate future design floods for Wonpyeongcheon watershed based on RCP (Representative Concentration Pathways) scenario. Wonpyeongcheon located in the Keum River watershed was selected as the study area. Historical precipitation data of the past 35 years (1976~2010) were collected from the Jeonju meteorological station. Future precipitation data based on RCP4.5 were also obtained for the period of 2011~2100. Systematic bias between observed and simulated data were corrected using the quantile mapping (QM) method. The parameters for the bias-correction were estimated by non-parametric method. A non-stationary frequency analysis was conducted with moving average method which derives change characteristics of generalized extreme value (GEV) distribution parameters. Design floods for different durations and frequencies were estimated using rational formula. As the result, the GEV parameters (location and scale) showed an upward tendency indicating the increase of quantity and fluctuation of an extreme precipitation in the future. The probable rainfall and design flood based on non-stationarity showed higher values than those of stationarity assumption by 1.2%~54.9% and 3.6%~54.9%, respectively, thus empathizing the necessity of non-stationary frequency analysis. The study findings are expected to be used as a basis to analyze the impacts of climate change and to reconsider the future design criteria of Wonpyeongcheon watershed.

Keywords: Climate change; non-stationary; RCP; design flood

1. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 최근 수십 년간 기후변화에 따른 영향으로 전 지구적으로 이상기후가 발생하여 강우 패턴이 변하거나 수자원이 변하는 등 수문학적 시스템이 변하고 있음을 보고하였다. 지난 100여 년간 온난화와 함께 전 지구 평균 지표온도는 약 0.85 °C 상승하였으며 이상고온, 장마, 홍수, 가뭄 등 극한사상이 증가하였다 (IPCC, 2013; IPCC, 2014; CCIC, 2013). 우리나라는 지난 20세기 동안 평균기온이 약 0.18 °C/10년, 강수량이 약 21 mm/10년의 비율로 증가하는

등 급격한 기후변화를 겪고 있는 것으로 보고된 바 있다. 특히 우리나라는 최근 20년간 강수량이 약 7% 증가하였고 80 mm 이상인 호우의 발생 빈도가 증가 추세를 나타내고 있으며, 수공구조물의 설계 기준을 초과하는 강우가 발생하고 있다 (NIMR, 2012; MOLIT, 2009). 이와 같이 설계 기준을 넘어서는 극한강우사상이 기후변화 하에 어떻게 변화하고 수공구조물의 수명기간동안 강수량 자료의 확률분포형이 어떻게 변화할지를 분석할 필요가 있다. 그러나 현재 수공구조물 설계 시 필요한 설계홍수량을 산정하는 데 중요한 영향을 미치는 강수량 자료는 정상성 (Stationary) 가정 하에 분석되고 있다. 정상성 가정은 강우 시계열 자료의 통계 특성 값들이 장기간 동안 변하지 않고 일정하다는 가정이므로, 정상성 빈도해석을 통해서 현재 진행되고 있는 강수의 증가 경향을 반영하지 못한다. 다가올 미래에는 수공구조물의 현재 설계 기준이 유효한가에 대한 재고가 필요하며, 따라서 미래 강우사상의 경향성을 반영할 수 있는 비정상성 빈도해석을 고려한 설계 기준 산정이 필요하다.

최근 비정상성 빈도해석 관련 연구는 확률분포형의 매개변수 변화를 분석하고, 비정상성 빈도해석을 수행하여 정상성 빈도해석 결과와 비교분석하는 데 대한 많은 연구가 발표되고 있다. 확률분포형의 매개변수 변화와 관련된 연구로,

* Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

** Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

*** National Academy of Agriculture Science, Rural Development Administration

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: September 3, 2015

Revised: September 25, 2015

Accepted: September 25, 2015

Kwon et al. (2011)은 미래 강수량을 전망하기 위하여 전국 68개 관측소를 대상으로 비정상성 빈도해석을 수행한 바 있다. 누적평균과 이동평균 방법을 이용하여 강수량 자료를 재구축하고 선형 회귀식을 통해 Gumbel 분포의 매개변수를 추정된 뒤 목표연도별 확률강우량을 추정하였다. 목표연도 2030년에는 전국적으로 100년 빈도 확률강수량이 누적평균 방법을 이용한 경우에 8%, 이동평균 방법을 이용한 경우에 18% 증가할 것으로 전망하였다. Shin et al. (2013)은 전국 57개 기상 관측소 자료를 토대로 228개 행정구역에 대한 강수량 자료를 구축하고 이동평균 방법을 통해 비정상성 빈도해석을 수행한 바 있다. GEV 분포 매개변수의 비선형 추정을 통한 비정상성 빈도해석 결과가 선형 추정을 통한 비정상성 결과 및 정상성 빈도해석 결과보다 관측값의 경향성을 보다 정확하게 반영하는 것으로 나타났다. Kim and Ha (2013)는 기후 변화에 따른 영향을 평가하기 위하여 RCP8.5 시나리오를 이용한 미래 설계홍수량을 산정한 바 있다. 연최고치계열 자료의 분석에 가장 보편적으로 사용되는 GEV 분포를 선정하고 매개변수를 시간에 종속시켜 기후변화를 고려할 수 있는 비정상성 빈도해석을 수행하였다. 먼 미래로 갈수록 GEV 분포의 위치 매개변수와 규모 매개변수가 증가하여 극한강수사상의 평균 및 변동성이 증가할 것으로 분석하였다. Shin et al. (2014)는 비정상성을 가정하여 강수량 자료를 분석하고 기대 대기시간 (expected waiting time)과 기대 초과사상 수 (expected number of exceedance event)의 개념에서 재현기간의 변화를 분석한 바 있다. 비정상성 빈도해석을 수행하기 위하여 Gumbel 분포의 위치 매개변수와 규모 매개변수에 시간 항을 고려하였다. 재현기간은 정상성을 가정한 경우보다 비정상성을 가정한 경우에 작게 산정되며, 재현기간이 커질수록 정상성과 비정상성의 결과 차이가 커지는 것으로 분석하였다.

비정상성 및 정상성 빈도해석 결과에 대한 비교분석을 실시한 연구로, Kim et al. (2011)은 국내 6개 기상 관측소 자료를 토대로 조건부 GEV 분포를 이용하여 빈도해석을 수행한 바 있다. 전반적으로 비정상성을 고려한 확률강우량이 정상성을 고려한 확률강우량보다 큰 것으로 분석하였다. Sung et al. (2012)은 RCP 시나리오를 이용하여 한반도의 미래 극한 강수를 전망한 바 있다. 21세기 말의 극한강수를 전망하기 위해 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오를 이용하여 비정상성 빈도해석을 수행한 결과, 21세기 말의 20년 빈도 강수량은 현재 기후에서 정상성을 고려한 경우에 비해 RCP4.5 시나리오에서 전국적으로 29.0% 증가하고, RCP8.5 시나리오에서 30.1% 증가하는 것으로 분석하였다. Kim and Lee (2012)는 기후변화에 따른 극한 강수량을 전망하기 위하여 전국 55개

기상 관측소를 대상으로 Gumbel 분포를 이용한 비정상성 빈도해석을 수행한 바 있다. 경향성 검정과 정상성 검정으로 통계적 유의성을 판단하여 대상 지점을 선별하였으며, 누적평균 방법을 이용하여 각 지점에 대한 목표연도별 확률강우량을 산정하였다. Lee et al. (2013)은 목감천 유역을 대상으로 설계호우-단위도법과 직접 홍수빈도해석 방법을 적용하여 비정상성을 고려한 설계홍수량을 산정한 바 있다.

본 연구에서는 원평천 유역을 대상으로 과거 35년과 미래 90년 강수량 자료를 구축하고 비모수적 방법으로 분위사상법을 적용하여 편의를 보정하였다. 극한강수사상의 변화 양상을 파악하기 위하여 비정상성 GEV 분포의 매개변수 변화를 추정하였다. 비정상성 빈도해석은 이동평균 방법으로 미래 강수량 자료를 재구축하여 확률강우량을 산정하였으며 합리식을 통해 설계홍수량을 분석하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 원평천 유역의 미래 설계홍수량을 다음과 같은 방법으로 분석하고 평가하였다. 과거 강수량 자료는 기상청으로부터 수집하였고, 미래 강수량 자료는 RCP4.5 시나리오를 사용하여 구축하였다. 미래 강수량 자료는 과거 강수량 자료를 바탕으로 분위사상법을 적용하여 편의보정을 실시하였다. 과거 강수량 관측치 자료 및 편의보정을 수행한 미래 강수량 모의치 자료를 이용하여 연도별로 지속시간별 최대강수량을 산정하였고, 비정상성을 고려한 빈도해석을 통해 확률강우량을 추정하였다. 설계홍수량은 비정상성 빈도해석 결과를 합리식에 적용하여 산정하였다. 본 연구의 연구방법 및 흐름도는 Fig. 1과 같다.

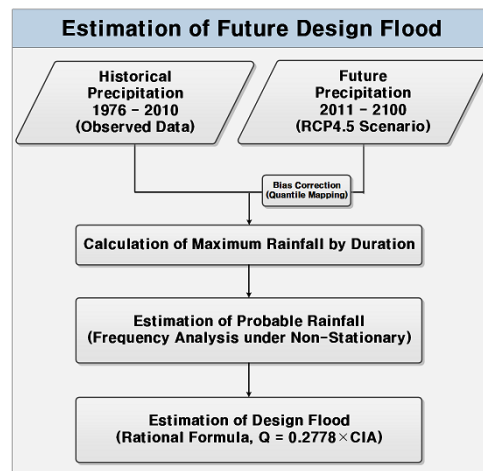


Fig. 1 Flow chart of this study

1. 강수량 자료 구축

가. 연구 대상 지구

본 연구의 대상 지구는 금강 권역 동진강 수계의 원평천으로 선정하였다. 원평천은 동진강의 제1 지류이며 원평천으로 합류하는 하천은 지방2급 하천인 두월천, 금구천, 유각천, 감곡천 등이 있다. 원평천은 금구천이 합류하는 전라북도 김제시 봉남면에서 국가하천으로 바뀌며 원평천(국가하천)의 유역면적과 유로연장은 각각 270.7 km², 30 km이다. Fig. 2는 원평천 유역의 수치지표고모형(Digital Elevation Model, DEM), 토양도, 토지이용도를 나타낸 것이다. 한편, 원평천 유역은 최근 집중호우에 따른 침수피해 및 인명피해 등이 발생한 바 있다. 원평천 유역이 위치한 김제시의 경우 2005년에 총 피해액 433억여 원, 농경지 피해액 9억여 원에 이르렀던 것으로 집계되었다(Table 1).

Table 1 The amount of damage from storm and flood in Gimje (2001 ~ 2012)

Year	Total amount of damage (1,000 won)	Damage in agricultural aspect (1,000 won)
2012	6,581,423	0
2011	4,706,753	90,076
2010	20,085	5,085
2009	2,191,144	27,603
2008	66,280	-
2007	45,000	-
2006	156,170	-
2005	43,351,644	950,099
2004	1,490,170	127,357
2003	661,768	7,130
2002	5,615,084	0
2001	1,335,581	0

나. 과거 강수량 자료 구축

원평천 유역의 과거 강수량 자료는 원평천 유역과 가장 인접한 곳에 위치한 전주 관측소 자료를 사용하여 수집하였다. 기상청에서 제공하는 전주 관측소의 1시간 단위 과거 강수량 자료를 수집하였다. 자료기간은 1976년 ~ 2010년으로 설정하였다.

다. 미래 강수량 자료 구축

국립기상과학원(National Institute of Meteorological Research, NIMR)은 전 지구 기후변화 모델(General Circulation Model, GCM)인 HadGEM2-AO와 지역 기후변화 모델(Regional Climate Model, RCM)인 HadGEM3-RA를 사용하여 12.5 km의 해상도를 가지는 3시간, 6시간, 일 단위 지역 기후변화 시나리오를 제공하고 있다(NIMR, 2012). Ryu et al. (2015)은 충청남도 공주시에 위치한 계룡저수지를 대상으로 RCP 시나리오별 미래 설계홍수량을 산정한 바 있으며, 3시간 단위 지역 기후변화 시나리오를 사용하여 미래 설계홍수량을 산정한 결과 전반적으로 RCP4.5 시나리오에 따른 결과가 가장 큰 값을 나타내는 것으로 분석하였다. 본 연구에서는 국립기상과학원에서 제공하는 시나리오 중 RCP4.5 시나리오에 기반한 3시간 단위 자료를 이용하여 미래 강수량 자료를 구축하였다. 자료기간은 2011년 ~ 2100년으로 설정하였다.

2. 편의보정

기후변화 시나리오는 관측치와 모의치 간에 편의가 존재한다. 따라서 기후변화 시나리오를 이용하는 경우에는 관측치와 모의치 간의 계통적 오차(Systematic Bias)를 보정하여 자료 분석의 정확성을 향상시켜야 한다. Park et al. (2012)과 Ryu et al. (2015)은 연최고치계열의 강수량 자료 분석에 많이 사용되는 GEV(Generalized Extreme Value) 분포를 확률분

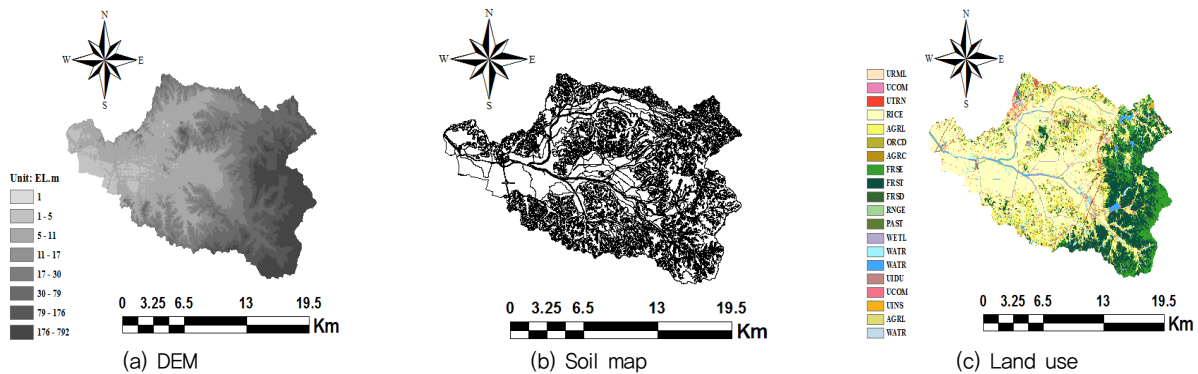


Fig. 2 DEM, land use, and soil map of Wonpyeongcheon watershed

포형으로 선정하고 분위사상법 (Quantile Mapping)을 적용하여 GEV 분포에 적합한 강수량 자료의 편의보정 (Bias Correction)을 수행한 바 있다. 분위사상법은 관측치 자료와 모의치 자료의 누적확률분포를 각각 산정한 다음 모의치 자료에 대한 누적확률분포를 관측치 자료에 대한 누적확률분포에 사상시킴으로써 관측치와 모의치 간의 오차를 보정하는 방법이다 (Hashino et al., 2007). 본 연구에서는 비모수적 (Non-Parametric) 방법으로 분포에 대한 분위사상법을 적용하여 편의보정을 수행하였다. 편의보정에 사용한 과거 강수량 자료기간은 관측치와 모의치 자료가 모두 존재하는 1979년~2005년으로 설정하였다. 모의치 자료의 경우 3시간 단위 자료를 사용하였으므로, 편의보정을 위하여 관측치 자료를 3시간 단위로 자료를 재구축하였다. 분위사상법을 이용하여 과거 강수량 관측치 및 모의치 자료 간의 3시간 단위 편의보정을 수행하였으며, 이를 미래 기간 (2011년~2100년)에 대해 적용하여 RCP4.5 시나리오에 기반한 3시간 단위 미래 강수량 자료의 편의를 보정하였다.

3. 확률강우량 산정

가. 비정상성 빈도해석

극한강수량상이 변화하는 양상을 살펴보기 위해서는 강수량 자료에 적합한 확률분포형을 선정하고 확률분포형의 매개변수 변화를 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 꼬리 부분이 두꺼운 형태로 극한강수량상을 표현하기에 적합한 GEV 분포를 확률분포형으로 선정하고 매개변수 추정방법으로 L-모멘트법을 사용하여 빈도해석을 수행하였다.

정상성 빈도해석은 강수량 자료의 확률분포형이 시간에 따라 변하지 않는다는 가정 하에 수행되며, 정상성을 가정한 GEV 분포의 누가밀도함수 (Cumulative Density Function, CDF)는 Eq. (1)과 같다.

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

여기서, z 는 강수량 자료 (독립변수), μ 는 위치 매개변수 (Location Parameter), σ 는 규모 매개변수 (Scale Parameter), ξ 는 형상 매개변수 (Shape Parameter)이다. 위치 매개변수와 규모 매개변수는 각각 GEV 분포의 1차 모멘트와 2차 모멘트, 즉 평균과 표준편차 (분산)을 의미하며, GEV 분포는 형상 매개변수의 크기에 따라 GEV-I 분포 혹은 Gumbel 분포 ($\xi = 0$), GEV-II 혹은 Log-Gumbel 분포 ($\xi < 0$), GEV-III 혹은 Weibull ($\xi > 0$) 등으로 구분된다.

최근 기후변화로 인한 극치사상의 규모와 빈도가 과거와

는 다른 양상으로 증가 추세를 나타내고 있으므로 강수량 자료의 변화 특성을 정확하게 파악하기 위해서는 비정상성 (Non-Stationary)에 대한 고려가 필요한 실정이다 (Shin et al., 2013; Sung et al., 2012). 비정상성 빈도해석은 시간에 따라 확률분포형 및 확률분포형의 매개변수가 시간에 따라 변한다는 가정 하에 수행된다 (Strupczewski et al. 2001; He and Brommundt, 2006). 비정상성을 고려한 GEV 분포의 누가밀도함수는 Eq. (2)와 같다.

$$F(z, t) = \exp\left[-\left\{1 + \xi(t)\left(\frac{z - \mu(t)}{\sigma(t)}\right)\right\}^{-1/\xi(t)}\right] \quad (2)$$

여기서, $\mu(t)$, $\sigma(t)$, 그리고 $\xi(t)$ 는 각각 시간을 고려한 위치 매개변수, 규모 매개변수, 형상 매개변수이다.

확률분포형의 매개변수 추정방법으로는 모멘트법, 최우도법, 확률가중모멘트법, L-모멘트법 등이 있다. L-모멘트법은 확률가중모멘트법을 선형조합으로 나타낸 것으로, 자료 수가 적거나 자료에 이상치가 있어 왜곡된 경우에도 비교적 안정적인 결과를 얻을 수 있다 (Ryu et al., 2015). 본 연구에서는 L-모멘트법을 사용하여 GEV 분포의 매개변수를 추정하였다.

나. 이동평균 방법

본 연구에서 정상성 빈도해석은 과거 1개 기간 (1981년~2010년)과 미래 3개 기간 (2011년~2040년, 2041년~2070년, 2071년~2100년)으로 나누어 수행하였으며, 비정상성 빈도해석은 강수량 자료의 강우 패턴 변화 혹은 경향성 변화를 반영할 수 있는 방법을 통해 수행하여야 한다. 자료의 경향성과 변동성을 반영할 수 있는 방법은 누적평균과 이동평균 방법이 있다. 누적평균 방법은 기준이 되는 기간을 설정한 뒤, 기준 기간을 기점으로 자료를 일정 시기만큼씩 자료를 누적시켜가며 자료를 재구축하는 방법이다. 이동평균 방법은 기준 기간을 설정하고 이를 기점으로 일정 시기만큼씩 이동시켜가며 자료를 재구축하는 방법이다 (Kwon et al., 2011; Shin et al., 2013). 본 연구에서는 이전 자료가 지속적으로 누적되어 경향성이 덜 반영될 가능성이 있는 누적평균 방법 대신 이동평균 방법을 이용하여 미래 강수량 자료를 재구축하였다. 이동평균 방법은 일반적인 수문 자료의 분석을 위한 자료기간인 30년을 고려하여 30년 이동평균 방법을 사용하였다. 이동평균에 사용한 자료기간은 1976년~2100년이며 초기 30년 (1976년~2005년)에 대하여 GEV 분포의 매개변수를 추정하였다. 이어서 자료를 1년씩 이동시켜가며 마지막 30년 (2071년~2100년)까지 총 96개 자료를 재구축하여 GEV 분포 매개변수 추정을 실시하였다.

4. 설계홍수량 산정

설계홍수량은 합리식(Rational formula)을 이용하여 산정하였다. 합리식은 설계홍수량을 유출계수와 강우강도, 그리고 유역면적을 곱한 값으로 구할 수 있는 방법이다. SI 단위제로 표현되는 합리식은 Eq. (3)과 같다.

$$Q = 0.2778 CIA = \frac{1}{360} CIA' \quad (3)$$

여기서, Q 는 유역 출구에서의 첨두홍수량 (m^3/sec), C 는 유역 특성에 따라 결정되는 감소계수인 유출계수, I 는 강우강도 (mm/hr), A 는 유역면적 (km^2)이다. A' 은 유역면적을 ha 단위로 나타낸 것이다. 일반적으로 합리식에 사용되는 유출계수는 유역의 피복 특성에 따라 결정할 수 있으며 Schwab and Frevert (1985)는 자연하천 유역에 대하여 유역 상태(산지, 초지, 경작지) 및 토양구조에 따른 유출계수를 제시한 바 있다. 본 연구에서는 Schwab and Frevert가 제시한 유출계수를 토대로 원평천 유역의 유출계수를 결정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 강수량 편의보정 결과

가. 과거 강수량 자료의 편의보정 결과

Table 2는 자료기간에 대한 과거 강수량 관측치 및 모의치의 총 강수량을 나타낸 것이다. 과거 강수량 자료의 편의보정 결과, 자료기간에 대한 연평균강수량은 관측치(1,295.1 mm) 대비 모의치의 경우 편의보정 전에 1,256.2 mm로 38.9 mm (3.00 %)의 편차를 보였으며 편의보정 후에 1,297.3 mm로 2.2 mm (0.17 %)의 편차를 보였다.

Fig. 3은 과거 관측치 및 모의치 간의 관계를 편의보정 전후로 정리하고 상관관계를 나타낸 것이다. 편의보정 전 모의치는 3시간 강우가 10 mm보다 적은 경우에 전반적으로 과다모의되는 경향을 나타냈으며, 3시간 강우가 10 mm보다 많은 경우에는 과소모의되는 경향을 나타냈다. 편의보정 후 모의치는 모든 강우계급에 있어 관측치와 유사한 정도로 분석되었

Table 2 Annual precipitation and error of observed, simulated and bias corrected historical precipitation (1979 ~ 2005)

Data	Total precipitation (mm)	Error (mm)
Observed	1,295.1	-
Simulated	1,256.2	-38.9 (-3.00 %)
Bias corrected	1,297.3	+2.2 (+0.17 %)

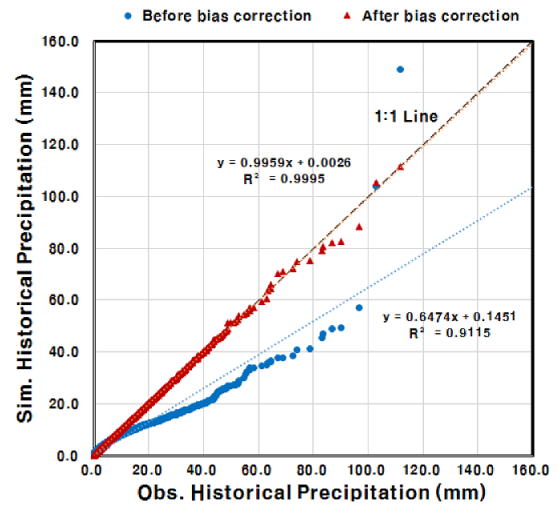


Fig. 3 Correlation between observed, simulated and bias corrected historical precipitation (1979 ~ 2005)

다. 결정계수 (R^2)는 편의보정 전 ($R^2 = 0.9115$)에 비하여 편의보정 후 ($R^2 = 0.9996$)에 보다 높게 산정되었으며, 이는 편의보정을 적용한 경우에 관측치의 경향성을 보다 정확하게 반영하는 것으로 나타났다.

나. 미래 강수량 전망

과거 27년 동안의 3시간 단위 강수량 편의보정 과정에서 산정한 매개변수를 90년 동안의 미래 기간(2011년 ~ 2100년)에 적용하여 RCP4.5 시나리오에 기반한 미래 강수량 자료의 편의를 보정하였다. 편의보정 결과, 미래 90년 동안의 연평균강수량은 편의보정 전 1,344.3 mm에서 편의보정 후 1,471.2 mm로 9.44 % 증가하였다. 미래 기간을 30년씩 총 3개의 기간(2011년 ~ 2040년, 2041년 ~ 2070년, 2071년 ~ 2100년)으로 나누어 분석한 결과, 연평균강수량은 2011년 ~ 2040년 동안에 편의보정 전 1,231.5 mm에서 편의보정 후 1,312.3 mm (6.56 % 증가), 2041년 ~ 2070년 동안에 편의보정 전 1,436.7 mm에서 편의보정 후 1,613.6 mm (12.32 % 증가), 2071년 ~ 2100년 동안에 편의보정 전 1,364.8 mm에서 편의보정 후 1,487.6 mm로 (9.00 % 증가) 나타나 미래 3개 기간에 편의보정에 따라 전반적으로 연평균강수량이 증가하는 것으로 분석되었다. Fig. 4는 미래 90년 동안의 연평균강수량을 편의보정 전후로 정리하여 나타낸 것이다.

과거 1개 기간(1981년 ~ 2010년)의 관측치와 미래 3개 기간(2011년 ~ 2040년, 2041년 ~ 2070년, 2071년 ~ 2100년)의 편의보정된 모의치에 대하여 분석한 결과, 연평균강수량은 1981년 ~ 2010년 동안에 706.4 mm ~ 1,857.3 mm, 2011년 ~

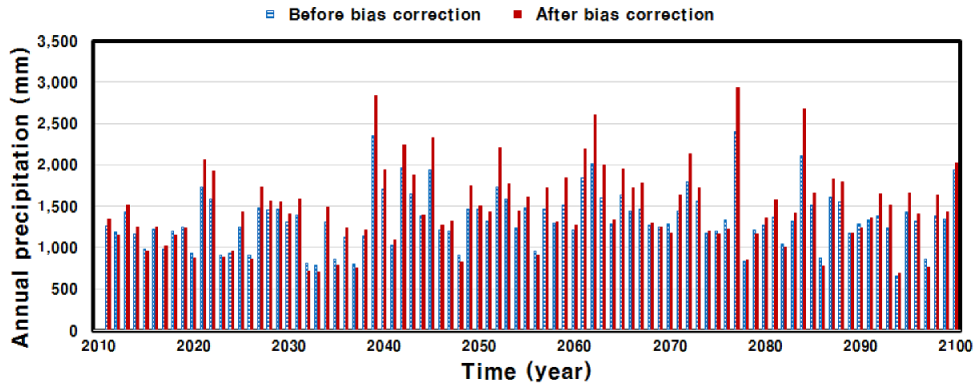


Fig. 4 Comparison between before and after bias correction of future precipitation data (2011~2100)

Table 3 Comparison between historical (1981~2010) and future (2011~2100) precipitation data

Precipitation data (RCP4.5)	Annual precipitation mean \pm standard deviation (mm)			
	1981~ 2010	2011~ 2040	2041~ 2070	2071~ 2100
After bias correction	1,293.7 \pm 275.4	1,312.3 (+1.4%) \pm 463.1	1,613.6 (+24.7%) \pm 426.1	1,487.6 (+15.0%) \pm 498.1

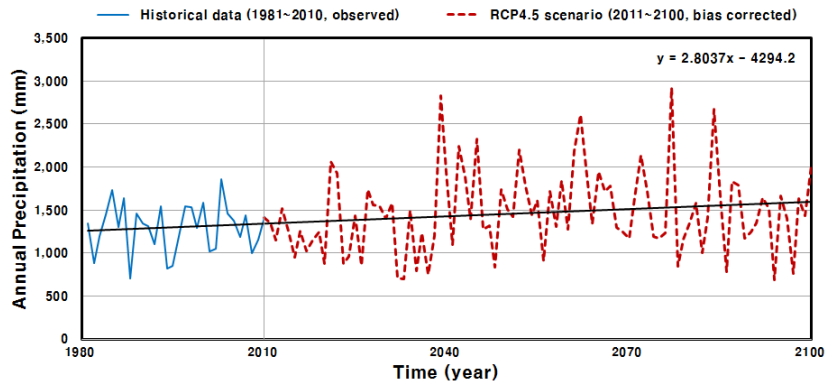


Fig. 5 Annual precipitation change of the study area (1981~2100)

2040년 동안에 697.3 mm ~ 2,829.0 mm, 2041년 ~ 2070년 동안에 830.2 mm ~ 2,604.8 mm, 2071년 ~ 2100년 동안에 689.5 mm ~ 2,927.9 mm의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 각 기간 동안의 연평균강수량 평균값은 1,293.7 mm, 1,312.3 mm, 1,613.6 mm, 1,487.6 mm로 나타났으며, 이는 과거 30년 (1981년 ~ 2010년)에 비하여 미래 3개 기간에서 각각 1.4 % (2011년 ~ 2040년), 24.7 % (2041년 ~ 2070년), 15.0 % (2071년 ~ 2100년) 증가한 것이다. 각 기간 동안의 연평균강수량 표준편차는 275.4 mm (1981년 ~ 2010년), 463.1 mm (2011년 ~ 2040년), 426.1 mm (2041년 ~ 2070년), 498.1 mm (2071년 ~ 2100년)로 나타나, 과거 기간에 비하여 미래 기간에 강수량의 변동폭이 크게 증가하는 것으로 분석되었다 (Table 3). Fig. 5는 RCP4.5 시나리오를 바탕으로 원평천 유역의 연강수량 변화 추이를 나타낸 것이다.

2. 빈도해석 결과

가. 확률분포형 매개변수의 변화 양상

본 연구에서는 GEV 확률분포형의 매개변수 추정을 위하여 L-모멘트법을 사용하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 각각 지속시간 6시간과 지속시간 24시간에서 GEV 분포의 위치 매개변수 및 규모 매개변수 추정 결과를 나타낸 것이다. 추정된 매개변수는 과거 1개 기간 (1981년 ~ 2010년)과 미래 3개 기간 (2011년 ~ 2040년, 2041년 ~ 2070년, 2071년 ~ 2100년)으로 나누어 도시하였으며, 비정상성을 고려한 매개변수의 경우 중앙값, 최댓값, 최솟값과 함께 5번째/10번째 백분위수 값을 나타내었다.

지속시간 6시간에서 위치 매개변수는 과거 기간에는 정상성을 고려한 위치 매개변수와 비정상성을 고려한 위치 매개

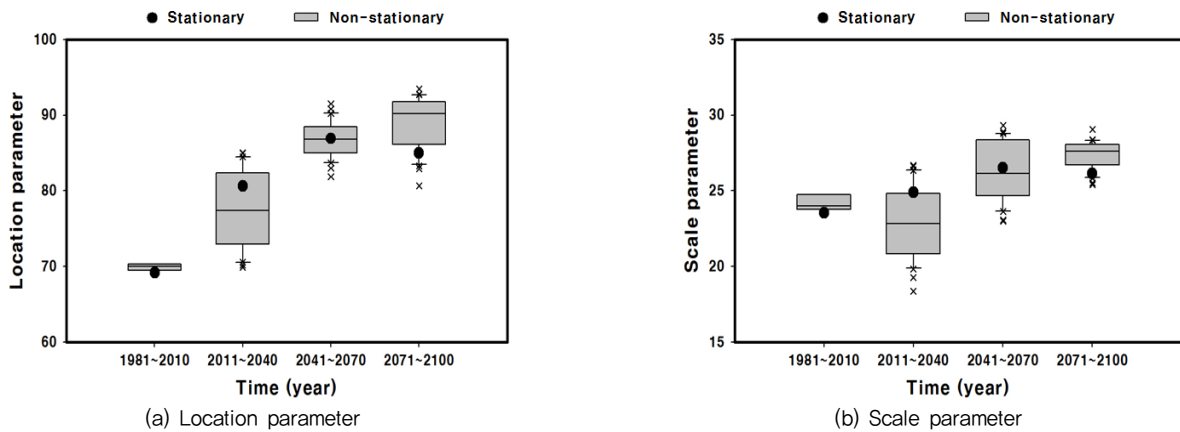


Fig. 6 GEV parameters for 6 hour duration

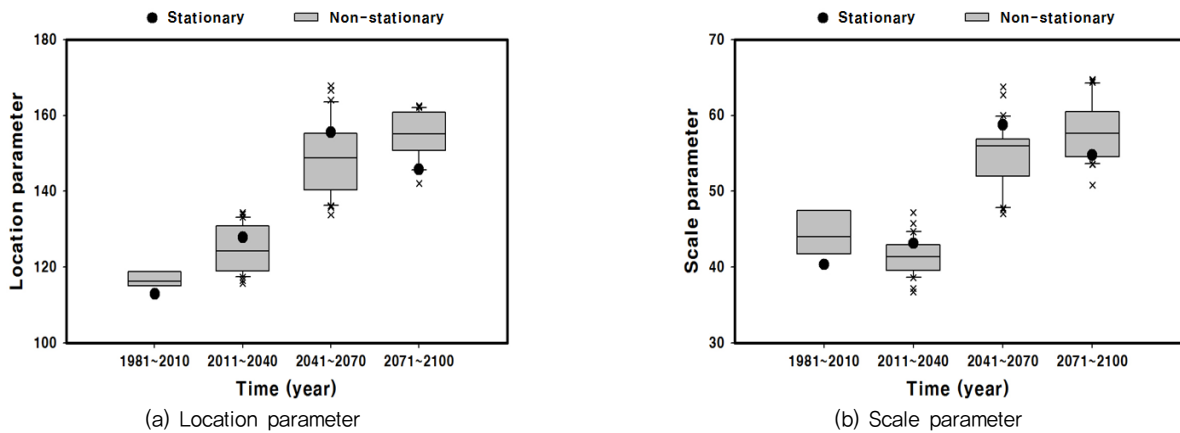


Fig. 7 GEV parameters for 24 hour duration

변수 간에 큰 차이가 나타나지 않았다. 미래 기간의 경우, 비정상성을 고려한 위치 매개변수와 규모 매개변수는 미래 기간으로 갈수록 증가하는 경향을 나타냈으며, 그 범위는 전반적으로 정상성을 고려한 매개변수 값을 포함하는 범위로 나타났다. 미래 기간별로, 2011년~2040년 동안에 비정상성을 고려한 매개변수 평균값은 정상성을 고려한 매개변수 값보다 작게 나타났으나, 2041년~2070년 동안에는 유사한 정도로 나타났고, 2071년~2100년 동안에는 정상성을 고려한 매개변수 값보다 큰 것으로 분석되었다. 비정상성을 고려한 매개변수의 최댓값은 모든 미래 기간에서 정상성을 고려한 매개변수 값보다 큰 것으로 분석되었다.

지속시간 24시간에서 위치 매개변수는 지속시간 6시간에서 추정된 위치 매개변수와 유사한 경향을 나타냈다. 규모 매개변수는 과거 기간에 비해 2011년~2040년 동안에 소폭 감소하였으나, 그 이후로는 미래 기간에 따라 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 위치 매개변수와 규모 매개변수의 범위는

전반적으로 정상성을 고려한 매개변수 값을 포함하는 것으로 나타났다. 미래 기간별로, 2011년~2040년 및 2041년~2070년 동안에 비정상성을 고려한 매개변수 평균값은 정상성을 고려한 매개변수 값보다 작게 나타났으나, 2071년~2100년 동안에는 정상성을 고려한 매개변수 값보다 큰 것으로 분석되었다. 비정상성을 고려한 매개변수의 최댓값은 모든 미래 기간에서 정상성을 고려한 매개변수 값보다 큰 것으로 분석되었다.

나. 확률강우량 산정 결과

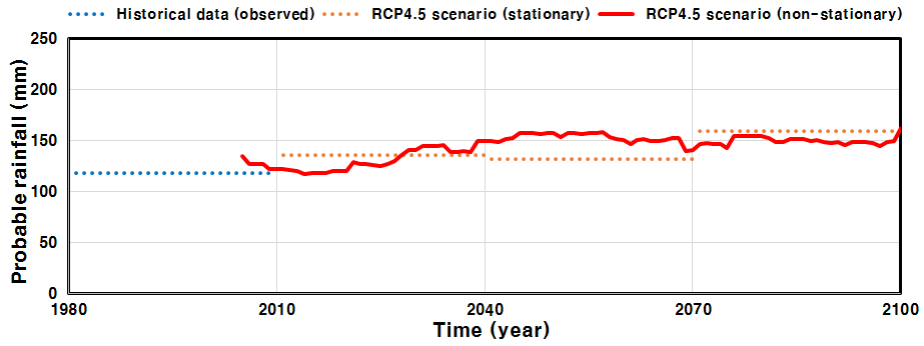
Table 4는 산정된 확률강우량의 범위와 평균값을 나타낸 것이다. 비정상성을 고려한 확률강우량의 범위는 전반적으로 정상성을 고려한 확률강우량 값을 포함하는 것으로 나타났다. 비정상성을 고려한 확률강우량의 평균값은 지속시간 3시간, 6시간, 9시간에서 2011년~2040년 기간과 2071년~2100년 기간에는 정상성 빈도해석 결과값보다 작게 산정되

Table 4 Probable rainfall for different durations (mm)

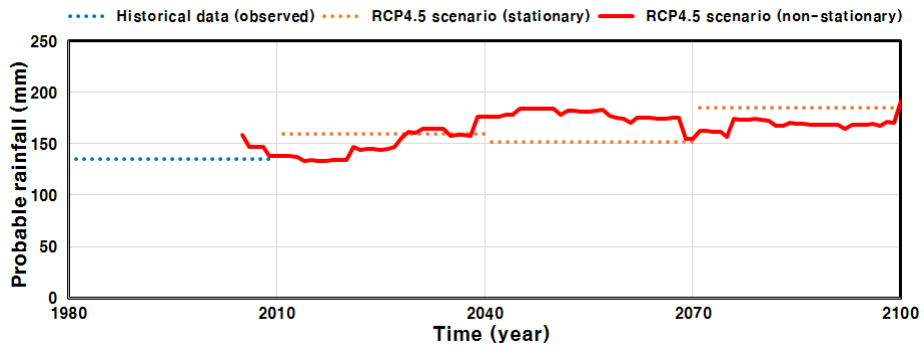
Duration (hour)	Data period	10-year frequency		20-year frequency	
		Stationary	Non-stationary	Stationary	Non-stationary
3	1981~2010	83.5	85.8~93.4 (88.4)	92.6	97.0~108.7 (100.9)
	2011~2040	87.7	82.9~94.2 (87.3)	98.6	94.3~106.3 (99.3)
	2041~2070	79.8	82.0~94.1 (89.8)	84.8	88.8~107.4 (101.7)
	2071~2100	91.4	83.6~98.4 (89.3)	101.5	89.4~111.8 (97.4)
6	1981~2010	118.8	122.1~135.2 (126.9)	135.5	138.4~158.7 (146.2)
	2011~2040	136.2	117.0~150.0 (131.4)	159.6	133.2~176.8 (149.7)
	2041~2070	131.6	139.9~158.2 (152.8)	152.2	154.9~184.3 (177.3)
	2071~2100	159.1	142.7~162.7 (149.9)	185.2	156.4~191.9 (169.2)
12	1981~2010	156.1	162.6~178.1 (169.4)	175.7	187.3~208.3 (197.4)
	2011~2040	183.6	160.9~201.7 (176.9)	209.2	186.2~230.6 (200.6)
	2041~2070	212.4	202.6~238.6 (223.1)	240.4	229.3~272.6 (256.5)
	2071~2100	226.6	195.6~229.4 (215.5)	255.8	230.2~266.4 (243.9)
24	1981~2010	188.7	196.6~210.2 (203.3)	205.8	217.8~232.1 (226.0)
	2011~2040	244.7	197.7~262.6 (219.5)	285.4	220.6~314.9 (250.9)
	2041~2070	295.7	262.2~332.1 (295.7)	345.1	312.7~395.5 (354.6)
	2071~2100	279.7	260.7~313.2 (288.3)	327.4	300.6~364.1 (332.4)
Duration (hour)	Data period	100-year frequency		200-year frequency	
		Stationary	Non-stationary	Stationary	Non-stationary
3	1981~2010	113.8	120.7~146.6 (130.3)	121.8	129.9~164.3 (143.4)
	2011~2040	131.3	119.3~143.9 (128.0)	150.7	128.4~163.0 (141.1)
	2041~2070	103.1	101.5~146.0 (129.2)	107.9	106.0~167.2 (141.3)
	2071~2100	131.0	97.7~141.9 (112.7)	145.1	100.1~154.7 (118.2)
6	1981~2010	162.7	173.0~217.2 (192.0)	178.2	187.2~244.7 (212.5)
	2011~2040	223.6	162.5~251.5 (193.2)	249.5	174.0~289.9 (212.8)
	2041~2070	200.2	186.0~255.3 (239.6)	213.2	198.1~289.8 (269.6)
	2071~2100	264.3	183.4~268.8 (212.8)	307.0	193.4~306.8 (231.4)
12	1981~2010	221.5	246.1~282.9 (267.2)	252.2	272.6~317.6 (300)
	2011~2040	246.1	222.6~305.7 (254.8)	277.9	232.1~340.8 (278.3)
	2041~2070	300.3	285.8~373.0 (335.9)	334.3	308.5~424.1 (371.6)
	2071~2100	334.4	290.7~401.3 (307.1)	403.0	308.8~475.0 (333.9)
24	1981~2010	243.9	258.5~281.5 (270.0)	259.7	273.3~301.7 (286.1)
	2011~2040	358.7	261.1~465.0 (325.2)	412.6	275.7~548.5 (358.8)
	2041~2070	487.1	445.0~561.6 (514.6)	552.0	511.2~655.9 (596.2)
	2071~2100	416.3	386.3~514.6 (435.4)	476.5	421.2~594.7 (480.7)

었으며, 나머지 2개 기간에 대해서는 크게 산정되는 것으로 분석되었다. 지속시간 24시간에서는 2011년~2040년 기간을 제외한 나머지 3개 기간에서 정상성 빈도해석 결과값보다 크게 산정되는 것으로 분석되었다. 최댓값은 모든 지속시간 과 재현기간에서 비정상성 빈도해석 결과값이 정상성 빈도해석 결과값보다 크게 산정되었다.

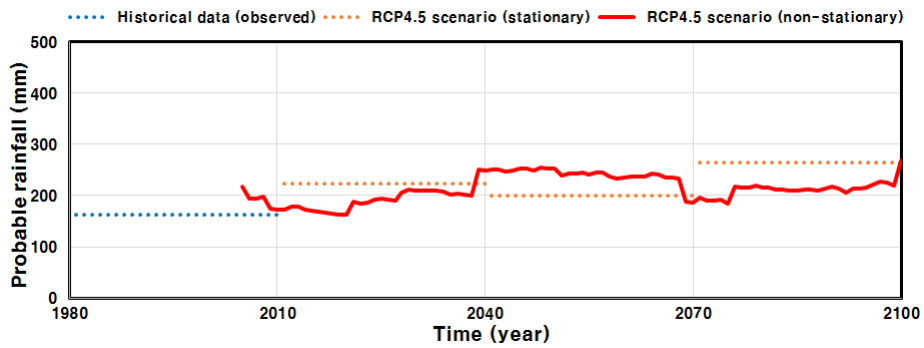
Fig. 8은 지속시간 6시간에서 확률강우량 산정 결과를 나타낸 것이다. 확률강우량은 모든 재현기간에서 과거 기간보다 미래 기간에 전반적으로 더 큰 값을 갖는 것으로 분석되었다. 정상성을 고려한 확률강우량의 경우, 모든 재현기간에서 2011년~2040년에 증가하고 2041년~2070년에 감소한 다음 2071년~2100년에 다시 증가하는 경향을 나타냈



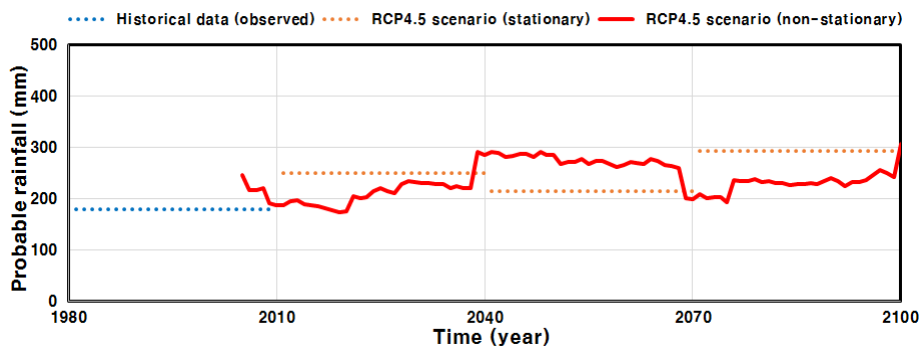
(a) 10-year frequency



(b) 20-year frequency

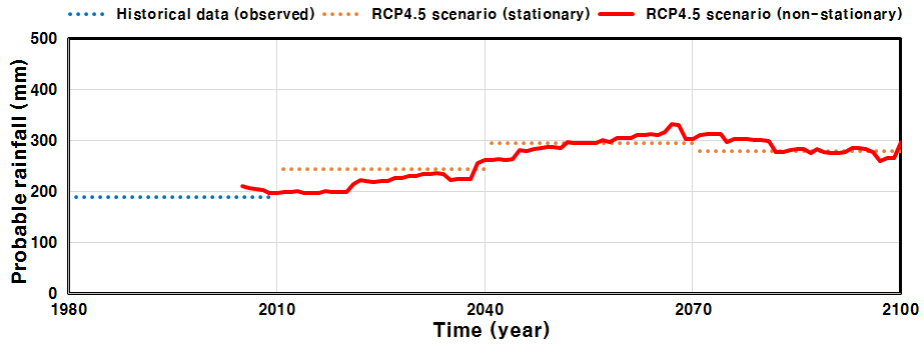


(c) 100-year frequency

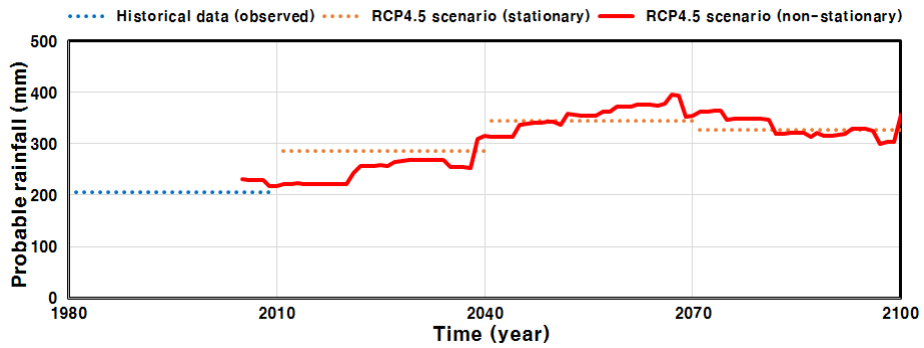


(d) 200-year frequency

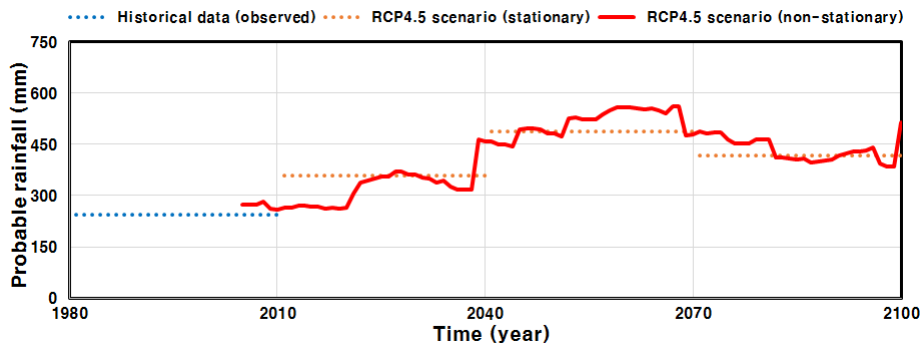
Fig. 8 Probable rainfall for 6 hour duration



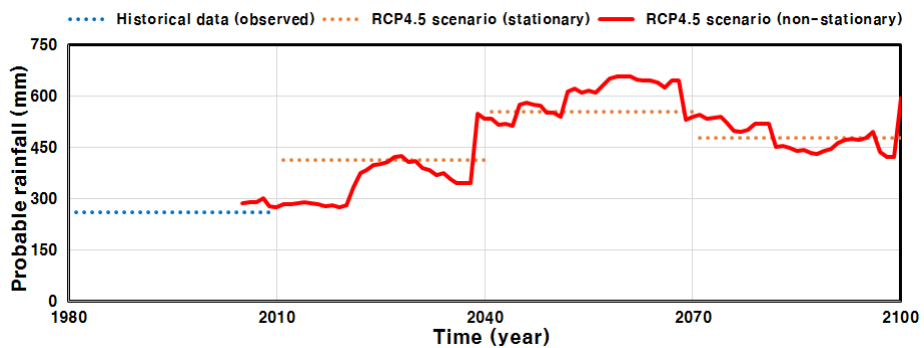
(a) 10-year frequency



(b) 20-year frequency



(c) 100-year frequency



(d) 200-year frequency

Fig. 9 Probable rainfall for 24 hour duration

다. 비정상성을 고려한 확률강우량의 경우, 모든 재현기간에서 과거 기간(2005년~2010년)부터 감소하다가 2020년을 기점으로 증가하여 2040년까지는 정상성 빈도해석 결과와 유사한 경향을 나타냈으나, 이후로는 다른 경향성을 나타냈다. 2041년부터 2068년까지는 유사한 값을 유지하다가 2069년과 2070년에 걸쳐 급격하게 감소한 다음 2100년까지 재현기간별로 상이한 경향성(10년 빈도: 감소, 20년 빈도: 유지, 100년 및 200년 빈도: 증가)을 나타내는 것으로 분석되었다.

Fig. 9는 지속시간 24시간에서 확률강우량 산정 결과를 나타낸 것이다. 지속시간 6시간에서와 마찬가지로, 확률강우량은 모든 재현기간에서 과거 기간보다 미래 기간에 전반적으로 더 큰 값을 갖는 것으로 분석되었다. 정상성을 고려한 확률강우량의 경우, 모든 재현기간에서 2011년~2070년까지 증가한 다음 2071년~2100년에는 감소하는 경향을 나타냈다. 비정상성 빈도해석 결과는 정상성 빈도해석 결과와 유사한 경향성을 나타냈다. 비정상성을 고려한 확률강우량은 10년 빈도와 20년 빈도에는 과거 기간(2005년~2010년)부터 서서히 증가하다가 2068년을 기점으로 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 100년 빈도와 200년 빈도 확률강우량은 과거 기간부터 증가하다가 2028년부터 2037년까지 감소한 다음 2068년까지 다시 증가하다가 2068년을 기점으로 점차 감소하는 경향을 나타냈다.

3. 설계홍수량 산정 결과

Table 5는 10년 빈도 첨두유출량(Peak runoff)을 지속시간 3시간, 6시간, 12시간, 24시간에 대하여 산정한 결과를 나타낸 것이다. 첨두유출량은 비정상성을 고려한 경우에 정상성을 고려한 경우보다 전반적으로 크게 나타났다. 지속시간 3시간에서 비정상성을 고려하여 산정된 첨두유출량은 정상성 첨두홍수량에 비하여 기간별(1981년~2010년, 2011년~2040년, 2041년~2070년, 2071년~2100년)로 각각 173.4 m³/s (11.8%), 115.1 m³/s (7.5%), 250.3 m³/s (17.9%), 123.9 m³/s (7.7%) 증가하였다. 지속시간 6시간에는 기간별로 144.7 m³/s (13.9%), 121.6 m³/s (10.2%), 233.9 m³/s (20.3%), 32.0 m³/s (2.3%) 증가하여 4개 지속시간 중 가장 큰 증가폭을 보였다. 지속시간 12시간에는 96.4 m³/s (14.1%), 79.2 m³/s (9.8%), 114.9 m³/s (12.3%), 12.0 m³/s (1.2%) 증가하고, 24시간에는 47.1 m³/s (11.4%), 39.4 m³/s (7.3%), 79.9 m³/s (12.3%), 73.3 m³/s (11.9%) 증가하는 것으로 분석되었다.

Table 6은 20년 빈도 첨두유출량을 산정한 결과를 나타낸

것이다. 첨두유출량은 비정상성을 고려한 경우에 정상성을 고려한 경우보다 전반적으로 크게 나타났으며, 증가폭은 10년 빈도 첨두유출량에 비해 더 크게 산정되었다. 지속시간 3시간에서 비정상성을 고려하여 산정된 첨두유출량은 정상성 첨두유출량에 비하여 기간별로 282.1 m³/s (17.4%), 134.6 m³/s (7.8%), 396.8 m³/s (26.7%), 180.3 m³/s (10.1%) 증가하여 4개 지속시간 중 가장 큰 증가폭을 보였고, 지속시간 6시간에는 기간별로 202.8 m³/s (17.1%), 150.1 m³/s (10.7%), 281.5 m³/s (21.1%), 59.3 m³/s (3.6%) 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 12시간에는 143.1 m³/s (18.6%), 93.6 m³/s (10.2%), 141.1 m³/s (13.4%), 46.7 m³/s (4.2%) 증가하고, 지속시간 24시간에는 57.8 m³/s (12.8%), 64.8 m³/s (10.3%), 110.5 m³/s (14.6%), 80.4 m³/s (11.2%) 증가하는 것으로 분석되었다.

Table 7은 100년 빈도 첨두유출량을 산정한 결과를 나타낸 것으로, 첨두유출량은 비정상성을 고려한 경우에 정상성을 고려한 경우보다 전반적으로 크게 나타났다. 지속시간 3시간에서 비정상성을 고려하여 산정된 첨두유출량은 정상성 첨두유출량에 비하여 기간별로 575.9 m³/s (28.8%), 221.9 m³/s (9.6%), 752.2 m³/s (41.6%), 191.0 m³/s (8.3%) 증가하였고, 지속시간 6시간에는 478.2 m³/s (33.5%), 245.6 m³/s (12.5%), 483.7 m³/s (27.5%), 39.1 m³/s (1.7%) 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 12시간에는 269.2 m³/s (27.7%), 261.5 m³/s (24.2%), 319.1 m³/s (24.2%), 293.6 m³/s (20.0%) 증가하여 4개 지속시간 중 가장 큰 증가폭을 보였고, 지속시간 24시간에는 82.5 m³/s (15.4%), 233.3 m³/s (29.7%), 163.3 m³/s (15.3%), 215.7 m³/s (23.6%) 증가하는 것으로 분석되었다.

Table 8은 200년 빈도 첨두유출량을 산정한 결과를 나타낸 것으로, 첨두유출량은 비정상성을 고려한 경우에 정상성을 고려한 경우보다 전반적으로 크게 나타났다. 첨두유출량 증가폭은 10년, 20년, 100년 빈도 첨두유출량 경우에 비해 더 크게 산정되었다. 지속시간 3시간에서 비정상성을 고려하여 산정된 첨두유출량은 정상성 첨두유출량에 비하여 기간별로 747.2 m³/s (35.0%), 216.1 m³/s (8.2%), 1,039.9 m³/s (54.9%), 80.8 m³/s (3.1%) 증가하여 4개 지속시간 중 가장 큰 증가폭을 보였고, 지속시간 6시간에는 583.7 m³/s (37.3%), 355.1 m³/s (16.2%), 671.8 m³/s (35.9%), 130.9 m³/s (5.1%) 증가하는 것으로 분석되었다. 지속시간 12시간에는 286.6 m³/s (25.9%), 275.8 m³/s (22.6%), 394.1 m³/s (26.9%), 315.5 m³/s (17.8%) 증가하고, 지속시간 24시간에는 92.2 m³/s (16.2%), 298.0 m³/s (32.9%), 227.9 m³/s (18.8%), 259.2 m³/s (24.8%) 증가하는 것으로 분석되었다.

Table 5 Peak runoff of 10-year frequency for different durations (m³/s)

Data period		3hr	6hr	12hr	24hr
1981~2010	Stationary	1,465.3	1,041.9	684.8	413.9
	Non-stationary	1,638.6	1,186.6	781.2	461.0
2011~2040	Stationary	1,538.1	1,194.7	805.6	536.6
	Non-stationary	1,653.2	1,316.2	884.8	576.0
2041~2070	Stationary	1,400.3	1,154.3	931.6	648.5
	Non-stationary	1,650.7	1,388.2	1,046.5	728.4
2071~2100	Stationary	1,603.5	1,395.6	994.2	613.5
	Non-stationary	1,727.4	1,427.6	1,006.2	686.9

Table 6 Peak runoff of 20-year frequency for different durations (m³/s)

Data period		3hr	6hr	12hr	24hr
1981~2010	Stationary	1,624.8	1,189.2	770.7	451.3
	Non-stationary	1,906.8	1,392.0	913.8	509.2
2011~2040	Stationary	1,730.4	1,400.6	917.8	626.0
	Non-stationary	1,864.9	1,550.8	1,011.4	690.8
2041~2070	Stationary	1,488.1	1,335.4	1,054.7	756.9
	Non-stationary	1,884.9	1,616.9	1,195.8	867.4
2071~2100	Stationary	1,781.6	1,624.4	1,121.9	718.1
	Non-stationary	1,961.9	1,683.7	1,168.6	798.5

Table 7 Peak runoff of 100-year frequency for different durations (m³/s)

Data period		3hr	6hr	12hr	24hr
1981~2010	Stationary	1,996.9	1,427.4	971.8	534.9
	Non-stationary	2,572.8	1,905.6	1,241.0	617.4
2011~2040	Stationary	2,303.5	1,961.3	1,079.5	786.7
	Non-stationary	2,525.4	2,206.9	1,341.1	1,019.9
2041~2070	Stationary	1,809.6	1,756.1	1,317.1	1,068.5
	Non-stationary	2,561.8	2,239.8	1,636.3	1,231.7
2071~2100	Stationary	2,299.4	2,319.1	1,466.9	913.0
	Non-stationary	2,490.4	2,358.2	1,760.5	1,128.7

Table 8 Peak runoff of 200-year frequency for different durations (m³/s)

Data period		3hr	6hr	12hr	24hr
1981~2010	Stationary	2,136.6	1,563.4	1,106.4	569.6
	Non-stationary	2,883.8	2,147.1	1,393.1	661.7
2011~2040	Stationary	2,731.5	2,188.7	1,219.1	905.0
	Non-stationary	2,859.8	2,543.8	1,494.9	1,203.0
2041~2070	Stationary	1,893.3	1,870.9	1,466.5	1,210.8
	Non-stationary	2,933.2	2,542.7	1,860.6	1,438.7
2071~2100	Stationary	2,634.2	2,560.7	1,768.0	1,045.1
	Non-stationary	2,715.0	2,691.5	2,083.6	1,304.3

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 RCP4.5 시나리오에 따른 원평천 유역의 비정상성 빈도해석을 수행하고 미래 설계홍수량을 산정하였다. 과거 및 미래 강수량 자료는 비모수적 방법으로 분위사상법을 적용하여 편의를 보정하였다. 과거 강수량 자료 및 편의보정을 수행한 미래 강수량 자료를 이용하여 비정상성을 고려한 GEV 분포의 확률분포형 매개변수를 추정하고, 확률강우량은 비정상성 빈도해석을 통해 산정하였다. 설계홍수량은 빈도해석 결과를 합리식에 적용하여 산정하였다.

강수량 자료의 편의보정은 비모수적 방법으로 분위사상법을 적용하여 수행하였다. 편의보정 전 과거 강수량 모의치 자료는 강우강도가 작은 경우 (10 mm/3hr 미만)에는 과다모의되고, 강우강도가 큰 경우 (10 mm/3hr 이상)에는 과소모의되는 경향을 갖는 것으로 분석되었다. 과거 강수량 모의치 자료 (1979년 ~ 2005년)는 관측치 자료의 27년 총 강수량과의 차이가 편의보정 전에 3.01%이었던 반면, 편의보정 후에 0.17%로 감소하는 것으로 나타나는 것으로 분석되었다. 비모수적 방법으로 분위사상법을 적용하여 편의보정을 실시하는 경우, 기간에 따라 과소 혹은 과다 모의되는 강수량 자료를 관측치의 경향성을 보다 정확하게 반영할 수 있는 것으로 분석되었다.

미래 강수량은 RCP4.5 시나리오 자료를 앞선 방법을 통해 편의보정하여 산정하였다. 연평균강수량의 평균값은 미래 기간으로 갈수록 전반적으로 증가 추세를 나타내며, 과거 (1981년 ~ 2010년)에 비하여 1.4% (2011년 ~ 2040년), 24.7% (2041년 ~ 2070년), 15.0% (2071년 ~ 2100년) 증가할 것으로 분석되었다. 각 기간동안 연평균강수량의 표준편차는 과거 275.4 mm에서 미래 기간별로 187.7 mm (38.2%), 150.7 mm (32.5%), 222.7 mm (52.3%) 증가하는 것으로 나타나, 미래 기간에 강수량의 변동폭이 크게 증가하는 것으로 분석되었다. 한편, 미래 기간 강수량의 보다 신뢰성 있는 전망을 위해 (Moon et al., 2013)은 비정상성 분위사상법 (Non-Stationary Quantile Mapping)을 제안한 바 있으며, 비정상성을 갖는 장기시계열 자료의 통계분포 모수에 추세를 반영하고 선형 회귀식을 통해 자료의 경향성을 보다 잘 반영할 수 있는 비정상성 분위사상법에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

확률강우량은 확률분포형으로 GEV 분포형, 매개변수 추정방법으로 L-모멘트법을 사용하여 산정하였다. 정상성 빈도해석과 비정상성 빈도해석을 통해 확률분포형 매개변수의 변화를 살펴본 결과, 비정상성을 고려한 매개변수가 평균값은 전반적으로 정상성을 고려한 경우와 유사하게 나타나나 최댓값은 보다 큰 값을 갖는 것으로 분석되었다. 정상성을 고

려한 경우에 비해 비정상성을 고려한 경우에 위치 매개변수 및 규모 매개변수의 최댓값의 차이는 미래 기간으로 갈수록 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 미래 기간으로 갈수록 극한강수의 평균과 변동성이 증가하는 것을 의미하므로 이러한 경향을 반영할 수 있는 비정상성 빈도해석의 필요성이 강조된다. 미래 확률강우량 또한 비정상성 빈도해석 결과값이 전반적으로 정상성 빈도해석 결과값보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났으며, 최댓값은 모든 지속시간 (3시간, 6시간, 12시간, 24시간)과 재현기간 (10년, 20년, 100년, 200년)에서 비정상성 빈도해석 결과값이 정상성 빈도해석 결과값보다 큰 것으로 나타났다. 지속시간별로 최소 1.2% (12시간, 10년)에서 최대 54.9% (3시간, 200년)까지 차이를 갖는 것으로 분석되었다.

원평천 유역의 설계홍수량은 비정상성을 고려한 경우에 정상성을 고려한 경우보다 전반적으로 큰 값을 나타내며, 정상성을 고려한 침투유출량과 비정상성을 고려한 침투유출량의 차이는 미래 기간으로 갈수록 커지는 것으로 분석되었다. 본 연구의 결과, 비정상성을 고려한 결과는 정상성을 고려한 경우보다 전반적으로 큰 값을 나타내는 것으로 분석됨에 따라 비정상성 빈도해석을 통해 기후변화에 따른 영향을 반영하여 수공구조물의 설계 기준을 재고하는 데 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ011686 032015)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

1. Climate Change Information Center (CCIC), 2013. Abnormal climate report (in Korean).
2. Hashino, T., A. A. Bradley, and S. S. Schwartz, 2007. Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11: 939-950.
3. He, Y., B. Bardossy and J. Brommundt, 2006. Non-stationary flood frequency analysis in southern Germany. The 7th International Conference on Hydro-science and Engineering (ICHE). Philadelphia, USA.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013. Summary for policymakers. In: *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the*

- fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. Summary for policymakers. In: *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New your, NY, USA.
 6. Kim, B. S. and S. R. Ha, 2013. The impact assessment of climate change on design flood in Mihocheon basin based on the Representative Concentration Pathway climate change scenario. *Journal of Korean Wetlands Society* 15(1): 105-114 (in Korean).
 7. Kim, B. S., J. K. Lee, H. S. Kim, and J. W. Lee, 2011. Nonstationary frequency analysis with climate variability using conditional Generalized Extreme Value distribution. *Journal of Korean Wetlands Society* 13(3): 499-514 (in Korean).
 8. Kim, G. and G. Lee, 2012. Application of a non-stationary frequency analysis method for estimating probable precipitation in Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(5): 141-153 (in Korean).
 9. Kwon, H. H., B. J. So, P. Y. Yoon, T. W. Kim, and S. H. Hwang, 2011. A comparison of nonstationary frequency analysis using successive average and moving average method. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 11(6): 269-280 (in Korean).
 10. Lee, K. S., J. H. Oh, K. Park, and J. H. Sung, 2013. Estimation of design discharge considering nonstationarity for river restoration in the Mokgamcheon. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 33(4): 1361-1375 (in Korean).
 11. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2009. National water ensure security measures to climate change: the second year, research report (in Korean).
 12. Moon S., J. Kim, and B. Kang, 2013. Bias correction for GCM long-term prediction using nonstationary quantile mapping. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(8): 833-842 (in Korean).
 13. National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2012. Climate change scenarios corresponding to IPCC assessment report 5th in 2012 (in Korean).
 14. Park, J., M. S. Kang, and I. Song, 2012. Bias correction of RCP-based future extreme precipitation using a quantile mapping method: for 20-weather stations of South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(6): 133-142 (in Korean).
 15. Ryu, J. H., M. S. Kang, I. Song, J. Park, J. H. Song, S. M. Jun, K. Kim, 2015. Estimation of design flood for the Gyeryong Reservoir watershed based on RCP Scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(1): 47-57 (in Korean).
 16. Schwab, G. O. and R. K. Frevert, 1985. Elementary soil and water engineering 3rd edition. John Wiley and Sons Inc., NY, USA.
 17. Shin, H. J., H. Ahn, and J. Heo, 2014. A study on the changes of return period considering nonstationarity of rainfall data. *Journal of Korea Water Resources Association* 47(5): 447-457 (in Korean).
 18. Shin, J. Y., Y. J. Park, and T. Kim, 2013. Estimation of future design rainfalls in administrative districts using nonstationary GEV model. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 13(3): 147-156 (in Korean).
 19. Strupczewski, W. G., V. P. Singh, and W. Flench, 2001. Non-stationary approach to at-site flood frequency modeling I. Maximum Likelihood Estimation. *Journal of Hydrology* 248: 123-142.
 20. Sung, J. H., B. S. Kim, H. Kang, and C. Cho, 2012. Non-stationary frequency analysis for extreme precipitation based on Representative Concentration Pathways (RCP) climate change scenarios. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 12(2): 231-244 (in Korean).