



Bootstrap 기법을 이용한 용당 저수지 유역의 미래 설계홍수량 불확실성 평가

Uncertainty Analysis of Future Design Floods for the Yongdang Reservoir Watershed using Bootstrap Technique

이도길* · 강문성**,[†] · 박지훈* · 류정훈*

Lee, Do Gil · Kang, Moon Seong · Park, Jihoon · Ryu, Jeong Hoon

Abstract

To estimate design floods for hydraulic structures, statistical methods has been used in the analysis of rainfall data. However, due to the lack of rainfall data in some regions, it is difficult to apply the statistical methods for estimation of design rainfall. In addition, increased uncertainty of design rainfall arising from the limited rainfall data can become an important factor for determining the design floods. The main objective of this study was to assess the uncertainty of the future design floods under RCP (representative concentration pathways) scenarios using a bootstrap technique. The technique was used in this study to quantify the uncertainty in the estimation of the future design floods. The Yongdang watershed in South Korea, 2,873 ha in size, was selected as the study area. The study results showed that the standard errors of the basin of Yongdang reservoir were calculated as 2.0~6.9 % of probable rainfall. The standard errors of RCP4.5 scenario were higher than the standard errors of RCP8.5 scenario. As the results of estimation of design flood, the ranges of peak flows considered uncertainty were 2.3~7.1 %, and were different each duration and scenario. This study might be expected to be used as one of guidelines to consider when designing hydraulic structures.

Keywords: Agricultural watershed; RCP; design flood; uncertainty analysis; Bootstrap technique

1. 서 론

최근 인간 활동에 의해 대기 중 온실 가스의 농도가 급격히 증가하였다. 온실 가스 농도의 증가는 지구 에너지 수지에 불균형을 초래하였고 기후변화를 야기하였다. 기후변화는 단순한 기온 상승뿐만 아니라 홍수 등의 극한 수문사상의 강도와 빈도에도 영향을 미치며 강우량의 변화, 강우 패턴의 변화, 해수면 상승 등을 야기할 것으로 예상된다(IPCC, 2013). 우리나라의 경우 지난 20세기(1912~2010년)에 기온이 0.18°C/decade, 강수량이 21 mm/decade의 비율로 상승하였다(NIMR, 2012). 이러한 급격한 기후변화로 인해 발생 빈도가 증가한 태풍·홍수로 인해 많은 피해가 일어나고 있다. 일례로 미국에서는 2005년 허리케인 카트리나로 인해 뉴올리언스의 80 % 이상이

물에 잠기고 2만 명 이상이 실종되는 등 엄청난 피해를 입었으며, 우리나라의 경우에도 루사, 매미 등의 이전보다 더 강하고 빈번한 태풍과 집중호우로 인해 극심한 홍수피해가 발생하고 있다. 이상 강우 현상으로 인해 실무에서 적용되고 있는 방법(Jeong and Yoon, 2007)에 의한 계획강우량의 적용의 실효성에 있어 의문이 제기되고 있으며, 이상 강우 현상과 확률강우량에 대한 연구가 다방면으로 진행되어 왔다.

이상 강우 현상에 대한 연구는 오랜 기간 동안 진행되어왔다. Iwashima and Yamamoto (1993)는 일본에 기록된 전기간의 강우 극대치를 이용하여 많은 관측소에서 일강우량의 최대치가 최근에 집중됨을 확인함으로써 집중호우량과 호우빈도의 증가를 규명하였으며, Karl and Knight (1998)는 20세기의 미국에서 집중호우가 증가한 원인을 분석한 바 있다. 연구 결과에 따르면 강수량 증가량의 절반 이상이 상위 10%의 강우 사상에 영향을 미치므로 강우강도가 더 강한 집중호우가 발생하였다. Jo and Jeon (2012)은 확률강우량보다 큰 호우사상에 대해 호우 규모나 발생 횟수 등의 특성과 발생 주기성, 연 변화 추세를 분석하였다. 연구 결과 초과호우사상의 발생도수가 재현기간을 크게 넘어서며, 초과호우사상의 평균 강우량 역시 증가하는 추세를 확인하였다. 따라서 현재 확률강우량을 그대로 이용하여 설계홍수량을 산정하는 것은

* 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
[†] Corresponding author
Tel.: +82-2-880-4582 Fax: +82-2-873-2087
E-mail: mskang@snu.ac.kr

Received: January 25, 2016

Revised: March 29, 2016

Accepted: March 29, 2016

홍수를 충분히 방지할 수 없다고 밝혀졌다. Ryu et al. (2015)은 기존에 산정한 설계홍수량에 비해 더 큰 재현기간에 해당하는 강우의 발생 빈도가 증가하여 강수량 증가 경향을 고려한 수공구조물의 재검토가 필요한 실정에서 과거뿐만 아니라 미래의 설계홍수량에 대한 산정을 통한 추세 분석에 대한 필요성을 제기하였다.

기후변화 및 강수의 불확실성에 대한 분석 및 수치화 역시 꾸준히 진행되어 왔다. Wagener et al. (2003)은 동적 분석을 통해 강우-유출 모델링의 불확실성을 감소시키는 연구를 수행한 바 있다. Yoon et al. (2000)은 HEC-FDA (Hydrologic Engineering Center-Flood Damage Analysis)를 이용하여 불확실성을 고려한 홍수방어계획에 필요한 요소를 산정하고 홍수방어계획을 수립하고 이를 평가하였다. Lee et al. (2010)은 안양천 유역에서 돌발홍수에 대한 불확실성을 고려하여 신뢰구간과 신뢰한계를 추정한 바 있다. 돌발홍수기준은 강우-유출 모형의 채택에 따라 달라지며, 매개변수의 특성 및 개수, 강우사상의 특성에 영향을 받는 것으로 나타났다. Seo (2011)는 퍼지기법, 부트스트랩(Bootstrap) 기법, Bayesian MCMC, Gaussian 랜덤필드 모의를 통해 강우 및 매개변수의 불확실성을 정량화하고 확률강우량을 추정한 바 있다. Kim et al. (2014)에 의해 베이지안 가중평균법을 이용한 기후변화의 불확실성의 수치화가 이루어졌다. 연구 결과 강수량은 증가하지만 그 증가의 방향성이 뚜렷하지 않으며, 기온에 비해 상대적으로 증가의 정도가 미미하게 나타난 바 있다.

기존의 설계홍수량 산정은 30년의 연최대강수량 자료를 바탕으로 산정된 확률강우량으로 계산되기 때문에 강우의 변동성을 잘 반영하지 못하는 단점이 있다. 또한 강우의 변동성을 고려한 설계홍수량의 불확실성에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 설계홍수량의 불확실성을 산정하기 위해서 부트스트랩 기법을 이용하였다. Efron (1979)이 도입한 부트스트랩 기법은 리샘플링 기법 중 하나로 적은 샘플로부터 예측한 통계적 매개변수의 정확성과 불확실성 정도를 평가할 수 있는 방법이다. 부트스트랩 기법은 하나의 제한된 데이터 집단만을 이용해서도 강우의 변동성을 고려한 설계홍수량의 불확실성 산정 및 평가가 가능하다.

따라서, 본 연구의 목적은 대상지구를 선정하여 과거 강수량 자료 및 미래 강수량 자료를 구축하며, 부트스트랩 기법을 활용하여 미래 확률 강수량을 산정하고, 수문모형을 이용하여 설계홍수량을 추정하여 불확실성을 평가하는 데 있다.

II. 재료 및 방법

본 연구의 순서도는 Fig. 1과 같다. 과거 강수량 자료는 기

상청에서 제공하는 강수량 자료를 수집하였고 미래 강수량 자료는 RCP4.5, 8.5 시나리오를 이용하여 구축된 자료를 수집하였다. 수집된 과거 강수량 자료와 미래 강수량 자료를 이용하여 부트스트랩 기법을 이용하여 부트스트랩 표본을 생성하고 표본들의 확률 강우량을 계산하였다. 계산된 값을 HEC-HMS의 SCS 단위도법을 적용하여 설계홍수량을 산정하고 불확실성을 평가하였다.

1. 대상 유역

본 연구의 대상지구는 한강 유역의 용당 저수지로 선정하였다. 용당 저수지는 충청북도 충주시 신니면 문송리에 위치한 농업용 저수지이다. 유역면적은 28.73 km², 유효저수량은 683.2만 m³이다. 연구대상지인 용당 저수지 유역의 유역특성 인자는 한국농어촌공사에서 제시한 값을 이용하였다 (KRC, 2010). 용당 저수지 유역의 지배관측소는 충주 관측소이다. CNIII의 값은 86으로 산정되었으며, 유역특성 인자는 Table 1에 나타내었다.

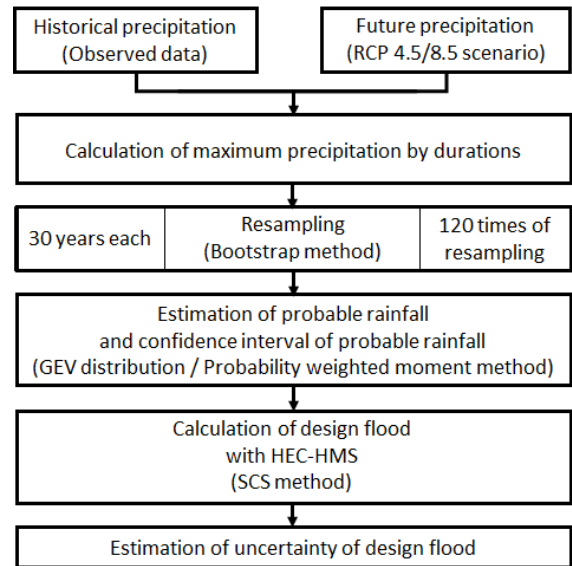


Fig. 1 Flow chart of this study

Table 1 Basin characteristics of Yongdang reservoir (KRC, 2010)

Basin area (ha)	2,873
Effective storage capacity (10 ³ m ³)	6,832.06
Watershed length (km)	6.42
Stream gradient (%)	1.9
Time of concentration (hr)	1.22
Impervious (%)	2.77

2. 강수량 자료

가. 과거 강수량 자료

과거 강수량 자료는 대상 지역과 가장 인접한 관측소인 수원 관측소의 강수량 자료를 이용하였다. 수원 관측소의 1시간 단위 강수량 자료를 기상청 웹사이트에서 수집하였으며 1981~2014년 자료를 이용하였다. 이 중 1981년부터 2010년까지의 기간을 과거 기간으로 설정하였다.

나. 미래 강수량 자료

본 연구에서는 RCP 시나리오를 기반으로 생성된 미래 강수량 자료를 이용하였다. 국립기상연구소(National Institute of Meteorological Research, NIMR)에서는 지역기후모델 HadGEM3-RA를 이용하여 RCP에 따른 한반도 미래의 기후 변화 시나리오를 생성하였다. 전지구 대기-해양 결합모델 HadGEM2-AO를 이용해 생성한 전지구 기후변화 시나리오 자료가 측면경계자료로서 사용되었다. 위와 같은 방법으로 생성된 한반도 기후변화 시나리오는 12.5 km의 해상도를 가진다(NIMR, 2012). 미래 강수량 자료는 2006년부터 2100년까지의 3시간, 6시간, 일 단위의 자료가 구축되어 있다. 이번 연구에서는 단기유출에 관한 분석을 하기 위해 3시간 단위의 미래 강수량 자료가 이용되었다. 기상청으로부터 수집한 2011년부터 2014년까지의 과거 기상 데이터와 2015년부터 2040년까지의 미래 강수량 데이터를 합하여 만든 2011년부터 2040년까지의 강수량 데이터를 미래 1 기간(2025s), 2041년부터 2070년까지의 미래 강수량 데이터를 미래 2 기간(2055s), 2071년부터 2100년까지의 미래 강수량 데이터를 미래 3 기간(2085s)로 설정하였다.

다. 편의보정

기후변화모형으로부터 모의한 값은 실제 관측치와 차이가 있기 때문에 신뢰성 높은 결과를 얻기 위해서는 모의치와 관측치의 편의보정이 필수적이다(Park et al., 2012). Park et al. (2012)과 Ryu et al. (2015)은 누적확률분포형으로 GEV 분포를 적용시킨 분위사상법(Quantile Mapping)을 이용하여 모의 강수량 자료를 보정한 바 있다. 본 연구에서는 같은 방법을 적용하여 1981년부터 2014년까지의 관측자료와 모의자료 간의 편의보정을 실시하였다. Fig. 2는 분위사상법을 이용하여 편의보정을 한 결과를 나타낸 그림이다. 회색 막대는 오차 막대로 표준 오차의 값을 나타낸다. 모의자료의 표준오차는 상대적으로 작는데 비해 편의보정한 값의 표준오차는 관측자료의 표준오차와 비슷하게 큰 값을 나타낸다. 이는 편의보정한 값이 실제 강우의 변동성을 반영하는 것이라 사료된다. 위의 방법을 통해 얻은 매개변수를 2015년부터 2100년까지

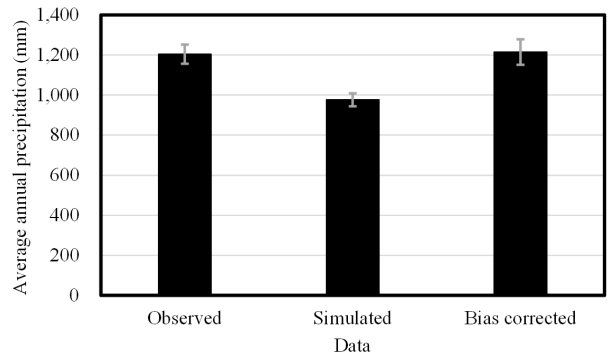


Fig. 2 The result of bias correction (1981~2014)

지의 모의자료에 적용하여 편의보정을 시행하였다.

3. Bootstrap 기법

부트스트랩 기법은 표본자료를 리샘플링하여 원하는 통계량을 추론하는 비모수 기반의 통계 기법이다(Efron, 1993). 전통 부트스트랩 방법은 원래 독립적이고 동일한 분포를 따르는 자료에 대해서 사용되도록 개발되었다. 이후, 자료가 독립적인 분포를 따라야 한다는 제한에서 벗어나 종속적인 분포를 가진 자료에 대해서도 적용할 수 있는 여러 가지 부트스트랩 기법들이 제안되었다. 종속적인 자료에 대해 적용할 수 있는 대표적인 부트스트랩 기법으로는 이동 블록 부트스트랩(Moving Block Bootstrap), 임계값부트스트랩(Threshold Bootstrap) 등이 있다. 부트스트랩 기법의 장점은 이 방법이 비모수 기반의 리샘플링 방법이기 때문에 추정치에 대한 정규성 가정이 불필요하며 따라서 잘못된 확률분포형의 채택으로 인한 오류가 방지된다는 점이다(Efron, 1993; Efron, 2003).

본 연구는 연속된 시계열 자료를 처리하여 생성된 연 강수량 자료를 이용하기 때문에 분포가 독립적이고 동일하게 분포되어 있다. 따라서 본 연구에서는 전통 부트스트랩 기법을 이용하여 과거 및 미래 확률 강우량을 산정하였다.

전통 부트스트랩 기법은 컴퓨터의 발달에 따라 통계학에서 유용하게 사용되는 기법으로 표본자료에서 복원 재추출을 시행하여 원하는 통계량을 추론하는 방법이다. 전통 부트스트랩 기법을 이용하여 통계량을 추론하는 절차는 다섯 단계로 정리할 수 있다.

- ① 표본자료를 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 로 정의한다. 여기서 x_1, x_2, \dots, x_n 은 서로 독립이어야 한다.
- ② 표본자료를 복원 재추출하여 부트스트랩 샘플 X_b 을 생성한다. 여기서 X_b 의 자료의 개수는 n 개다.
- ③ ②의 과정을 반복하여 $X_{b_1}, X_{b_2}, \dots, X_{b_m}$ 의 부트스트랩 샘플

플들을 생성한다.

- ④ 각각의 부트스트랩 샘플을 이용하여 원하는 통계량 $\theta_{b_1}, \theta_{b_2}, \dots, \theta_{b_m}$ 를 산정한다.
- ⑤ $\theta_{b_1}, \theta_{b_2}, \dots, \theta_{b_m}$ 의 표본표준편차를 산정하고, 이를 이용하여 θ 의 표준오차를 추정한다. 여기서 θ 는 표본자료의 통계량이다.

표본표준편차를 이용하여 표준오차를 구하는 식은 다음과 같다.

$$se = \left[\frac{\sum_{x=1}^m (\theta_{b_x} - \sum_{x=1}^m (\theta_{b_x}/m))^2}{m-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서, se 는 표준오차, m 은 재추출 횟수이다.

Fig. 3은 본 연구에서 부트스트랩 기법을 이용하여 불확실성을 평가하는 방법을 도시한 그림이다. 과거와 미래의 강수량 자료를 수집하여 연최대강수량을 산정하고 부트스트랩 기법을 이용하여 120개의 대표본 ($bs_1, bs_2, \dots, bs_{120}$)을 생성하였다. 생성된 대표본들을 이용하여 확률강우량을 산정하였다. 산정된 확률강우량을 부트스트랩 기법을 통해 얻은 통계량 (θ)으로 가정하고 표준편차와 표준오차를 산정하였다. 실제 확률강우량과 대표본을 이용하여 산정한 확률강우량의 95% 신뢰구간의 값을 이용하여 각각 설계홍수량을 산정하였다. 산정된 설계홍수량의 침투유량 범위의 크기를 통해 불확실성을 평가하였다.

4. 확률 강우량 산정

과거 강수량 자료와 미래 강수량 자료를 이용하여 180, 360, 540, 720, 900, 1080, 1260, 1440분의 지속시간에 따른 200년 빈도의 확률강우량을 산정하였다. 강수량 자료를 통해 지속시간별 최대 강수량을 산정하고 산정된 지속시간별 최대 강수량에 고정시간-임의시간 환산계수를 곱하여 임의시간 강수량으로 변환하였다.

임의시간 강수량 자료를 이용하여 확률 강우량을 산정하여 분석하기 위해서는 적절한 확률분포형과 매개변수의 선정이 필요하다. 확률분포형에는 대표적으로 Gumbel 분포와 GEV 분포가 있다. 우리나라의 경우 최적 확률분포형으로 Gumbel 분포를 주로 채택한다. GEV 분포는 연최고치계열 자료를 이용할 때 주로 쓰이는 분포형이라는 특징을 가지고 있다. 확률분포함수의 매개변수 추정 방법으로는 모멘트법, 최우도법, 확률가중모멘트법 등이 있다. 본 연구에서는 확률 분포형으로 GEV 분포를 적용하였다. 매개변수 추정 방법으로는 MOLIT (2012)의 지침에 따라 확률가중모멘트법을 적용하였다.

5. 설계홍수량 산정

설계홍수량은 HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) 모형을 이용하여 모의하였다. HEC-HMS 모델은 미육군 공병단 (U.S. Army Corps of Engineers)의 수문공학연구소 (Hydrologic Engineering Center)에서 개발된 모델로 기존의 HEC-1 모형을 발전시킨 모델이다. HEC-HMS 모델은 유역에서의 강우-유출 현상을 모델링

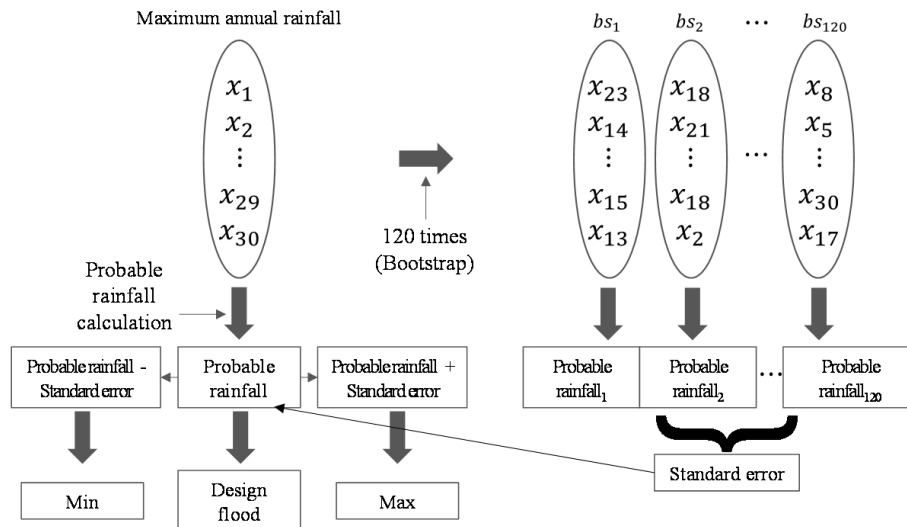


Fig. 3 Method of uncertainty analysis using Bootstrap technique

하며, 각 과정을 통해 지표면 유출, 하도 유출, 저수지 유출 등을 모의할 수 있다(Lee, 2007).

Huff 분포에 의한 무차원 우량 시간분포곡선을 이용하여 확률강우량에 시간 분포를 적용하였으며, 손실우량 산정 방법으로는 SCS 유출곡선지수 방법, 직접유출량 산정 방법으로는 SCS 단위도법을 이용하여 과거, RCP4.5 2025s, RCP4.5 2055s, RCP4.5 2085s, RCP8.5 2025s, RCP8.5 2055s, RCP4.5 2085s의 7개 지속기간(180, 360, 540, 720, 900, 1080, 1440 분)에 따른 200년 빈도 설계홍수량을 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 용당 저수지의 확률강우량 산정 결과

Table 2는 강수량의 편의보정 된 모의치를 이용해 산정한

200년 빈도 확률강우량과 부트스트랩 기법을 이용하여 리샘 플링을 실행하여 얻은 재표본의 200년 빈도 확률강우량의 지속기간에 따른 표준오차 값을 지속기간 별로 나타낸 표이며, 200년 빈도 확률강우량은 Fig. 4, 200년 빈도 확률강우량의 표준 오차는 Fig. 5에 도시하였다. 여기서 표준오차는 유의수준 5 %에서 신뢰구간 95 %의 값이다. 미래 강수량 자료는 3 시간 단위의 기후변화 시나리오를 통해 수집하였기 때문에 총 8가지 지속기간 (180, 360, 540, 720, 900, 1080, 1260, 1440분)에 대한 확률강우량을 산정하였다.

확률강우량은 RCP8.5의 2055s를 제외한 과거, RCP4.5의 2025s, 2055s, 2085s, RCP8.5의 2025s, 2085s에서 지속기간이 길어질수록 커지는 경향을 보였다. RCP8.5의 2055s에서는 지속기간이 길어짐에 따라 확률강우량이 감소하는 추세를 보였는데, 이는 RCP8.5 시나리오의 2055s에서 강수가 오랜 시간 지속적으로 내리지 않고 짧은 시간에 집중되어 내리는

Table 2 Probable rainfall of 200-year frequency with standard error for different duration (mm)

Scenario	Period	180 min	360 min	540 min	720 min
historical	1995s	181.5±10.6 (5.8 %)	240.4±7.2 (3.0 %)	295.9±7.9 (2.7 %)	353.7±9.8 (2.8 %)
RCP 4.5	2025s	327.4±15.1 (4.6 %)	604.7±28.8 (4.8 %)	679.8±29.5 (4.3 %)	730.2±35.8 (4.9 %)
	2055s	321.5±11.5 (3.6 %)	509.3±29.3 (5.8 %)	611.9±27.1 (4.4 %)	833.5±57.7 (6.9 %)
	2085s	290.9±8.6 (3.0 %)	581.9±17.9 (3.1 %)	700.7±23.2 (3.3 %)	915.2±34.3 (3.7 %)
RCP 8.5	2025s	296.5±12.1 (4.1 %)	390.7±21.5 (5.5 %)	452.0±23.2 (5.1 %)	490.5±25.0 (5.1 %)
	2055s	413.4±14.4 (3.5 %)	796.3±33.2 (4.2 %)	947.6±29.5 (3.1 %)	1,083.7±27.7 (2.6 %)
	2085s	319.7±9.9 (3.1 %)	502.6±19.6 (3.9 %)	606.6±24.9 (4.1 %)	632.7±26.6 (4.2 %)
Scenario	Period	900 min	1080 min	1260 min	1440 min
historical	1995s	373.2±9.4 (2.5 %)	386.2±11.2 (2.9 %)	412.8±9.2 (2.2 %)	433.0±9.9 (2.3 %)
RCP 4.5	2025s	790.5±41.8 (5.3 %)	856.4±44.5 (5.2 %)	932.3±54.0 (5.8 %)	975.4±52.2 (5.4 %)
	2055s	932.9±61.1 (6.5 %)	1,004.2±61.2 (6.1 %)	1,063.4±65.8 (6.2 %)	1,101.8±66.1 (6 %)
	2085s	1,049.7±43.7 (4.2 %)	1,193.7±45.1 (3.8 %)	1,291.1±52.4 (4.1 %)	1,371.8±60.3 (4.4 %)
RCP 8.5	2025s	517.4±19.7 (3.8 %)	577.9±20.1 (3.5 %)	614.9±25.6 (4.2 %)	639.5±26.6 (4.2 %)
	2055s	1,146.4±27.5 (2.4 %)	1,124.7±28.2 (2.5 %)	1,121.2±22.9 (2.0 %)	1,099.1±25.7 (2.3 %)
	2085s	666.6±29.7 (4.5 %)	696.8±26.6 (3.8 %)	705.0±29.2 (4.1 %)	713.5±28.8 (4.0 %)

것으로 모의되어 지속시간에 따른 연최대강수량은 동일한데 고정시간-임의시간 환산계수는 지속시간이 길어질수록 작아지기 때문에 이를 적용했을 때 자료의 값이 지속시간이 길어질수록 확률강우량이 감소하기 때문으로 사료된다.

부트스트랩 기법을 통해 얻은 표준 오차값은 과거와 RCP4.5 시나리오의 전체 기간에서 지속시간이 길어질수록 커지는 경향을 보였다. RCP4.5 시나리오의 세 기간에서는 지속시간에 따라 표준 오차의 차이가 상대적으로 크게 나타났다. 이에 비해 RCP8.5 시나리오의 세 기간에서는 지속시간에 따른 표준 오차의 차이가 상대적으로 적었으며, 특히 RCP8.5 2055s에서는 지속시간이 늘어날수록 표준 오차가 줄어드는 경향을 나타냈다. 표준 오차는 확률강우량 대비 2.0~6.9%로 나타났다.

2. 용당 저수지의 설계홍수량 산정 결과

용당 저수지의 지속시간에 따른 시나리오 및 기간별 200년

빈도 설계홍수량을 1분 단위로 산정하여 20분간 평균 유출량으로 보정하였다. 용당 저수지의 지속시간에 따른 시나리오 및 기간별 200년 빈도 설계홍수량의 첨두유량과 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위 값을 Table 3에 나타내고 Fig. 6에 도시하였다.

과거, RCP4.5 2055s, RCP8.5 2025s, RCP8.5 2085s 시나리오에서는 첨두유량이 지속시간 180분일 때 나타났고, RCP4.5 2025s, RCP4.5 2085s, RCP8.5 2055s 시나리오에서는 첨두유량이 지속시간 360분일 때 나타났다. 공통적으로 지속시간이 늘어남에 따라 첨두유량이 감소하는 경향을 보였다. 각각의 임계지속시간에서 첨두유량은 과거에서 622 m³/s로 가장 작았고, RCP8.5 2055s 시나리오에서 1,864 m³/s로 가장 크게 나타났다.

불확실성을 고려한 첨두유량의 범위의 경우 지속시간에 따라 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 과거의 지속시간 1,440분에서 ±7 m³/s로 가장 작게 나타났고 RCP8.5 2055s의 지속시

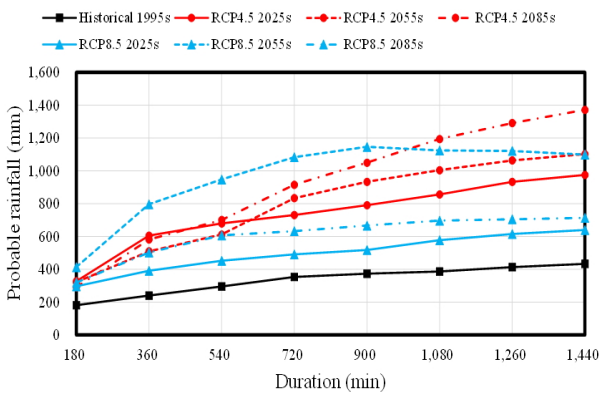


Fig. 4 Probable rainfall of 200 year frequency

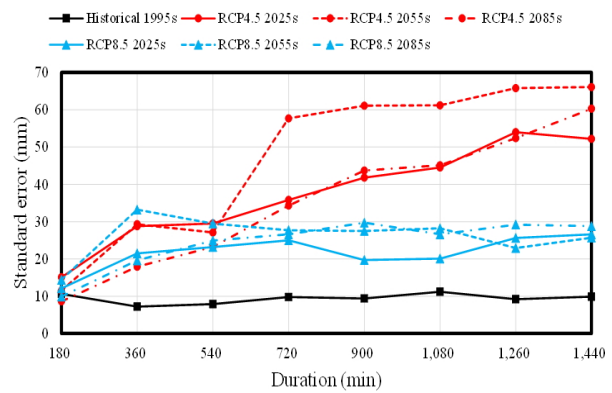


Fig. 5 Standard error of probable rainfall of 200 year frequency

Table 3 Peak flow and the range of peak flow considered uncertainty of 200 year frequency (m³/s)

Scenario		Duration (min)						
		180	360	540	720	900	1,080	1,440
Historical		622±44 (7.1 %)	517±18 (3.5 %)	456±13 (2.9 %)	424±13 (3.1 %)	362±10 (2.8 %)	314±9 (2.9 %)	268±7 (2.6 %)
RCP 4.5	2025s	1,230±63 (5.1 %)	1,402±69 (4.9 %)	1,102±50 (4.5 %)	904±45 (5.0 %)	790±42 (5.3 %)	718±38 (5.3 %)	618±34 (5.5 %)
	2055s	1,206±48 (4.0 %)	1,172±71 (6.1 %)	989±46 (4.7 %)	1,035±73 (7.1 %)	936±62 (6.6 %)	844±52 (6.2 %)	699±42 (6.0 %)
	2085s	1,078±36 (3.3 %)	1,347±43 (3.2 %)	1,137±39 (3.4 %)	1,139±44 (3.9 %)	1,055±44 (4.2 %)	1,006±38 (3.8 %)	872±39 (4.5 %)
RCP 8.5	2025s	1,102±51 (4.6 %)	884±52 (5.9 %)	720±39 (5.4 %)	599±32 (5.3 %)	511±20 (3.9 %)	480±17 (3.5 %)	402±18 (4.5 %)
	2055s	1,589±59 (3.7 %)	1,864±74 (4.0 %)	1,548±46 (3.0 %)	1,352±38 (2.8 %)	1,154±29 (2.5 %)	947±22 (2.3 %)	697±17 (2.4 %)
	2085s	1,198±37 (3.1 %)	1,156±44 (3.8 %)	980±40 (4.1 %)	780±31 (4.0 %)	664±28 (4.2 %)	581±23 (4.0 %)	449±17 (3.8 %)

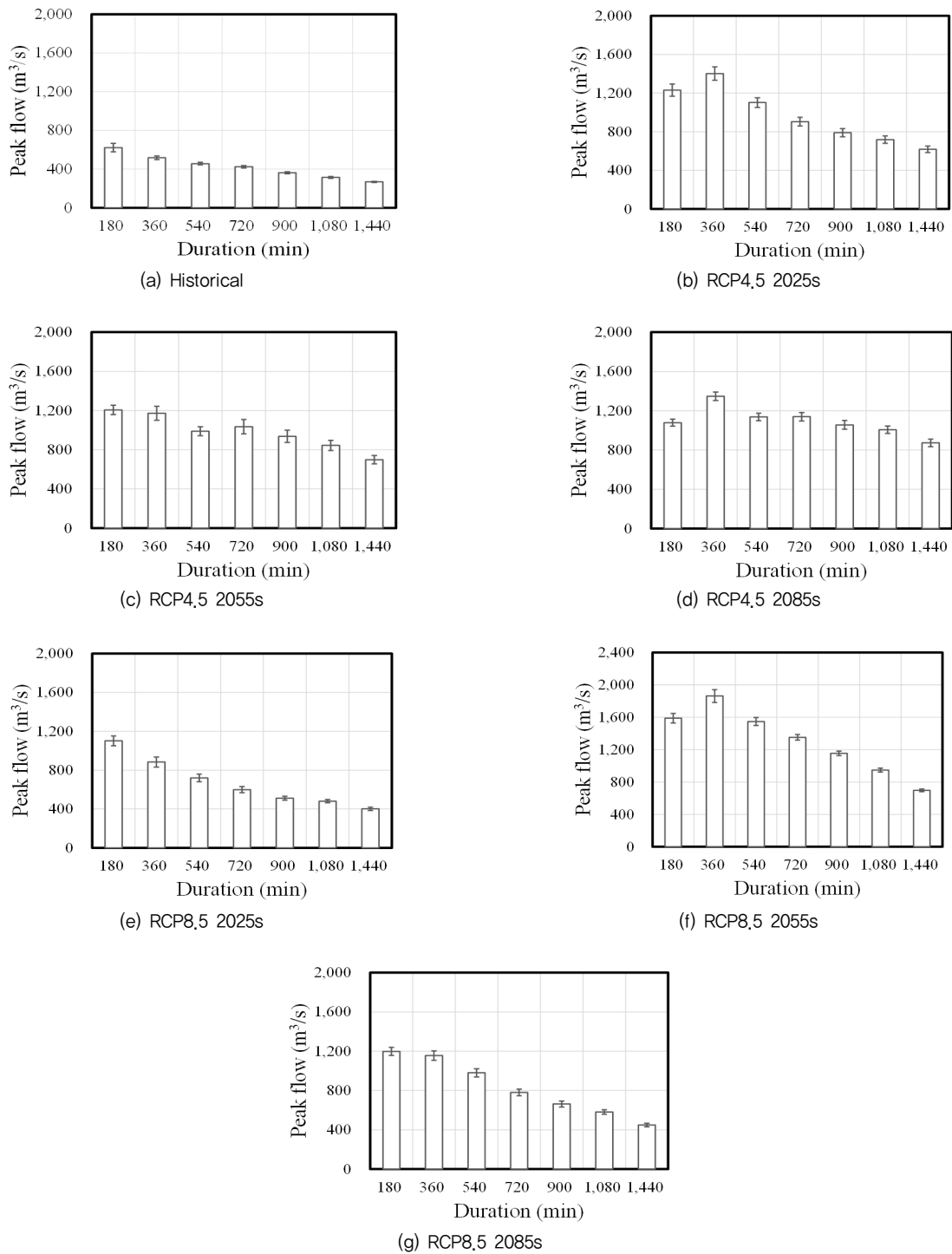


Fig. 6 Peak flow with range considered uncertainty (m^3/s)

간 360분에서 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위가 $\pm 74 m^3/s$ 로 가장 크게 나타났다. 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위는 첨두유량 값에 대해 2.3~7.1%의 값을 가지는 것으로 나타났다.

Fig. 7에 RCP4.5와 RCP8.5에서 첨두유량과 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위의 산포도를 도시하였다. 첨두유량과 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위의 상관관계를 분석한 결과 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오에서 상관계수는

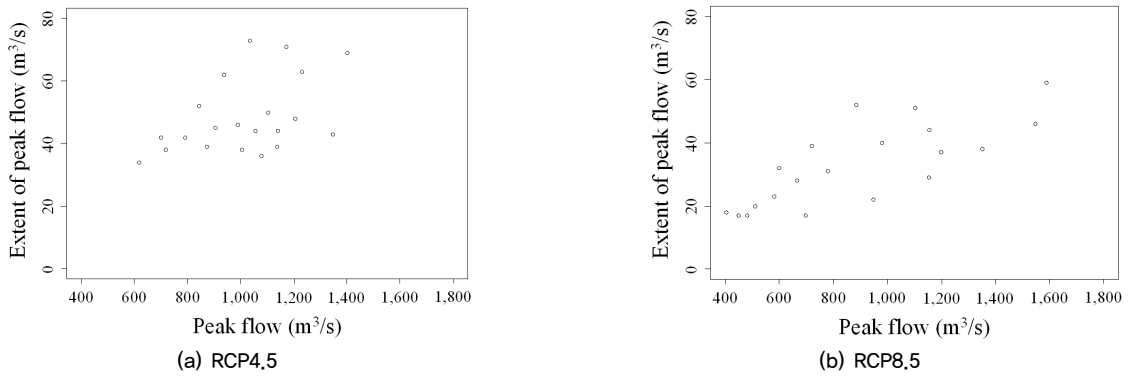


Fig. 7 Scatter plot of peak flow and the range of peak flow considered uncertainty

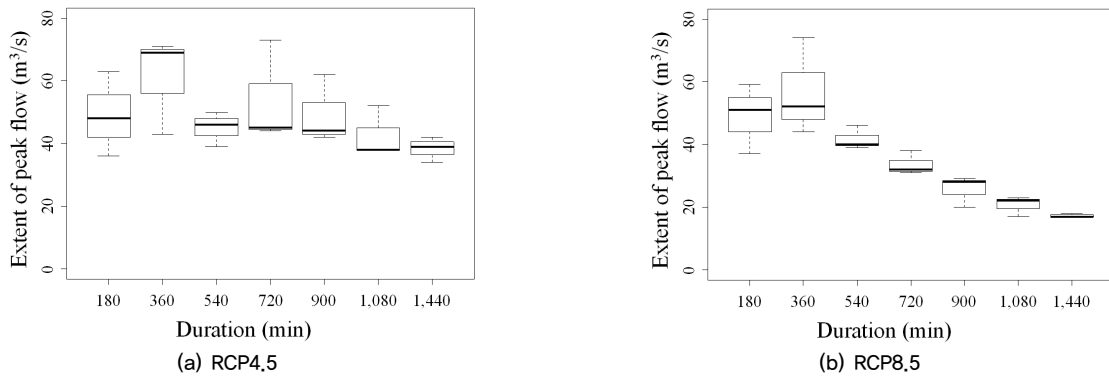


Fig. 8 Box plot of duration and the range of peak flow considered uncertainty

각각 0.4628, 0.8354로 나타났다. 따라서 RCP8.5 시나리오에서는 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위가 첨두유량과 상관관계가 있다고 사료된다.

지속시간과 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위의 크기의 상관관계를 알기 위해 상관성 분석을 실시하였다. Fig. 8에 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오에서 지속시간과 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위의 크기를 박스 플롯으로 나타내었다.

상관성 분석 결과 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오에서 결정계수는 각각 0.0739, 0.7450이었으며 p-value는 각각 0.3333, 0.0001로 유의수준 5%에서 지속시간과 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위의 크기는 RCP8.5 시나리오에서 선형관계가 성립되는 것으로 사료된다. 박스 플롯에서도 RCP4.5 시나리오에 비해 RCP8.5 시나리오의 지속시간에 대한 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위가 선형성을 더 잘 나타내는 것을 확인할 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 전통 부트스트랩 기법을 이용하여 확률강

우량을 산정하고, 그에 따른 미래 설계홍수량의 불확실성을 평가하였다. 과거와 미래의 강수량 자료를 수집하여 연최대 강수량을 산정하고 전통 부트스트랩 기법을 이용하여 120개의 대표본을 생성하였다. 생성된 대표본으로 확률강우량을 산정하고 원 자료의 확률강우량과 95% 신뢰구간의 확률강우량을 이용하여 각각 설계홍수량을 산정하였다. 산정된 첨두유량의 범위를 불확실성의 평가 기준으로 삼았다.

미래의 확률강우량은 대체적으로 증가하는 경향을 보였으나, 먼 미래일수록 확률강우량이 증가하지는 않는 것으로 나타났다. RCP4.5 시나리오의 경우에는 2025s, 2055s, 2085s의 순서로 먼 미래일수록 확률강우량이 크게 산정되었지만, RCP8.5 시나리오의 경우에는 2025s, 2085s, 2055s의 순서로 미래 2 기간의 확률강우량이 미래 3 기간의 확률강우량보다 더욱 크게 산정되었다. 전통 부트스트랩 기법을 이용하여 계산한 확률강우량의 표준 오차는 최소 7.2 mm, 최대 66.1 mm로, 확률강우량의 2.0~6.9%로 산정되었다.

설계홍수량 산정 결과 시나리오별, 기간별로 임계지속시간이 상이하였다. 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위의 값은 첨두유량 값의 2.3~7.1%로 나타났다. 불확실성을 고려한 첨

두유량의 범위와 첨두유량간의 상관성을 분석한 결과 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오에서 결정계수는 각각 0.4628, 0.8354로 나타났다. 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위와 지속시간의 관계를 분석한 결과 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오에서 결정계수의 값은 각각 0.0739, 0.7450로 나타났다. 결과적으로 시나리오별로 상관관계 및 선형관계 성립 여부가 상이하였으며, 용당 저수지에서는 RCP8.5 시나리오만 상관성이 존재하고 선형관계가 성립하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 미래 설계홍수량의 불확실성을 부트스트랩 기법을 이용하여 산정한 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위의 크기로 평가하였다. 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위는 첨두유량의 최대 약 7%로 나타났다. 본 연구는 한 유역에 대해서만 진행되었으며, 다른 유역에 본 연구 방법을 적용하여 설계홍수량의 불확실성 평가를 할 경우 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위는 유역의 특성이나 강우 특성에 따라 상이할 것이라 사료된다. 후속 연구를 통해 본 연구 방법을 다른 유역에 적용하거나, 전통 부트스트랩 기법뿐만 아니라 다른 재추출 기법을 활용하여 불확실성을 평가할 필요가 있다. 본 연구에서 산정한 불확실성을 고려한 첨두유량의 범위는 수공 구조물을 설계할 때 미래 설계홍수량의 불확실성을 나타내는 하나의 지표로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2015년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2015R1A2A2A01008152).

REFERENCES

- Efron, B., 1979. Bootstrap methods : another look at the jackknife, *Annals of Statistics* 7: 1-26.
- Efron, B., and R. J. Tibshirani, 1993. *An Introduction to the Bootstrap*, Chapman & Hall/CRC.
- Efron, B., 2003. Second Thoughts on the Bootstrap, *Statistical Science* 18(2): 135-140.
- 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.
- Iwashima, T., and R. Yamamoto, 1993. A statistical analysis of the extreme events: long-term trend of heavy daily precipitation. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 71: 637-640.
- Jeong, J. H., and Y. N. Yoon, 2007. *Water Resource Design Practice*, Seoul: Goomibook (in Korean).
- Jo, D. J., and B. H. Jeon, 2012. Analysis on the characteristics of exceeding probability rainfall events. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 12(2): 309-313 (in Korean).
- Karl, T. R., and R. W. Knight (1998), Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79: 231-241.
- Kim, J. H., H. R. Cho, Y. S. Cho, 2014. Projection of climate change with uncertainties: 1. GCM and RCP uncertainties, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 14(5): 317-327 (in Korean).
- Korea Rural Community Corporation (KRC), 2010. General plan of heightening business for irrigation dam in Yongdang district (in Korean).
- Lee, J. S., 2007. Runoff analysis of reservoir basin using HEC-HMS, *Hanbat University Journal* 24: 39-48 (in Korean).
- Lee, K. H., H. S. Kim, S. J. Kim, B. S. Kim, 2010. Estimation of flash flood guidance considering uncertainty of rainfall-runoff model, *Journal of wetlands research* 12(3): 155-163 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2012. Design flood estimation guidelines (in Korean).
- National Institute of Meteorological Research (NIMR), 2012. Climate change scenario report corresponding IPCC 5th assessment report (in Korean).
- 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).
- Seo, Y. M., 2011. Flood risk analysis in water resources planning - flood risk analysis with consideration of rainfall uncertainty, Ph.D. diss., Gyeongsan, Republic of Korea: Yeungnam University (in Korean).
- Wagener, T., N. McIntyre, M. J. Lees, H. S. Wheater, H. V. Gupta, 2003. Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: Dynamic identifiability analysis, *Hydrol. Process.* 17: 455-476.
- Yun, Y. N., H. S. Kim, M. J. Park, S. D. Kim, 2000. Plan of flood damage mitigation considered uncertainty analysis, *Journal of Korea Water Resources Association* 33(1): 382-387 (in Korean).