



## Estimation and evaluation on the return period of flash flood for small mountainous watersheds in the Han River basin

Kim, Hwa-Yeon<sup>a</sup> · Kim, Jeong-Bae<sup>b</sup> · Bae, Deg-Hyo<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>M.S., Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Ph.D Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

Paper number: 18-107

Received: 10 December 2018; Revised: 18 February 2019 / 26 February 2019; Accepted: 26 February 2019

### Abstract

The objectives of this study are to estimate the return period of flash flood and evaluate its appropriateness based on the actual observation events for small mountainous watersheds in the Han River basin. For these goals, Flash Flood Guidance (FFG) was estimated from 1-hr duration Threshold Runoff (TR) and Saturation Deficit (SD) of soil moisture which was derived from Sejong University Rainfall Runoff (SURR) model. Then, the return period of flash flood was calculated by comparing the rainfall quantile to the 1-hr duration rainfall that exceeded the FFG during the past period (2002-2010). Moreover, the appropriateness of the estimated return period of flash flood was evaluated by using the observation events from 2011 to 2016. The results of the return period of flash flood ranged from 1.1 to 19.9 years with a mean and a standard deviation of 1.6 and 1.1 years, respectively. Also, the result of the appropriateness indicated that 83% of the return periods derived from observation events were within the return period of flash flood range. Therefore, the estimated return period of flash flood could be considered as highly appropriate.

**Keywords:** Return period of flash flood, Small mountainous watersheds, Flash flood guidance, Rainfall quantile

## 한강유역 산지소하천의 돌발홍수 재현기간 산정 및 평가

김화연<sup>a</sup> · 김정배<sup>b</sup> · 배덕효<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>세종대학교 건설환경공학과 석사, <sup>b</sup>세종대학교 건설환경공학과 박사과정, <sup>c</sup>세종대학교 건설환경공학과 교수

### 요지

본 연구에서는 한강유역 산지소하천 미세소유역별 돌발홍수 재현기간을 산정하고, 돌발홍수 실사례를 활용하여 적합성을 평가하였다. 이를 위해 1시간 지속기간의 한계유출량과 SURR 모형으로 모의한 토양포화미흡량으로부터 돌발홍수능을 산정하였다. 이후 돌발홍수능을 초과한 과거 집중호우 사상(2002~2010년)의 강수량과 재현기간별 유역평균확률강우량을 비교하여 미세소유역별 돌발홍수 재현기간을 산정하였다. 또한, 돌발홍수 실사례(2011~2016년) 강수량으로부터 추정된 재현기간을 활용하여 적합성을 평가하였다. 돌발홍수 재현기간 산정결과 평균은 1.6년, 표준편차는 1.1로 산정되었으며, 1.1~19.9년 범위로 나타났다. 적합성 평가결과 돌발홍수 사례별 추정된 재현기간의 83%가 돌발홍수 재현기간 범위 이내로 나타났다. 본 연구에서 산정한 돌발홍수 재현기간의 적합성은 높은 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 돌발홍수 재현기간, 산지소하천, 돌발홍수능, 확률강우량

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-3408-3337  
E-mail: dhbae@sejong.ac.kr (D.-H. Bae)

### 1. 서론

최근 기후변화의 영향으로 국지성 집중호우에 의한 돌발홍수가 빈번히 발생하고 있으며, 인적·물적 피해가 증가하고 있다. 일반적으로 돌발홍수는 건조한 지표 상태에서 집중호우로 인해 6시간 이내에 발생하는 홍수로 정의되며(Hall, 1981; NWS, 1998), 지형적 특성, 토양 및 지표면의 조건과 강우지속기간 및 강우강도 등 강우특성에 의해 발생한다. 특히 국내는 산지비율이 높은 지형적 특성으로 산지소하천에서 돌발홍수가 많이 발생하며, 이는 빠른 유속과 토사를 동반하여 단시간에 많은 인명피해를 야기한다. 이처럼 단시간에 발생하는 산지소하천 돌발홍수를 예방하기 위해서는 이에 대한 지각을 이해하고 현업에 활용하는 것이 필요하다.

돌발홍수에 대비하기 위한 기법 개발 방안은 크게 예측유량(forecasting discharge) 기법, 홍수 취약성 채점절차(flood susceptibility scoring procedures) 기법, 돌발홍수능(flash flood guidance, FFG) 기법으로 분류된다(Hapuarachchi and Wang, 2008). 이 중, 미국, 한국, 중앙아시아 등 현업에서는 주로 지리·지형적 특성으로부터 산정되는 한계유출량과 해당시점의 토양수분 조건을 고려하는 돌발홍수능 기법을 활용하고 있으며, 이와 관련된 다양한 연구들이 수행되어 왔다. Sweeney (1992)는 돌발홍수능을 산정하는 표준 알고리즘을 제시하였으며, Carpenter and Georgakakos (1993)는 GIS 기반의 소유역 한계유출량 개념을 도입하여 돌발홍수능을 산정하였다. 이후 미국기상청(National Weather Service, NWS)은 돌발홍수능 시스템을 개발하여 홍수에경보시스템(National Weather Service River Forecast System, NWSRFS)에 활용하고 있다. 최근 돌발홍수능 평가 및 개선 연구로 Seo *et al.* (2017)은 돌발홍수능의 정확도 향상을 위해 위성자료로 토양수분량을 모의하고, 이를 돌발홍수능 산정 시 활용하였다. 한편, 국내에서는 한계유출량과 강우-유출모형으로 모의된 토양수분량을 활용하여 돌발홍수능을 산정하는 연구가 주로 수행되어 왔다(Bae and Kim, 2007; Kim *et al.*, 2009; Research Center of Flood Defence Technology for Next Generation, 2013). 이를 환경부 홍수통제소가 시스템화하여 돌발홍수 예측 및 경보발령 업무를 수행하고 있다. 그러나 국내의 경우, 수문 및 지형자료 수집이 어려운 산지소유역이 많아 돌발홍수능 산정 및 정확도 확보에 어려움이 있다.

돌발홍수능 산정의 핵심은 한계유출량의 결정이며(Bae and Kim, 2007), 이는 특정빈도 홍수량 또는 Manning 공식으로부터 산정된다. Carpenter *et al.* (1999)는 홍수-빈도(flood-frequency) 방법으로 추정된 2년 빈도 홍수량과 Manning 공식으로 돌발홍수능을 산정하고 이의 활용성을 제시하였다.

이를 근거로 미국 기상청은 2년 빈도 홍수량을 돌발홍수능 시스템에 활용하고 있다. 한편, 우리나라는 관측 지형자료를 이용하거나, 수집이 어려운 경우에는 회귀분석으로 유도된 지형자료를 Manning 공식에 적용하여 돌발홍수능을 산정하고 있다. 반면에 특정빈도의 홍수량을 활용하여 돌발홍수능을 산정한 연구는 전무한 실정이며, 국내 돌발홍수가 몇 년 빈도로 발생하는지 제시된 바가 없어 이에 대한 정량적 분석이 요구된다. 돌발홍수-빈도 관계는 대상지역의 지형특성과 수문 자료에 근거하여 산정되므로, 해당구역의 돌발홍수 발생특성을 반영한 돌발홍수 재현기간에 관한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 한강유역을 대상으로 산지소하천 미세소유역의 돌발홍수 재현기간을 산정하고 실제 돌발홍수 사상을 활용하여 그 적합성을 평가하고자 한다.

### 2. 연구방법

본 연구의 주요 수행절차는 Fig. 1과 같다. 지형자료와 수문 기상자료로부터 산지소하천 미세소유역을 추출하고 강우지속기간 1시간의 한계유출량을 산정한다. 이를 연속형 강우-유출 모형(SURR)으로 모의한 토양포화미흡량과 합하여 돌발홍수능을 산정한다. 미세소유역별 돌발홍수 재현기간을 산정하기 위해서는 재현기간별 확률강우량이 필요하므로, 각 강우관측소의 연최대강우자료를 빈도해석하고 이를 티센면 적가중법에 적용해 유역평균확률강우량으로 산정하였다. 그리고 대상유역에 내린 강우량이 돌발홍수능을 초과한 2002~2010년 기간의 집중호우 사상을 추출하고, 각 사상의 강우량과 재현기간별 유역평균확률강우량을 비교하여 돌발홍수 재현기간을 산정하였다. 또한 2011~2016년 기간의 돌발홍수 실사례 강수량으로부터 추정된 재현기간을 활용하여 미세소유역별로 산정된 돌발홍수 재현기간의 적합성을 평가하였다.

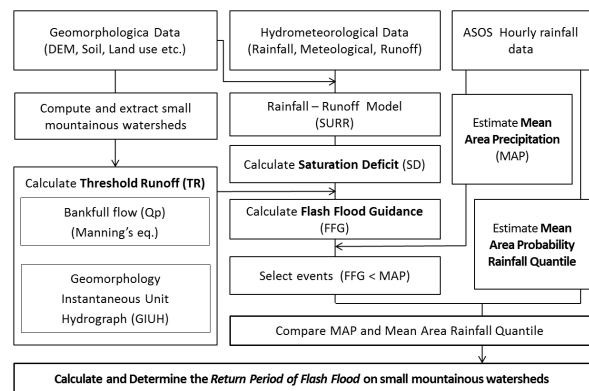


Fig. 1. Flowchart of study

## 2.1 돌발홍수능

돌발홍수능은 현재의 토양수분 조건에서 특정시간 동안 하천 제방을 월류하는 홍수가 발생할 때까지 앞으로 필요한 누적강수량이다(Moon and Bae, 2012). 이는 토양이 포화될 때까지 필요한 강우량인 토양포화미흡량과 토양이 포화되었다는 가정 하에 소하천 제방을 월류하기 시작할 때 유효수량인 한계유출량의 합으로 산정하며, Eq. (1)과 같다.

$$FFG = SD + TR \times 10 \quad (1)$$

여기서,  $FFG$ 는 돌발홍수능(mm),  $SD$ 는 토양포화미흡량(mm),  $TR$ 은 한계유출량(cm)을 의미하며, Eq. (1)에서 10은 단위환산계수이다.

한계유출량은 유역면적, 하도길이, 경사, 하도단면의 형상 및 크기 등 유역 및 하천특성에 따라 결정되며, Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다.  $Q_p$ 는 Manning 공식과 2년 빈도 홍수량으로 산정 가능하며,  $q_{PR}$ 는 Snyder 방법과 같이 합성단위도를 이용하는 방법과 유역의 지형특성이나 Horton의 하천계수 등을 사용하는 지형학적 순간단위도(Geomorphology Instantaneous Unit Hydrograph, GIUH)를 이용하는 방법이 있다(Rodriguez-Iturbe and Valdes, 1979; Rodriguez-Iturbe *et al.*, 1982). 본 연구에서는 대상유역에 일치하는 하도단면자료를 이용하기 위해 지역적 회귀분석을 이용하였다. 따라서  $Q_p$ 를 Eq. (3)과 같이 Manning 공식을 이용해  $Q_d$ 로 결정하고, 지형학적 순간단위도를  $q_{PR}$ 에 대입해  $TR$ 을 산정하였다.

$$TR = \frac{Q_p}{q_{PR} \cdot A} \quad (2)$$

여기서,  $Q_p$ 는 제방월류유량( $m^3/sec$ ),  $q_{PR}$ 는 단위도의 침투유량( $m^3/sec/km^2/cm$ ),  $A$ 는 유역 면적( $km^2$ ),  $TR$ 은 한계유출량(cm)을 의미한다.

$$Q_d = \frac{1.486}{n} S_c^{0.5} B_b \left[ \frac{Y_b}{m+1} \right]^{0.38} \quad (3)$$

여기서,  $n$ 은 Manning의 조도계수,  $S_c$ 는 하도바닥경사( $f_i/f_o$ ),  $B_b$ 는 하천 폭( $f$ ),  $Y_b$ 는 하천 수심( $f$ ),  $Q_d$ 는 제방월류유량( $f^3/sec$ )이다.

토양포화미흡량은 토양이 보유할 수 있는 최대 수분량에서 현 토양수분량을 뺀 나머지의 토양수분량이다. 포화된 상태에서의 토양수분량은 장력수 영역 내 토양이 포화되어 유출이 발생하는 경계를 의미하며, Eq. (4)와 같다. 또한 토양수분량은 강우, 침투 등의 영향으로 매시간 변해 연속적인 모의가

가능해야 한다. 토양수분량은 Lysimeter, Neutron probe, TDR (Time Domain Reflectometry) 등을 이용하여 실측하는 직접적인 방법과 강우-유출 모형에 의해 모의하는 간접적인 방법이 있다(Bae and Georgakakos, 1994). 본 연구에서는 SURR 모형(Bae and Lee, 2011)을 사용하여 토양수분량을 모의하고, Eq. (5)로 토양포화미흡량을 산정하였다.

$$TSAT = (FC - WP) \times Z \quad (4)$$

$$SD = TSAT - CSAT \quad (5)$$

여기서,  $TSAT$ 는 장력수 영역의 포화수분량(mm),  $FC$ 는 포장용수량(mm),  $WP$ 는 영구위조점에서의 토양수분량비(mm/mm),  $Z$ 는 토양층 깊이(mm),  $CSAT$ 는 SURR 모형을 통해 산정된 현재 토양수분량(mm),  $SD$ 는 토양포화미흡량(mm)을 의미한다.

## 2.2 돌발홍수 재현기간

돌발홍수 재현기간을 산정하려면 재현기간별 유역평균확률강우량이 필요하다. 확률강우량을 산정하기 위해 Gumbel 확률분포형을 이용하여 확률밀도함수를 추정하였다. Gumbel 확률분포형은 강우의 빈도해석 시 실무에서 가장 많이 채택되는 확률분포형으로, MOCT (2000)가 우리나라 전국을 대상으로 분석한 ‘한국 확률강우량도 작성’ 보고서에서도 모든 관측소에 대한 최적 확률분포형으로 Gumbel 확률분포형을 채택한 바 있다(Kwon *et al.*, 2009). Gumbel 확률분포형의 확률밀도함수와 누적확률분포 함수는 Eqs. (6) and (7)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[ -\frac{x-x_0}{\alpha} - \exp \left( -\frac{x-x_0}{\alpha} \right) \right] \quad (6)$$

$$F(x) = \exp \left[ -\exp \left( -\frac{x-x_0}{\alpha} \right) \right] \quad (7)$$

여기서  $\alpha$ 는 축척매개변수(scale parameter),  $x_0$ 는 위치매개변수(location parameter)이다.

매개변수 추정은 모멘트법, 최우도법, 확률가중모멘트법 중 자료에 가중치를 부여하여 매개변수를 추정하는 확률가중모멘트법(Greenwood *et al.*, 1979)을 활용하였다. 이 방법은 모멘트법 보다 표본크기에 영향을 덜 받으며, 자료에 이상치가 있을 때 비교적 안정적인 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다(Jenkinson, 1969; Snyder, 1972; Kim *et al.*, 1995). 최우도법은 표본크기가 충분히 클 때 가장 효율적인 방법으로 평가되지만 수렴성에 있어 문제가 발생할 수 있으며, 표본의 크기가

작을 때는 정확도가 떨어지는 단점이 있다(Kim *et al.*, 1996).

강우지속기간 1시간의 연최대강우량을 Gumbel 확률분포형과 확률가중모멘트법으로 빈도해석하여 재현기간별 확률강우량을 산정하였다. 이를 티센면적가중법에 적용하여 재현기간별 유역평균확률강우량으로 환산하였다. 이후 대상유역에 내린 강우량이 돌발홍수능을 초과한 과거 강우사상을 추출하고, 각 사상의 강우량과 재현기간별 유역평균확률강우량을 비교하여 돌발홍수 재현기간을 산정하였다. 즉, 추출된 사상의 강우량과 동일한 값에 해당하는 유역평균확률강우량의 재현기간으로부터 돌발홍수 재현기간을 산정하였다. 만약 대상유역에 내린 강우량과 동일한 재현기간별 유역평균확률강우량 값이 없는 경우에는 Eq. (8)과 같이 보간하여 산정하였다.

$$RP(x) = RP(x_0) + \frac{RP(x_1) - RP(x_0)}{x_1 - x_0}(x - x_0) \quad (8)$$

여기서  $x$ 는 대상유역에 내린 강우량(mm),  $x_0, x_1$ 은 각각  $x$ 보다 작거나 큰 재현기간의 확률강우량(mm),  $RP(x), RP(x_0), RP(x_1)$ 는 각 강우량에 해당하는 재현기간(년)을 의미한다.

### 3. 대상유역 및 자료수집

본 연구에서는 한강유역을 산지소하천 미세소유역으로 구

분하기 위해 ArcGIS를 사용하여 660개의 미세소유역으로 분할하고 상세하천도를 추출하였다. 이후, 지형자료 등을 이용하여 200개의 산지소하천 미세소유역을 최종적으로 선정하였다. 전체 산지소하천 미세소유역 중 78%(156개)의 유역면적이 20~50 km<sup>2</sup>에 해당하며, 평균 및 표준편차는 각각 43.1 km<sup>2</sup>, 19.8로 산정되었다.

한계유출량 산정 시 기초자료인 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM), 경사도, 영구위조점 등의 입력자료를 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)과 농업과학기술원 자료로부터 수집 및 구축하였다. 토양포화미흡량 및 돌발홍수능을 산정하기 위한 SURR 모형의 수문기상 입력자료로 한강유역 내 위치한 기상청 ASOS (Automated Synoptic Observing System) 25개 지점의 2002~2010년 6~9월의 기상자료(기온, 상대습도, 풍속, 일사량)와 강우자료를 구축하였다. 또한 수위관측소 4개, 댐 14개 지점의 유량자료를 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)로부터 구축하였다. 확률강우량을 산정하기 위해서는 적어도 20년의 강우자료가 필요하므로 동일 ASOS 25개(최소 23년) 지점 자료를 활용하여 강우지속기간 1시간의 연최대강우량을 구축하였다. Fig. 2(a)는 한강유역의 전체 및 산지소하천 미세소유역과 수문기상(기상, 수위, 댐) 관측소 위치, 2(b)는 산지소하천 미세소유역 면적의 상대빈도를 나타낸 것이다. Figs. 2(c)~2(f)는 돌발홍수능 산정 시 필요한 입력자료 중 수치표고모델(DEM), 토지이용도(Landuse), 토양도(Soil), 포장용수량(Field Capacity)을 도시한 것이다.

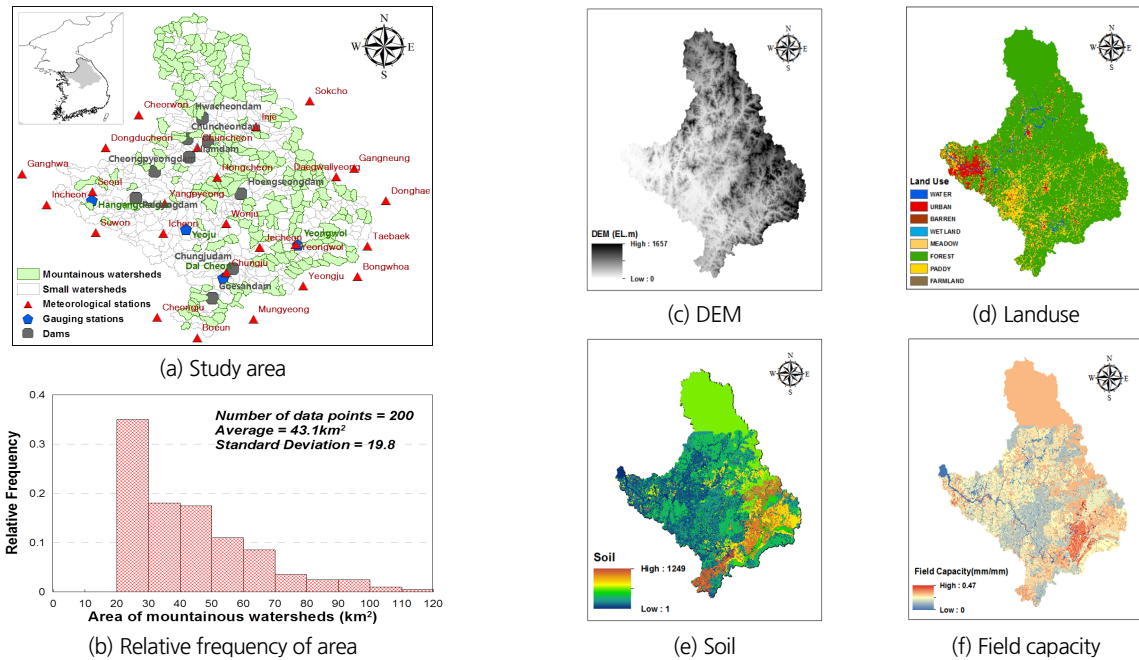


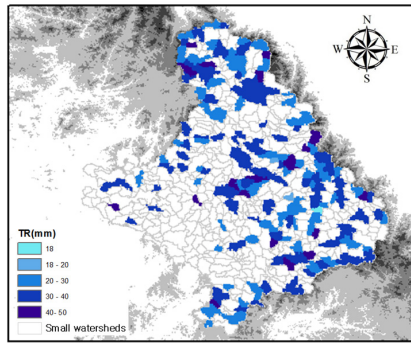
Fig. 2. Study area and datasets

## 4. 결과 및 분석

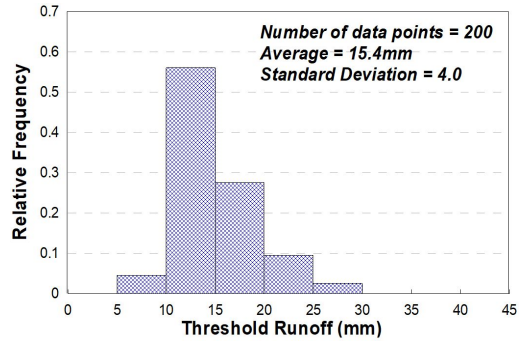
### 4.1 돌발홍수능 산정 및 분석

200개 산지소하천 미세소유역의 유역특성자료(유역면적, 하천연장, 유역경사)와 지역적 회귀분석으로 산정한 하도 특성자료(하폭, 수심, 하천경사)를 이용하여 Manning 공식과 GIUH 방법으로 한계유출량을 산정하였다(Kim and Bae, 2006). 한계유출량 산정결과 강우지속기간 1시간의 한계유출량은 유역에 따라 9.4~28.1 mm의 범위로 나타났으며, 평균 및 표준편차는 각각 15.4 mm, 4.0로 산정되었다. Fig. 3(a)는 미세소유역별 한계유출량 값이며, 3(b)는 한계유출량의 상대빈도이다. 미세소유역 한계유출량의 상대빈도를 분석한 결과 200개 유역 중 58% (116개)가 10~15 mm에 집중되어 있는 것으로 나타났다.

SURR 모형을 활용하여 2002~2010년 6~9월 기간에 대해 한강 산지소하천 미세소유역의 토양수분량을 모의하였다. 모의된 토양수분량을 이용하여 토양포화미흡량을 산정하였다. 한계유출량과 토양포화미흡량을 활용하여 돌발홍수능을 산정하였다. Figs. 4(a)~4(d)는 200개 산지소하천 미세소유역 중 임의로 선정된 지암(Jiam), 명지(Myungzi), 용추(Yongchu), 녹수(Noksu) 계곡유역에 대한 토양포화미흡량(SD)과 돌발홍수능(FFG)을 시계열로 도시한 것이다. 토양포화미흡량은 대상유역의 지형 및 토양조건에 따라 달라지며, 완전포화상태의 토양수분량 이하로 나타난다. 실제 지암(Jiam), 명지(Myungzi), 용추(Yongchu), 녹수(Noksu) 계곡유역의 완전포화토양수분량은 각각 125.5, 111.6, 111.6, 104.6 mm로 토양포화미흡량 이상이며, 돌발홍수능은 토양포화미흡량에 비례하여 증감하였다(Fig. 4).

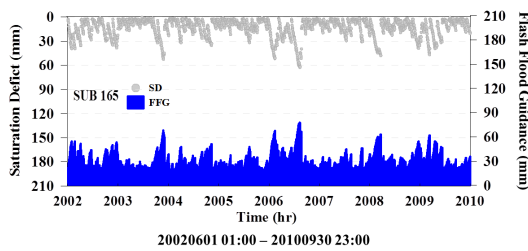


(a) Threshold Runoff (TR)

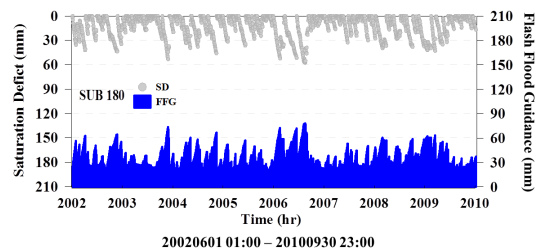


(b) Relative Frequency of TR

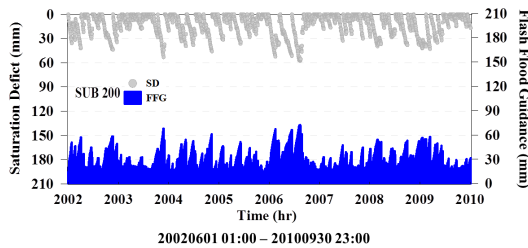
Fig. 3. Spatial distribution and relative frequency of TR



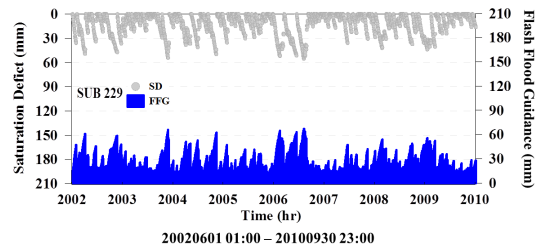
(a) Jiam valley



(b) Myungzi valley



(c) Yongchu valley



(d) Noksu valley

Fig. 4. Saturation deficit and flash flood guidance in small mountainous watersheds

### 4.2 돌발홍수 재현기간 산정 및 분석

ASOS 25개 지점별 강우지속기간 1시간의 연최대강우량을 수집하여 빈도해석을 수행하였다. Gumbel 확률분포형을 적용하여 매개변수를 추정한 후 적합도를 검정하였다. 분석결과 Kolmogorov-Smirnov (K-S), Chi-square 검정 모두 유의수준 5% 이내로 나타나 Gumbel 확률분포형이 적합하였다. Figs. 5(a)~5(d)는 임의의 4개 미세소유역에 내린 2002~2010년 6~9월의 강우량(MAP)과 돌발홍수능(FFG)을 시계열로 도시하고 대상유역의 강우량이 돌발홍수능을 초과하는 사상을 파란색 원으로 표시한 것이며, 이를 돌발홍수 사상으로 가정하였다. 이 중 24시간 이상의 강우지속기간을 갖는 장마, 태풍 등의 강우사상을 제외하였다. 이는 실제 돌발홍수가 짧은 지속기간과 큰 강우강도를 갖는 사상에서 발생하기 때문이다.

대상유역 돌발홍수 사상의 강우량과 유역평균확률강우량을 비교하여 돌발홍수 재현기간을 산정하였다. Fig. 6은 각 4개 미세소유역에 대한 재현기간별 확률강우량(Rainfall Quantile)을 검정색 선, 대상유역에 내린 돌발홍수 사상별 강우량(MAP)을 주황색 원으로 표현한 것이다. 대상유역에 내린 강우량이 재현기간별 유역평균확률강우량 사이에 나타난 경우 보간법을 사용하여 돌발홍수 재현기간을 산정하였다. 200개 산지소하천 미세소유역에서 산정된 돌발홍수 재현기간은 1.1~19.9년의 범위로 나타났으며 평균은 1.6년, 표준편차는 1.1로 각각 산정되었다.

Fig. 7(a)는 산지소하천 미세소유역에 내린 돌발홍수 사상의 강우량으로부터 산정된 돌발홍수 재현기간을 상대빈도로 나타낸 것이고 7(b)는 이를 분포도로 도시한 것이다. 돌발홍수

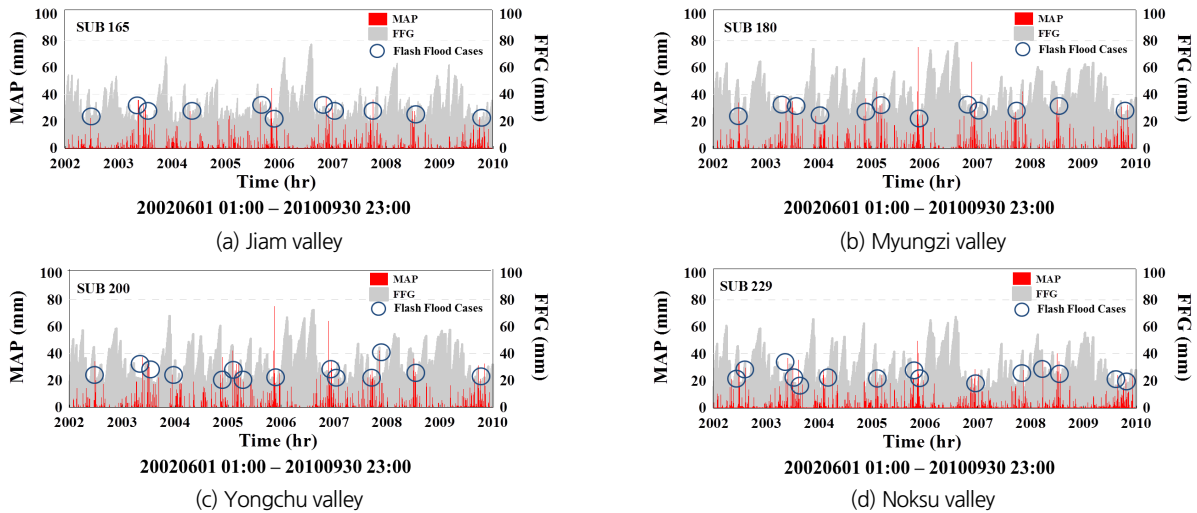


Fig. 5. Time series of MAP and FFG in small mountainous watersheds

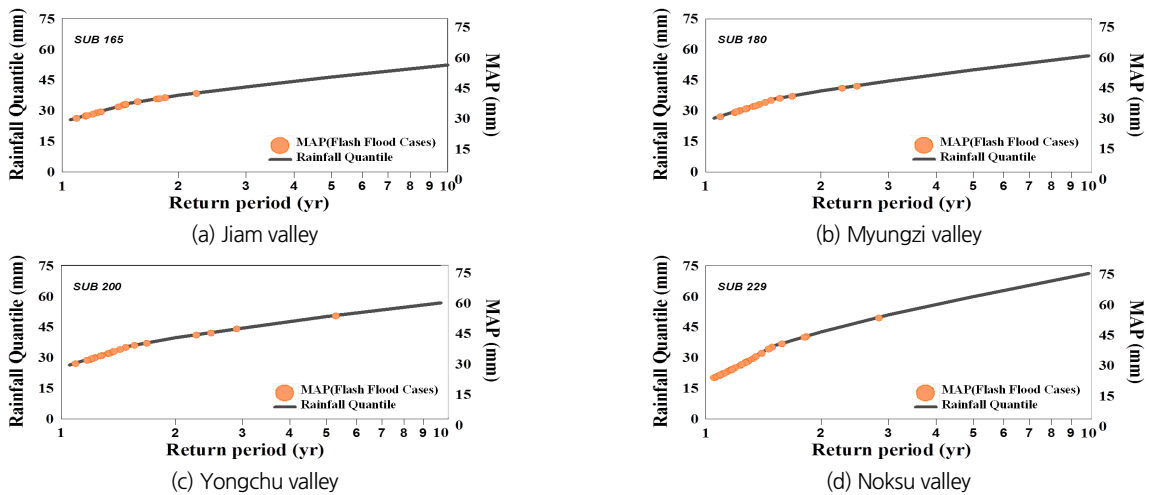
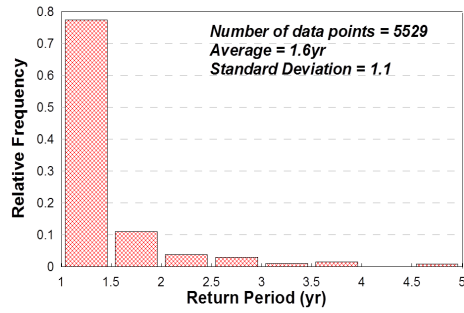
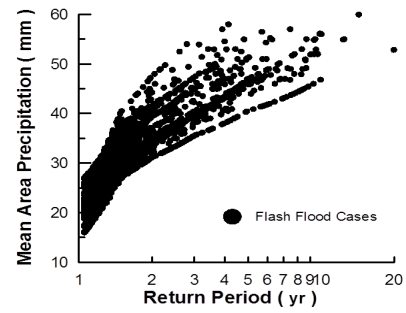


Fig. 6. Return periods of flash flood cases in small mountainous watersheds





(a) Relative frequency of return period



(b) Relationship between return period and MAP

Fig. 7. The characteristics of the return period of flash flood

수 사상으로부터 산정된 재현기간의 78%(4,313개)가 1.1 ~ 1.5년에 분포되었으며 98%(5,418개)는 5년 이내로 나타났다 (Fig. 7(a)). 그러나 일부 돌발홍수 사상의 재현기간이 19.9년으로 크게 나타났다. 이는 우리나라 지형 및 강우특성에 의한 영향으로 사료된다. 우리나라는 면적 대부분이 산악지형으로 산악형 강우와 기압의 기반에 의한 전선형 강우 등이 나타나며, 실제 돌발홍수 재현기간이 크게 산정된 강우는 강원도의 복잡한 지형에 의한 산악형 강우와 충청도의 전선형 강우 등에 의한 것으로 확인하였다.

### 4.3 돌발홍수 재현기간 평가

돌발홍수 재현기간이 적합하다는 것은 실제 돌발홍수 발생 사례의 재현기간이 기 산정된 재현기간과 상응하다는 것을 의미한다. 평가를 위해, 신문과 뉴스로부터 산지계곡에서 발생한 2011년부터 2016년 기간의 돌발홍수 실사례를 수집하였고, 실사례 강우량으로부터 돌발홍수 재현기간을 추정하였다. Fig. 8은 대상유역 내 6년간 발생한 돌발홍수 사례 중 12

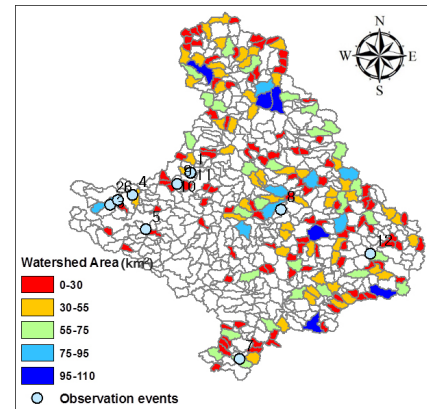


Fig. 8. Observation events of flash flood

개 피해지역의 유역면적과 위치를 나타낸 것이다.

평가방법은 산정된 돌발홍수 재현기간 범위(1.1~19.9년) 내에 최근 돌발홍수 실사례의 재현기간이 포함되는 경우, 산정된 돌발홍수 재현기간 범위가 적합하다고 평가하였다. Table 1은 피해지역의 발생시간, 상세 위치, 유역면적, 유역평

Table 1. Property of the observation events in the Han river basin

No.	Time	Location	Area (km <sup>2</sup> )	MAP (mm)	Return Period (yr)	Appropriateness
1	2011.07.14. PM 07:00	Yongchoo valley, Gapyeong-Gun, Gyeonggi-Do	44.9	12.2	< 1.1	X
2	2011.07.27. AM 05:00	Uidong valley, Gangbuk-Gu, Seoul-Si	37.0	47.7	2.0	O
3	2011.07.26. PM 06:30	Samcheonsa valley, Eunpyeong-Gu, Seoul-Si	80.6	28.9	1.2	O
4	2011.07.26. PM 04:55	Madangbawii valley, Namyangju-Si, Gyeonggi-Do	47.0	32.6	1.4	O
5	2011.07.27. AM 08:00	Mt. Namhan valley, Gwangju-Si, Gyeonggi-Do	34.0	37.1	1.4	O
6	2011.08.03. PM 05:30	Uidong valley, Gangbuk-Gu, Seoul-Si	37.0	18.9	1.1	O
7	2011.08.09. PM 01:00	Sadam valley, Goesan-Gun, Chungcheongbuk-Do	61.0	17.4	1.1	O
8	2012.07.15. AM 08:14	Byeongjibangri valley, Gapyeong-Gun, Gyeonggi-Do	34.9	15.3	< 1.1	X
9	2013.07.14. AM 10:11	Noksoo valley, Gapyeong-Gun, Gyeonggi-Do	26.1	21.8	1.1	O
10	2013.07.13. PM 05:05	Seungan stream, Gapyeong-Gun, Gyeonggi-Do	44.9	48.8	4.6	O
11	2016.07.05. AM 05:00	Yongchoo valley, Gapyeong-Gun, Gyeonggi-Do	44.9	33.0	1.4	O
12	2016.07.06. AM 03:00	Gwangdeog velly, Jeongseon-Gun, Gangwon-Do	73.2	16.1	1.1	O

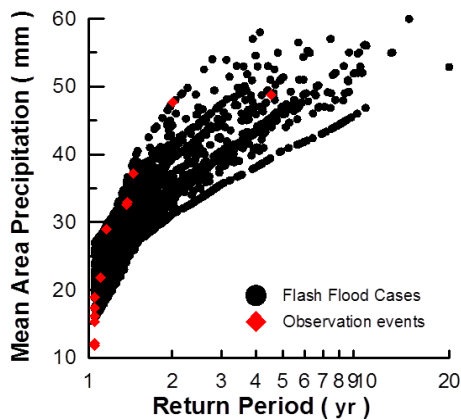


Fig. 9. Evaluation on the return period of flash flood

균강우량, 돌발홍수 재현기간, 적합 여부를 제시하였다. 평가 결과, 10개 돌발홍수 사례가 돌발홍수 재현기간 범위 내에 포함되었고, 2개 돌발홍수 사례는 범위를 벗어났다(Fig. 9). 2개 돌발홍수 사례의 강우량 분석결과, 대상유역의 강우량이 재현기간별 확률강우량보다 적게 내렸지만 돌발홍수가 발생했다. 이는 24시간 이내의 집중호우 사상이지만 사전 강우의 영향으로 토양이 포화된 상태에서 강우가 발생했기 때문이다. 따라서 최근 돌발홍수 사례로 추정된 재현기간의 83%(10개)가 돌발홍수 재현기간 범위 내에 포함되어, 산정된 한강유역 돌발홍수 재현기간은 적합하다고 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 짧은 강우지속기간에 발생하는 한강유역 산지소하천 미세소유역의 돌발홍수 재현기간을 산정 및 평가하였다. 돌발홍수 재현기간을 산정하기 위해 돌발홍수 발생시, 기준값으로 활용되는 돌발홍수능과 해당지역의 관측 강우자료를 활용하였다. 한강유역 200개 소유역을 대상으로 돌발홍수능과 재현기간별 유역평균확률강우량을 산정하고, 2002~2010년 기간의 돌발홍수능을 초과한 강우량으로 돌발홍수 재현기간을 추정하였다. 돌발홍수 재현기간은 평균 1.6년, 1.1~19.9년의 범위로 산정되었으며 전체의 98%에 해당하는 돌발홍수 재현기간이 5년 이내로 나타났다.

산지계곡의 최근 돌발홍수 발생사례(2011~2016년)의 재현기간을 활용하여 산정된 한강유역의 돌발홍수 재현기간의 적합성을 평가하였다. 돌발홍수 발생사례로부터 추정된 재현기간 중 83%가 돌발홍수 재현기간 범위(1.1~19.9년) 내에 포함되어 산지소하천 미세소유역의 돌발홍수 재현기간은 적합하다고 판단된다.

본 연구에서는 한강유역의 수문 및 강우자료를 기반으로 돌발홍수 재현기간을 분석하여 이를 정량적으로 제시하였다. 장기간의 관측자료 및 돌발홍수 실사례를 기반으로 국내 돌발홍수와 재현기간과의 관계를 분석하고, 정량화된 범위로 제시하였다는 측면에서 연구의 가치가 있다고 판단된다. 본 연구결과는 한강 산지유역에서의 돌발홍수 발생기작에 대한 분석, 산지돌발홍수 예경보시스템 및 구조적 대책방안 수립 시 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

다만, 본 연구에서는 미세소유역별 지형 및 강우특성이 상이하여 산정된 돌발홍수 재현기간을 특정 단일 값으로 제시하는 데에는 한계가 있다. 국내에서 발생하는 돌발홍수 재현기간의 실용성 향상을 위해서는 한강유역 이외에도 타 유역의 돌발홍수 사례수집과 해당 유역의 지형특성을 고려한 적정 빈도 도출이 요구되며, 다양한 강우지속기간에 따라 발생하는 돌발홍수 특성분석 등의 후속 연구가 수행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물 환경사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RE201901039).

## References

- Bae, D. H., and Georgakakos, K. P. (1994). "Climatic variability of soil water in the American Midwest: Part 1. Hydrologic modeling." *Journal of Hydrology*, Vol. 162, No. 3-4, pp. 355-377.
- Bae, D. H., and Kim, J. H. (2007). "Development of Korea flash flood guidance system: (I) Theory and system design." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 3B, pp. 237-243.
- Bae, D. H., and Lee, B. J. (2011). "Development of continuous rainfall-runoff model for flood forecasting on the large-scale basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 1, pp. 51-64.
- Carpenter, T. M., and Georgakakos, K. P. (1993). *Gis-based procedures in support of flash flood guidance*. IIHR Report, No. 366, Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR), The University of Iowa, Iowa City, Iowa, United States, pp. 1-27.
- Carpenter, T. M., Sperflage, J. A., Georgakakos, K. P., Sweeney, T., and Fread, D. L. (1999). "National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems." *Journal of Hydrology*, Vol. 224, No. 1-2, pp. 21-44.
- Greenwood, J. A., Landwehr, J. M., Matalas, N. C., and Wallis, J. R. (1979). "Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form." *Water resources research*, Vol. 15, No. 5, pp. 1049-1054.
- Hall, A. J. (1981). *Flash flood forecasting*. World Meteorological



- Organization (WMO), Geneva, Switzerland, pp. 4-48.
- Hapuarachchi, H. A. P., and Wang, Q. J. (2008). *A Review of methods and systems available for flash flood forecasting*. Report for the Bureau of Meteorology, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Dickson, Australia, pp. 7-29.
- Jenkinson, A. F. (1969). *Statistics of extremes*. estimation of maximum flood. No. 98, World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland, pp. 183-228.
- Kim, B. S., Bae, Y. H., and Hong, S. J. (2009). "The application results of the F2MAP model illustrates that the model is suitable for the monitoring and the prediction of a flash flood." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 27, No. 2B, pp. 225-230.
- Kim K. D., Heo J. H., and Cho W. C. (1996). "The selection of appropriate probability distributions for annual maximum rainfall data." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 16, No. 2-4, pp. 335-344.
- Kim, J. H., and Bae, D. H. (2006). "Estimation of threshold runoff on Han river watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 2, pp. 151-160.
- Kim Y. S., Heo J. H., and Ryu H. J. (1995). "Study on applicability of probability weighted moment method to rainfall frequency analysis." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 15, No. 6, pp. 1647-1658.
- Kwon, Y. M., Park, J. W., and Kim, T. W. (2009). "Estimation of design rainfalls considering an increasing trend in rainfall data." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 2B, pp. 131-139.
- Ministry Of Construction and Transportation (MOCT) (2000). *Development of the map of rainfall quantiles in Korea*. pp. 117-146.
- Moon, S. K., and Bae, D. H. (2012). "Assessment and estimation of mountainous flash flood guidance in Han-river watershed." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 10, pp. 664-667.
- National Weather Service (NWS) (1998). *Service assesment and hydraulic analysis: red river of the north 1997 floods*. Natural Disaster Survey Report, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), U.S. Department of Commerce, Silver Spring, Maryland, United States, pp. 16-99.
- Research Center of Flood Defence Technology for Next Generation (2013). *Land transport and maritime R&D report*. Ministry Of Construction and Transportation (MOCT), pp. 24-637.
- Rodriguez-Iturbe, I., and Valdes, J. B. (1979). "The geomorphologic structure of hydrologic response." *Water Resources Research*, Vol. 15, No. 6, pp. 1409-1419.
- Rodriguez-Iturbe, I., Gonzalez-Sanabria, M., and Bras, R. L. (1982). "A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 877-886.
- Seo, D., Lakhankar, T., Cosgrove, B., Khanbilvardi, R., and Zhan, X. (2017). "Applying SMOS soil moisture data into the National Weather Service (NWS)'s Research Distributed Hydrologic Model (HL-RDHM) for flash flood guidance application." *Remote Sensing Applications Society and Environment*, Vol. 8, pp. 182-192.
- Snyder, W. M. (1972). "Fitting of distribution functions by nonlinear least squares." *Water Resources Research*, Vol. 8, No. 6, pp. 1423-1432.
- Sweeney, T. L. (1992). *Modernized area flash flood guidance*. NOAA Technical Report NWS HYDRO 44, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), U.S. Department of Commerce, Silver Spring, Maryland, United States, pp. 5-21.