



예보강우의 시간분포에 따른 청미천 유역의 홍수 확률 평가

Assessment of Flood Probability Based on Temporal Distribution of Forecasted-Rainfall in Cheongmicheon Watershed

이현지^a · 전상민^a · 황순호^a · 최순군^b · 박지훈^c · 강문성^{d,†}

Lee, Hyunji · Jun, Sang Min · Hwang, Soon Ho · Choi, Soon-Kun · Park, Jihoon · Kang, Moon Seong

ABSTRACT

The objective of this study was to assess the flood probability based on temporal distribution of forecasted-rainfall in Cheongmicheon watershed. In this study, 6-hr rainfalls were disaggregated into hourly rainfall using the Multiplicative Random Cascade (MRC) model, which is a stochastic rainfall time disaggregation model and it was repeated 100 times to make 100 rainfalls for each storm event. The watershed runoff was estimated using the Clark unit hydrograph method with disaggregated rainfall and watershed characteristics. Using the peak discharges of the simulated hydrographs, the probability distribution was determined and parameters were estimated. Using the parameters, the probability density function is shown and the flood probability is calculated by comparing with the design flood of Cheongmicheon watershed. The flood probability results differed for various values of rainfall and rainfall duration. In addition, the flood probability calculated in this study was compared with the actual flood damage in Cheongmicheon watershed ($R^2 = 0.7$). Further, this study results could be used for flood forecasting.

Keywords: Flood; clark unit hydrograph method; forested-rainfall; MRC

1. 서론

전 세계적으로 기후변화가 발생함에 따라 국지성 집중호우 등과 같은 극한기상의 발현빈도가 증가하였으며 최근 들어 기상과 관련된 재해가 증가하고 있다 (IPCC, 2013; 2014). 기상재해의 발생빈도와 경향을 살펴보면 호우로 인한 재해가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 이 중 홍수와 관련된 재해가 뚜렷한 증가 경향을 나타내고 있다 (IPCC, 2013; 2014). 이로 인해 홍수 피해도 더 커질 것으로 예상된다. 특히 농촌지역은 도시지역에 비해 홍수에 대한 대책수립이 적어 매년 큰 피해를 입고 있다 (Jun et al., 2013). 홍수에 선제적으로 대응하기 위해서는 홍수 예측이 필수적이다.

현재 대부분의 홍수 예측은 관측 강우자료를 기반으로 수행되고 있다 (Han et al., 2009). 하지만 관측 강우만으로 홍수 예측을 할 경우 첨두유량의 크기와 시간을 강우 관측 이후에 만 알 수 있기 때문에 대비책을 마련할 시간이 충분치 않을 가능성이 크다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 예보강우를 이용하여 예측할 필요성이 있다 (Lee et al., 2011).

홍수 예측에는 시강우량 이상의 고해상도 강우가 요구되고 있어 (Linzar et al., 2011) 예보강우를 홍수 예측에 이용하기 위해서는 강우의 시간적 시간분해가 필수적이다 (Müller and Haberlandt, 2015; 2016). 강우의 시간분포에 따라 홍수 모의 결과가 크게 달라지므로 예보강우의 시간분포를 고려하는 것은 홍수 모의에서 가장 중요하다고 할 수 있다. 강우의 시간분해에는 Huff 분포 등의 확률론적인 방법과 통계학적인 방법 등 다양한 방법이 존재한다.

그 중 Multiplicative Random Cascade (MRC) 모형은 Mandelbrot (1974)이 제안한 프랙탈 이론의 자기복제적인 특징을 이용하는 모형으로 난기류 이론에서 처음 사용되었다. 수문분야에서는 Gupta and Waymire (1993)가 강우장의 공간해상도를 높이기 위한 방법으로 그 사용이 시작되었으며 점차 시간분해로 사용범위가 넓어졌다. 현재 MRC 모형은 강우를 시공간적 분해 모두에 다양하게 적용될 수 있는 편의성이 높은 방법이다 (Kim et al., 2016). 또한 Kim et al. (2016)은 MRC 모형을 이용하여 6시간 강우를 1시간으로 분해하였으며 관측강우와 유사한 강우강도를 발생시키며 강우 시간분해

^a Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^b Researcher, Climate Change and Agroecology Division, National Institute of Agricultural Sciences

^c Research Fellow, Climate Services and Research Department, APEC Climate Center

^d 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: May 22, 2019

Revised: November 01, 2019

Accepted: November 07, 2019

에 충분한 성능을 보이는 것을 확인하였다.

한편 Kang and Moon (2010), Kim et al. (2005)은 예보강우를 이용하여 유출모형을 수행한 바 있다. 두 연구에서는 예보강우를 직접 모형에 입력하여 하나의 확정론적 해석을 제안하고 있어 예측 유량이 실제 유출량과 크게 차이 나는 경우 대비가 어렵다는 문제가 있다. 이를 보완하기 위해 확정론적 해석이 아닌 확률론적 해석을 제공하는 것이 필요하다고 사료된다.

따라서 본 연구에서는 예보강우의 시간분포에 따른 청미천 유역의 홍수 확률의 크기를 비교하고 적용성을 보고자 한다.

II. 재료 및 방법

본 연구의 전체적인 흐름은 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 홍수 확률을 평가하기 위하여 MRC 모형을 이용하여 기상청 동네예보의 6시간 예보강우의 시간상세화를 진행하고자 한다. 지형자료, 하천자료 등 유역특성 자료를 구축하고 Kraven (II) 공식과 Sabol 공식을 이용하여 집중시간과 저류상수를

산정하고 Clark 단위도법을 이용하여 유역유출량을 산정한다. MRC 모형을 이용하여 시간분해를 100번 수행하고 그 결과를 Clark 단위도법에 입력하여 100개의 수문곡선을 도출한다. 수문곡선의 첨두홍수량 값을 모아 이에 대한 확률분포형을 결정하고 매개변수를 추정한다. 추정된 매개변수를 이용하여 첨두홍수량의 확률밀도함수를 도출하고 이를 청미천 하천기본계획 (MOLIT, 2011)에서 산정한 100년 빈도 설계홍수량과 비교하여 청미천 유역의 홍수 확률을 산정 및 비교하고자 한다.

1. 연구대상유역

본 연구의 대상유역은 청미천 유역으로 한강 수계이며 한강 제 1지류로 국가하천과 지방하천으로 나뉘어져있다. 청미천의 유역면적은 595.6 km², 유로연장은 60.7 km, 유역평균경사 (표면경사)는 13.76 %, 하천평균경사 (하상경사)는 1.65 % 이다. 청미천 유역은 경기도 4개의 시 (여주시, 이천시, 안성시, 용인시)와 충청북도 음성군에 걸쳐 위치한다. 유역의 토지 이용 형태는 농경지 257.41 km² (43.22 %), 임야 261.85 km²

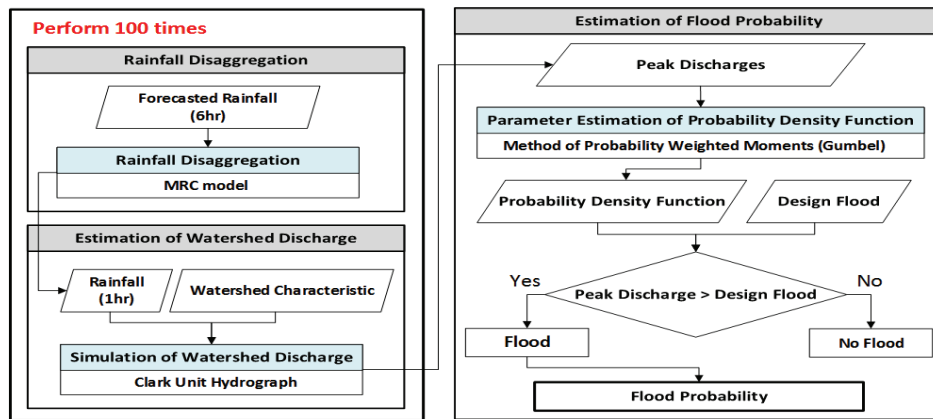


Fig. 1 Schematic diagram

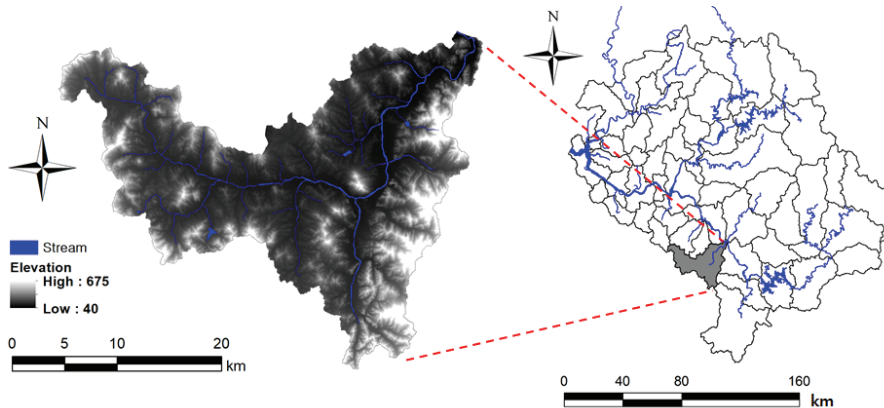


Fig. 2 Location and DEM of the study watershed

(43.96 %)이다. 한편, 청미천 유역은 집중호우에 따른 홍수 피해가 발생한 바 있으며, 2013년 208명의 이재민이 발생하였고 농경지 피해액이 5억여 원에 이르렀던 것으로 집계되었다. Fig. 2는 한강수계 내 청미천 유역의 위치와 유역경계 및 하천, 수치 표고모델 (Digital Elevation Model; DEM)을 나타내고 있다.

2. 예보강우의 시간 분해

본 연구에서는 Müller and Haberlandt (2015)가 제시한 Microcanonical MRC (Multiplicative Random Cascade) 모형을 Kim et al. (2016)이 우리나라의 동네예보 자료에 사용하기 알맞게 6시간 강수에 사용될 수 있도록 변형시킨 MRC 모형을 이용하여 예보강우의 시간 분해를 진행하였다. 이 MRC 모형을 이용하여 6시간 단위 강우자료를 3개의 2시간 단위로 분해하고, 2시간 단위 강우를 2개의 1시간 단위 강우자료로 분해하여 2회의 분해로 1시간 강우자료를 생성하였다. Fig. 3은 본 연구에서 이용한 MRC 모형의 기본원리를 나타낸다. 6시간 단위 강우자료를 3개의 2시간 단위로 분해하는 과정을 수식화하면 다음 식 (1)과 같다.

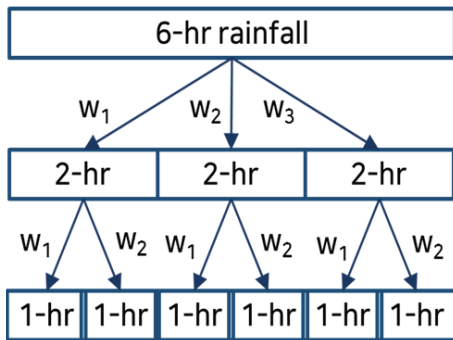


Fig. 3 The concept of MRC model

$$w_1, w_2, w_3 = \begin{cases} 1, 0, \text{ and } 0 & \text{with } P(0/0/1) \\ 0, 1, \text{ and } 0 & \text{with } P(0/0/1) \\ 0, 0, \text{ and } 1 & \text{with } P(0/0/1) \\ \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \text{ and } 0 & \text{with } P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2}) \\ \frac{1}{2}, 0, \text{ and } \frac{1}{2} & \text{with } P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2}) \\ 0, \frac{1}{2}, \text{ and } \frac{1}{2} & \text{with } P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2}) \\ \frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \text{ and } \frac{1}{3} & \text{with } P(\frac{1}{3}/\frac{1}{3}/\frac{1}{3}) \end{cases} \quad (1)$$

여기서, w_1, w_2, w_3 는 각 시간 단위 강우로 분해되는 강우의 비율을 나타내며, $P(0/0/1)$ 은 강우가 3개 중 한 개의 시간 단위 로만 분해될 확률, $P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2})$ 은 두 개로 분해될 확률, $P(\frac{1}{3}/\frac{1}{3}/\frac{1}{3})$ 은 세 개로 분해될 확률이다. 본 모형에서는 세 가지 경우의

$P(0/0/1)$ 과 $P(0/\frac{1}{2}/\frac{1}{2})$ 을 따로 구분하지 않고 통합해 사용하였으며 강우 시간 단위가 두 개 혹은 세 개로 분해될 때는 동일한 비율로 분해되는 것을 가정하였다. 1개의 2시간 단위 강우가 2개의 1시간 강우로 분해되는 경우를 수식화하면 다음 식 (2)와 같다.

$$w_1, w_2 = \begin{cases} 1 \text{ and } 0 & \text{with } P(1/0) \\ 0 \text{ and } 1 & \text{with } P(0/1) \\ x, \text{ and } 1-x & \text{with } P(x/1-x) \end{cases} \quad (2)$$

여기서, w_1, w_2 은 두 개의 셀로 분해되는 강우의 비율, $P(\cdot)$ 은 각 경우의 확률을 의미한다. 강우가 두 개의 셀로 분해되는 비율 x 는 관측자료에서 얻어진 경험적 확률밀도 함수, $f(x)$ 에 의해 결정된다. 강우의 시간적 상관성을 고려하기 위해 본 모형에서는 강우셀 분류방법을 이용하였으며 자세한 내용은 Kim et al. (2016)과 Müller and Haberlandt (2015)에서 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용한 MRC 모형의 매개변수는 Kim et al. (2016)가 산정한 매개변수를 이용하였으며, 이 매개변수는 1시간 단위 관측 강우자료를 이용하여 6시간 단위 강우자료를 만들고 이를 이용하여 산정하고 검증한 것이다.

기상청 동네예보는 6시간 강수량을 구간으로 나누어 제공한다 (0.1 mm 미만, 0.1~1 mm, 1~5 mm, 5~10 mm, 10~20 mm, 20~40 mm, 40~70 mm, 70 mm 이상). MRC 모형에는 6시간 강우로 강수량의 범위가 아닌 강수량 하나의 값이 입력되어야 하는데 본 연구는 홍수해석이 연구의 주목적이므로 예보 강우 범위의 최댓값을 적용하였다. 70 mm 이상의 강수량이 예보된 경우에는 본 연구대상유역의 지배관측소인 이천관측소의 관측 최대 6시간 강수량인 173.5 mm를 적용하였다. 본 연구에서는 72시간 동안의 홍수수문곡선 예측에 초점을 맞추고 MRC 모형을 이용하여 각 강우사상마다 시간분해를 100회 수행하여 100개의 1시간 단위 우량추상도를 생성하였다.

3. 예보기반 유출 모의

본 연구에서는 SCS 유출곡선지수방법을 이용하여 손실량 산정, Clark 단위도법을 이용하여 유역유출량을 산정하였다. 합성단위유출도 방법에는 Clark, SCS, Snyder 단위도법 등이 있으나 일관성과 객관성이 입증되어 홍수량 산정 표준지침에서 권장하는 Clark 단위도법을 채택하였다. 유역유출량 산정에 앞서 Clark 단위도법의 적용성 검토를 위해 실측 강우사상 4개를 이용하여 모형의 보정 및 검증을 수행하였다. 보정 매개변수는 Clark 단위도의 저류상수와 집중시간을 선정하였으며, R^2 , NSE , $PBIAS$ (Percent BIAS), $RMSE$ (Root Mean Square Error) 등의 4가지 통계적 지표를 이용하여 적용성을 검토하였다. 식 (3)~(6)는 본 연구에서 사용한 통계적 지표이다.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [O_i - P_i]^2} \quad (6)$$

여기서 O 는 실측치, \bar{O} 는 실측치의 평균, P 는 모의치, \bar{P} 는 모의치의 평균을 의미한다.

지리정보시스템 (Geographic Information System, GIS)을 이용하여 Clark 단위도법의 입력자료인 유역면적, 유로장 길이, CN (curve number), 하상경사 (무차원)를 산정하였다. 생성된 100개의 우량주상도를 Clark 단위도법에 입력하여 유출모의를 수행하였다. 총 100개의 유출수문곡선을 도출하고 침투홍수량의 최댓값, 최소값, 중간값을 갖는 수문곡선을 도시하였으며 100개의 수문곡선의 범위를 나타내었다.

4. 홍수 확률 산정 기법

100개의 수문곡선의 침투홍수량 값을 모아 가장 적합한 확률분포형을 분석하고 확률분포형을 선정하였다. 이에 본 연구에서는 최대치계열 자료에 다수 사용된 바가 있는 Gumbel 분포와의 적합성을 확인하고, 설계홍수량 산정요령에서 권장

하는 확률가중모멘트법을 이용하여 매개변수를 추정한다. 추정된 확률분포의 매개변수를 이용하여 확률밀도함수와 누가확률밀도함수를 도출한다.

Gumbel 분포는 Type-1 극치분포 (EV1 분포)로 GEV 분포에서 형상매개변수 $\beta=0$ 인 경우이며, 연최대홍수량 혹은 강수량 자료 등과 같은 극치자료의 빈도분석에 많이 이용되고 있다. Gumbel 분포의 확률밀도함수 (probability density function, PDF)는 다음 식 (7)과 같이 표시된다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-x_0}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-x_0}{\alpha} \right) \right], -\infty < x < \infty \quad (7)$$

여기서, $f(x)$ 는 침투홍수량 값이 x 일 때의 확률, x 는 100개의 침투홍수량 값, α 는 $\alpha > 0$ 인 축척매개변수이며, x_0 는 최대확률 (mode)이 발생하는 위치를 표시하는 위치매개변수이다. 위 식 (7)을 적분하면 다음 식 (8)과 같은 누가확률분포함수 (cumulative distribution function, CDF)를 얻을 수 있다.

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-x_0}{\alpha} \right) \right] \quad (8)$$

여기서, $F(x)$ 는 x 까지의 누적 확률을 나타낸다.

신뢰성 해석에서는 설계변수의 통계적 특성을 고려하여 시스템의 위험도를 파괴확률 (probability of failure)로 산정하여 나타낸다. 설계변수를 하중요소 (load factor, L)와 저항요소 (resistance factor, R)로 설정하여 시스템의 안전과 파괴를 판단한다. Fig. 4는 신뢰성 해석에서의 파괴확률 개념도를 보여주고 있다. 하중요소와 저항요소의 통계적 특성을 고려하면 하중요소와 저항요소의 확률밀도함수가 겹치는 면적이 발생하며, 겹쳐진 면적은 시스템 파괴확률의 상한값을 의미한다 (Ichikawa, 1993). 본 연구에서는 Clark 단위도법을 이용하여 산정한 침투홍수량을 하중요소로, 청미천 하천기본계획 (MOLIT, 2011)에서 산정한 100년 빈도 설계홍수량 ($=2,861 \text{ m}^3/\text{s}$)을 저항요소로 설정하여 홍수 확률을 산정하였

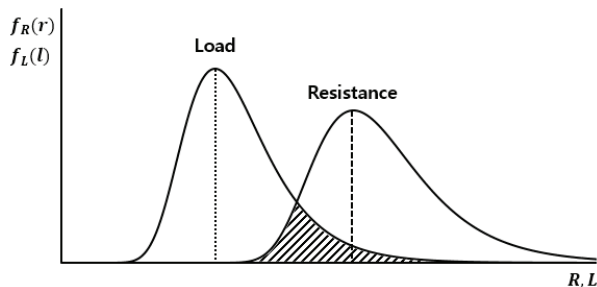


Fig. 4 Schematic of the probability of failure (Yang et al., 1999)

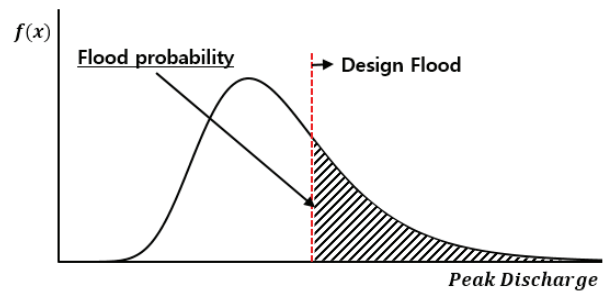


Fig. 5 Schematic of the flood probability

다. Fig. 5는 첨두홍수량이 설계홍수량을 초과하는 확률을 산정하여 홍수 확률로 제시하고 있다. 본 연구에서는 첨두홍수량의 통계적인 특성을 분석하고 설계홍수량은 확정적인 값을 가지는 인자로 가정하여 홍수 확률을 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 기상 예보자료

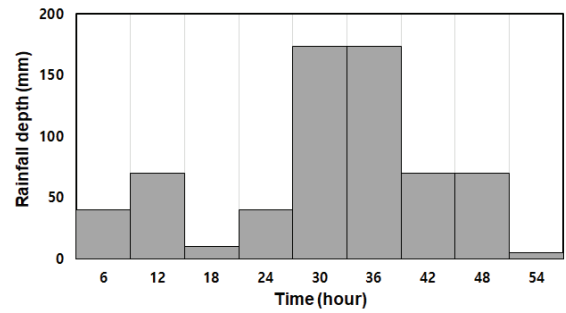
기상청 동네예보는 2013년부터 제공되기 시작하여 본 연구에서 분석하고자 홍수를 발생시킬만한 강우사상이 없는 상황이다. 그래서 본 연구에서는 관측자료를 이용하여 예보강우 형식처럼 강우 자료를 변환하여 사용하였다. Table 1과 같이 관측자료의 6시간 단위 강우량의 범위에 따라 하나의 값으로 변환하도록 하였다. 강우량의 범위는 동네예보의 강우량 범위를 차용하였다. 2000년부터 2018년까지의 모든 강우사상 중 강우량이 큰 10개의 강우사상에 대해 분석을 수행하였으며 Table 1를 참고하여 6시간 단위 강우사상으로 변환하였다. 그 결과는 Table 2와 같다. 총강우량이 큰 순서대로 이름을 붙여 SE1이 10개의 강우사상 중 가장 많은 총강우량을 가지며 SE10이 10개의 강우사상 중 가장 적은 총강우량을 가진다.

2. MRC 모형을 이용한 강우의 시간분해

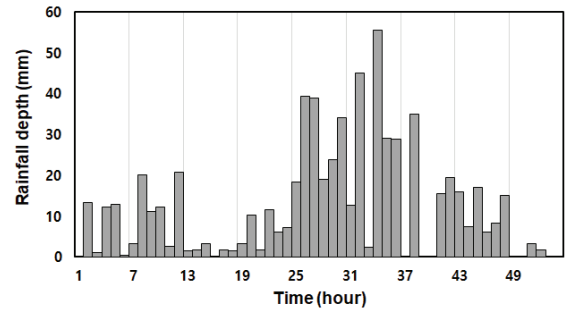
Kim et al. (2016)의 MRC 모형을 이용하여 각 강우사상별 강우 시간분해를 100회 수행하여 1시간 단위 우량추상도를 100개 생성하였다. 본 연구에 사용된 MRC 모형의 매개변수는 Kim et al. (2016)에서 산정한 매개변수로 1973년부터 1994년까지의 이천기상관측소를 포함한 기상청 중관관측점 59개소의 시강우자료를 6시간으로 집계하여 산정한 값이다. Fig. 6 (a)는 MRC 모형의 입력자료로 사용된 강우를 나타내며, Fig. 6 (b)는 MRC 모형 구동 결과를 나타낸다. 6시간 단위 강우가 1시간 단위로 시간분해된 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Converted rainfall value

Actual rainfall range for 6 hours (p, mm)	Converted rainfall (mm)
$p < 0,1$	0
$0,1 \leq p < 1$	1
$1 \leq p < 5$	5
$5 \leq p < 10$	10
$10 \leq p < 20$	20
$20 \leq p < 40$	40
$40 \leq p < 70$	70
$70 \leq p$	173,5



(a) Input (6-hr rainfalls)



(b) Result (1-hr rainfalls)

Fig. 6 The input and result of the MRC model (SE1)

Table 2 The duration and total rainfall of each storm events

Storm event	Date	Duration (hr)	Total rainfall (mm)	
			Actual rainfall	Converted rainfall
SE1	2002-08-06	54	405,5	652,0
SE2	2006-07-15	72	314,0	498,5
SE3	2009-07-11	30	306,0	393,0
SE4	2006-07-26	72	251,5	345,0
SE5	2012-07-05	36	261,0	288,5
SE6	2000-07-22	18	241,0	367,0
SE7	2018-08-26	60	238,7	301,0
SE8	2011-07-27	18	206,0	348,0
SE9	2013-07-21	24	202,9	358,0
SE10	2010-09-21	30	187,3	195,5

3. Clark 단위도법

유역 유출량 산정에 사용되는 유역특성인자 산정을 위하여 수치지도, 토지피복도, 토양도 자료를 사용하여 지형자료를 구축하였다. 국토지리정보원의 1:5,000 수치지도를 이용하여 수치표고모형 (Digital Elevation Model; DEM) 자료를 구축하였다. 토지피복도는 환경부의 1:25,000 중분류 토지피복도 자료를 이용하였으며, 토양도는 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도 자료를 이용하였다. 토지피복도와 토양도를 이용하여 유출곡선지수 (curve number, CN)값을 산정하였다. 우리나라 논외의 경우 홍수기에는 담수상태이므로 임상준 등 (1997), 국토해양부 (2012)에서 제시된 바와 같이 토양군에 관계없이 CN(II) (AMC-II 조건)를 79로 적용하였다. Table 3에 청미천

유역의 토지이용을 나타내었으며 청미천 유역의 토지피복도, 토양도는 Fig. 7과 Fig. 8과 같다. 유역의 DEM, 토지이용도, 토양도를 이용하여 유역특성 분석을 수행하였다. Clark 단위도법의 입력자료로 이용되는 청미천 유역의 유역특성은 Table 4와 같다.

Clark 단위도법을 사용하여 유역 유출량을 산정하기에 앞서 보정 및 검정을 수행하였다. 2015년과 2017년 2개의 강우사상에 대하여 보정을 수행하였으며 2018년 2개의 강우사상에 대하여 검정을 수행하였다. 보정에는 청미천 말단에 위치한 국토교통부 수위관측 지점인 여주시 (삼합교)의 수위를 이용하여 수위-유량 관계곡선식 (MLTM, 2009)을 이용하여 유량으로 환산하여 보정을 진행하였으며, 수평분리법을 이용하

Table 3 Land use of the study watershed

Land use	Forest	Agricultural Land	Used Area	Grass	Water	Other
Area (km ²)	261.85	257.41	34.12	15.40	13.01	13.81
Percentage (%)	43.96	43.22	5.73	2.59	2.18	2.32

Table 4 Characteristics of the Cheongmi stream watershed

Item	Value	
Area (km ²)	595.6	
Length (km)	60.7	
Basin slope (%)	13.76	
Stream gradient (%)	0.16	
Impervious (%)	3.47	
Curve Number (CN)	AMC(I)	50.7
	AMC(II)	71.0
	AMC(III)	84.9

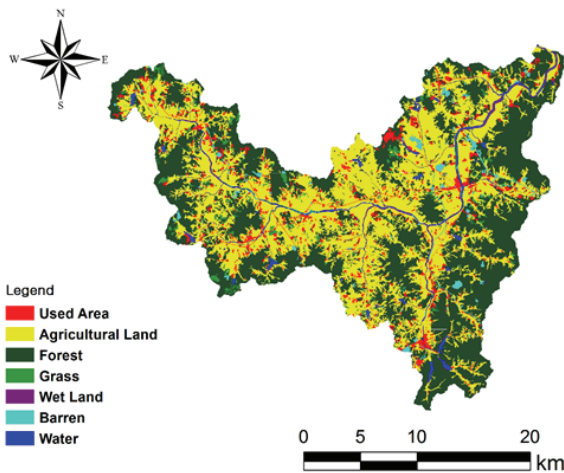


Fig. 7 The land cover for the study watershed

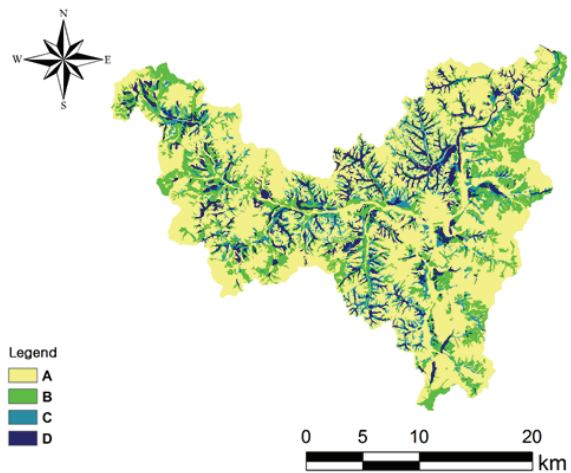


Fig. 8 Soil map of the Cheongmi stream watershed

여 기저유출을 분리하였다. 보정 결과를 도식적 방법과 통계적 지표를 사용하여 나타내었으며, 보정결과 모의치가 실측치의 경향성을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용한 여주시 (삼합교) 수위-유량 관계곡선식은 Table 5와 같

다. 통계적 지표를 이용하여 나타낸 보정 및 검정 결과는 Table 6과 같다. 시계열그래프를 이용하여 나타낸 보정 및 검정 결과는 Fig. 9, Fig. 10과 같다.

Table 5 Stage–discharge relation curve at Samhap

Station	Stage–discharge relation curve (Q : m^3/s , h : m)	Range
Samhap	$Q = 57.710 \times (h - 0.350)^{2.270}$	$0.35 \leq h \leq 1.00$
	$Q = 62.963 \times (h - 0.400)^{2.119}$	$1.00 < h \leq 3.60$
	$Q = 179.603 \times (h - 0.500)^{1.252}$	$3.60 < h \leq 9.00$

Table 6 Statistics of calibration results

Statistics	Calibration		Validation	
	SE20150724	SE20170709	SE20180701	SE20180705
R^2	0.98	0.97	0.94	0.92
NSE	0.94	0.96	0.90	0.92
$PBIAS$ (%)	0.02	0.07	0.07	0.07
$RMSE$ (m^3/s)	12.52	30.54	44.24	27.10

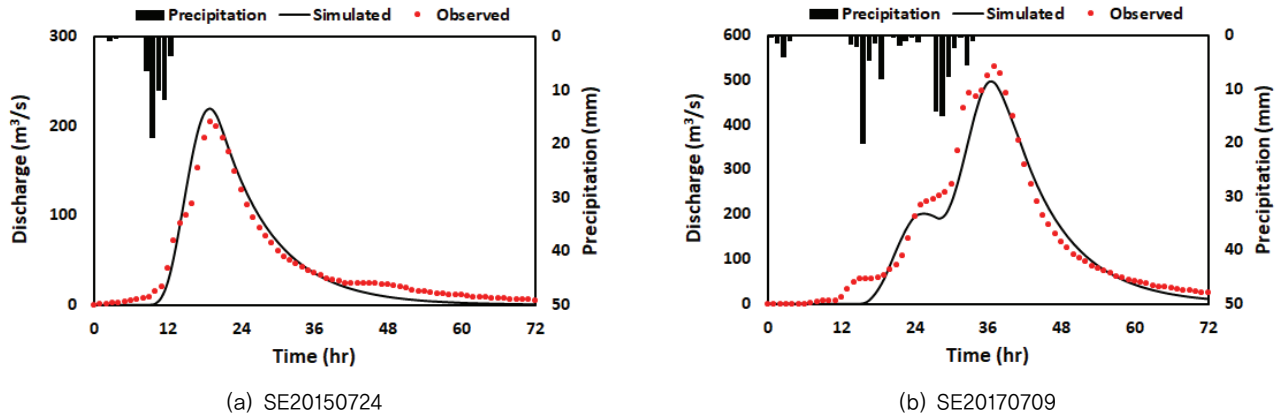


Fig. 9 Comparison of the observed with the simulated runoff (Calibration)

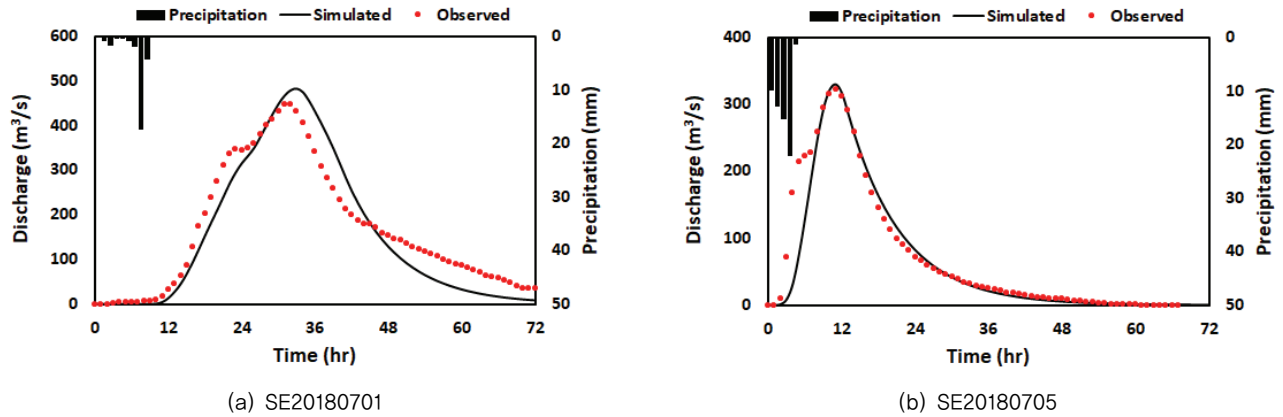


Fig. 10 Comparison of the observed with the simulated runoff (Validation)

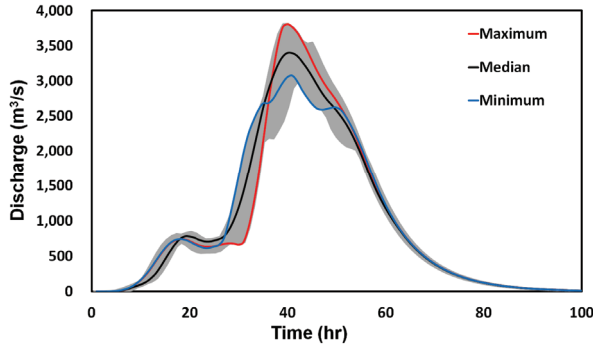


Fig. 11 The hydrograph of SE1

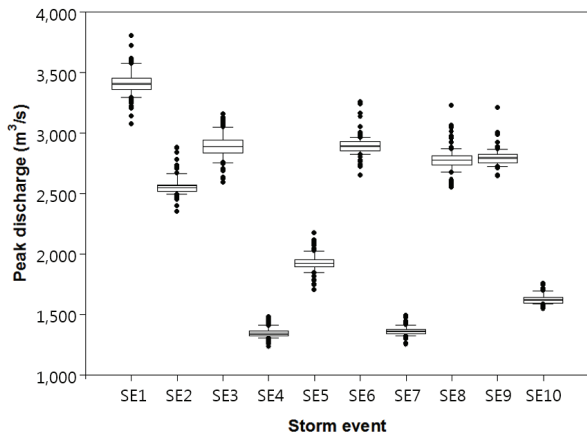


Fig. 12 The box plot of the peak discharge

4. 예보강우에 따른 유출수문곡선 도출

강우사상 별 100개의 강우우량주상도를 이용하여 Clark 단위도법에 입력하여 청미천 유역의 유역유출량을 산정하였다. Fig. 11에 100개의 첨두홍수량 중 최솟값, 중간값, 최댓값을 갖는 수문곡선과 100개의 수문곡선의 범위를 도시하였다. 수

문곡선 도시 결과 강우의 시간적 분포에 따라 수문곡선의 형태가 다양한 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 100개의 유출수문곡선의 첨두홍수량에 대해 box plot을 도시한 것이다. 전반적으로 강우량이 클수록 첨두홍수량의 범위가 더 넓은 것을 확인할 수 있다.

5. 홍수 확률 산정

100개의 첨두홍수량 값을 모아 최대치계열 자료에 다수 사용된 바가 있는 Gumbel 분포와의 적합성을 확인하고, 설계홍수량 산정요령에서 권장하는 확률가중모멘트법을 이용하여 매개변수를 추정한다. 적합도 검정 결과 모든 강우사상에 대하여 첨두홍수량이 Gumbel 분포를 따르는 것으로 확인되었으며, 확률가중모멘트법을 이용하여 확률분포의 매개변수를 추정하였다. 추정된 Gumbel 분포의 위치매개변수에 홍수량 산정 표준치침에 따라 산정한 기저유량 값을 더해 기저유량을 고려한 최종 매개변수를 산정하였다. 최종 산정된 확률분포의 매개변수를 이용하여 확률밀도함수와 누가확률밀도함수를 도시하였다. 산정된 매개변수와 각 강우사상별 산정된 홍수 확률은 Table 7과 같다. 산정된 매개변수를 이용하여 도출한 첨두홍수량의 첨두홍수량의 PDF와 CDF는 Fig. 13과 Fig. 14와 같다.

본 연구에서 산정된 홍수 확률 결과와 재해연보의 홍수 피해를 입은 이재민 수를 비교하여 적용성을 평가하였다. 그 결과 R^2 가 0.7 값을 나타내었다. SE1의 경우 홍수가 일어날 확률이 100 %로 나타났으며, 실제 청미천 유역에 2002년 홍수로 인해 1,477명의 이재민이 발생했다. 비교적 큰 값의 홍수확률을 나타냈던 SE3 (2009년)의 경우에도 464명의 이재민을 발생시켰으며, SE6 (2000년)의 경우는 87명의 비교적 적은 이재민을 발생시켰지만, 홍수피해액이 약 181억 원으로 집계되면서 분석한 10개의 강우사상 중 가장 큰 홍수피해액을 발생시켰다.

Table 7 The parameter and flood probability

Storm event	Location parameter	Scale parameter	Flood probability (%)
SE1	3,366.5	87.9	100.0
SE2	2,552.1	60.0	0.5
SE3	2,841.0	86.4	54.8
SE4	1,356.9	33.4	0.0
SE5	1,895.7	58.0	0.0
SE6	2,863.2	61.4	64.5
SE7	1,348.4	30.0	0.0
SE8	2,737.8	76.3	18.1
SE9	2,769.9	59.0	19.3
SE10	1,610.8	31.1	0.0

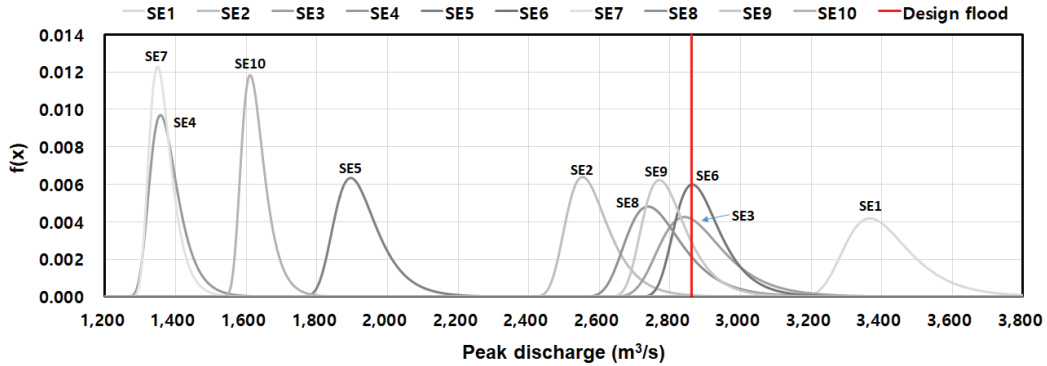


Fig. 13 The probability density function for the peak discharge

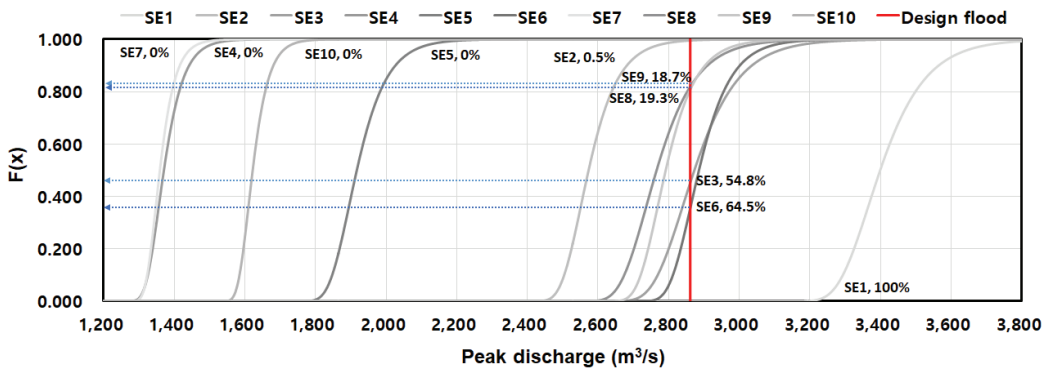


Fig. 14 The cumulative distribution function for the peak discharge

홍수 확률 분석 결과 총강우량이 많다고 하여 높은 홍수 확률을 나타내지는 않는 것으로 나타났다. Fig. 13을 보면 강우사상에 따라 확률밀도함수의 위치 및 형태가 다양하게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. SE1의 경우는 100 %의 홍수 확률을 나타내었으며 10개의 강우사상 중 5개의 강우사상이 0 %의 홍수 확률을 나타내었다. SE4와 SE8의 변환된 강우의 총강우량은 비슷한 값을 가지고 있으나 홍수 확률은 18 %가 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 강우 지속시간이 72시간과 18시간으로 서로 크게 차이가 나기 때문으로 사료된다. 또한 SE6과 SE8은 같은 강우 지속시간을 가지며 총 강우량도 약 20 mm 정도의 차이만 가지고 있다. 그러나 홍수 확률 분석 결과 SE6이 SE8보다 약 46 %가 큰 홍수 확률을 나타냈다. 이는 SE6의 20 mm가 선행강우 역할을 하여 더 높은 홍수 확률을 발생시킨 것으로 사료된다. 10 % 이상의 홍수 확률을 나타내었던 강우사상들은 6시간동안 70 mm 이상 비가 내리는 경우가 연속해서 두 번 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 총강우량보다는 집중호우 등과 같이 짧은 시간에 많은 강우가 집중되어 내리게 되면 더 높은 홍수 위험이 있다는 것을 알 수 있다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 청미천 유역을 대상으로 예보강우의 시간분포에 따른 홍수 확률을 평가하였다. 기상청 동네예보 자료가 생성된 이후로 홍수 분석을 수행할 만한 강우사상이 적어 실제 관측 강우사상에 대하여 동네예보 형식처럼 강우자료를 변환한 후 분석을 수행하였다. 2000년부터 2018년까지의 강우사상 중 총강우량이 큰 10개의 강우사상에 대하여 홍수 확률 분석을 수행하였으며, MRC 모델을 이용하여 6시간 단위의 강우자료를 1시간 단위의 강우자료로 분해하고 이를 각 강우사상에 대하여 100회 수행하여 100개의 우량주상도를 도출하였다. 이를 Clark 단위도법에 입력하여 청미천 유역의 수문곡선을 도출하고 첨두홍수량을 산정하였다. 100개의 첨두홍수량 값을 이용하여 Gumbel 분포의 매개변수를 추정하였으며 확률밀도함수를 도출하여 청미천 유역의 설계홍수량 값과 비교하여 홍수 확률을 분석하였다.

본 연구에서 산정된 홍수 확률 결과와 재해연보의 홍수 피해를 비교하였으며 그 결과 R^2 가 0.7 값을 나타내었다. 또한 홍수 확률 분석 결과 총강우량이 많다고 하여 높은 홍수 확률을 나타내지는 않는 것으로 나타났다. 강우량이 같다고 해도

강우 지속시간에 따라 홍수 확률이 다르게 나타났으며, 적은 양의 강우량 차이라도 그 강우량이 선행강우의 역할을 하게 되는 경우 더 큰 홍수 확률을 나타내었다. 또한, 총강우량보다는 집중호우 등과 같이 짧은 시간에 많은 강우가 집중되어 내리게 되면 더 높은 홍수 위험이 있는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 실제 예보되었던 강우를 이용한 것이 아닌 관측 강우자료를 이용하여 예보 강우 형식으로 변환하여 연구를 진행하였다. 실제 예보강우를 이용하여 연구를 수행하지 못한데에 한계가 있으며, 예보를 조건으로 하는 실강우량의 발생확률을 고려하지 않고 예보강우의 최댓값을 적용하였기에 동네예보 강수량 범위의 불확실성을 고려하지 못한 한계가 있다. 이는 추후 예보강우 자료가 더 많이 축적된다면 이를 이용하여 모형의 검증에 할 수 있을 것으로 사료된다.

또한 본 연구에서는 예보강우의 불확실성과 이에 따른 확률만을 고려하여 홍수 확률을 산정하였으며, 본 연구에서 서술된 홍수 확률은 강우의 불확실성만을 고려한 확률이다. 매개변수의 불확실성을 고려하지 못하였으며, 확률 산정시 저항요소로 청미천의 100년 빈도 설계홍수량 확정적인 값을 적용하는 등 다른 요소는 고려하지 못한 한계가 있다.

본 연구는 불확실성을 띠고 있는 기상청 동네예보자료를 이용하여 홍수 확률을 산정하고자 하였으며 이는 많은 불확실성을 내포할 수 있다. 그러나 이렇게 예보강우가 불확실성을 띠는 만큼 예보강우를 이용한 홍수 확률 산정은 선제적인 홍수 예보 및 대책을 세우는데 필수적이며, 피해를 저감할 수 있는 기회를 제공할 수 있게 한다. 또한 향후 더 정확하게 강우가 예보된다면 더 합리적이고 현실적인 홍수 예측 및 대응이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ0134142018)의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- Gupta, V. J., and E. C. Waymire, 1993. A statistical analysis of mesoscale rainfall as a random cascade. *Journal of Applied Meteorology* 32(2): 251-267. doi:10.1175/1520-0450(1993)032<0251:ASAOMR>2.0.CO;2.
- Han, M. S., C. S. Kim, H. S. Kim, and H. Kim, 2009. A study on the revised methods of missing rainfall data for real-time forecasting system. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(2): 131-139 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2009.42.2.131.
- Ichikawa, M., 1993. A meaning of the overlapped area under probability density curves of stress and strength. *Reliability Engineering and System Safety* 41: 203-204. doi:10.1016/0951-8320(93)90033-U.
- 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.
- 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 York, NY, USA.
- Jun, S. M., M. S. Kang, I. Song, S. H. Hwang, K. Kim, and J. Park, 2013. Effect of agricultural reservoir rehabilitation on their flood control capacities. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6): 57-68 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2013.55.6.057.
- Kang, B., and S. Moon, 2010. Realtime streamflow prediction using quantitative precipitation model output. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 30(6B): 579-587 (in Korean).
- Kim, J. H., W. J. Yoon, and D. H. Bae, 2005. Real-time application of streamflow forecast using precipitation forecast. *Journal of Korea Water Resources Association* 38(1): 11-23 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2005.38.1.011.
- Kim, D., S. Yoon, M. S. Kang, and K. Lee, 2016. Applicability of a multiplicative random cascade model for disaggregation of forecasted rainfalls. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(5): 91-99 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2016.58.5.091.
- Lee, S. J., C. S. Jeong, J. C. Kim, and M. H. Hwang, 2011. Lon-term streamflow prediction using ESP and RDAPS model. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(12): 967-974 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2011.44.12.967.
- Linznar, P., J. Lomotowski, and D. E. Rupp, 2011. Random cascade driven rainfall disaggregation for urban hydrology: An evaluation of six models and a new generator.

- Atmospheric Research* 99: 563-578. doi:10.1016/j.atmosres.2010.12.014.
12. Mandelbrot, B., 1974. Intermittent turbulence in self-similar cascades-divergence of high moments and dimension of carrier. *Journal of Fluid Mechanics* 62(2): 331-358. doi: 10.1017/S0022112074000711.
 13. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT), 2011. Cheongmi stream river master plan report (in Korean).
 14. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2009. Hydrological annual report in Korea (in Korean).
 15. Müller, H., and U. Haberlandt, 2015. Temporal rainfall disaggregation with a cascade model: From single-station disaggregation to spatial rainfall. *Journal of Hydrologic Engineering* 20(11): 04015026. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001195.
 16. Müller, H., and U. Haberlandt, 2016. Temporal rainfall disaggregation using a multiplicative cascade model for spatial application in urban hydrology. *Journal of Hydrology* 556: 847-864. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.01.031.
 17. Yang, Y. S., Y. S. Suh, and J. O. Lee, 1999. *Structural reliability engineering*. Seoul: Seoul National University Press (in Korean).
 18. Yoon, Y. N., 2007. *Hydrology*. Seoul: Cheongmoongak (in Korean).