



## Generation of runoff ensemble members using the shot noise process based rainfall-runoff model

Kang, Minseok<sup>a</sup> · Cho, Eunsaem<sup>b</sup> · Yoo, Chulsang<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Ph.D Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Ph.D Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

Paper number: 19-067

Received: 12 August 2019; Revised: 28 August 2019; Accepted: 28 August 2019

### Abstract

This study proposes a method to generate runoff ensemble members using a rainfall-runoff model based on the shot noise process (hereafter the rainfall-runoff model). The proposed method was applied to generate runoff ensemble members for three drainage basins of Daerim 2, Guro 1 and the Jungdong, whose results were then compared with the observed. The parameters of the rainfall-runoff model were estimated using the empirical formulas like the Kerby, Kraven II and Russel, also the concept of modified rational formula. Gamma and exponential distributions were used to generate random numbers of the parameters of the rainfall-runoff model. Especially, the gamma distribution is found to be useful to generate various random numbers depending on the pre-assigned relationship between mean and standard deviation. Comparison between the generated runoff ensemble members and the observed shows that those runoff ensemble members generated using the gamma distribution with its standard deviation twice of the mean properly cover the observed runoff.

**Keywords:** Runoff ensemble, Shot noise process, Gamma distribution, Rainfall-runoff model

## Shot Noise Process 기반 강우-유출 모형을 이용한 유출 앙상블 멤버 생성

강민석<sup>a</sup> · 조은샘<sup>b</sup> · 유철상<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사과정, <sup>b</sup>고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사과정,

<sup>c</sup>고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수

### 요 지

본 연구에서는 shot noise process 기반 강우-유출 모형(이하 강우-유출 모형)을 이용하여 유출 앙상블 멤버를 생성하는 방법을 제안하였다. 아울러 제안된 방법을 적용하여 대림 2, 구로 1, 중동 빗물펌프장 등 3개 배수구역에 대한 유출 앙상블 멤버를 생성하고, 이를 관측 유출량과 비교해 보았다. 강우-유출 모형의 매개변수는 Kerby 공식, Kraven II 공식, Russel 공식 및 수정합리식의 개념을 이용하여 추정하였다. 강우-유출 모형 매개변수의 난수 발생을 위해서는 감마분포와 지수분포를 이용하였다. 특히, 감마분포의 경우에는 평균과 표준편차의 관계를 어떻게 설정하느냐에 따라 다양한 난수 발생이 가능함을 확인하였다. 생성된 유출 앙상블과 관측 유출량과의 비교 결과, 표준편차가 평균의 두 배인 감마 분포를 이용하여 만든 유출 앙상블이 관측 유출량을 가장 적절히 포괄함을 확인하였다.

**핵심용어:** 유출 앙상블, shot noise process, 감마분포, 강우-유출모형

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-3290-3321

E-mail: envchul@korea.ac.kr (C. Yoo)

## 1. 서론

기후변화로 인해 국지적으로 짧은 시간에 집중하여 발생하는 강우의 빈도가 증가하면서 도시유역에서의 침수 피해가 증가하고 있다(Schreider *et al.*, 2000; Bae and Kim, 2007; Lee *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2016; Kang and Yoo, 2018; Kim *et al.*, 2018a). 특히, 도시유역의 경우에는 불투수면의 비율이 높기 때문에 짧은 도달시간, 첨두 유량의 증가 등의 현상이 나타나고, 이로 인한 침수 피해가 가중되어 나타난다(Konrad, 2003; MLTMA, 2009; Jo, 2014; Song *et al.*, 2015; Hofmann and Schüttrumpf, 2019). 침수로 인한 피해를 저감하기 위해서는 근본적으로 예측 강우의 정확성이 개선되어 효과적인 예경보가 가능할 수 있어야 한다(MLTMA, 2009; Kim *et al.*, 2018b).

그러나 강우-유출 해석과정의 불확실성도 문제로 제기된다. 강우-유출 과정이 근본적으로 비선형이기 때문에, 특히, 강우강도에 따른 집중시간의 차이가 크다. 이는 첨두 시간 및 첨두 유량에 큰 영향을 미친다. 대부분의 작은 도시유역에서 관측이 충분히 이루어지기 어렵다는 점은 또 다른 문제이다. 이런 경우 유출모형의 매개변수 결정을 위해 경험식을 사용할 수밖에 없는데 이 과정에 또 다른 불확실성이 추가되게 된다. 결과적으로 유출해석 결과는 상당한 오차를 보일 수밖에 없는 구조적인 문제를 안게 된다. 이런 문제를 해결하기 위한 방편으로 도입된 것이 확률적 홍수예측이다. 발생 가능한 여러 시나리오를 생성하고(즉, 유출 앙상블) 이를 이용하여 확률적으로 발생 가능한 미래 유출량을 예측하는 것이다. 이 방법은 예측치에 대한 불확실성도 함께 제공할 수 있는 장점이 있다.

국내에서는 Lee *et al.* (2010)이 용담유역을 대상으로 다양한 기상 예측 자료를 활용하여 유출 앙상블 멤버를 생성한 바 있으며, Yu *et al.* (2017)은 중규모 모델의 수치예보자료를 이용하여 산청 유역에 대한 강우 앙상블 및 유출 앙상블 멤버를 모의하였다. Lee *et al.* (2018)도 중랑천 유역을 대상으로 레이더 기반 강우와 블렌딩 기법을 이용하여 유출 앙상블 멤버를 모의하고 이를 기반으로 최적 유출 수문곡선을 산정하였다. 국외에서도 다양한 방법으로 유출 앙상블 멤버를 생성하여 미래 혹은 다양한 조건에 대한 유출량을 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Gouweleeuw *et al.* (2005)은 ECMWP (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) NWP (Numerical Weather Prediction) 모형을 이용하여 다양한 강수 예측 결과를 만들고 이를 LISFLOOD 모형에 입력하여 유럽 Meuse 강 유역에 대한 유출 앙상블 멤버를 생성하였다. Komma *et al.* (2007)는 호주의 Kamp 유역에 대한 예측 강수의 특성을 파악하고 분포형 강우-유출 모형으로 생성한 유출 앙상블 멤버를 검토하였다. Nester *et al.* (2012)는 강수

예측 결과의 오차를 고려하여 오스트리아와 독일에 위치한 43개 유역에 대한 유출 앙상블 멤버의 적용성을 검증하였다. Najafi and Moradkhani (2015)는 8개의 기후 모형을 이용하여 생성한 기후 변화 시나리오에 따른 미국 Columbia 강 유역의 유출 앙상블 멤버를 생성하였다. Kneis *et al.* (2017)은 레이더 기반 강우 예측 자료를 만들고, 이를 이용하여 필리핀의 Marikina 강 유역의 유출 앙상블 멤버를 유도하였다.

이상과 같은 연구들은 대부분 강우 앙상블 멤버를 강우-유출 모형에 적용하여 유출 앙상블 멤버를 생성하는 구조로 되어 있다. 그 적용도 대부분 중규모 이상의 유역으로 되어 있는 특징이 있다. 그 이유는 첫째, 대상 유역에 관측자료가 충분하여 강우-유출 모형을 검보정 하기 유리하다는 점이다. 즉, 대상 유역을 대표하는 강우-유출 모형을 고정할 수 있다는 장점이 있다. 결과적으로 강우 앙상블 멤버만 생성하면 이를 주어진 모형에 바로 적용하여 유출 앙상블 멤버를 만들 수 있는 것이다. 두 번째는 유역의 저류효과로 인해 강우 앙상블 멤버에 포함된 오차의 규모를 상당 부분 완화시킬 수 있기 때문이다. 즉, 생성된 유출 앙상블 멤버들이 이상치 수준의 결과로 나타나는 것은 어려운 것이다. 그러나 이러한 장점은 특히 작은 도시유역에서는 발휘되기 어렵다. 이는 기본적으로 도시 유역의 경우 저류효과가 적어 유출이 강우에 지배되는 양상을 보이기 때문이다. 또한, 유출 모형의 매개변수를 확정할 충분한 관측자료가 없는 경우가 대부분이기도 하다. 따라서 이런 문제를 완화시키기 위해서는 강우-유출 과정의 불확실성이 충분히 반영될 수 있도록 하는 것이 중요하다. 즉, 강우-유출 모형의 매개변수를 다양화하는 방식으로 모형 자체에 변동을 주고, 이를 통해 다양한 유출 앙상블 멤버가 구성되도록 하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 특히 도시유역에서 강우-유출 모형의 불확실성을 반영하는 앙상블 멤버 생성의 필요성을 증명하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 도시유역 강우-유출 해석에 적용성이 검증된 Kang and Yoo (2018)의 shot noise process 기반의 강우-유출 모형을 선택하여 유출 앙상블 멤버 생성에 이용하였다. Shot noise process는 Bernier *et al.* (1970)이 수문 분야에 처음 적용되었으며, Weiss (1973; 1977)에 의해 적용성이 검증되었다. 이후로 다양한 연구에서 장기 및 홍수 유출 해석에 적용되었다(O'Connell and Jones, 1979; Todorovic and Woolhiser, 1987; Hutton, 1990; Cowpertwait and O'Connell, 1992; Claps and Murrone, 1994; Murrone *et al.*, 1997; Claps *et al.*, 2005; Morlando *et al.*, 2016). 본 연구에서는 연구의 대상 유역으로 서울특별시 소재 3개의 빗물펌프장 배수유역을 선정하였다. 이들 3개 유역은 유입량 자료 형식으로 관측자료가 있어 적용성 평가가 가능한 곳이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 Shot noise process 기반 강우-유출 모형

Shot noise는 다이오드나 트랜지스터와 같은 전자장치에서 발생하는 잡음(noise)의 한 형태이다. 이 noise는 발생 시점에서 최댓값을 가지고 발생 시점 이후부터는 지수적으로(exponentially) 감소하는 특징을 가진다. Shot noise process는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$O(t) = \begin{cases} O_0 e^{-\frac{(t-t_0)}{K}}, & (t \geq t_0) \\ 0, & (t < t_0) \end{cases} \quad (1)$$

여기서,  $O_0$ 은 첨두치,  $K$ 는 감쇄상수,  $t_0$ 는 shot noise의 발생 시점을 나타낸다. 만일 shot noise의 발생이 시간적으로 연속적으로 나타나게 되면 결과적으로 나타나는 신호는 개개 shot noise들의 합으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$O(t) = \sum_i O(t_i) = \sum_i O_{0i} e^{-\frac{t-t_{0i}}{K_i}} \quad (2)$$

수문분야에서 shot noise process는 Bernier *et al.* (1970)에 의해 처음 도입되었으며, 이후 장기유출모의에 주로 적용되었다(Weiss, 1977; Cowpertwait and O’Connell, 1992; Murrone *et al.*, 1997; Claps *et al.*, 2005). 이와 같은 모형들은 대개 일 단위의 해석모형으로, 일 단위의 강우가 입력으로 주어지면 Eq. (2)와 같이 유역 출구에서의 유출 결과를 제공하는 것으로 알려져 있다. 이러한 적용에 있어 shot noise process의 감쇄상수  $K$ 는 유역의 저류상수로 대체되고, 첨두치  $O_0$ 은 일

강우량의 규모와 유역의 유출계수를 반영하여 결정된다. 결과적으로 유출결과는 아래 Eq. (3)과 같이 정리된다.

$$O(t) = \sum_i O_{0i} e^{-\frac{t-t_{0i}}{K}} \quad (3)$$

Kang and Yoo (2018)은 소유역 분할이 세세하게 되어 있거나 도시유역에서와 같이 배수분구 또는 블록 단위의 소유역 분할을 고려할 수 있는 홍수유출 해석모형을 제안하였다. 일반적으로 유역 내에서 소유역들은 병렬 또는 직렬로 서로 연결되게 되는데, 이러한 연결을 고려하면 shot noise process의 매개변수를 조절할 수는 없는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 Kang and Yoo (2018)은 개개 소유역에서의 유출이 독립적으로 유역출구까지 도달하는 것으로 가정하였다. Fig. 1은 일반적인 강우유출 과정과 본 연구에서 가정한 강우유출 과정을 비교한 것이다.

즉, 각 소유역에서의 유출이 shot noise process를 따른다고 가정하면, 단위 지속기간동안의 단위 우량으로 인한 유역 전체에서의 유출  $U(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$U(t) = \sum_n P_n e^{-\frac{t-t_{cn}}{K_n}} \quad (4)$$

위 Eq. (4)에서  $n$ 는 소유역을,  $P_n$ 은 단위 우량에 의해 발생하는 해당 소유역의 첨두치,  $t_{cn}$ 는 각 소유역에서 유역 출구까지의 도달시간,  $K_n$ 는 각 소유역 출구에서 유역출구까지 도달하는 과정을 대표하는 감쇄상수를 나타낸다. 각 소유역의 크기가 다르고 아울러 소유역에서 유역 출구까지의 경로 및

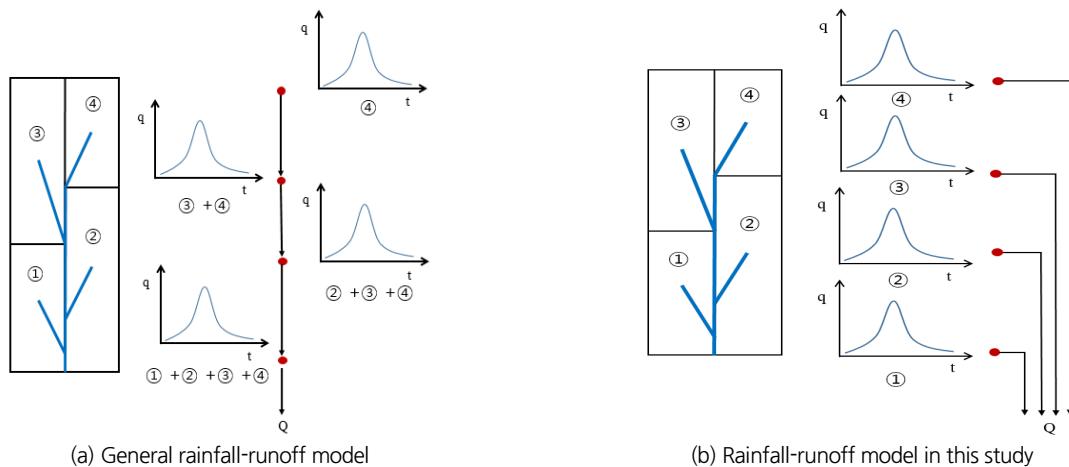


Fig. 1. Comparison of the structure of general rainfall-runoff model and that in this study

거리가 다르므로  $t_{cn}$ 와  $K_n$ 는 각 소유역별로 다르게 결정된다. 위 식에서 또한  $t < t_{cn}$ 인 경우에는  $P_n = 0$ 가 성립한다. 마지막으로 연속된 강우에 의한 유역의 유출은 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q(t) = \sum_i R_i \times U(t-i) = \sum_i R_i \left[ \sum_n P_n e^{-\frac{(t-i)-t_{cn}}{K_n}} \right] \quad (5)$$

위 Eq. (5)에서  $i$ 는 강우발생 시점,  $R_i$ 는 강우강도를 의미한다. 위 식은 단위도를 이용하여 수문곡선을 합성하는 식과 동일하다. 이 식에서도 역시  $t < i$ 인 경우  $U(t-i) = 0$ 가 성립한다. 이 모형을 적용하여 유출 해석하기 위해서는 먼저 각 소유역별로  $P_n$ ,  $t_{cn}$  및  $K_n$ 를 결정해야 한다.

Shot noise process 기반 강우-유출 모형(이하 강우-유출 모형)의 매개변수는 침투치, 지체시간, 감쇄상수이며, 이들 매개변수는 지역특성을 반영한 경험식을 통해 결정할 수 있다. 먼저, 침투치( $P_n$ )는 수정합리식의 개념을 이용하여 추정한다. 즉,  $P_n$ 은 시간  $t$ 에서의 유출용적  $V$ 에 대한 Eq. (6)을 만족시키는 값으로 결정된다.

$$V = \int_{-\infty}^{\infty} P_n e^{-\frac{t}{K_n}} dt \quad (6)$$

강우-유출모형을 적용함에 있어 집중시간 또는 도달시간을 계산해야 하는 경우는 두 가지이다. 먼저, 수정합리식에 적용하기 위해 소유역에서의 도달시간(또는 집중시간)이 필요하다. 두 번째로는 shot noise process의 지체시간으로 쓰이는 소유역 출구에서 유역 출구까지의 도달시간을 계산해야 한다. 도달시간(또는 집중시간)은 관측자료를 분석하여 추정 가능한 값이기는 하지만 자료가 충분하지 않거나 미세측 유역에서는 경험식을 이용하는 것이 일반적이다. 이때 경험식이 가지고 있는 제약 조건을 고려하는 과정이 중요하다.

감쇄상수는 선형저수지 이론에 근거하여 저류상수로 대체할 수 있다. 순간 강우입력에 대한 선형저수지의 응답함수는 Eq. (7)과 같이 지수적으로 감소하는 형태를 가지고 있다.

$$O = \frac{1}{K} e^{-t/K} \quad (7)$$

여기서  $O$ 는 시간  $t$ 에서의 유출량,  $K$ 는 저류상수이다. 위 식의 형태가 shot noise process의 형태와 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있으며, Eq. (7)의 저류 상수를 shot noise process의

감쇄상수로 대체할 수 있다. 도달시간과 마찬가지로 저류상수 또한 관측자료를 분석하여 추정할 수 있다. 저류상수 역시 경험식을 이용하여 추정할 수도 있으며, 이 경우에도 경험식의 제약 조건을 배제해서는 안된다.

## 2.2 유출 앙상블 멤버 생성 방법

### 2.2.1 매개변수의 확률분포

본 연구에서는 shot noise process 기반 강우-유출 모형(이하 강우-유출 모형) 매개변수의 난수를 발생하기 위해 감마분포(gamma distribution)와 지수분포(exponential distribution)를 고려하였다. 감마분포는 연속형 확률분포이고, 대기시간의 모델링에서 사건이  $n$ 번 발생하기까지의 대기 시간을 모의하는데 이용된다. 다음 Eqs. (8)~(10)은 감마분포의 확률밀도 함수, 평균, 분산을 수식화한 것이다.

$$f(x) = \frac{\lambda^n x^{n-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(n)} \quad (x > 0) \quad (8)$$

$$= 0 \quad (x \leq 0)$$

$$\mu = \frac{n}{\lambda} \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \frac{n}{\lambda^2} \quad (10)$$

위 Eqs. (8)~(10)에서  $f(x)$ 는 확률밀도함수,  $\mu$ 는 평균,  $\sigma^2$ 은 분산,  $\Gamma()$ 는 감마함수이고,  $n$ 과  $\lambda$ 는 감마분포의 매개변수이다. 특별히,  $n = 1$ 일 경우 감마분포는 지수분포가 된다. 지수분포의 경우 평균과 표준편차가 동일하다.

### 2.2.2 유출 앙상블 멤버 생성

강우-유출 모형을 이용한 유출 앙상블 멤버 생성 방법은 다음과 같다. 먼저, 감마분포와 지수분포를 이용하여 강우-유출 모형 매개변수의 통계적 특성을 따르는 난수를 발생시켰다. 난수발생을 위해 감마분포의 매개변수를 결정해야 하는데, 평균은 경험식으로 구한 값을, 분산은  $n$  값에 따른 평균과 표준편차의 관계를 이용하여 결정하였다. 예를 들어,  $n = 1$ 인 경우 감마분포의 평균과 표준편차가 같고,  $n = 2$ 일 경우에는  $\mu^2 = 2\sigma^2$ 의 관계가 유도된다. 즉, 표준편차는 평균의  $1/\sqrt{2}$ 배가 된다. 이를 일반화하면 감마분포의 평균과 표준편차의 관계는  $\mu = \sqrt{n}\sigma$ 가 된다. 또는, 추가로  $\theta = 1/n$ 을 도입하면 감마분포의 표준편차는 평균의  $\sqrt{\theta}$ 배가 된다. 감마분포의 매개변수가 결정되면, 이를 만족하도록 생성된 난수를 강우-유출 모형의 매개변수로 사용하여 앙상블 멤버가 생성된다.

### 3. 대상 유역 및 자료

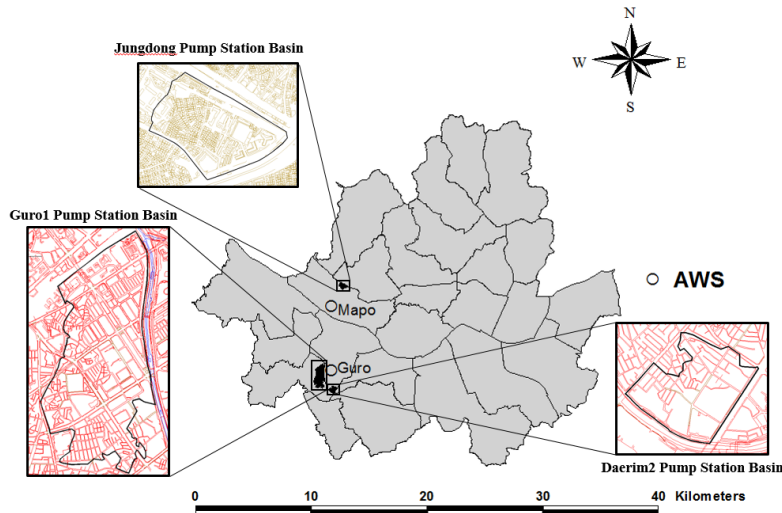
본 연구에서는 shot noise process 기반 강우-유출 모형(이하 강우-유출 모형)을 이용한 앙상블 멤버 생성을 위한 대상 유역으로 대림2 빗물펌프장 배수유역, 구로1 빗물펌프장 배수유역, 중동 빗물펌프장 배수유역을 선정하였다. 세 배수유역은 모두 서울에 위치해 있으며, 대림2 빗물펌프장 배수유역은 영동포구, 구로1 빗물펌프장 배수유역은 구로구, 중동 빗물펌프장 배수유역은 마포구에 위치해 있다. 대림2, 구로1, 중동 빗물펌프장 배수유역의 유역면적은 각각 0.23 km<sup>2</sup>, 1.31 km<sup>2</sup>, 0.23 km<sup>2</sup>이다. 다음 Fig. 2는 대상 유역의 위치 및 유역 내 주요 관거를 나타낸 것이다.

대상 유역의 강우 자료는 대상 유역 인근에 위치한 기상청 AWS 지점의 강우 자료를 이용하였다. 중동 빗물펌프장 배수

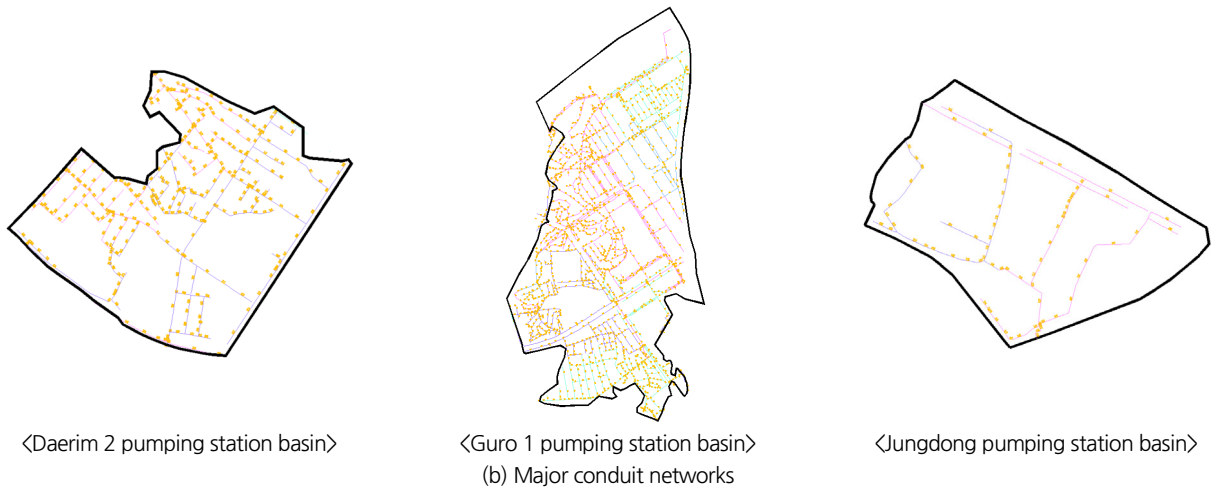
유역의 경우 마포(411)지점, 구로1 빗물펌프장 배수유역과 대림2 빗물펌프장 배수유역의 경우 구로(423)지점의 1분 강우 자료를 이용하였다. 본 연구에서 분석한 호우사상의 기본 특성을 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Storm events considered in this study

Basin	AWS	Period	Duration (hr)	Total rainfall amount (mm)
Daerim 2	Guro (423)	2010/09/21 07:00 ~2011/09/21 22:00	15	229.0
Guro 1	Guro (423)	2010/09/21 07:00 ~2011/09/21 22:00	15	229.0
Jungdong	Mapo (411)	2010/09/21 11:00 ~2010/09/21 23:00	12	276.0

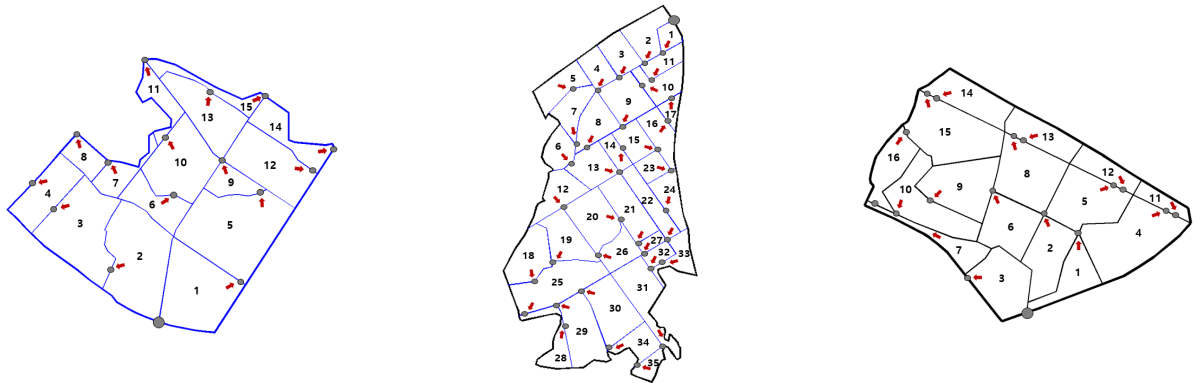


(a) Location of the three basins



(b) Major conduit networks

Fig. 2. Location of the three basins considered in this study and their major conduit networks



(a) Daerim 2 pumping station basin      (b) Guro 1 pumping station basin      (c) Jungdong pumping station basin

Fig. 3. Result of sub-basin division for each basin considered in this study

### 4. 적용 결과

#### 4.1 Shot Noise Process 기반 강우-유출 모형의 매개변수 추정 결과

먼저 대상유역에 대한 유출 해석을 수행하기 위해 대상 유역을 소유역으로 분할하고, 소유역별 매개변수를 추정하였다. 소유역의 분할은 대상유역의 관망 자료를 이용하여 관거가 소유역의 측면에 위치한다는 가정 하에 수행하였다. 그 결과, 대림2 빗물펌프장 배수유역의 경우 15개 소유역으로 분할되었으며, 구로1 빗물펌프장 배수유역과 중동 빗물펌프장 배수유역의 경우 각각 35개, 16개 소유역으로 분할되었다. 다음 Fig. 3은 대상 유역별 소유역 분할 결과를 나타낸 것이다.

다음으로 유출 해석을 수행하기 위해 필요한 모형의 매개변수를 추정하였다. Shot noise process 기반 강우-유출 모형(이하 강우-유출 모형)의 매개변수는 지체시간, 감쇄상수, 침투치이다. 지체시간은 유역 지체시간과 하도 지체시간으로 구분하여 결정하였다. 유역 지체시간은 Kerby 공식을 이용하여 결정하였으며, 하도 지체시간은 Kraven II 공식을 이용하여 결정하였다. 하도 지체시간은 각 소유역별 출구점에서 전채유역의 출구점까지 연결된 각각의 관거들의 지체시간을 산정한 후 모두 합하여 소유역별 하도 지체시간을 추정하였다.

감쇄상수는 우리나라 실무에서 많이 이용되고 있는 Russel 공식을 이용하여 추정하였다. 이때 상수  $\alpha$ 는 1.0이라 가정하였다.  $\alpha$ 는 원래 공식에서 도시지역 1.1~2.1, 자연지역 1.5~2.8, 산림지역에서 8.0~12.0 범위로 제시되고 있으나 일반적으로 1.0을 적용할 수 있다(Jeong and Yoon, 2007). 감쇄상수는 각 소유역별 출구점에서 전채유역 출구점을 연결하는 관로에서의 감쇄 특성을 고려하기 위해 유역 감쇄상수와 하도 감쇄상수를 구분하여 산정하였다.

침투치는 수정합리식의 개념을 이용하여 추정하였다. 수정

합리식은 강우의 실제 지속기간이 유역의 도달시간보다 작을 경우, 같을 경우 및 유역의 도달시간 보다 더 긴 경우에 대한 수문곡선의 형태를 제시한다. 본 연구에서는 소유역별 도달시간이 1시간 미만, 분 단위인 것을 고려하여 수정합리식을 이용해 침투유량을 산정하였다. 수정합리식을 이용하여 침투유량을 산정하기 위해 이용한 강우 조건은 강우강도는 10 mm/hr, 강우 지속기간은 1분이다. 이때, 유출계수는 Ponce (1989)가 정리한 토지이용도에 따른 합리식의 유출계수 범위를 참고하였으며, 토지이용상태는 국토지리정보원에서 제공하는 토지이용도를 이용하였다. 다음 Table 2는 대림2 빗물펌프장 배수유역의 소유역별 강우-유출 모형의 매개변수를 정리한 내용이다.

Table 2. Parameters of rainfall-runoff model for each sub-basin in Daerim 2 pumping station basin

Sub-basin	Peak value (m <sup>3</sup> /sec)	Sub-basin		Conduit	
		Lag time (min)	Storage coefficient (min)	Lag time (min)	Storage coefficient (min)
B01	0.0104	5.71	5.71	2.06	2.06
B02	0.0099	6.35	6.35	3.14	3.14
B03	0.0063	9.83	9.83	3.36	3.36
B04	0.0042	7.35	7.35	4.08	4.08
B05	0.0090	7.94	7.94	2.88	2.88
B06	0.0032	6.20	6.20	1.81	1.81
B07	0.0025	5.35	5.35	2.96	2.96
B08	0.0021	6.08	6.08	3.61	3.61
B09	0.0020	6.85	6.85	2.29	2.29
B10	0.0073	5.85	5.85	3.72	3.72
B11	0.0017	8.64	8.64	4.18	4.18
B12	0.0059	7.22	7.22	4.35	4.35
B13	0.0040	8.75	8.75	4.23	4.23
B14	0.0021	10.59	10.59	4.71	4.71
B15	0.0009	14.79	14.79	3.36	3.36

### 4.2 강우-유출 모형 매개변수의 난수 발생

본 연구에서는 강우-유출 모형 매개변수(지체시간, 감쇄상수)에 대한 난수를 생성하기 위해 감마분포와 지수분포를 이용하였다. 감마분포와 지수분포를 이용하여 모형 매개변수에 대한 난수를 생성하기 위해서는 소유역별 매개변수의 평균과 표준편차를 추정하는 과정이 필요하다.

소유역별 모형 매개변수의 평균은 앞서 경험식을 적용하여 추정된 값을 그대로 이용하였으며, 표준편차는 지수분포와 감마분포의 이론적인 배경을 고려하여 추정하였다. 본 연구에서는  $\theta$ 가 0.5, 1.0, 2.0, 4.0일 때의 감마분포의 평균과 표준편차의 관계를 이용하여 소유역 별 표준편차를 추정하였

다.  $\theta = 0.5$ (표준편차가 평균의  $1/\sqrt{2}$  배) 미만이거나  $\theta = 4.0$ (표준편차가 평균의 2배) 초과인 경우에는 적절한 유출수문곡선이 유도되지 않는 것을 확인하여 고려하지 않았다.

추정된 평균과 표준편차를 지수분포와 감마분포를 적용하여 강우-유출 모형 매개변수(지체시간, 감쇄상수)에 대한 난수를 발생시켰다. 생성한 난수의 개수는 충분한 유출 양상별 멤버를 만들기 위해 각 배수유역별로 100개로 결정하였다. 다음 Fig. 4는  $\theta$  값에 따른 대림2 빗물펌프장 배수유역의 소유역별 관로 감쇄상수 100개를 히스토그램으로 나타낸 것이다. Fig. 4에서 검정색 직선은 해당 매개변수의 평균을 표시한 것이다. Fig. 4에서  $\theta = 1.0$ 인 히스토그램은 표준편차가 평균과

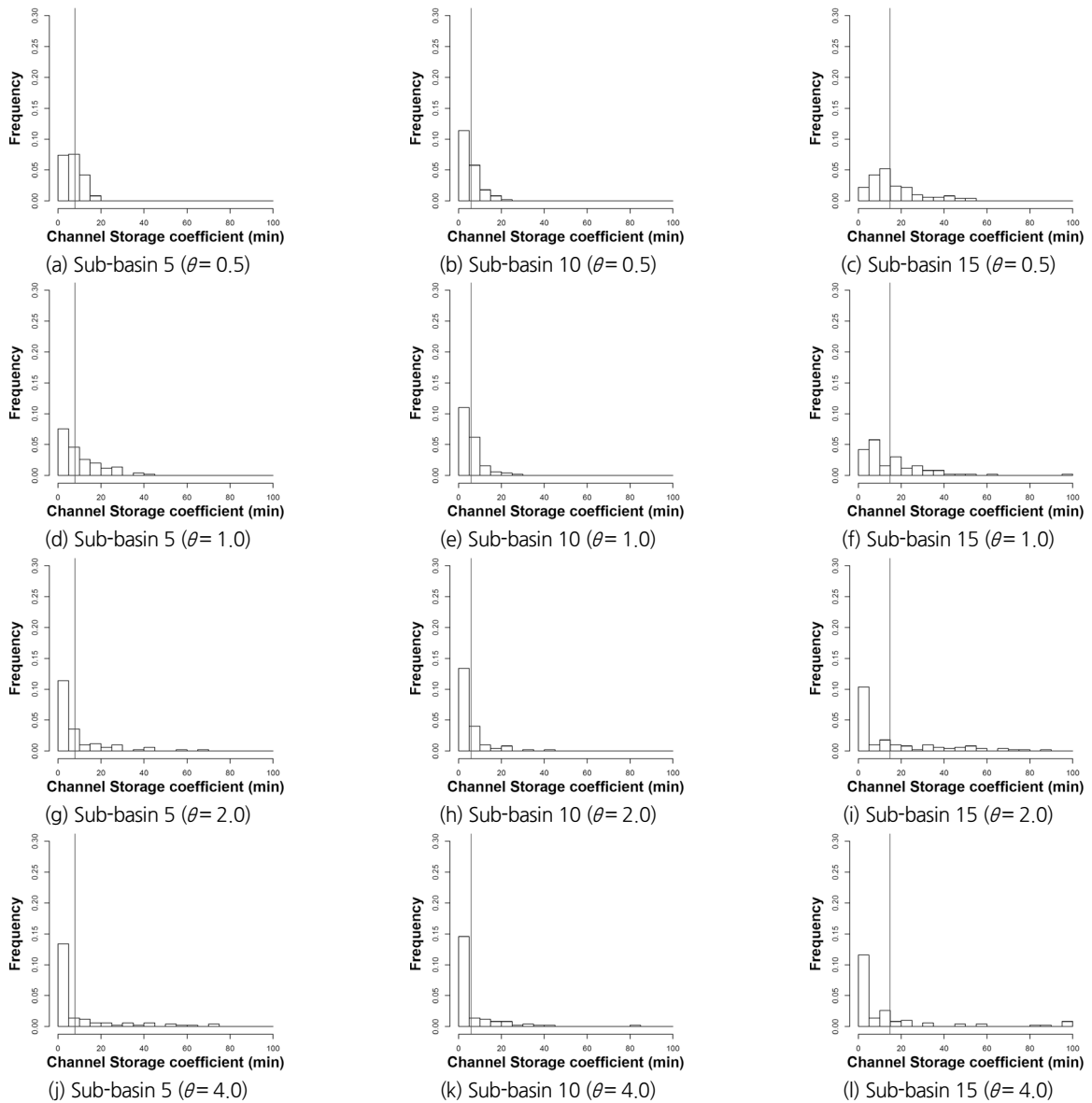


Fig. 4. Histogram of storage coefficient for conduit in Daerim 2 pumping station basin (Lines in the graph represent the mean)



같은 감마분포로 발생시킨 매개변수로 만들어진 것이다.  $\theta = 0.50$ 이면 표준편차가 평균의  $\sqrt{0.5}$  배이고,  $\theta = 2.0$ 이면 표준편차가 각각 평균의  $\sqrt{2}$  배,  $\theta = 4.0$ 이면 표준편차가 평균의 2.0배인 경우가 된다.

먼저  $\theta$  값에 따른 히스토그램의 차이를 살펴보면,  $\theta$  값이 커질수록 난수의 범위가 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 표준편차가 커질수록 평균과 차이가 큰 난수가 생성되고, 표준편차가 작아질수록 평균 주변의 값으로 난수가 생성되는 것을 알 수 있다. 대림2 빗물펌프장 배수구역의 히스토그램뿐만 아니라 구로1, 중동 빗물펌프장 배수구역의 히스토그램 또한  $\theta$  값에 따른 히스토그램의 차이가 유사하게 나타났다.

### 4.3 유출 앙상블 멤버 생성 결과

본 연구에서는 지수분포와 감마분포로 생성한 난수를 강우-유출 모형에 적용하여 실제 호우 사상에 대한 유출 앙상블 멤버를 생성하였다. 배수구역별 생성된 유출 앙상블 멤버의 개수는 난수의 개수와 동일한 100개이다. 아울러, 유출 앙상블 멤버를 기존 유출 해석 결과와 비교하기 위해 유출 모형의 매개변수를 그대로 적용한 결과도 확인해보았다. Fig. 5는 기존 유출 해석 결과와 함께  $\theta$  값에 따른 유역별 유출 앙상블 멤버 100개를 중첩하여 나타낸 것이다. Fig. 5에서 회색 실선은 유출 앙상블 멤버를 중첩하여 나타낸 것이며, 검정색 실선은 앙상블 멤버의 평균이다. 그리고, 검정색 점선은 기존 유출 해석

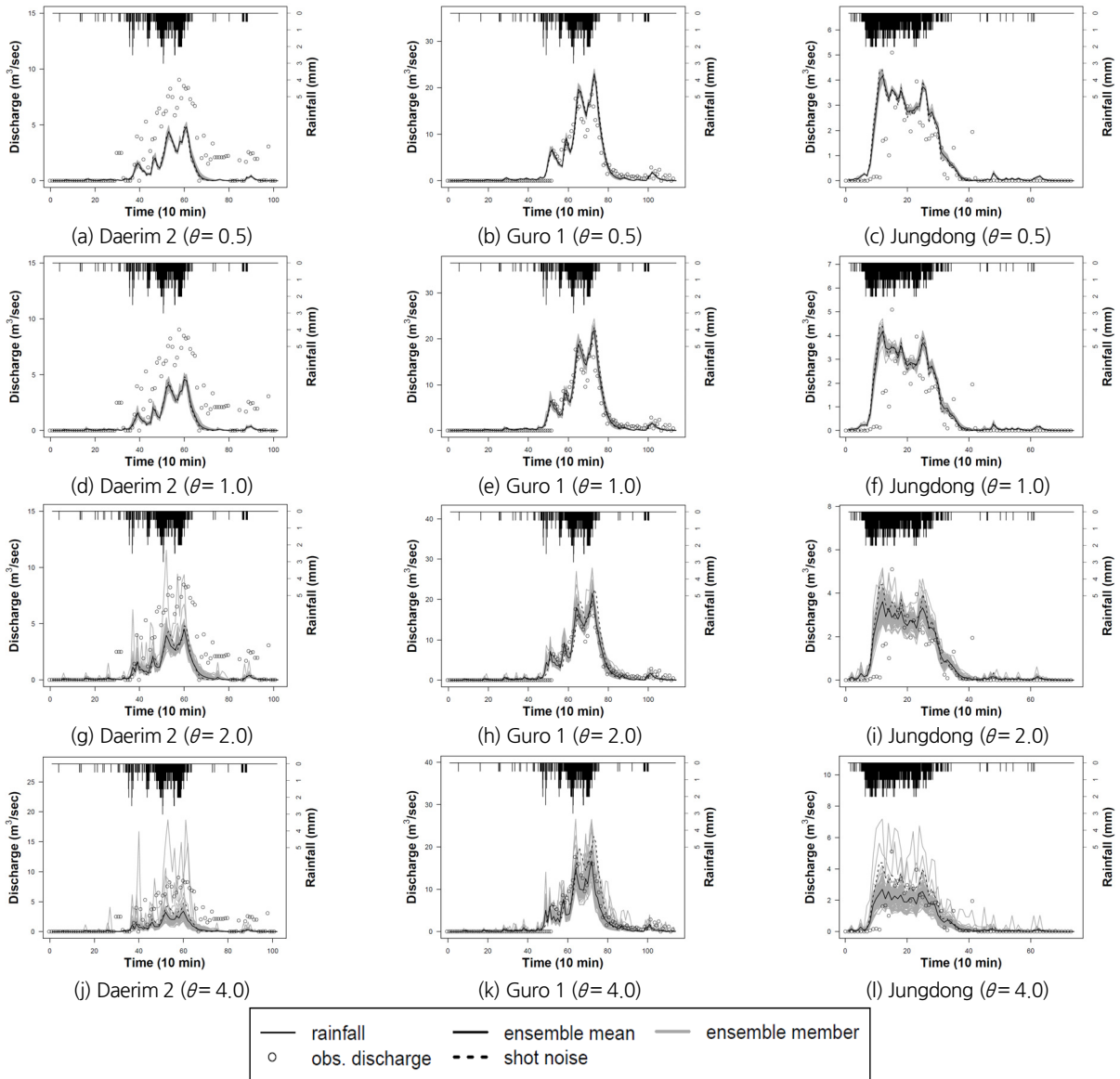


Fig. 5. Pumping station observation data, runoff ensemble members and conventional runoff result



결과이고, 속이 빈 원들은 관측 유출량이다. 관측 유출량은 각 유역의 빗물펌프장 펌프가동 기록과 저류지 수위변동 자료를 유출량으로 변환한 값이다. 빗물펌프장으로의 유입량은 측정하고 있지 않다. 따라서 저류지의 수위변화량과 펌프토출량을 합산하여 관측 유출량을 산정하였다.

Fig. 5를 살펴보면 배수유역별로  $\theta$  값에 따라 100개의 유출 앙상블 멤버가 어떻게 생성되는지 비교할 수 있다. 먼저  $\theta = 0.5$ 인 경우에는 그래프 상 검정색 점선으로 표현되는 기존 유출 해석 결과와 유출 앙상블 멤버 간 차이가 보이지 않는 것을 알 수 있다. 즉,  $\theta = 0.5$ 일 때는 유출 앙상블 멤버를 아무리 많이 생성해도 기존 유출 해석 결과와 다른 결과를 얻을 수 없는 것으로 판단된다.  $\theta = 1.0$ 인 경우에도 마찬가지로 유출 앙상블 멤버와 기존 유출 해석 간에 차이가 뚜렷하게 보이지 않

았다. 반면,  $\theta = 2.0$ 인 경우부터 유출 앙상블 멤버와 기존 유출 해석 결과와의 차이점이 확인되기 시작했다. 그리하여, 기존 유출 해석 결과와 값의 차이가 큰 관측 유출량을 모의하는 유출 앙상블 멤버도 발견되었다. 특히, 대림 배수유역의 경우 기존 유출 해석 결과는 관측 유출량과 확연히 차이가 있으나, 이에 대한 유출 앙상블의 일부는 관측 유출량과 동일한 값을 가지는 것으로 확인되었다. 구로와 중동 배수유역 또한  $\theta = 2.0$ 일 때 유출 앙상블의 일부가 관측 유출량을 모의하고 있는 것으로 나타났다. 마지막으로,  $\theta = 4.0$ 인 경우를 살펴보면, 세 배수유역 모두 유출 앙상블 멤버가 대부분의 관측 유출량을 모의할 수 있는 것으로 확인되었다.

Fig. 6은 유출 앙상블 범위를 더 자세히 확인하기 위해 유출 앙상블 멤버의 최대값과 최소값 사이 범위를 음영으로 나타낸

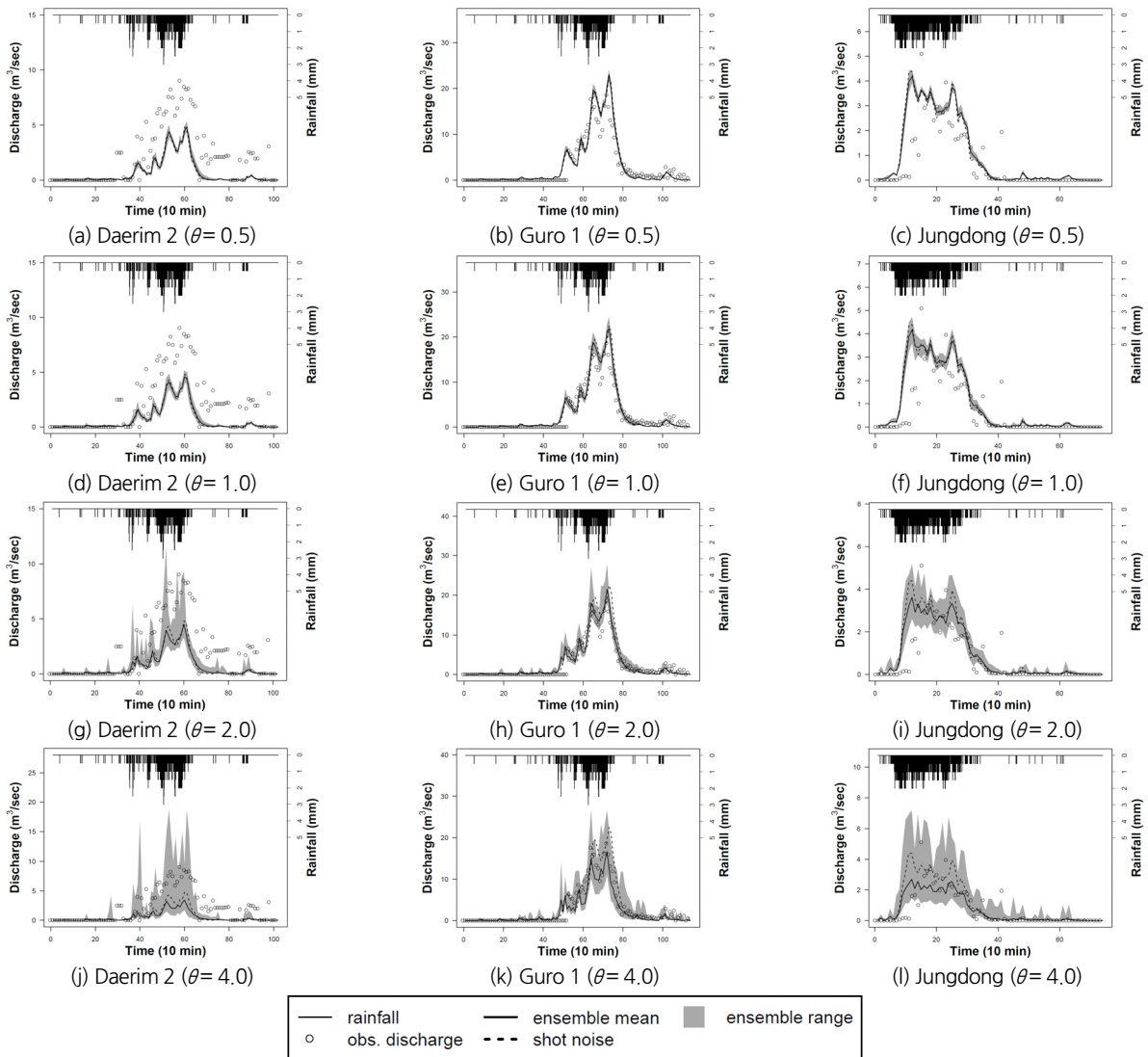


Fig. 6. Pumping station observation data and range of runoff ensemble members

것이다. Fig. 6을 자세히 보면,  $\theta$  값의 차이에 따라 유출 앙상블 멤버의 최대값과 최소값의 차이가 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다.  $\theta = 0.5$ 인 경우를 보면 세 배수유역 모두 앙상블 멤버 간 차이가 작으며, 대부분의 관측값을 포괄하지 못하는 것으로 확인된다. 지수분포에 해당하는  $\theta = 1.0$ 인 경우 또한 유출 앙상블 범위가 좁고, 세 배수유역에서 대부분의 관측값이 유출 앙상블 범위 밖에 있는 것으로 파악된다.  $\theta = 2.0$ 인 경우를 살펴보면,  $\theta = 1.0$ 인 경우 보다는 앙상블 범위가 넓어졌긴 하지만, 여전히 세 배수유역에서 관측값을 포괄하지 못하고 있다. 마지막으로  $\theta = 4.0$ 인 경우에는 앙상블 멤버의 최대값과 최소값이 크게 차이나며 세 배수유역에서 대부분의 관측값이 유출 앙상블의 범위 내에 존재하는 것으로 나타났다. 특히, 구로 배수유역과 중동 배수유역의 관측값은 앙상블 범위 안에 대부분 존재할 뿐만 아니라 앙상블 평균값 근처에 분포하는 것으로 확인되었다. 반면, 대림 배수유역의 결과를 보면, 관측값이 앙상블 범위 안에는 있지만, 앙상블 평균과는 여전히 차이가 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과의 원인을 정확히 한정하기는 어려우나, 대림 빗물펌프장의 수위 변동 자료를 이용하여 유출량으로 역산정하는 과정에서 유출량이 실제보다 과대하게 산정된 것이 아닌가 추측된다.

이상의 결과는 각 유출 앙상블이 관측 유출량을 얼마나 포괄하는지를 평가하는 과정에서도 확인되었다. 특히  $\theta$ 가 4.0인 경우를 살펴보면 중동 배수유역의 유출 앙상블은 60% 이상의 관측값을 포괄하고 있는 것으로 나타난다. 구로 배수유역의 유출 앙상블 또한 50% 이상의 관측값을 포괄하는 것으로 나타나나, 대림 배수유역의 유출 앙상블은 상대적으로 작은 약 40%의 관측값만을 포괄하는 것으로 나타난다. 이러한 결과는 적절한  $\theta$ 값이 어느 정도인지를 판단하는데 도움이 된다. 결과적으로 대림 배수구역의 유출자료에 약간의 문제가 있다고 가정하면, 적절한  $\theta$ 값은 4.0정도인 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 shot noise process 기반 강우-유출 모형을 이용하여 유출 앙상블 멤버를 생성하고 이를 서울특별시 소재 3개 빗물펌프장 배수유역(대림 2, 구로 1, 중동)에 적용하여 평가하였다. 강우-유출 모형의 매개변수는 Kerby 공식, Kraven II 공식, Russel 공식 및 수정합리식을 이용하여 추정하였다. 유출 앙상블 멤버는 강우-유출 모형의 매개변수를 다양화하는 방법으로 생성하였으며, 이를 위해 지수분포와 감마분포를 고려하였다. 특히, 감마분포를 이용하면 평균과 표

준편차의 관계를 조정하여 다양한 앙상블 멤버를 생성할 수 있는 것으로 확인되었다. 이에 본 연구에서는 감마분포의 표준편차를 평균의  $\sqrt{0.5}$  배에서 2.0배까지 바꾸어 가며 유출 앙상블 멤버를 생성하고, 생성된 결과를 관측 유출량과 비교해 보았다.

생성된 유출 앙상블과 관측 유출량과의 비교 결과, 표준편차가 평균의 두 배인 감마 분포를 이용하여 만든 유출 앙상블이 관측 유출량을 가장 적절히 포괄함을 확인하였다. 이 경우 유출 앙상블이 관측 유출량을 포괄하는 비율은 중동 배수유역에서 60% 이상, 구로 1 배수유역에서 50% 이상, 대림 2 배수유역에서 40% 이상으로 나타나 유출 앙상블을 활용하기에 적절한 것으로 판단되었다.

본 연구에서 확인해보았듯이 적절한 확률분포의 매개변수를 이용하여 유출 앙상블 멤버를 생성하면 기존 유출 해석 방법으로 모의하기 어려운 극단적인 유출량에도 대비할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러, 본 연구에서 제시한 앙상블 멤버 생성 방법을 홍수 예-경보 시스템에 활용한다면 돌발적으로 발생하는 홍수에 대한 피해를 저감하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(79615).

## References

- Bae, D., and Kim, J. (2007). "Development of Korea flash flood guidance system: (I) theory and system design." *Journal of Korean Society of Civil engineering*, KSCE, Vol. 27, No. 3B, pp. 237-243.
- Bernier, J., Morlat, G., O'Connell, P. E., O'Donnell, T., Sneyers, R., Delaporte, P. J., Elston, D., and Borgman, L. E. (1970). "Inventaire des modeles de processus stochastiques applicables a la description des debits journaliers des rivieres." *Revue de l'institut International de Statistique*, ISI, Vol. 38, No. 1, pp. 49-104.
- Claps, P., and Murrone, F. (1994). "Optimal parameter estimation of conceptually-based streamflow models by time series aggregation." *In Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering*, pp. 421-434.
- Claps, P., Giordano, A., and Laio, F. (2005). "Advances in shot noise modeling of daily streamflows." *Advances in water resources*, Vol. 28, No. 9, pp. 992-1000.

- Cowpertwait, P. S. P., and O'Connell, P. E. (1992). "A Neyman-Scott shot noise model for the generation of daily streamflow time series." *Advances in Theoretical Hydrology-A Tribute to James Dooge*, pp. 75-94.
- Gouweleeuw, B. T., Thielen, J., Franchello, G. D., De Roo, A. P. J., and Buizza, R. (2005). "Flood forecasting using medium-range probabilistic weather prediction." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geophysical Society*, Vol. 9, No. 4, pp. 365-380.
- Hofmann, J., and Schuttrumpf, H. (2019). "Risk-based early warning system for pluvial flash floods: approaches and foundations." *Geoscience, MDPI*, Vol. 9, No. 3.
- Hutton, J. L. (1990). "Non-negative time series models for dry river flow." *Journal of Applied Probability, APT*, Vol. 27, No. 1, pp. 171-182.
- Jeong, J. H., and Yoon, Y. N. (2007). *Water resources design practice*. Goomibook, Seoul.
- Jo, D. (2014). "Application of the urban flooding forecasting by the flood nomograph." *Journal of the Korean Society Hazard Mitigation, KOSHAM*, Vol. 14, No. 6, pp. 421-425.
- Kang, M., and Yoo, C. (2018). "Development of a shot noise process based rainfall-runoff model for urban flood warning system." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 51, No. 1, pp. 19-33.
- Kim, H., Hwang, J., Ahn, J., and Jeong, C. (2018a). "Analysis of rate discharge change on urban catchment considering climate change." *Journal of Korean Society of Civil Engineering, KSCE*, Vol. 38, No. 5, pp. 645-654.
- Kim, H., Keum, H., and Han, K. (2018b). "Application and comparison of dynamic artificial neural networks for urban inundation analysis." *Journal of Korean Society of Civil Engineering, KSCE*, Vol. 38, No. 5, pp. 671-683.
- Kneis, D., Abon, C., Bronstert, A., and Heistermann, M. (2017). "Verification of short-term runoff forecasts for a small Philippine basin (Marikina)." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 62, No. 2, pp. 205-216.
- Komma, J., Reszler, C., Blöschl, G., and Haiden, T. (2007). "Ensemble prediction of floods? catchment non-linearity and forecast probabilities." *Natural Hazards and Earth System Science, EGU*, Vol. 7, No. 4, pp. 431-444.
- Konrad, C. P. (2003). *Effects of urban development on floods*. USGS, Reston, Virginia.
- Lee, H., Ryu, S., Won, S., Jo, E., Kim, S., and Joe, G. (2016). "A study on model of heavy rain risk prediction using influencing factors of flood damage." *Journal of the Korean Society Hazard Mitigation, KOSHAM*, Vol. 16, No. 3, pp. 39-45.
- Lee, M., Jung, I., and Bae, D. (2011). "Korean flood vulnerability assessment on climate change." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 44, No. 8, pp. 653-666.
- Lee, M., Kang, N., Kim, J., and Kim, H. S. (2018). "Estimation of optimal runoff hydrograph using radar rainfall ensemble and blending technique of rainfall-runoff models." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*, Vol. 51, No. 3, pp. 221-233.
- Lee, S. J., Kim, J. C., Hwang, M. H., and Maeng, S. J. (2010). "Forecasting monthly runoff using ensemble streamflow prediction." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, KSAE*, Vol. 52, No. 1, pp. 13-18.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2009). *A Study on an application of urban runoff model for urban flood forecasting*. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Morlando, F., Cimorelli, L., Cozzolino, L., Mancini, G., Pianese, D., and Garofalo, F. (2016). "Shot noise modeling of daily streamflows: A hybrid spectral-and time-domain calibration approach." *Water Resources Research*, Vol. 52, No. 6, pp. 4730-4744.
- Murrone, F., Rossi, F., and Claps, P. (1997). "Conceptually-based shot noise modeling of streamflows at short time interval." *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Vol. 11, No. 6, pp. 483-510.
- Najafi, M. R., and Moradkhani, H. (2015). "Multi-model ensemble analysis of runoff extremes for climate change impact assessments." *Journal of Hydrology*, Vol. 525, pp. 352-361.
- Nester, T., Komma, J., Viglione, A., and Blöschl, G. (2012). "Flood forecast errors and ensemble spread-A case study." *Water Resources Research, American Geophysical Union*, Vol. 48, No. 10.
- O'Connell, P. E., and Jones, D. A. (1979). "Some experience with the development of models for the stochastic simulation of daily flows." *Inputs for Risk Analysis in Water Resources*, pp. 287-314.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering hydrology: Principles and practices*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Schreider, S. Y., Smith, D. I., and Jakeman, A. J. (2000). "Climate change impacts on urban flooding." *Climatic Change*, Vol. 47, No. 1-2, pp. 91-115.
- Song, Y., Song, Y., Park, M., and Lee, J. (2015). "Preliminary feasibility study on alert standard rainfall for urban mid and small rivers." *Journal of the Korean Society Hazard Mitigation, KOSHAM*, Vol. 15, No. 1, pp. 315-326.
- Todorovic, P., and Woolhiser, D. A. (1987). "A shot-noise model of streamflow." *In Flood Hydrology*, pp. 143-163.
- Weiss, G. (1973). *Filtered poisson processes as models for daily streamflow data*. Ph. D. dissertation, Imperial College London, London, United Kingdom.
- Weiss, G. (1977). "Shot noise models for the generation of synthetic streamflow data." *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 1, pp. 101-108.
- Yu, W., Choi, M., Jeong, A., and Jung, K. (2017). "Ensemble rainfall estimation and flood forecast by considering spatial prediction uncertainty of numerical weather prediction." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, KOSHAM*, Vol. 17, No. 5, pp. 43-55.