



## Development of a shot noise process based rainfall-runoff model for urban flood warning system

Kang, Minseok<sup>a</sup> · Yoo, Chulsang<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

Paper number: 17-086

Received: 17 October 2017; Revised: 13 November 2017; Accepted: 13 November 2017

### Abstract

This study proposed a rainfall-runoff model for the purpose of real-time flood warning in urban basins. The proposed model was based on the shot noise process, which is expressed as a sum of shot noises determined independently with the peak value, decay parameter and time delay of each sub-basin. The proposed model was different from other rainfall-runoff models from the point that the runoff from each sub-basin reaches the basin outlet independently. The model parameters can be easily determined by the empirical formulas for the concentration time and storage coefficient of a basin and those of the pipe flow. The proposed model was applied to the total of three rainfall events observed at the Jungdong, Guro 1 and Daerim 2 pumping stations to evaluate its applicability. Summarizing the results is as follows. (1) The unit response function of the proposed model, different from other rainfall-runoff models, has the same shape regardless of the rainfall duration. (2) The proposed model shows a convergent shape as the calculation time interval becomes smaller. As the proposed model was proposed to be applied to urban basins, one-minute of calculation time interval would be most appropriate. (3) Application of the one-minute unit response function to the observed rainfall events showed that the simulated runoff hydrographs were very similar to those observed. This result indicates that the proposed model has a good application potential for the rainfall-runoff analysis in urban basins.

**Keywords:** Rainfall-runoff model, Shot noise, Urban basin, Flood warning

## 도시홍수에경보를 위한 shot noise process 기반 강우-유출 모형 개발

강민석<sup>a</sup> · 유철상<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부

### 요 지

본 연구에서는 도시유역에서의 실시간 홍수에경보 목적으로 shot noise process 기반의 강우-유출모형을 제안하였다. 제안된 모형은 각 소유역 별 침투치, 감쇄상수 및 지체시간으로 결정되는 shot noise의 합으로 표현되며, 기존 강우-유출 모형과는 달리 각 소유역 별 유출량이 독립적으로 유역 출구에 도달하는 구조를 가지고 있다. 제안된 모형의 매개변수는 통상 경험식을 가지고 결정하는 소유역의 집중시간과 저류상수 및 관로에서의 도달시간과 저류상수를 이용하여 쉽게 결정될 수 있는 것으로 확인되었다. 본 연구에서 제안된 모형은 중동 빗물펌프장 배수유역, 구로1 빗물펌프장 배수유역, 대림2 빗물펌프장 배수유역에서 관측된 총 3개의 호우사상에 적용하여 그 성능을 평가하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) 본 연구에서 제안된 shot noise process 기반 단위 응답함수는 기존 단위 응답함수와 달리 강우 지속시간에 관계없이 동일한 모양을 갖는다. (2) 제안된 모형의 특성상 강우의 시간간격이 짧을수록 수렴된 결과를 얻을 수 있다. 따라서 도시유역의 특성을 감안할 때 1분이 가장 적절한 것으로 판단된다. (3) Shot noise process 기반 1분 단위 응답함수를 실제 호우사상에 적용하여 유출해석을 수행한 결과, 모의된 유출 수문곡선과 관측 값이 매우 유사한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 도시유역에서의 유출해석을 수행하는데 있어 제안된 유출모형이 충분한 적용성이 있다는 것을 보여준다.

**핵심용어:** 강우-유출모형, Shot noise, 도시유역, 홍수에경보

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-3290-3321  
E-mail: envchul@korea.ac.kr (C. Yoo)

## 1. 서론

기후변화로 인한 집중호우의 증가와 도시화에 따른 불투수면의 증가로 인해 도시침수피해가 증가하고 있다. 대표적인 도시침수피해 사례로 2010년 9월과 2011년 7월에 발생한 서울지역의 침수피해가 있으며, 2014년 8월에 부산과 경남 지역에 시간당 최고 130 mm 상당의 폭우가 내리면서 침수피해가 발생했다(Yoon and Lee, 2016). 특히 도시지역의 경우 도달시간의 감소, 침투유량의 증가, 통수능 부족, 저류량 감소 등의 변화로 침수피해가 가중되고 있다(Konrad, 2003). 도시 침수는 인명 및 재산피해 이외에 사회적, 환경적, 경제적, 심리적 피해를 유발하며, 도로, 지하철 등 도시기반시설의 피해는 도시기능 마비, 사회시스템 붕괴까지 야기한다(Bourque *et al.*, 2006; Sullivent *et al.*, 2006; Habitat, 2007; Sim, 2008; Jonkman *et al.*, 2009).

이러한 피해를 저감시키기 위해서는 침수피해가 예상되는 지역에 대해 적절한 침수피해 저감대책을 세우고 이를 통해 침수피해를 사전에 예방하는 것이 중요하다. 일반적으로 침수피해를 줄이기 위한 방법으로는 구조물적 대책과 비구조물적 대책이 있다(Price and Vojinovic, 2008; Tingsanchali, 2012). 구조물적 대책은 침수피해 저감의 수단으로 특정 구조물을 건설하여 침수피해를 줄이는 방법이며, 비구조물적 대책은 법령 및 각종 제도를 운용하여 침수피해를 저감시키는 방법이다. 기존 침수피해 저감 대책의 경우 구조물적 대책이 주로 이용되었으나, 침수피해 저감을 위해서는 비구조물적 대책으로 인식되는 추가적인 침수 전후의 활동이 필요할 것으로 인식되었다. 또한 도시 지역의 경우 홍수예경보와 같은 비구조물적 대책이 도시 침수로 인한 인명 및 재산 피해를 줄이는데 효율적이라는 결과가 입증되었다(Andjelkovic, 2001). 특히 미국의 경우 1977년 이후 홍수범람지 관리에 대한 법령인 ‘presidential executive order 119988’을 통해 도시계획의 시행에 있어 도시홍수 저감을 위한 비구조물적 대책을 강구하도록 의무화하고 있다.

도시지역에서의 홍수예경보시스템 구축 및 도시유출해석 모형과 관련된 다양한 연구가 수행되어 왔다. 국외의 경우, Maitland *et al.* (1999)은 XP-SWMM32 모형을 이용하여 호주, 일본, 미국의 시범 유역에 적용하여 개수로와 관수로 등 복잡한 배수체계의 해석 모형의 적용성을 검토하였다. Lai *et al.* (2000)은 도시유역의 새로운 우수관리 메뉴얼을 적용하여 SWMM 모형을 통해 도시 유역 내 유출해석을 수행하였다. 또한, Mehedi *et al.* (2017)은 SWMM 모형을 이용하여 방글라데시에 위치한 Chittagong시 Chaktai Khal 유역의 유출해석을

수행하였다. 국내에서는 Lee (1998)가 SWMM, ILLUDAS, STORM, HEC-1 모형을 이용하여 서울시 홍제천 유역을 대상으로 유출해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. Ahn and Kim (1999)은 SWMM 모형과 ILLUDAS 모형을 이용하여 청주의 용암지구를 대상으로 유출해석을 수행하였다. 또한, Shin *et al.* (2007)은 SWMM 모형과 HEC-RAS 모형을 이용하여 부산 온천천 유역을 대상으로 지속시간별 한계유출량과 홍수발생 강우량을 산정하고 이를 통하여 홍수예보체계 구축에 관한 연구를 수행하였다. Moon (2014)은 SWMM 모형과 HEC-RAS 모형을 이용하여 서울 도림천 유역에 홍수 예측 시스템 구축에 관한 연구를 수행하였다.

이러한 연구들에 적용된 모형을 살펴보면 HEC-HMS, HEC-RAS, SWMM, ILLUDAS 등이 있다. 그러나 앞서 언급된 모형들의 경우 모의결과를 도시지역에서의 실시간 홍수에 경보에 적용하기에는 한계가 있다. HEC 계열의 모형의 경우 자연유역에 적용이 적절한 모형으로, 도시에 적용하기에는 적절한 구조가 아니다. SWMM의 경우 많은 매개변수 변수를 산정하는 등 모형 구축이 복잡하며, 모의시간이 많이 소요되는 단점이 있다. ILLUDAS의 경우 SWMM에 비해 모형 구축이 간단하지만 관거 자료를 구축하는데 어려움이 따르며, 관로 내 배수 영향을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 또한 수치해석기법을 이용하여 유출해석을 하는 모형의 경우 모의시간이 많이 소요된다(Son *et al.*, 2015). 도시홍수의 경우 강우에 의한 유출량의 급격한 증가와 유하시간 감소 등에 의하여 도달시간이 짧은 특성을 나타낸다. 모의 시간이 많이 소요되는 단점을 가진 모형들의 경우, 도달시간이 짧은 도시지역에서의 실시간 홍수예경보에 적용성이 떨어진다. 따라서 도시지역에서의 실시간 홍수예경보에 적용을 위해서는 모의시간을 단축시키는 것이 중요하며, 이를 위해서는 모형의 구조가 간단하고 짧은 모의시간을 가지는 적용이 간단한 모형이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이상과 같은 도시홍수예경보의 목적에 부합할 수 있도록 shot noise process 기반의 강우-유출모형을 제안하고자 한다. Shot noise process는 다이오드나 트랜지스터와 같은 전자장치에서 발생하는 잡음(noise)의 한 형태이다. 이 noise는 발생시점에서 최댓값을 가지고 발생시점 이후부터는 지수적으로(exponentially) 감소하는 형태를 나타낸다. 수문분야에서는 Bernier *et al.* (1970)에 의해 처음 적용되었다. Bernier *et al.* (1970)은 유출수문곡선에서의 상승부와 하강부를 shot noise process로 표현할 것을 제안했으며, 이후 Weiss (1973, 1977)에 의해 보완 발전되었다. 이후 다양한 장기 유출해석 사례를 찾아볼 수 있다(O’Connell, 1977; O’Connell

and Jones, 1979; Todorovic and Woolhiser, 1987; Hutton, 1990; Cowpertwait and O'Connell, 1992; Konecny, 1992; Murrone *et al.*, 1997; Claps and Murrone, 1994; Claps *et al.*, 2005; Morlando *et al.*, 2016). 대부분의 사례들에서 shot noise 모형은 좋은 유출해석 성능을 보여주었으나, 월 단위 유출해석의 경우 과소추정의 문제를 보여주기도 했다(Cowpertwait and O'Connell, 1992). 그러나 아직 shot noise process가 시간 또는 그 이하의 홍수유출해석에 적용된 사례는 없다. 물론 도시 지역의 홍수유출 해석에도 적용된 사례는 없다.

본 연구에서는 도시지역에서의 실시간 홍수예경보 목적으로 shot noise process 기반의 강우-유출모형을 제안하고 그 적용성을 평가하고자 한다. 제안된 모형은 배수시스템의 사면과 관로로 구성된 도시지역의 배수특성을 반영할 수 있어야 하고, 아울러 매개변수 추정이 간단해야 한다. 도시 지역의 규모를 고려하여 최소 1분 단위의 해석이 가능할 수 있어야 하며, 아울러 해석시간이 매우 짧아야 한다. 물론 강우-유출 해석결과가 일정 수준이상의 정도를 확보해야 한다. 본 연구에서는 먼저, 모형의 개발과정을 가상유역을 이용하여 설명한 후 중동 빗물펌프장 배수구역, 구로1 빗물펌프장 배수구역, 대림2 빗물펌프장 배수구역 등 실제유역에 적용하여 그 성능을 평가하고자 한다.

## 2. Shot noise process의 특성과 유출모형에의 적용

### 2.1 Shot noise process

Shot noise process는 다이오드나 트랜지스터와 같은 전자 장치에서 발생하는 잡음(noise)의 한 형태이다. 이 noise는 발생시점에서 최댓값을 가지고 발생시점 이후부터는 지수적으로(exponentially) 감소하는 형태를 나타낸다. Shot noise process는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다(Weiss, 1997).

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

여기서,  $O_0$ 은 첨두치,  $K$ 는 감쇄상수,  $t_0$ 는 noise의 발생시점을 나타낸다. 만일 noise의 발생이 시간축 상에서 연속적으로 나타나게 되면 결과적으로 나타나는 신호는 개개 shot noise들의 합으로 표현될 수 있다. 즉,

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

만일 각 noise가 같은 특성을 갖는다면,  $O_{0i} = O_0$ ,  $K_i = K$ 가 된다. 위 식에서는 특히  $t < t_{0i}$ 인 경우  $O_{0i} = 0$ 임을 기억해야 한다.

### 2.2 Shot noise process 기반 강우-유출모형

#### 2.2.1 모형의 구조

본 연구에서 제안하는 강우-유출 모형은 홍수유출모형으로 자세하게 소유역 분할이 되어 있거나 또는 도시지역에서와 같이 배수분구 또는 블록 단위의 소유역 분할을 고려할 수 있는 경우에 해당한다. 이 경우에 각 소유역들은 병렬 또는 직렬로 연결되게 되는데 이러한 연결을 고려하여 shot noise process의 매개변수를 조절할 수는 없다. 보다 간단하게 개개 소유역에서의 유출은 독립적으로 유역출구까지 도달하는 것으로 가정한다(Fig. 1). 소유역 분할이 된 경우의 일반적인 강우유출 과정에서는 Fig. 1(a)와 같이 유출이 합쳐지게 되나, 본 연구에서 제안하는 형태는 Fig. 1(b)와 같이 각 소유역 별 유출은 독립적으로 유역출구에 도착하는 것이다.

이를 shot noise process로 표현하기 위해서는, 먼저, 단위 지속기간동안의 단위 유효우량으로 인한 유역 전체의 유출을 표현하여야 한다. 이는 유역을 대표하는 단위도의 개념과 같다. 각 소유역에서의 유출이 shot noise process를 따른다고 가정하고 있으므로, 단위 지속기간동안의 단위 유효우량으로 인한 유역 전체에서의 유출  $U(t)$ 는 다음과 같다.

$$U(t) = \sum_k P_k e^{-\frac{t-t_{ck}}{K_k}} \quad (3)$$

위 식에서  $k$ 는 소유역을,  $P_k$ 은 단위 유효우량에 의해 발생하는 해당 소유역의 첨두치,  $t_{ck}$ 는 각 소유역에서 유역 출구까지의 도달시간,  $K_k$ 는 각 소유역 출구에서 유역출구까지 도달하는 과정을 대표하는 감쇄상수를 나타낸다. 각 소유역의 크기가 다르고 아울러 소유역에서 유역 출구까지의 경로 및 거리가 다르므로  $t_{ck}$ 와  $K_k$ 는 각 소유역별로 다르게 결정된다. 위 식에서는  $t < t_{ck}$ 인 경우  $P_k = 0$ 임을 기억해야 한다.

마지막으로 연속된 강우에 의한 유역 유출은 다음과 같이 나타낸다.

$$Q(t) = \sum_i R_i \times U(t-i) = \sum_i R_i \left[ \sum_k P_k e^{-\frac{(t-i)-t_{ck}}{K_k}} \right] \quad (4)$$

위 식에서  $i$ 는 강우발생 시점을,  $R_i$ 는 강우강도를 나타낸다.

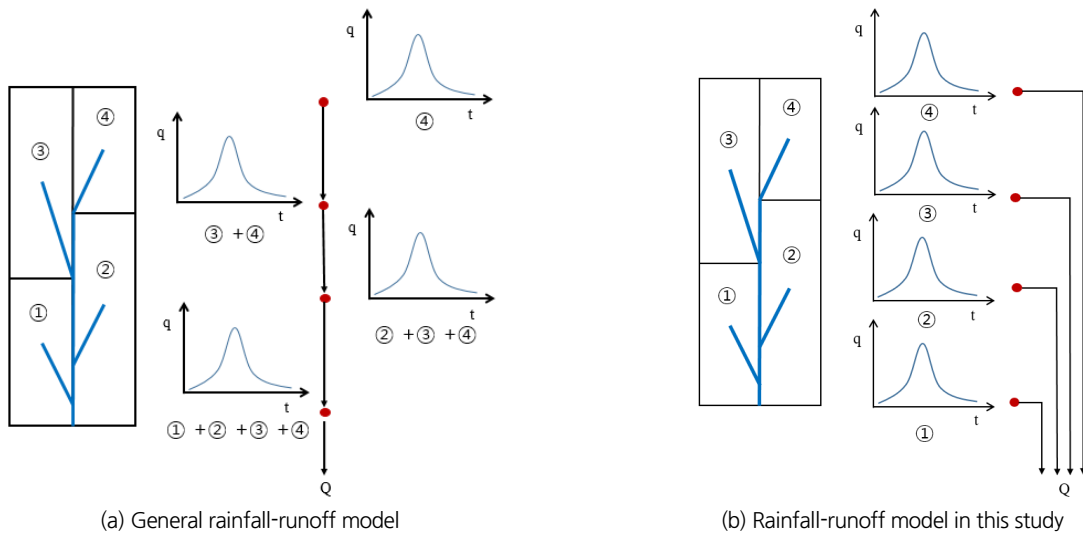


Fig. 1. Comparison of the structure of general rainfall-runoff model and that in this study

위 식은 단위도를 이용하여 수문곡선을 합성하는 과정과 동일하다. 이 식에서도 역시  $t < i$ 인 경우  $U(t-i) = 0$ 임을 기억해야 한다. 이 모형을 적용하여 유출해석하기 위해서는 각 소유역별로  $P_k$ ,  $t_{ck}$  및  $K_k$ 를 결정해야 한다.

2.2.2 모형의 매개변수의 결정

(1) 첨두치( $P_k$ )

본 연구에서는 첨두치의 결정을 위해 수정합리식의 개념을 이용하였다. 수정합리식이란 첨두유출량을 추정하는 대표적인 식인 합리식에 강우의 지속시간을 고려하여 수문곡선의 형태로 만든 것이다(Walesh, 1989). 먼저 합리식은 다음과 같이 나타난다.

$$Q = 0.2778 C \cdot I \cdot A \tag{5}$$

위 식에서  $Q$ 는 첨두유량( $m^3/sec$ ),  $C$ 는 유출계수,  $I$ 는 강우강도( $mm/hr$ ),  $A$ 는 유역면적( $km^2$ )을 나타낸다. 이 합리식을 적용할 경우, 필요한 강우강도의 결정 조건으로 유역의 도달시간이 강우의 지속시간과 같다고 가정한다. 이 가정 하에서 첨두유량을 최대로 만들 수 있다.

수정합리식은 강우의 실제 지속시간이 유역의 도달시간보다 작을 경우, 같을 경우 및 유역의 도달시간 보다 더 긴 경우에 대한 수문곡선의 형태를 제시한다(Fig. 2). 따라서 강우의 지속시간( $t_r$ )과 유역의 도달시간( $t_t$ )을 비교하면 다음과 같이 첨두치와 총 유출용적의 결정이 가능하다.

$$Q_p = Q \times (t_r/t_t), (t_r < t_t) \tag{6}$$

$$= Q; (t_r \geq t_t)$$

$$V = Q_p \times t_r \tag{7}$$

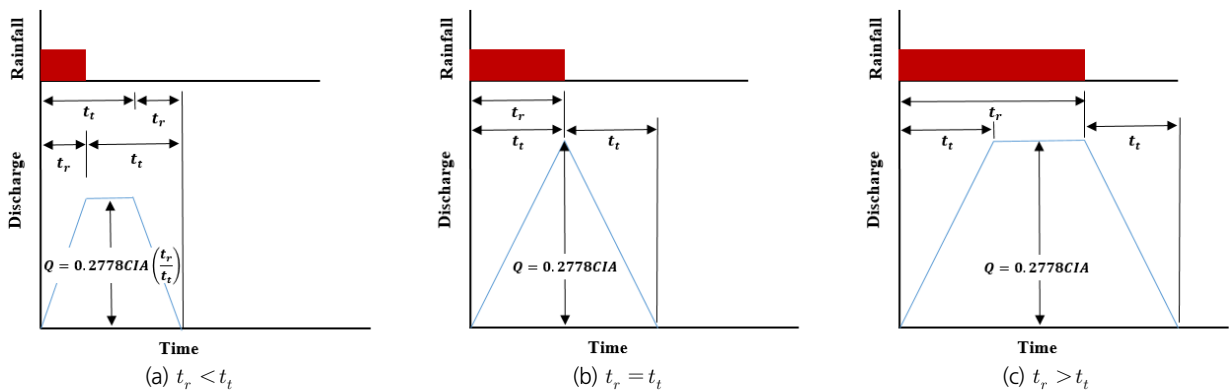


Fig. 2. Modified rational formula with three different cases of rainfall durations

위 식에서 결정된 침투유량이 침투치( $P_k$ )가 되는 것은 아니다. 이 과정에 총 유출용적이 반영되어야 하기 때문이다. 즉, 침투치( $P_k$ )는 다음 식을 만족시키는 값으로 결정된다.

$$V = \int_{-\infty}^{\infty} P_k e^{-\frac{t}{K_k}} dt \quad (8)$$

(2) 지체시간( $t_c$ )

유역에서의 집중시간(concentration time), 지체시간(lag time) 또는 도달시간(travel time)은 각기 다른 개념이지만 일반적으로 혼용해서 쓰는 경향이 있다. 당초 집중시간은 유역의 최원점으로부터 유역의 출구까지 도달하는데 걸리는 시간, 지체시간은 유효우량의 질량중심과 유효우량로 인해 발

생한 침투유출량의 발생시간과의 차이를 말한다(USDA SCS, 1975). 도달시간은 유효우량의 질량중심과 유출 수문곡선의 질량중심과의 차이를 의미한다. 그러나 사면과 하도에 서의 흐름이 구분되지 않는 경우에 있어서는 위 세 가지 다른 시간은 큰 차이가 없으며, 따라서 이 셋을 혼용하는 경향이 있다. 본 연구에서는 도달시간이란 용어로 통일하여 사용하기로 한다.

Shot noise process를 유역의 강우-유출 해석에 적용함에 있어 도달시간은 다음 두 가지로 구분하여 고려한다. 먼저, 소유역에서의 도달시간을 계산해야 한다. 이 도달시간은 수정 합리식의 적용에 필요하다. 두 번째로는 소유역 출구에서 유역 출구까지의 도달시간을 계산해야 한다. 이 도달시간이 shot noise process의 적용에 필요한 지체시간이 된다. 도달시

Table 1. Empirical formula for concentration time

Name	Empirical formula	Characteristics
Kirpich (1940)	$T_c = 0.0663 \cdot \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$	Small farmland, $A$ : $\sim 0.8km^2$ , $S$ : $1/30 \sim 1/10$
Rziha (1876)	$T_c = 0.0139 \cdot \frac{L}{S^{0.6}}$	Natural upstream, $S \geq 1/200$
Kraven ( I )	$T_c = 0.0074 \cdot \frac{L}{S^{0.515}}$	Natural middle and downstream, $S < 1/200$
Kraven ( II )	$T_c = 0.0074 \cdot \frac{L}{V}$	$S \leq 0.005$ : $V = 2.1m/sec$ $0.005 < S < 0.01$ : $V = 3.0m/sec$ $S \geq 0.01$ : $V = 3.5m/sec$
California DoT	$T_c = 0.0663 \cdot \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$	Small mountainous region
Kerby (1959)	$T_c = 0.6059 \cdot \left(\frac{L \cdot N}{\sqrt{S}}\right)^{1/2.14}$	$S < 1/10$
Johnstone and Cross (1949)	$T_c = 0.543 \left(\frac{L}{S}\right)^{0.5}$	$A$ : $25 \sim 1,624mi^2$
SCS	$T_c = 1/3600 \sum \frac{L}{V}$	Mean velocity depending on surface conditions
FAA	$T_c = \frac{0.000524(1.1 - C)L^{0.5}}{S^{1/3}}$	Airport region, urban region or surface flow
Izzard	$T_c = \frac{0.00547(0.0178i + C)L^{0.33}}{S^{0.333}i^{0.667}}$	Delay constant( $C$ ) = flat pave region: 0.007, Concrete pave region: 0.012, Gravel pave region: 0.017, Cutted lawn: 0.046, Dense lawn: 0.060
Morgali and Linsley (1965)	$T_c = \frac{1.396 \times 10^{-6} L^{0.6} n^{0.6}}{i^{0.4} S^{0.3}}$	Surface flow
SCS lag	$T_c = \frac{0.257L^{0.8}[(1000/CN) - 9]^{0.7}}{1900S^{0.5}}$	Farmland or urban, $T_c = 1.67 \times basin\ lag$ , $A \leq 2,000acres$
Jung (2005)	$T_c = 0.119 \frac{L^{0.777}}{S^{0.212}}$	Korean, $A$ : $8.5 \sim 520km^2$ , $S$ : $0.00582 \sim 0.04057$
Yoon et al. (2005)	$T_c = 1.08 \frac{A^{0.09} L^{0.16}}{S^{0.12}}$	Korean, $A$ : $\sim 5,000km^2$

간은 관측자료를 분석하여 추정 가능한 값이기는 하지만 자료가 충분하지 않거나 아예 없는 미계측 유역에서는 경험식을 이용하는 것이 일반적이다. 다음 표는 다양한 연구자들이 제시한 도달시간의 경험식을 정리한 것이다(Table 1). 경험식의 적용을 위해서는 특히 그 제약사항을 잘 파악하는 것이 중요하다.

(3) 감쇄상수( $K_k$ )

Shot noise process를 강우-유출 해석에 적용하기 위해서 필요한 감쇄상수는 선형저수지 이론에 근거하여 저류상수로 대체할 수 있다. 즉, 순간 강우입력에 대한 선형저수지의 응답 함수는 다음과 같이 지수적으로 감소하는 형태를 가진다.

$$O = \frac{1}{K} e^{-t/K} \tag{9}$$

여기서,  $O$ 는 시간  $t$ 에서의 유출량,  $K$ 는 저류상수이다. 위 식의 형태가 shot noise process의 형태와 매우 유사하다는 것은 쉽게 발견할 수 있다. 따라서 shot noise process의 감쇄상수는 선형저수지 모형의 저류상수로 대체하여 사용할 수 있다.

도달시간과 마찬가지로 저류상수 또한 관측자료를 분석하여 추정 가능한 값이다. 그러나 미계측 유역의 경우에는 경험식을 이용하는 것이 일반적이다. 다음 표는 다양한 연구자들이 제시한 저류상수의 경험식을 정리한 것이다(Table 2). 저류상수에 대한 경험식을 적용할 경우에도 물론 그 제약사항을 잘 파악하는 것이 중요하다.

### 3. 적용사례

#### 3.1 가상 유역에의 적용

##### 3.1.1 가상 유역의 구성 및 소유역 특성

본 연구에서는 shot noise process 기반 유출모형을 가상 유역에 적용하였다. 가상 유역은 총 5개의 소유역으로 구성되어 있으며, 각 소유역에 내린 강우는 각 소유역에 위치한 출구를 통해 관로에 유입되고, 관로를 통해 최종적으로 유역 출구에 도달하게 된다(Fig. 3). 다음 Table 3은 유출해석을 위해 필요한 소유역의 정보를 정리한 것이다.

##### 3.1.2 소유역별 단위 응답함수의 결정 및 유출해석

Shot noise process 기반 유출모형의 매개변수는 지체시간, 감쇄상수, 첨두치이다. 이중 감쇄상수는 Table 3에 정리된 소유역별 특성치 중 유역 저류상수와 하도 저류상수를 적용하였으며, 지체시간은 유역 지체시간과 하도 지체시간을 적용하였다. 마지막으로 첨두치는 수정합리식을 적용하여 산정하였다.

수정합리식을 이용하여 첨두유량을 산정하는데 있어서 강우강도는 10 mm/hr, 강우 지속기간으로는 1분, 10분, 60분을 적용하였다. 이는 가상유역의 가장 적절한 지속기간을 갖는 응답함수를 유도하기 위해서이다. 수정합리식 적용을 위해 필요한 도달시간으로는 Table 3에 정리된 소유역별 특성치 중 유역 지체시간을 적용하였다. 예를 들어, 3번 소유역의 경우, 지속기간 1분, 10분, 60분일 때의 첨두유량은 각각 0.11 m<sup>3</sup>/sec, 1.11 m<sup>3</sup>/sec, 1.11 m<sup>3</sup>/sec, 총 유출량은 66.70 m<sup>3</sup>, 666.40 m<sup>3</sup>, 3999.90 m<sup>3</sup>으로 산정되었다. 3번 소유역의 도달

Table 2. Empirical formula for storage coefficient

Name	Empirical formula	Characteristics
Clark (1945)	$K = C \frac{L}{\sqrt{S}}$	Natural river, $A : 647 \sim 4298 \text{ km}^2$
Linsley (1945)	$K = \frac{b L \sqrt{A}}{\sqrt{S}}$	Modified Clark formula
Laurenson (1962)	$K = 1.03A^{0.27}$	-
Russell et al. (1979)	$K = \alpha T_c$	$\alpha =$ generally, 0.8 ~ 1.2, Urban, 1.1 ~ 2.1, Natural, 1.5 ~ 2.8, Mountain, 8 ~ 12
Sabol (1988)	$K = \frac{T_c}{1.46 - 0.0867(L^2/A)}$	-
Yoon and Hong (1995)	$K = 5.29A^{0.074}$	Korean, $A : 33.8 \sim 472.5 \text{ km}^2$
Lee et al. (1997)	$K = 3.92A^{0.06}$	Korean, $A : 33.8 \sim 472.5 \text{ km}^2$
Jung (2005)	$K = 1.521 \frac{L^{0.263}}{S^{0.120}}$	Korean, $A : 8.5 \sim 520 \text{ km}^2$ , $S : 0.00582 \sim 0.04057$
Yoon et al. (2005)	$K = 1.89A^{0.108} L^{0.179}$	Korean, $A : \sim 5,000 \text{ km}^2$

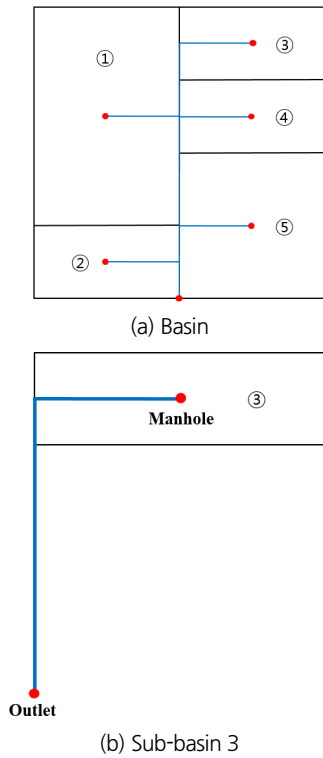


Fig. 3. Structure of the sub-basin division and the runoff from sub-basin 3

시간이 10분이므로 지속기간 10분과 60분 일 때의 침투유량은 동일하게 산정된다.

다음으로, 지속기간별로 산정된 유출수문곡선을 고려하여 가상유역에 대한 shot noise process 기반 유출모형의 매개변수인 침투치를 결정하였다(Eq. 8). 이 때 감쇄상수로는 Table 3에 정리된 각 소유역의 유역 저류상수를 적용하였다. 마지막으로 산정된 3번 소유역의 침투치, 감쇄상수를 적용하여 shot noise process 기반 응답함수를 유도하였다. Fig. 4는 3번 소유역 출구에서의 지속기간별 shot noise process 기반 유출모형의 응답함수와 수정합리식에 의한 유출수문곡선을 비교한 것이다. Shot noise process 기반 유출모형의 단위 응답함수에 지속기간 1분, 10분, 60분을 적용했을 경우, 침투유량은 각각  $0.11 \text{ m}^3/\text{sec}$ ,  $1.11 \text{ m}^3/\text{sec}$ ,  $6.67 \text{ m}^3/\text{sec}$ , 총유출량은 각각  $66.05 \text{ m}^3$ ,  $666.56 \text{ m}^3$ ,  $4005.34 \text{ m}^3$ 로 산정되었다. 지속기간별 shot noise 모형 기반 유출모형의 단위 응답함수와 수정합리식에 의한 유출수문곡선을 비교한 결과, 지속기간 1분, 10분인 경우 동일한 침투치가 산정되었다. 그러나 지속기간 60분인 경우 큰 차이를 보이는 것을 확인하였다. 이는 3번 소유역에 수정합리식을 적용하는 경우 유역 지체시간이 강우 지속기간보다 작아 유역 지체시간에서 침투유량에 도달한 후 더 이상 증가하지 않고 강우 지속기간까지 평형상태를 유지하기 때문이다.

Table 3. Characteristics of each sub-basin

Sub-basin	Runoff coefficient (C)	Area (km <sup>2</sup> )	Basin delay time (min)	Basin storage coefficient (min)	Channel delay time (min)	Channel storage coefficient (min)
①	0.9	1.5	30	30	15	15
②	0.8	0.5	10	10	5	5
③	0.8	0.5	10	10	20	20
④	0.9	0.5	10	10	15	15
⑤	0.8	1.0	20	20	10	10

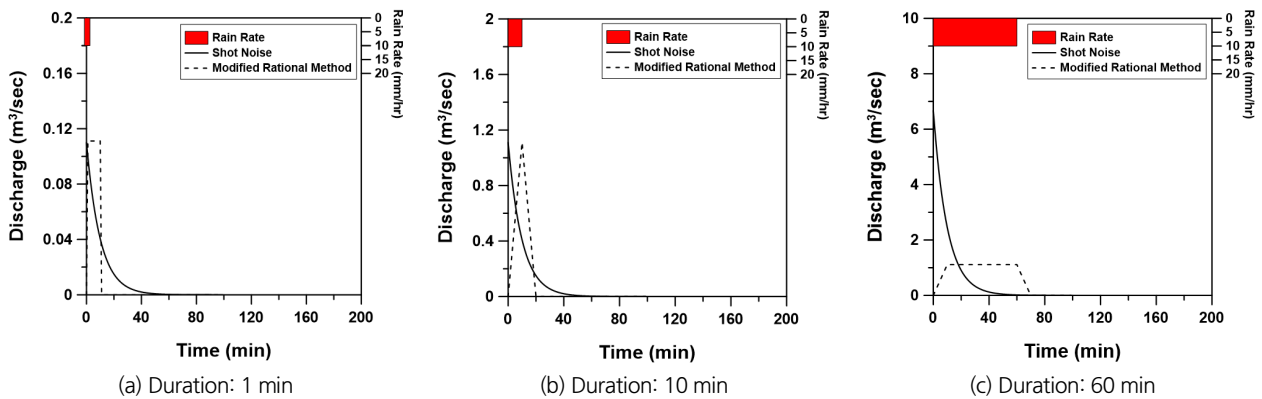


Fig. 4. Response function of the shot-noise-process-based rainfall-runoff model at the exit of the sub-basin 3

그러나 전체 유역 출구지점에서의 유출특성은 각 소유역 출구에서의 유출특성과는 크게 다르다. 즉, 각 소유역 출구에서의 유출량은 연결된 관로를 따라 전체 유역 출구지점으로 이동하며, 이 때 추가로 저류효과 및 지체효과가 발생하기 때문이다. 따라서 전체유역에 대한 응답함수를 유도하기 위해서는 관로에서의 지체시간과 저류상수를 추가로 고려해 주어야 한다. 결과적으로 shot noise process 기반 유출모형의 매개변수인 침투치도 다르게 결정되게 된다. 결정된 각 소유역별 침투치, 감쇄상수 및 관로에서의 지체시간을 고려하여 강우 지속시간에 따른 전체 유역 출구에 대한 shot noise process 기

반 응답함수를 유도하면 다음 Fig. 5와 같다. 전체유역 출구지점에서의 응답함수 유도에 관로에서의 저류상수를 추가로 고려함에 따라 침투유량은 감소하였고 기저시간은 증가하였다. Table 4는 소유역별 지속시간에 따른 침투유량 및 총 유출량을 정리한 것이다.

마지막으로 각 소유역별 shot noise process 기반 응답함수를 합성하여 유역을 대표하는 단위 응답함수를 유도하였다. 단위 응답함수를 유도하기 위해 각 강우 지속시간에 따른 강우강도를 조정하였다. 이는 단위도에서와 같이 단위 크기의 유효우량을 고려하기 위함이다. 다음 Fig. 6은 가상유역에 대

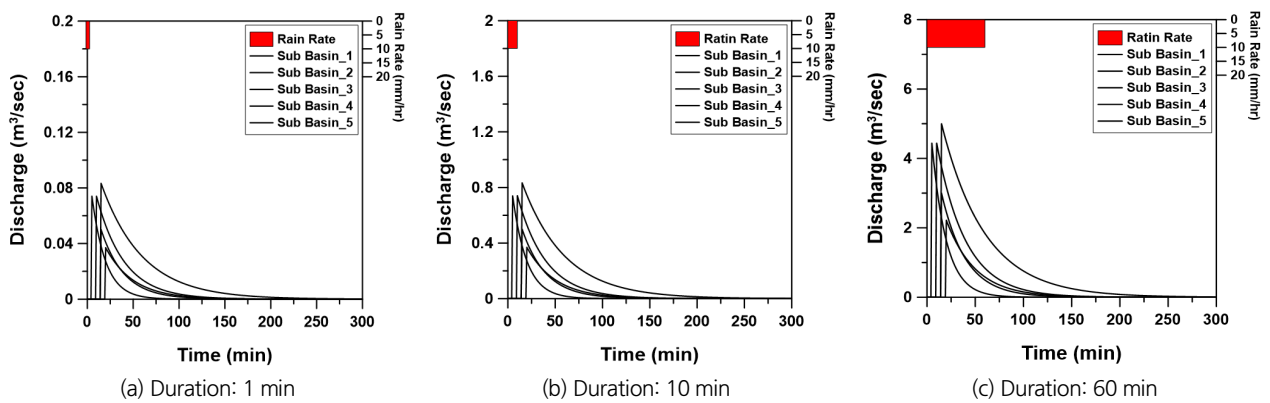


Fig. 5. Response function with duration of shot noise model-based rainfall-runoff model in outlet of the basin

Table 4. Peak flow and total volume at the exit of each sub-basin with different rainfall durations

Sub-basin	Duration (min)	Modified rational method (Outlet of the sub-basin)		Shot noise model (Outlet of the sub-basin)		Shot noise model (Outlet of the basin)	
		Peak flow (m³/sec)	Total volume (m³)	Peak flow (m³/sec)	Total volume (m³)	Peak flow (m³/sec)	Total volume (m³)
①	1	0.13	225.02	0.13	225.06	0.08	225.03
	10	1.25	2,250.18	1.25	2250.63	0.83	2250.61
	60	3.75	13,500.00	7.50	13,503.75	5.00	13,502.49
②	1	0.11	66.67	0.11	66.06	0.07	66.71
	10	1.11	665.42	1.11	666.56	0.74	665.79
	60	1.11	3,995.78	6.67	4,005.34	4.44	3,998.00
③	1	0.11	66.67	0.11	66.06	0.04	66.69
	10	1.11	665.42	1.11	666.56	0.37	665.61
	60	1.11	3,995.78	6.67	4,005.34	2.22	3,996.89
④	1	0.13	75.01	0.13	75.07	0.05	75.03
	10	1.25	750.06	1.25	750.69	0.50	750.31
	60	1.25	4,500.98	7.50	4,503.73	3.00	4,501.48
⑤	1	0.11	133.34	0.11	133.39	0.07	133.34
	10	1.11	1,333.44	1.11	1,333.96	0.74	1,333.77
	60	2.22	7,992.00	6.67	7,995.33	4.44	7,994.22



한 shot noise process 기반 단위 응답함수를 나타낸다. 각기 다른 시간 단위의 응답함수에서 유도된 3개의 단위 응답함수를 비교한 결과, 3개 단위 응답함수 모두 동일한 것으로 나타났다. 이는 기존 단위도와는 달리 유출응답을 모의하기 위해 shot noise process를 적용했고, 또한 적용된 유역 특성치도 동일하기 때문이다.

이상과 같이 유도한 shot noise process 기반 응답함수 이용하여 가상유역에 유출해석을 수행하였다. 유출해석의 입력으로 강우는 강우강도 10 mm/hr로 총 1시간동안 지속되는 것으로 가정하였다. 다음 Fig. 7은 유출해석에 있어 어떤 시간간격(1분, 10분 또는 60분)을 사용하느냐에 따라 달라지는 유출

해석 결과를 보여준다. 즉, 유출해석의 시간 단위가 커질수록 첨두유량은 크게, 첨두시간은 짧게 나타났다(Table 5). 이는 동일한 응답함수를 몇 번 사용하느냐에 따라 만들어지는 당연한 결과이기도 하다. 시간 단위가 10분 또는 60분인 경우 유출 수문곡선이 매끄럽지 않게 나타나는 것도 같은 이유이다. 전체적으로 보면 유출 수문곡선은 시간간격을 짧게 할수록(응답함수를 더 많이 사용할수록) 수렴되는 형태가 된다. 즉, shot noise process 기반 응답함수를 사용하는 경우 유출해석 시간 단위로는 1분이 가장 적절하며, 부득이한 경우 10분을 사용하여도 무방할 것이며, 이는 도시유역의 특성을 감안할 때 적절한 수준으로 판단된다.

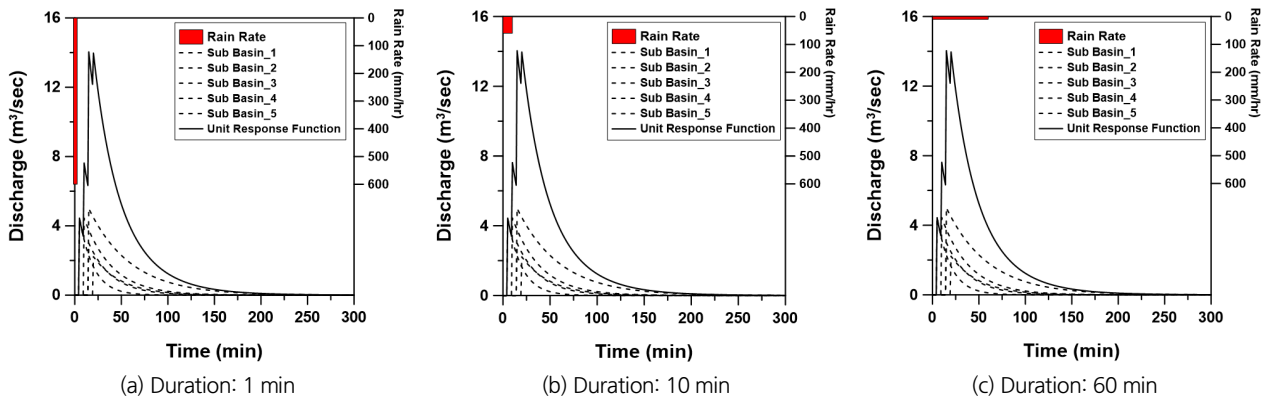


Fig. 6. Unit response functions of shot noise process based rainfall-runoff model at the exit of the entire basin with different rainfall durations but with the same rainfall amount

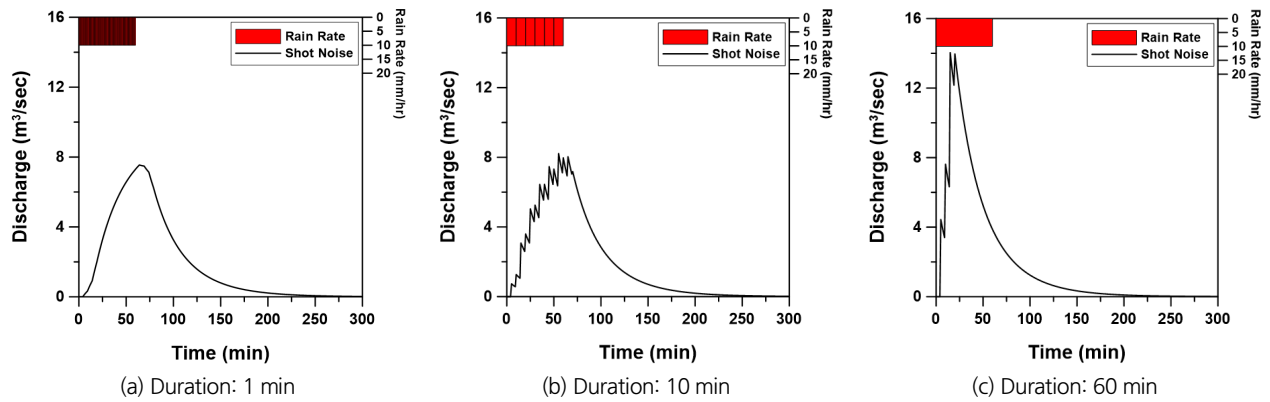


Fig. 7. Rainfall-runoff analysis with the shot noise process based rainfall-runoff model for the artificial basin

Table 5. Summary of rainfall-runoff analysis results using the shot noise process based rainfall-runoff model

Unit response function	Peak flow (m <sup>3</sup> /sec)	Peak time (min)	Total flow (m <sup>3</sup> )
1 min	7.55	64	34,575.29
10 min	8.22	55	34,563.54
60 min	14.04	15	34,559.87

3.2 실제 유역에의 적용

3.2.1 대상 유역의 특성 및 대상 호우사상 설명

본 연구의 대상 유역으로 중동 빗물펌프장 배수유역, 구로1 빗물펌프장 배수유역, 대림2 빗물펌프장 배수유역을 선정하였다. 중동 빗물펌프장 배수유역은 서울시 마포구에 위치하며, 유역 면적은 0.23 km<sup>2</sup>이고 배수유역에 대한 토지이용현황 조사결과 주거지역이 57%, 공공용지 지역이 10%, 도로지역이 10%로 전체면적의 75% 이상을 차지하고 있다. 구로1 빗물펌프장 배수유역은 서울시 구로구에 위치하며, 유역 면적은 1.31 km<sup>2</sup>이고 배수유역에 대한 토지이용현황 조사결과 주거지역이 50%, 상업·업무지역이 13%, 공공용지지역이 15%, 도로지역이 10%로 전체면적의 80% 이상을 차지하고 있다. 대림2 빗물펌프장 배수유역은 서울시 영등포구에 위치하며,

유역 면적은 0.23 km<sup>2</sup>이고 배수유역에 대한 토지이용현황 조사결과 주거지역이 60%, 상업·업무지역이 13%, 공업지역이 10%, 도로지역이 10%로 전체면적의 90% 이상을 차지하고 있다. Fig. 8은 대상 유역의 현황도를 나타내며, Fig. 9는 대상 유역의 유역 경계와 유역 내 주요 관거를 나타낸다.

대상 유역의 강우 자료는 대상 유역 인근에 위치한 기상청 AWS 강우 자료를 이용하였다. 중동 빗물펌프장 배수유역의 경우 마포(411) 지점, 구로1 빗물펌프장 배수유역과 대림2 빗물펌프장 배수유역의 경우 구로(423) 지점의 1분 강우 자료를 이용하였다. 본 연구에서 이용한 호우 사상은 총 3개로 중동 빗물펌프장 배수유역에 2개, 구로1 빗물펌프장 배수유역과 대림2 빗물펌프장 배수유역에 각각 1개씩 적용하였다. 이들 호우사상의 기본 특성은 Table 6에 정리하였다.

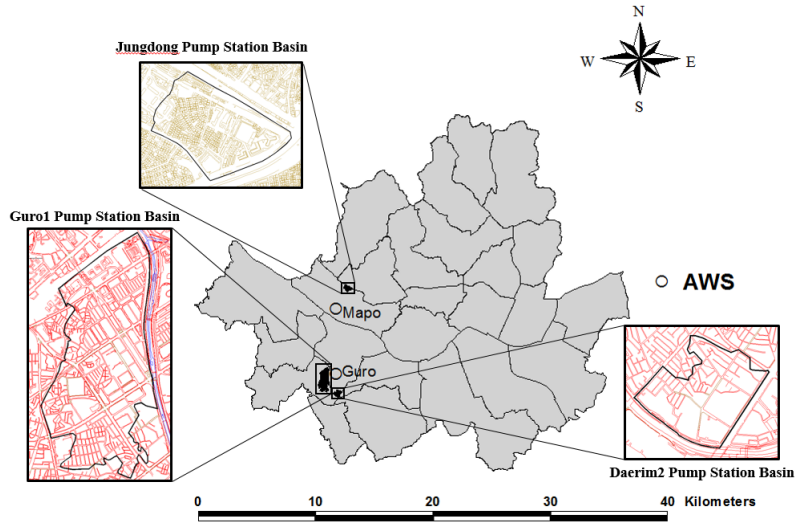


Fig. 8. Locations of three pumping stations and two nearby AWSs

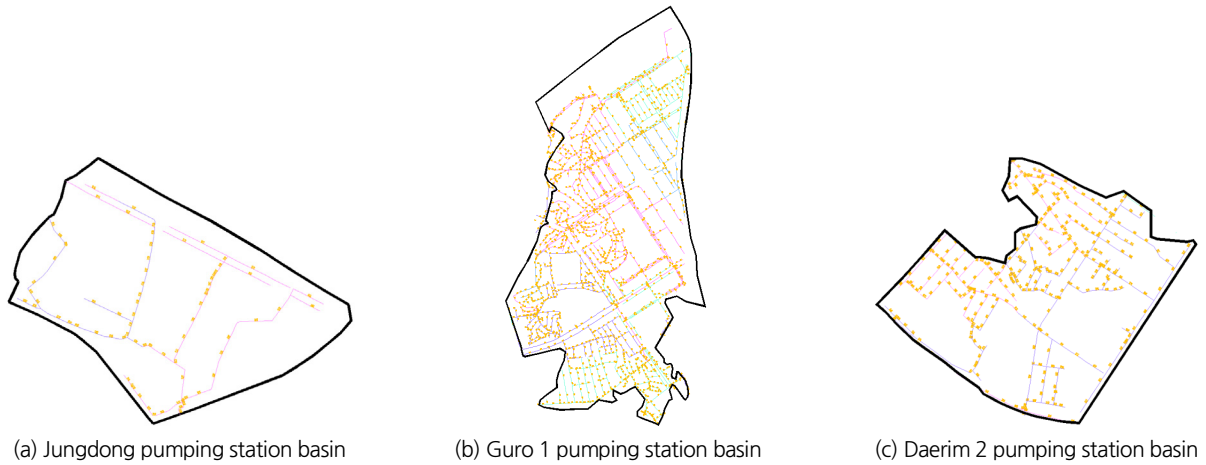


Fig. 9. Shapes of the three basins considered in this study and their major conduit networks

Table 6. Storm events considered in this study

Basin	AWS	Storm event	Period (year/month/day hour)	Duration (hr)	Total rainfall amount (mm)
Jungdong	Mapo (411)	1	2010/09/21 11:00 ~ 2010/09/21 23:00	12	276.0
		2	2011/07/26 15:00 ~ 2011/07/26 22:00	7	139.5
Guro 1	Guro (423)	1	2010/09/21 07:00 ~ 2011/09/21 22:00	15	229.0
Daerim 2	Guro (423)	1	2010/09/21 07:00 ~ 2011/09/21 22:00	15	229.0

3.2.2 소유역 분할 및 하도 매개변수의 결정

Shot noise process 기반 유출모형을 적용하여 대상유역에 대한 유출해석을 수행하기 위해 대상 유역을 소유역으로 분할하고, 소유역별로 유출해석을 수행하는데 필요한 매개변수를 결정하였다. 소유역의 분할은 대상유역의 관망 자료를 이용하여 관거가 소유역의 측면에 위치한다는 가정하에 소유역을 분할하였다. 그 결과, 중동 빗물펌프장 배수유역의 경우 16개 소유역으로 분할하였으며, 구로1 빗물펌프장 배수유역과 대림2 빗물펌프장 배수유역의 경우 각각 35개, 15개 소유역으로 분할하였다. 다음 Fig. 10은 대상 유역별 소유역 분할 결과를 나타낸다.

다음으로 유출해석을 수행하기 위해 필요한 모형의 매개변수를 결정하였다. Shot noise process 기반 유출모형의 매개변수는 지체시간, 감쇄상수, 침투치이다. 지체시간은 유역 지체시간과 하도 지체시간으로 구분하여 결정하였다. 유역 지체시간은 Kerby 공식을 이용하여 결정하였으며, 하도 지체시간은 Kraven II 공식을 이용하여 결정하였다. Kerby 공식을 이용하여 소유역별 유역 지체시간을 결정하는데 있어, 유역 평균 경사는 GIS 프로그램인 Arcview를 이용하여 산정하였다. WAMIS (국가 수자원 관리 종합 정보시스템)에서 제공하는 수치표고자료(Digital Elevation Model, DEM)를 이용하여 Arcview를 통해 소유역의 평균 경사를 산정하였다. 조도

계수는 Park and Lee (2008)이 정리한 8개 대분류체계에 의한 지표면 조도계수를 사용하였다. WAMIS에서 제공하는 토지피복도를 이용하여 토지피복상태에 따라 각 소유역별 조도계수를 선정하였다. 지표수 흐름 길이는 유역폭을 결정하여 산정하였다. 이는 실제 소유역이 대칭적인 직사각형 형태로나타나지 않기 때문에 지표유출이 직사각형 집수유역 수로에 대해 수직하게 흐르는 것으로 가정하고 지표수 흐름길이를 산정하기 위함이다. 유역폭은 각 소유역의 측면에 위치한 관로의 길이로 결정하였다. 결정된 각 소유역별 유역폭을 각 소유역의 면적에 나누어줌으로써 각 소유역별 지표수 흐름길이를 산정하였다. 하도 지체시간은 Kraven II 공식을 이용하여 각 소유역별 출구점에서 전체유역의 출구점까지 연결된 각각의 관거들의 지체시간을 산정하고 모두 합하여 소유역별 하도 지체시간을 결정하였다.

감쇄상수는 우리나라 실무에서 많이 이용되고 있는 Russell 공식을 이용하여 산정하였다. 이때 상수  $\alpha$ 는 1.0을 적용하였다.  $\alpha$ 는 원래 공식에서 도시지역 1.1~2.1, 자연지역 1.5~2.8, 산림지역에서 8.0~12.0 범위로 제시되고 있으나 일반적으로 1.0을 적용하고 있다(Jeong and Yoon, 2009). 감쇄상수는 유역 감쇄상수와 하도 감쇄상수를 구분하여 결정하였다. 이는 각 소유역별 출구점에서 전체유역 출구점을 연결하는 관로에서의 감쇄 특성을 고려하기 위함이다.

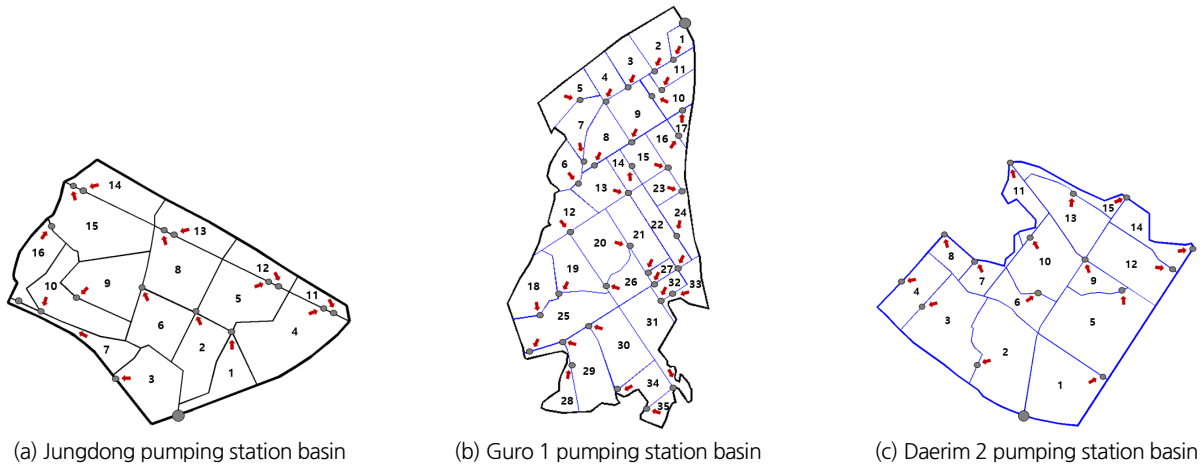


Fig. 10. Result of sub-basin division for each basin considered in this study

침투치는 수정합리식의 개념을 이용하여 결정하였다. 수정합리식을 이용하여 침투유량을 산정하는데 있어서 강우강도는 10 mm/hr, 강우 지속기간은 1분을 적용하였다. 이때, 유출계수는 Ponce (1989)가 정리한 토지이용도에 따른 합리식의 유출계수 범위를 참고하였다. 국토지리정보원에서 제공하는 토지이용도를 이용하여 토지이용상태에 따라 각 소유역별 유출계수를 선정하였다. 유출계수는 일반주택지의 경우 0.75, 고층주택지는 0.70, 상업지역은 0.95, 내대지는 0.5, 도로는 0.95, 철로는 0.40, 공업지역은 0.75, 교육 및 군사시설은 0.50, 공공용지는 0.95, 하천은 1.0을 적용하였다. 수정합리식을 이용하여 산정한 침투유량을 적용하여 대상유역에 대한 shot noise 모형 기반 유출모형의 매개변수인 침투치를 결정하였다. 각 소유역별로 산정된 총 유출량을 적용하여 Eq. (8)을 만족하는 침투치를 결정하였다. 침투유량은 앞서 수정합리식을 이용하여 산정한 침투유량을 적용하였고, 감쇄상수는 유역 감쇄상수를 적용하였다.

3.2.3 단위 응답함수 결정

전체 유역 출구지점에 대한 각 소유역별 shot noise process 기반 1분 단위 응답함수를 합성하여 유도한 전체유역에 대한 1분 단위 응답함수는 다음 Fig. 11과 같다. 이 그림에서 실선은 전체 유역에 대한 shot noise process 기반 유출모형의 1분 단위 응답함수를 나타내며, 점선은 전체 유역 출구지점에 대한

각 소유역별 shot noise process 기반 유출모형의 1분 단위 응답함수를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼, 1분 단위 응답함수의 침투유량은 구로1 빗물펌프장 배수유역에서 가장 크게 나타났으며, 중동 빗물펌프장 배수유역과 대림2 빗물펌프장 배수유역은 유사하게 나타났다. 침투시간 역시 구로1 빗물펌프장 배수유역에서 가장 길게 나타났으며, 중동 빗물펌프장 배수유역과 대림2 빗물펌프장 배수유역은 동일하게 나타났다. 이들 응답함수의 특성을 정리하면 Table 7과 같다.

3.2.4 결과 검토

본 연구에서는 shot noise process 기반 1분 단위 응답함수를 실제 호우사상에 적용하여 유출해석을 수행하였다. 아울러 도시유역에서의 shot noise process 기반 유출모형의 적용성을 평가하기 위해, shot noise process 기반 유출모형의 결과와 빗물펌프장 유입량 자료를 비교하였다. 빗물펌프장의 유입량 자료는 직접 관측된 유입량 자료가 아닌 빗물펌프장의 펌프가동기록과 저류지 수위자료를 이용하여 산정한 것이다. 그 결과는 Fig. 12와 같다.

이 그림에서 확인할 수 있는 것처럼, 먼저, 중동 빗물펌프장 배수유역에 호우사상 1과 2를 적용한 경우와 구로1 빗물펌프장 배수유역에 호우사상을 적용한 경우, 대림2 빗물펌프장 배수유역에 호우사상을 적용한 경우는 모의된 유출수문곡선이 관측값과 매우 유사하게 나타났다. 특히, 중동 빗물펌프장 배

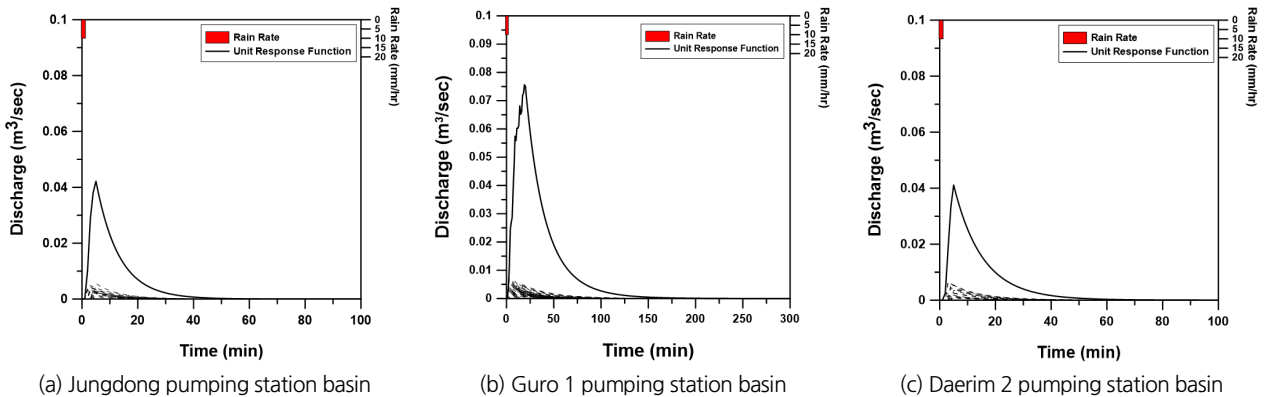


Fig. 11. Comparison of one-minute unit response functions of the shot noise process based rainfall-runoff model determined for three basins considered in this study

Table 7. Major characteristics of the one-minute unit response function of the shot noise process based rainfall-runoff model determined for each basin

Basin	Peak flow (m <sup>3</sup> /sec)	Peak time (min)	Total flow (m <sup>3</sup> )
Jungdong	0.0422	5	26.88
Guro 1	0.0756	20	157.34
Daerim 2	0.0408	5	29.93

수유역에 호우사상 2를 적용한 경우와 구로1 빗물펌프장 배수유역에 호우사상을 적용한 경우에는 첨두시간은 동일하게, 첨두유출량도 매우 유사하게 나타났다. 중동 빗물펌프장 배수유역에 호우사상 1을 적용한 경우와 대림2 빗물펌프장 배수유역에 호우사상을 적용한 경우에는 유출수문곡선이 관

측값과 유사한 형태를 나타나는 하였으나 첨두시간과 첨두 유출량에서는 약간의 차이를 보였다(Table 8). 빗물펌프장의 유입량 자료가 실제 관측값이 아닌 추정값이라는 점을 고려한다면 이러한 결과는 shot noise process 기반 유출모형이 충분한 적용성이 있음을 나타내는 것으로 판단된다.

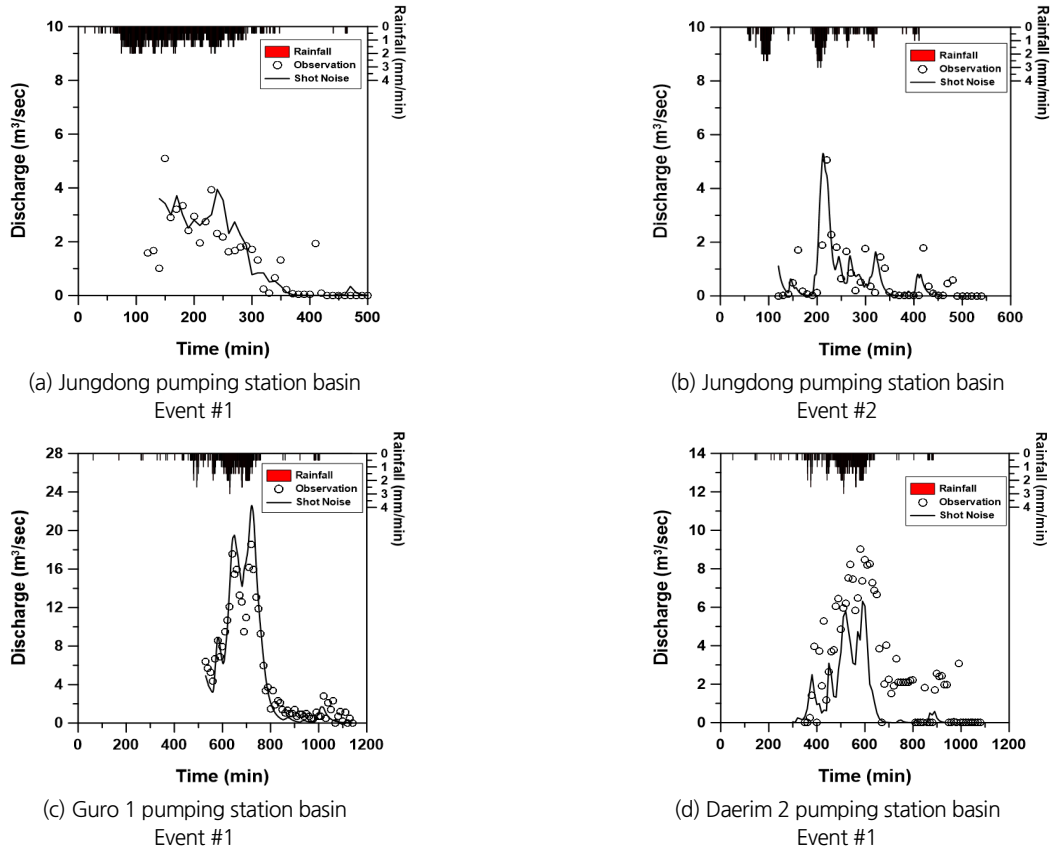


Fig. 12. Comparison of observed, SWMM and simulated runoff hydrographs derived by applying the shot noise process based rainfall-runoff model

Table 8. Summary of runoff results

	Jungdong pumping station basin			
	(a) Event #1		(b) Event #2	
	Observed	Shot noise	Observed	Shot noise
Peak flow (m <sup>3</sup> /sec)	5.09	3.95	5.05	5.31
Peak time (min)	150	240	220	220
Total flow (m <sup>3</sup> )	31,619.88	31,607.40	15,809.70	22,788.37
	Guro 1 pumping station basin		Daerim 2 pumping station basin	
	(c) Event #1		(d) Event #1	
	Observed	Shot noise	Observed	Shot noise
Peak flow (m <sup>3</sup> /sec)	18.54	22.48	9.01	6.31
Peak time (min)	720	720	580	590
Total flow (m <sup>3</sup> )	189,939.90	197,305.98	124,164.30	51,359.82

## 4. 결론

본 연구에서는 도시유역에서의 실시간 홍수예경보 목적으로 shot noise process 기반의 강우-유출모형을 제안하고 그 적용성을 평가하였다. 제안된 모형은 각 소유역 별 침투치, 감쇄상수 및 지체시간으로 결정되는 shot noise의 합으로 표현되며, 기존 강우-유출 모형과는 달리 각 소유역 별 유출량이 독립적으로 유역 출구에 도달하는 구조를 가지고 있다. 제안된 모형의 매개변수는 통상 경험식을 가지고 결정하는 소유역의 집중시간과 저류상수 및 관로에서의 도달시간과 저류상수를 이용하여 쉽게 결정될 수 있는 것으로 확인되었다. 본 연구에서 제안된 모형은 중동 빗물펌프장 배수유역, 구로1 빗물펌프장 배수유역, 대림2 빗물펌프장 배수유역에서 관측된 총 4개의 호우사상에 적용하여 그 성능을 평가하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 동일한 가상유역에 대한 1분, 10분, 60분 단위의 응답함수에서 유도된 3개의 단위 응답함수(총 강우량 동일)를 비교한 결과, 3개 단위 응답함수 모두 동일하게 나타났다. 이는 shot noise process에 기반한 강우-유출 모형의 특성이며, 아울러 각 지속시간에 따른 응답함수를 유도하는 과정에서 동일한 유역 특성치를 적용했기 때문이다.
- 2) 소유역에 적용이 적절한 단위 응답함수의 지속기간을 결정하기 위해, 가상의 소유역을 설정하고 지속기간 1분, 10분, 60분에 대한 단위 응답함수를 유도하였다. 유도된 지속기간별 단위 응답함수를 이용하여 가상 소유역에 대한 유출해석을 수행한 결과, 응답함수의 시간 단위는 1분이 가장 적절한 것으로 나타났다.
- 3) Shot noise process 기반 1분 단위 응답함수를 실제 호우사상에 적용하여 유출해석을 수행한 결과, 모의된 유출수문 곡선과 관측값이 매우 유사한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 도시유역에서의 유출해석을 수행하는데 있어 제안된 유출모형이 충분한 적용성이 있다는 것을 보여준다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(17AWMP-B079625-04)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Ahn, S. J., and Kim, J. G. (1999). "Runoff analysis of urban area using urban runoff models." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 32, No. 4, pp. 479-488.
- Andjelkovic, I. (2001). *Guidelines on non-structural measures in urban flood management*. International Hydrological Programme (IHP), UNESCO, Paris.
- 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.
- Bourque, L. B., Siegel, J. M., Kano, M., and Wood, M. M. (2006). "Weathering the storm: the impact of hurricanes on physical and mental health." *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, SAGE, Vol. 604, No. 1, pp. 129-151.
- 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*, Springer, pp. 421-434.
- Claps, P., Giordano, A., and Laio, F. (2005). "Advances in shot noise modeling of daily streamflows." *Advances in Water Resources*, Elsevier, Vol. 28, No. 9, pp. 992-1000.
- Clark, C. O. (1945). "Storage and the unit hydrograph." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, ASCE, Vol. 110, pp. 1419-1446.
- Cowperrtwait, 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*, Elsevier, pp. 75-94.
- Habitat, U. N. (2007). *Global report on human settlements 2007: Enhancing urban safety and security*. Earthscan, London.
- 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. (2009). *Water resources design practice*. Goomibook, Seoul.
- Johnstone, D., and Cross, W. P. (1949). *Elements of applied hydrology*. Ronald Press, New York.
- Jonkman, S. N., Maaskant, B., Boyd, E., and Levitan, M. L. (2009). "Loss of life caused by the flooding of New Orleans after hurricane Katrina: analysis of the relationship between flood characteristics and mortality." *Risk Analysis*, Springer, Vol. 29, No. 5, pp. 676-698.
- Jung, S. W. (2005). *Development of empirical formulas for the parameter estimation of Clark's watershed flood routing model*. Ph. D. dissertation, Korea University, Seoul, Korea.
- Kerby, W. S. (1959). "Time of concentration for overland flow." *Civil Engineering*, ASCE, Vol. 29, No. 3, pp. 174.
- Kirpich, P. Z. (1940). "Time of concentration of small agricultural watersheds." *Civil Engineering*, ASCE, Vol. 10, No. 6, pp. 362.

- Konecny, F. (1992). "On the shot-noise streamflow model and its applications." *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, Springer, Vol. 6, No. 4, pp. 289-303.
- Konrad, C. P. (2003). *Effects of urban development on floods*. USGS, Reston, Virginia.
- Lai, S. H., Ab, G. A., Zakaria, N. A., Leow, C. S., Chang, C. K., and Yusof, M. F. (2000). "Application of SWMM for urban storm-water management: a case study with modelling." *Management*, Vol. 2000, pp. 1-9.
- Laurenson, E. M. (1962). *Hydrograph synthesis by runoff routing*. University of New South Wales, Water Research Laboratory, Manly Vale, NSW.
- Lee, J. S., Lee, J. J., and Son, K. I. (1997). "A comparative study of conceptual models for rainfall-runoff relationship in small to medium sized watershed-Application to Wi stream basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 30, No. 3, pp. 279-291.
- Lee, J. T. (1998). "Urban runoff and water quality model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 31, No. 6, pp. 709-725.
- Linsley, R. K. (1945). "Discussion of storage and the unit hydrograph by C. O. Clark." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, ASCE, Vol. 110, pp. 1452-145.
- Maitland, D., Phillips, B. C., Goyen, A. G., and Thompson, G. R. (1999). "Integrated modelling of urban drainage systems using XP-SWMM32." *Proceedings the Eighth International Conference on Urban Storm Drainage*, Sydney, Australia, pp. 1887-1895.
- Mehedi, H. T., Imran, K., and Adil, H. (2017). "Application of SWMM for analysis of flash floods in urban areas: a case study for Chaktai Khal watershed in Chittagong." *Proceedings of 6th International Conference on Water & Flood Management*, Bangladesh, Vol. 6, pp. 1-9.
- Moon, Y. I. (2014) *A study on the construction of the Dorimcheon flood prediction system*. Seoul.
- Morgali, J. R., and Linsley, R. K. (1965). "Computer analysis of overland flow." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 91, No. 3, pp. 81-100.
- 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*, Wiley, 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*, Springer, Vol. 11, No. 6, pp. 483-510.
- O'Connell, P. E. (1977). "Shot noise models in synthetic hydrology." *Mathematical Models for Surface Water Hydrology*, Wiley, pp. 19-26.
- 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 Systems*, Water Resources Publications, pp. 281-314.
- Park, S., and Lee, J. (2008). "Determination of surface roughness consider the landuse and classification method." *Proceedings 34th Annual Conference And 2008 Civil Exposition*, KSCE, Daejeon, Vol. 2008, No. 10, pp. 564-567.
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering hydrology: principles and practices*. Prentice-Hall, New Jersey.
- Price, R. K., and Vojinovic, Z. (2008). "Urban flood disaster management." *Urban Water Journal*, Taylor & Francis, Vol. 5, No. 3, pp. 259-276.
- Russell, S. O., Sunnell, G. J., and Kenning, B. F. (1979). "Estimating design flows for urban drainage." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 105, No. 1, pp. 43-52.
- Rziha, F. (1876). *Eisenbahn-Unter-und Oberbau (Vol. 1)*. Verlag der KK Hof-und Staatsdr., Vienna, Austria.
- Sabol, G. V. (1988). "Clark unit hydrograph and R-parameter estimation." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 1, pp. 103-111.
- Shin, H., Park, Y., and Hong, I. (2007). "The study on the development of flood prediction and warning system at ungaged coastal urban area." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 6, pp. 447-458.
- Sim, O. B. (2008). "Characteristics and development strategies of the urban flood damage in Korea." *Water for Future*, KWRA, Vol. 41, No. 9, pp. 41-46.
- Son, A. L., Kim, B., and Han, K. Y. (2015). "A study on prediction of inundation area considering road network in urban area." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 35, No. 2, pp. 307-318.
- Sullivent, E. E., West, C. A., Noe, R. S., Thomas, K. E., Wallace, L. D., and Leeb, R. T. (2006). "Nonfatal injuries following Hurricane Katrina—New Orleans, Louisiana, 2005." *Journal of Safety Research*, Elsevier, Vol. 37, No. 2, pp. 213-217.
- Tingsanchali, T. (2012). "Urban flood disaster management." *Procedia Engineering*, Elsevier, Vol. 32, pp. 25-37.
- Todorovic, P., and Woolhiser, D. A. (1987). "A shot-noise model of streamflow." *In Flood Hydrology*, Springer, pp. 143-163.
- USDA SCS (1975). *Urban hydrology for small watersheds*. USDA SCS, Washington, D.C.
- Walesh, S. G. (1989). *Urban surface water management*. Wiley, N.J.
- 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*, Wiley, Vol. 13, No. 1, pp. 101-108.
- Yoon, S. Y., and Hong, I. P. (1995). "Improvement of the parameter estimating method for the Clark model."
- Yoon, S., and Lee, B. (2016). "Urban flood prediction technology development." *Water for Future*, KWRA, Vol. 49, No. 9, pp. 17-24.
- Yoon, T. H., Kim, S. T., and Park, J. W. (2005). "On redefining of parameters of Clark model." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 25, No. 3B, pp. 181-187.