고층 건물의 영향을 고려한 강우-유출 해석 방법 제안

Rainfall-runoff Analysis Method Considering the Effect of High-rise Buildings

조은샘* · 유철상**

Cho, Eunsam*, and Yoo, Chulsang**

Abstract

In this study, a rainfall runoff process analysis method considering the effect of high-rise buildings was proposed. The proposed method was applied to the Yeoksam urban basin in Seoul. For rainfall-runoff analysis, a shot noise process based model was used to independently analyze the runoff from the wall and roof of a high-rise building. Thus, the Yeoksam urban basin was divided into 155 sub-basins for analysis. It was observed that the peak runoff increased by 22.0% in the 9-2 sub-basin. However, in a sub-basin in which the peak runoff increased by 10.0% or more due to high-rise buildings, there was no case where the increase rate of peak runoff was maintained greater than 5.0% until the next sub-basin outlet. Finally, by deriving the runoff hydrograph for the entire Yeoksam urban basin, it was observed that there was no significant difference in rainfall-runoff process, regardless of whether the building was considered. Therefore, it was concluded that the phenomenon of increase in peak runoff due to high-rise buildings occurs only in sub-basin units.

Key words : Urbanization, High-rise Building, Rainfall-runoff Analysis

요 지

본 연구에서는 고층 건물의 영향을 고려하여 강우-유출 과정을 해석하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 방법론은 서울시 역삼 배수분구 단위 유역에 적용되었다. 강우-유출 해석을 위해서는 고층 건물 벽면과 지붕에서 발생하는 유출을 독립적으로 분석하기 위해 shot noise process 기반 모형을 이용하였다. 역삼 배수분구 단위 유역은 155개의 소유역으로 분할되어 분석되었다. 그 결과, 역삼 배수분구의 소유역 중 W/B ratio가 가장 큰 9-2 유역에서는 첨두유출량이 22.0%까지 증가하였다. 반면, 고층 건물에 의해 첨두유출량이 10.0% 이상 증가하는 소유역일지라도 다음 소유역 출구까지 첨두유출량의 증가율이 5.0% 보다 크게 유지되는 경우는 찾아볼 수 없었다. 마지막으로 역삼 배수분구 단위 유역 전체에 대한 유출수문곡선을 유도해본 결과, 건물 고려 유무에 따른 차이가 유의하게 나타나지 않았다. 이에 따라 건물에 의해 첨두유출량이 증가하는 현상은 본 연구의 소유역 단위 정도의 국소적인 범위에서만 발생한다는 결론을 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 도시화, 고층 건물, 강우-유출 해석

1. 서 론

도시화로 인한 불투수면 비율의 증가는 도시에서 발생하는 유출의 첨두유출량을 증가시키고, 첨두시간은 감소시켜 홍수로 인한 피해를 가중시키는 것으로 알려져 있다

(Saghafian et al., 2008; Suriya and Mudgal, 2012). 특히, 전세계적으로 도시의 면적이 급격하게 증가하면서 도시유역의 홍수 문제는 점점 더 심각한 문제로 부각되고 있다(Li et al., 2013; Huong and Pathirana, 2013). 도시 홍수 문제에 대한 적절한 대응책을 수립하기 위해서는 도시유역에서

*정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사후연구원(E-mail: saemrnt@gmail.com)

Member, Post-doctoral Researcher, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

**교신저자, 정회원, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수(Tel: +82-2-3290-3912, Fax: +82-2-3290-3912, E-mail: envchul@korea.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering, Korea University

발생하는 강우-유출 과정을 정교하게 해석할 수 있는 방법론이 필요하다(Brocca et al., 2011; Masseroni et al., 2017). 특히, 자연 유역과 다른 도시유역의 특성을 강우-유출 해석 과정에 반영하는 작업이 중요하다.

최근 들어 주목해야 할 도시유역의 특성 중 하나는 높은 건축물의 수가 증가하고 있다는 것이다. 도시에 인구가 집중되면서 한정된 공간을 최대한으로 활용하기 위해 고층 건물의 수가 증가하기 시작했다. 아울러, 50 m 이상의 고층 건물의 개수 또한 전 세계적으로 증가하고 있는 추세이다(Safarik et al., 2015; Gabel et al., 2017). 반면 강우-유출 해석 관련 연구 동향을 살펴보면 고층 건물을 고려하는 연구가 상당히 제한적인 것을 알 수 있다. 대부분의 연구들은 도시화에 따라 유역의 침투 특성이 바뀌는 현상에 초점을 맞추어 진행되었다.

고층 건물이 존재하는 도시유역에서는 기존 저층 건물 위주의 도시유역과는 다른 수문 특성이 나타나게 된다. 먼저, 차단이라는 현상이 다른 형태로 발휘되게 된다. 이러한 차이는, 먼저, 차단역의 역할을 크게 바꾼다. 기본적으로 연직방향으로의 강우 차단과 수평방향으로의 강우 차단이 다르다는 점에 주목할 필요가 있다. 연직방향의 차단은 주로 유출을 가로막는 역할로서의 차단이며, 식생이나 지표면의 다양한 구조물로 인해 발생한다. 그러나 수평방향의 차단은 오히려 지나가는 강우를 채집(Intercept)하여 유출량을 증가시키는 방향으로 역할하게 된다.

아울러, 고층 건물은 도시유역의 유출 경로를 복잡하게 바꾸는 역할을 한다. 특히, 고층 건물에 의해 유출 경로가 바뀌는 현상은 건물 벽면에서 발생하는 유출 과정의 특성과 관련이 깊다. 건물 벽면에서 발생하는 유출에 관련된 연구는 건축공학분야에서 다양하게 진행된 바 있다(Beijer and Johansson, 1976; Hall and Kalimeris, 1982; Blocken and Carmeliet, 2012). Beijer and Johansson (1976)은 콘크리트 벽면에서 발생하는 유출을 관측하고, 이를 단순한 강우-유출 모형을 이용하여 추정하는 연구를 수행하였다. 이후, Hall and Kalimeris (1982)는 건물 높이에 따라 형성되는 수막의 두께를 계산하고, 그에 따라 유속이 어떻게 바뀌는지 확인하였다. Blocken and Carmeliet (2012)은 수치해석모형을 이용하여 벽면 유출을 모의한 바 있으며, 전체적으로 벽면 유출의 거동이 하도에서의 흐름 형태와 유사하게 나타나는 것을 확인하였다.

본 연구의 목적은 고층 건물에 의해 바뀌는 차단 특성과 유출 경로를 고려하여 강우-유출 과정을 해석하는 방법을 제안하는 것이다. 이를 위해, 고층 건물 벽면에서 발생하는 유출을 독립적으로 분석하고자 한다. 기존 유역과 고층 건물 벽면에서 발생하는 유출을 함께 고려하기 위해 본 연구에서는 Shot noise process 기반 강우 유출 모형을 이용할 것이다. 아울러, 실제 규모의 도시유역에서 건물의 영향이 어떻게 나타나는지 확인하기 위해 본 연구에서는 서울시 역삼 배수

분구 단위 유역을 선정하여 본 연구의 방법론을 적용해보고자 한다.

2. 분석 방법

2.1 고층 건물에 의한 강우-유출 과정 변화

일반적으로 단기간에 발생하는 강우-유출 과정에서는 차단되는 강우량이 증발하여 유출에 기여하지 않는 것으로 고려된다. 반면, 고층 건물로 인해 차단되는 강우량은 벽면을 타고 흘러내려 유출에 기여할 수 있다. 이에 따라, 기존 강우-유출 해석 방법처럼 차단량을 증발하는 것으로 판단할 수 없게 된다.

Cho et al. (2020)은 건물 벽면에 의해 차단되는 강우량을 추정하는 경험식을 제안하였다. 차단량 추정식의 기본 형태는 기존 측면 강우강도의 연직분포와 면적분포를 고려하여 결정되었으며, 건물 모형을 이용한 실험을 통해 차단량 추정식의 매개변수가 추정되었다. 아울러, 건물에 의한 차단량을 실제로 관측하여 차단량 추정식의 적용성이 검증되었다. Cho et al. (2020)이 제안한 경험식은 Eq. (1)과 같다.

$$Q = 0.161 B H U R_h^{0.88} \quad (1)$$

위 식에서 R_h 는 지면에서 관측한 강우강도(mm/hr), B는 건물 벽면의 폭(m), H는 건물의 높이(m), U는 풍속(m/s), Q는 벽면에 의해 차단되는 강우량($m^2 \cdot mm/h$)이다. 본 연구에서는 Eq. (1)을 적용하여 건물에 의한 차단량을 계산하고, 이를 고층 건물 벽면에서 발생하는 유출량의 입력 자료로 이용하였다.

고층 건물은 도시유역의 수평적인 유출 경로를 바꾸고, 유출 경로를 다양하게 만든다. 특히, 고층 건물 지붕과 벽면에서 발생하는 유출로 인해 기존 유출 경로에 수직적인 유출 경로가 추가되게 된다. Fig. 1은 기존 도시유역의 유출 경로와 고층 건물이 존재하는 도시유역의 유출 경로를 비교한 것이다.

먼저, 수평적 유출 경로의 변화는 고층 건물이 유출 경로를 방해하기 때문에 발생한다. 기존 도시유역의 유출 경로 중 일부를 건물이 방해함으로써 완전히 다른 유출 경로가 만들어진다. Fig. 1(a)는 기존 도시유역의 유출 경로를 나타낸 것이며, 유역 출구 쪽으로 흐름이 집중되는 형태를 보이고 있다. Fig. 1(b)는 고층 건물이 존재하는 유역의 유출 경로를 나타낸 것이다. 고층 건물이 존재하는 도시유역의 경우, 건물이 기존 유출 경로를 방해하므로 건물의 주변의 유출 경로가 왜곡되어 있는 것을 알 수 있다.

다음으로, 고층 건물로 인해 도시유역에는 연직방향의 유출 경로가 추가된다. 기존 일반 도시유역에서의 흐름(Fig. 1(c))과 달리 고층 건물이 존재하는 도시유역의 경우(Fig. 1(d)), 건물 벽면과 지붕이 차지하는 비중이 커진다. 이에

Fig. 1. Comparison of Conventional Flow Path and Changed Flow Path by a Building (Cho, 2020)

따라 강우-유출 해석 과정에서 지붕에 내린 강우, 벽면에 내린 강우의 유출 경로를 추가적으로 고려해야 한다.

2.2 Shot Noise Process 기반 강우-유출 모형

Shot noise는 다이오드나 트랜지스터와 같은 전자장치에서 발생하는 잡음(Noise)을 의미하는 용어이다. Shot noise는 발생 시점에 최댓값을 가지고 이후 지수적으로(Exponentially) 감소하는 특성을 가지고 있다. 이와 같은 Shot noise process를 수식으로 표현하면 Eq. (2)와 같다.

$$O(t) = O_0 e^{-\frac{(t-t_0)}{K}}, (t \geq t_0) \\ = 0, (t < t_0) \quad (2)$$

위 식에서, O_0 는 침투값, K 는 감쇄상수, t_0 는 Shot noise의 발생 시점이다. 여러 개의 Shot noise가 연속적으로 발생할 경우, 전체적인 결과는 각각의 Shot noise들의 총 합으로 나타낼 수 있다. 즉,

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

Bernier et al. (1970)은 최초로 Shot noise process 이론을 수문 분야에 도입하였으며, 이후 장기유출모의에 주로 Shot noise 이론이 적용되었다(Weiss, 1977; Murrone et al., 1997; Claps et al., 2005). Shot noise 이론이 수문 분야에 적용할

경우, Shot noise process의 감쇄상수 K 는 유역의 저류상수로 대체되고, 침투값 O_0 은 강우 자료와 유역의 유출 계수를 분석하여 결정된다.

Kang and Yoo (2018)는 Shot noise process 이론을 적용하여 배수분구 단위 도시유역의 강우-유출 과정을 해석하는 방법을 제안하였다. 특히, Kang and Yoo (2018)는 도시유역의 소유역에서 발생하는 유출이 독립적으로 유역출구에 도달한다는 가정 하에 강우-유출 해석을 수행할 수 있음을 확인하였다. Fig. 2는 일반적인 강우-유출 과정과 본 연구의 강우-유출 과정의 구조를 비교한 것이다. 이러한 구조로 인해 Shot noise process 모형은 다양한 소유역에서 발생하는 유출의 특성을 개별적으로 분석하는데 유용하다. 이에 따라 본 연구에서는 고층 건물의 벽면과 지붕을 독립적인 소유역으로 고려할 수 있는 Shot noise process 모형을 선택하여 이용하였다.

각 소유역에서의 유출이 Shot noise process를 따른다고 가정하면, 단위 지속기간동안의 단위 우량으로 인한 유역 전체에서의 유출 $U(t)$ 는 Eq. (4)와 같이 표현된다.

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

위 식에서 n 는 소유역을, P_n 은 단위 우량에 의해 발생하는 해당 소유역의 침투치, t_{cn} 는 각 소유역에서 유역 출구까지의 도달시간, K_n 는 각 소유역 출구에서 유역출구까지 도달하는 과정을 대표하는 감쇄상수이다. 마지막으로 연속된 강우에 의한 유역의 유출은 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 2. Comparison of the Structure of General Rainfall-runoff Model and That in This Study (Kang and Yoo, 2018)

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

위 식에서 i 는 강우발생 시점을, R_i 은 강우강도를 의미한다. 위 식은 단위도를 이용하여 수문곡선을 합성하는 식과 동일하다. 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 침투지, 도달시간, 감쇄상수이며, 이들 매개변수는 지역특성을 반영한 경험식을 통해 결정할 수 있다. 먼저, P_n 은 Eq. (6)을 만족시키는 값으로 결정된다.

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

위 식에서 V 는 유출용적이며 수정합리식을 적용하여 계산할 수 있는 값이다. 도달시간은 관측 자료를 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. 순간적으로 발생하는 강우에 대한 선형저수지의 응답함수는 Eq. (7)과 같이 지수적으로 감소하는 형태를 가지고 있다.

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

위 식에서 O 는 시간 t 에서의 유출량, K 는 저류상수이다. Eq. (7)의 형태가 Shot noise process의 형태와 매우 유사하다

는 것을 확인할 수 있으며, Eq. (7)의 저류 상수를 Shot noise process의 감쇄상수로 대체할 수 있다. 도달시간과 마찬가지로 저류상수 또한 관측 자료를 분석하여 추정할 수 있으나, 관측 자료가 충분하지 않을 경우 저류상수 역시 경험식을 이용하여 추정할 수 있다. 이 경우에도 경험식의 제약 조건을 신중하게 고려해야 한다.

2.3 고층 건물의 영향을 고려한 강우-유출 해석 방법

고층 건물을 고려하여 강우-유출을 해석하기 위해서는 각각의 건물을 하나의 개별적인 소유역으로 간주하여 분석을 수행해야 한다. 하지만, 본 연구의 대상 유역에는 각각 분석하기에는 상당히 많은 건물이 존재한다. 이에 따라 본 연구에서는 소유역 내에 존재하는 건물들을 하나로 병합하여 강우-유출 과정을 해석하였다. 병합된 건물의 바닥 면적은 소유역 내에 존재하는 모든 건물들의 바닥 면적을 합하여 결정하였으며, 병합된 건물의 높이는 각 건물들의 높이를 가중 평균하여 결정하였다. 이때 가중치로는 각 건물들의 바닥 면적이 이용되었다. 가중치로 건물의 바닥 면적을 고려한 이유는 건물 벽면적을 건물 높이와 바닥면적으로 추정했기 때문이다.

소유역을 벽면과 지붕 소유역으로 분할하는 과정은 Fig. 3(a)를 통해 설명할 수 있다. Fig. 3(a)에서 A는 소유역의 면적, B는 병합된 건물의 바닥 면적이다. 본 연구에서는 병합된 건물이 Fig. 3(a)와 같이 유역의 중앙에 위치하는 상황에 대하여 분석을 수행하였다. 실제로는 유역마다 유역 출구가 다른 것이 사실이지만, 본 연구에서는 모든 유역의 출구가 Fig. 3(a)와 같이 왼쪽 하단에 위치한 것으로 가정하였다.

Fig. 3(a)와 같이 소유역을 분할하면 소유역이 총 9개가 된다. 여기에서 ①~⑤번 소유역은 지면 소유역이며, ①~⑤

(a) Ground sub-basin of target sub-basin

(b) Sub-basin division and inside flow path of all sub-basins

Fig. 3. Determination of Roof and Wall Sub-Basin and Inside Flow Path of All Sub-Basins (Cho, 2020)

소유역은 건물에 의해 추가되는 소유역이다. 본 연구에서는 네 개의 벽면 중 ①-2에서만 유출이 발생하는 상황에 대한 모의 결과를 만들어보았다. 이와 같은 상황에서 소유역 내부의 유출 경로는 Fig. 3(b)와 같이 결정할 수 있다.

위와 같은 소유역별 특성을 이용하여 소유역별 도달시간을 산정하였다. 도달시간을 산정하는 과정에서 소유역 내부의 유량이 소유역 근방의 맨홀로 유입되고 다시 유역 출구까지 흘러간다고 가정하였다. 지면에서의 도달시간은 Kraven II 공식(JSCE, 1999)을 이용하여 산정하였다. Kraven II 공식은 Eq. (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$t_c = 16.667 \frac{L}{V} \quad (8)$$

위 식에서 t_c 는 도달시간(min), L 은 유로 연장(km), V 는 유속(m/s)이다. Eq. (8)에서 유속 V 는 유역경사가 0.005 미만일 때에는 2.1 m/s, 0.005 이상 0.01 미만일 때에는 3.0 m/s, 마지막으로 0.01 이상일 때는 3.5 m/s로 결정된다.

건물이 있는 경우에 대해서는 건물 소유역의 지붕과 벽면의 도달시간을 추가적으로 고려해야 한다. 지붕 소유역의 경우, 지붕에서의 도달시간은 지면과 동일하게 Kraven (II) 공식을 이용하여 산정하였으며, 지붕에서 모인 강우가 지면까지 우수 수직관거를 통해 도달하는 데 걸리는 시간은 Wyly and Eaton (1961)이 제시한 공식(Eq. (9))을 이용하여 산정하였다.

$$v_{pipe} = 16.2 \left(\frac{Q}{d} \right)^{0.4} \quad (9)$$

위 식에서 v_{pipe} 는 수직관거에서 강우 입자의 낙하 속도(m/s)이고, Q 는 유량(m^3/s), d 는 수직관거의 관경(m)이다. 유량 Q 은 강우강도가 일정하게 발생할 경우, 지붕 소유역에 합리식을 적용하여 산정할 수 있다. 서울 지점 30년 빈도와 30분

지속시간의 확률강우를 적용하면 $0.23 m^3/s$ 의 유량이 발생한다. 수직관거의 관경은 환경부에서 제안한 허용 최대 지붕면 적별 관경값을 참고하여 0.2 m로 결정하였다(ME, 2015).

벽면 소유역의 경우에는 비흘림 효과를 고려하여 도달시간을 산정하였다. 본 연구에서는 벽면의 강우가 벽면에 부딪힌 후, 건물 2층에 해당하는 높이(8 m)를 흘러내려 이동하고 비흘림 효과에 의해 떨어져 나와 대기 중에서 자유낙하하는 상황을 가정하였다. 벽면을 타고 흘러내려가는 속도는 De Vogelaere and Pacco (2012)가 관측 실험을 통해 산정한 $0.027 m/sec$ 를 적용하였다. 강우의 자유낙하속도는 Ferro (2001)가 제안한 경험식을 이용하여 산정하였다(Eq. (10)).

$$v_{free} = v_{max} (1 - e^{-a_n \times d}) \quad (10)$$

위 식에서 v_{free} 는 강우의 자유낙하속도(m/s)이고, v_{max} 는 최대낙하속도(m/s), d 는 강우 입자의 직경(mm), a_n 은 매개변수이다. v_{max} 와 a_n 은 실험 결과를 통해 얻어낼 수 있는 값이다. 강우 입자의 낙하 높이가 20 m를 초과하게 되면 각각 $v_{max} = 9.55 m/s$, a_n 은 6으로 고정된다. d 는 강우 입자의 직경으로, Best (1950)의 강우 입자 크기 분포 연구를 토대로 중앙값에 해당하는 직경을 이용하였다. 강우 입자 크기 분포는 강우강도 조건에 따라 다르게 유도되며, 재현기간 30년과 지속기간 30분의 확률강우의 직경은 1.21 mm로 결정된다.

3. 분석 자료

3.1 역삼 배수분구 단위 유역

본 연구에서는 실제 규모의 도시유역에서 건물이 강우-유출 과정에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위한 분석 대상 지역으로 서울시 강남구에 위치한 역삼 배수분구 단위 유역을 선정하였다. 역삼 배수분구 단위 유역에는 테헤란로와 강남대로가 포함되어 있어 고층 건물이 다수 들어서 있다. 다음 Fig. 4(a)는 역삼 배수분구 단위 유역과 건물 정보를

(a) Yeoksam urban basin and building height map

(b) Sub-basins of Yeoksam urban basin

Fig. 4. Yeoksam Urban Basin and Sub-Basin Division

정리하여 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 건물의 높이는 건물의 음영으로 나타나 있으며, 유역 출구는 사각형 심볼로 표시되어 있다.

역삼 배수분구 단위 유역에 대한 강우-유출 해석을 수행하기 위해서는 유역을 여러 개의 소유역으로 분할하는 과정이 선행되어야 한다. 특별히, 고층 건물을 고려하여 강우-유출을 수행하는 경우에는 소유역을 분할하는 과정에서 주변에 고층 건물이 존재하는지 확인해야 한다. 주변에 고층 건물이 존재하면 그 고층 건물로 인해 넓은 범위에서 강우가 차단되지 않을 수 있기 때문이다. 이에 따라 본 연구에서는 건물이 차단에 영향을 미치는 거리를 소유역을 분할 과정에 반영하였다. 건물별 차단에 영향을 미치는 거리는 건물의 높이와 WDR의 각도를 고려하여 추정하였다. WDR의 각도는 서울 지점 확률강우의 특성을 분석하여 결정하였다. 그 결과, Fig. 4(b)와 같이 역삼 배수분구 단위 유역이 총 155개의 소유역으로 분할되었다.

3.2 확률 강우 및 풍속 자료

본 연구에서는 강우-유출 과정을 해석하기 위해 국토교통부에서 제공하는 서울 지점 확률강우량 자료를 이용하였다(MLTM, 2011). 확률강우를 이용한 이유는 단위시간 강우에 대한 고층 건물의 영향을 살펴보기 위해서이다. 서울 지점 확률강우량 자료에는 지속기간 5분부터 72시간, 재현기간 2년부터 500년까지의 조건에 대한 확률강우강도가 정리되어 있다. 본 연구에서는 이중 지속기간이 30분, 60분이고, 재현기간이 30년인 자료를 강우-유출 해석에 이용하였다. 재현기간이 30년일 때, 확률강우의 강우강도는 지속기간이 30분이면 116.2 mm/hr이고, 지속기간이 60분이면 91.2 mm/hr이다. 재현기간 30년의 확률강우를 이용한 이유는 재현기간 30년이 우리나라 하수관로 설계 기준에 해당하기 때문이다(ME, 2017). 고층 건물로 인해 설계 기준이 얼마나 바뀔 수 있는지

확인하기 위해 해당 확률강우로 분석을 수행하였다. 선정된 확률강우는 재현기간에 따른 강우강도를 해당 강우의 지속기간 동안 발생시키는 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 설계 강우량에 대응하는 풍속을 결정하기 위해 1988년부터 2019년까지 관측된 강우사상 자료를 분석하였다. 각 강우사상 자료는 서울지점 종관기상관측장비(ASOS)로 관측된 강우자료를 기준으로 만들어졌으며, 강우사상을 정의하기 위한 무강우기간은 10시간이 이용되었다. 확률강우에 대응하는 풍속은 1988년부터 2019년까지 관측된 강우사상 중 확률강우의 총 강우량과 동일한 강우사상들의 풍속을 평균하여 결정하였다. 재현기간이 30년인 확률강우의 경우, 지속기간이 30분일 경우에 총 강우량은 58.1 mm이다. 1988년부터 2019년까지 관측된 강우사상 중 총 강우량이 58.1 mm인 강우사상은 총 9개이며, 이들의 평균 풍속은 3.12 m/s인 것으로 확인되었다. 이와 같은 방법으로 재현기간이 30년, 지속기간이 60분인 확률강우의 풍속을 결정해본 결과, 2.68 m/s로 계산되었다.

본 연구에서 이용한 ASOS 풍속은 높이 10 m에서 관측된 결과이다. 이에 따라 본 연구에서는 풍속연직분포를 고려하여 대상 지역의 건물 높이에 맞게 변환하여 이용하였다. 이 과정에서 풍속연직분포는 먹급수함수식을 따른다고 가정하였다. 풍속의 높이를 변환하는 과정에서는 주로 먹급수함수식과 대수함수식이 적용된다(Tamura et al., 2007; Li et al., 2010; Kikumoto et al., 2017). 본 연구에서는 이중 먹급수함수식을 선정하여 AWS 풍속 자료를 변환하였다. 먹급수함수식은 Eq. (11)과 같이 표현된다.

$$U = U_0 \left(\frac{U}{z_0} \right)^\alpha \quad (11)$$

위 식에서 U 는 높이 z 에서의 풍속이며, U_0 는 기준 높이

z_0 에서의 풍속이다.

α 는 대기 안정도와 지형 특성에 따라 결정되는 풍속고도 분포지수이다. 풍속고도분포지수는 고도별 직접 관측한 풍속을 이용하여 추정되기도 하며, 관측 자료가 없는 경우에는 대기가 안정하다는 가정 하에 0.143을 이용하거나 지역 특성에 적절한 값을 적용한다. 도시 지역에서는 주로 0.20에서 0.25까지의 값이 이용된다(Plate, 1999; Cho et al., 2004; Lu and Sun, 2014; Park et al., 2019). 특히, Park et al. (2019)의 연구에서는 서울의 지형 특성을 고려하여 0.25 값을 적용한 바가 있다. 이에 따라, 본 연구에서도 0.25 값의 풍속고도분포 지수를 적용하여 풍속 자료를 변환하였다.

4. 분석 결과 및 토의

4.1 매개변수 추정 및 단위응답함수 비교

본 연구에서는 역삼 배수분구 단위 유역에 대한 강우-유출 해석을 수행하기 위해 소유역별 강우-유출 모형의 매개변수를 추정하였다. 소유역의 매개변수를 추정하기 위해 필요한 자료는 유역 경사도, 토지이용도, 배수관망 자료이다. Fig. 5는 역삼 배수분구 단위 유역의 유역 경사도, 토지이용도, 배수관망 자료를 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에는

경사도가 정리되어 있으며, 소유역의 경사는 내부 도달시간을 산정하는데 이용되었다. Fig. 5(b)의 토지이용도에 정리된 정보는 소유역의 유출계수를 결정하기 위해 필요하다. 마지막으로, Fig. 5(c)에 나타난 배수관망은 소유역의 외부 유로 연장을 계산하는데 이용된다. 여기서 외부 유로 연장은 소유역의 출구로부터 전체 유역 출구까지 연결된 배수관을 분석하여 결정하였다.

Fig. 6은 역삼 배수분구의 소유역별 평균 건물 높이, 도달시간을 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에는 소유역의 평균 건물 높이가 음영으로 표시되어 있다. 평균 건물 높이가 가장 큰 유역은 9-2 유역이며, 해당 유역의 평균 건물 높이는 202.7 m인 것으로 확인되었다. Fig. 6(b)에 요약되어 있는 도달시간의 경우, 왼쪽에 위치한 유역과 오른쪽에 위치한 유역의 차이가 분명하게 나타났다. 오른쪽에 위치한 유역은 유출 경로가 전체 유역 출구 방향으로 짧게 정해져 있지 않고, 멀리 돌아서 도달하도록 정해져 있기 때문에 도달시간이 길게 산정되었다.

본 연구에서는 역삼 배수분구 단위 유역 전체에 대한 분석을 하기 이전에 먼저 역삼 배수분구의 주요 소유역에서의 강우-유출 과정을 해석하였다. 주요 소유역을 선정하는 기준은 유역 면적에 대한 건물 벽면적의 비율(Wall area/Basin

Fig. 5. Slope Map, Land-Use Map, Urban Drainage Network of Yeoksam Urban Basin

Fig. 6. Basic Characteristics of Sub-Basins Yeoksam Urban Basin

area ratio, W/B ratio)이다. 이론적으로 W/B ratio가 클수록 고층 건물이 강우-유출 해석 결과에 미치는 영향이 커지게 된다. 이에 따라 본 연구에서는 역삼 배수분구의 155개 소유역 중 W/B ratio가 큰 세 개의 유역을 선정하였다. 선정된 유역의 기본적인 특성은 Table 1과 같다.

역삼 배수분구 주요 소유역에 대한 유출수문곡선을 모의하기 위해서는 먼저 단위응답함수를 유도해야 한다. 역삼 배수분구 주요 소유역의 단위응답함수는 앞서 추정된 매개변수를 통해 유도할 수 있다. Fig. 7은 주요 소유역의 단위응답함수를 그래프로 나타낸 것이다.

Table 1. Basic Characteristics of Major Sub-Basins in Yeoksam Urban Basin

Sub-basin	Average Building Height (m)	Building Wall Area (km ²)	Basin Area (km ²)	Wall/Basin Area	Travel Time (min)	Runoff Coefficient
9-2	202.7	0.0134	0.0194	0.69	18.2	0.95
2-10	49.0	0.0026	0.0058	0.45	4.8	0.95
3-8	61.1	0.0041	0.0118	0.35	8.5	0.95

Fig. 7. Impulse Response Function of Major Sub-Basin in Yeoksam Urban Basin

Fig. 7을 자세히 살펴보면 건물 유무에 따른 단위 응답 함수의 차이점을 확인할 수 있다. 가장 큰 차이점은 바로 건물을 고려함에 따라 벽면 소유역에 대한 단위응답함수가 추가된다는 것이다. Fig. 7에서 모든 소유역의 단위응답함수의 합은 굵은 그래프로 표시되어 있다. 굵은 그래프를 비교해보면 유역 면적에 대한 건물 벽면적의 비율이 클수록 벽면 소유역의 단위응답함수 또한 상대적으로 커지는 것을 알 수 있다. 다음으로, 건물이 존재하는 소유역에서 지붕 소유역에 해당하는 단위응답함수의 첨두치가 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 기존 도달시간에 건물 지붕에서 지면까지

도달하는데 걸린 시간이 추가되었기 때문에 나타나는 현상이다.

4.2 고층 건물의 영향을 고려한 강우-유출 해석 결과

Fig. 8은 단위응답함수와 서울 지점 확률 강우 및 풍속 자료를 이용하여 모의한 역삼 배수분구 주요 소유역의 유출 수문곡선이다. Fig. 8에서 점선은 건물을 고려하지 않고 유도한 유출수문곡선이고, 실선은 건물을 고려하여 유도한 유출수문곡선이다.

Fig. 8. Simulated Hydrograph of Major Sub-Basins in Yeoksam Urban Basin

본 연구에서는 Fig. 8에 나타난 유출수문곡선의 특성을 정밀히 비교하기 위해 건물에 따른 침투유출량의 증가 비율을 계산해보았다. 그 결과, 건물 유무에 따라 증가하는 침투유출량의 비율은 소유역의 특성과 관련이 깊은 것으로 확인되었다. 주요 소유역 중 W/B ratio가 가장 큰 9-2 유역의 침투유출량 증가비율은 확률강우의 지속기간이 30분일 때 21.9%, 60분일 때는 22.2%인 것으로 나타났다. 주요 소유역 중 W/B ratio가 가장 작은 3-8 유역에서는 침투유출량의 증가비율이 30분일 때와 60분일 때 각각 8.6%, 10.2%로 계산되었다.

본 연구에서는 역삼 배수분구의 모든 소유역에 대해서도 강우-유출 해석을 수행하였다. 이때에도 건물을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우를 구분하여 유출수문곡선을 유도하였다. Fig. 9는 건물에 따른 침투유출량 증가비율을 그림으

로 나타낸 것이다. Fig. 9(a)는 확률강우의 지속기간이 30분인 경우의 결과이고, Fig. 9(b)는 지속기간이 60분인 경우의 결과이다.

Fig. 9를 자세히 살펴보면, 건물에 의해 침투유출량 증가 비율이 유역에 따른 차이가 있음을 알 수 있다. 전체적으로 봤을때 유역의 중앙부에 위치한 주거지역에서는 침투유출량의 증가 비율이 5.0% 미만으로 작게 나타났다. 반면, 네 개의 주요 소유역을 비롯하여 고층 건물이 밀집된 지역에서는 침투유출량의 증가 비율이 최대 22.2%까지 높게 계산되었다. 확률강우의 지속기간이 60분인 경우(Fig. 9(b)), 30분인 경우보다 침투유출량의 증가 비율이 전체적으로 크게 나타났다. 하지만, 확률강우의 지속기간이 60분으로 증가하여도 주거지역에서 침투유출량의 뚜렷한 증가를 찾아볼 수가 없었다.

Fig. 9. Increase Ratio Peak Runoff in All Sub-Basins in Yeoksam Urban Basin

지금까지 역삼 배수분구 주요 소유역을 기준으로 강우-유출 해석을 수행하고 그 결과를 해석해보았다. 다음으로, 본 연구에서는 배수관망의 흐름 방향을 고려하여 소유역별 유출량을 누적시킨 결과를 살펴보고자 한다. Fig. 10은 소유역 출구별 건물에 의한 침투유출량의 증가 비율을 나타낸 것이다.

Fig. 10을 통해 유출 과정이 흐름 방향에 따라 진행되면서 건물의 영향이 어떻게 달라지는지 확인할 수 있다. 건물의 영향이 가장 컸던 9-2 소유역의 경우, 침투유출량의 증가율이 처음에는 15.5%였지만, 다음 소유역으로 넘어가면서 증가율은 3.8%로 줄어든다. 9-2 소유역 외 주요 소유역에서도 다음 소유역 출구까지 침투유출량의 증가율이 5.0% 보다 크게 유지되는 경우가 없었다. 이에 따라 건물에 의해 침투유

출량이 증가하는 현상은 본 연구의 소유역 단위 정도의 국소적인 범위에서만 발생한다고 해석할 수 있다.

마지막으로, 본 연구에서는 역삼 배수분구 단위 유역 전체를 대상으로 강우-유출 해석 결과를 살펴보고자 하였다. Fig. 11은 역삼 배수분구 단위 유역 전체에 대한 유출수문곡선을 정리한 결과이다. Fig. 11(a)는 지속기간 30분 확률강우로 유도한 결과이고, Fig. 11(b)는 지속기간 60분 확률강우로 유도한 결과이다. Fig. 11에서 또한 실선은 건물을 고려하여 유도한 결과이고, 점선은 건물을 고려하지 않은 경우의 결과이다.

Fig. 11을 자세히 살펴보면 건물을 고려한 경우의 유출수문곡선이 고려하지 않은 경우의 유출수문곡선과 크게 다르지 않은 것을 확인할 수 있다. 두 유출수문곡선의 침투유출량은 확률강우의 지속기간이 30분일 때는 2.5%, 60분일 때는

Fig. 10. Increase Ratio of Cumulative Peak Runoff at Sub-Basin Outlet of Yeoksam Urban Basin

Fig. 11. Simulated Hydrograph at Basin Outlet in Yeoksam Urban Basin

2.7% 밖에 다르지 않은 것으로 나타났다. 즉, 역삼 배수분구 출구에서는 건물에 의한 영향이 매우 작은 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 통해 고층 건물의 영향은 건물 주변에 집중적으로 나타나고, 유출해석 대상 면적이 커지면 그에 비례해 줄어들 수 있음을 알 수 있다.

4.3 본 연구의 한계

본 연구에서는 고층 건물에 의해 바뀌는 차단 특성과 유출 경로를 고려하여 강우-유출 해석을 수행하고, 실제 규모의 고층 건물이 도시구역의 강우-유출 과정에 미치는 영향을 평가하였다. 그러나 본 연구에서 도출한 결과는 다음과 같은 한계를 갖는다.

먼저, 풍속 자료의 불확실성을 들 수 있다. 본 연구에서는 풍속 자료에 대한 빈도해석을 수행하지 않고, 확률강우와 유사한 특성을 가진 강우사상들의 평균 풍속을 이용하였다. 이렇게 결정한 풍속 자료는 실제 빈도해석을 수행하여 유도된 풍속과 다를 수 있다. 아울러, 본 연구는 소유역 내에 존재하는 건물들을 모두 병합하여 분석하였다는 한계를 가지고 있다. 모든 소유역의 유역 출구를 왼쪽 아래로 가정한 것 또한 본 연구의 한계이다.

본 연구의 가장 큰 한계는 모의 결과를 실제 관측자료와 비교하지 못한 점이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 고층 건물에 의해 기존 도시구역의 유출수문곡선이 얼마나 바뀔 수 있는지 확인해보았다. 하지만, 본 연구의 결과는 하나의 시나리오이다. 실제로 고층 건물에 의해 유출수문곡선이 바뀌는지는 검증하지 못했다. 이에 따라, 본 연구의 결과는 추후 관측 자료와의 비교를 통해 검증되어야 할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 고층 건물의 영향을 고려하여 강우-유출

과정을 해석하는 방법을 제안하고, 제안된 방법론을 실제 도시구역에 적용해보았다. 특히, 고층 건물로 인해 바뀔 수 있는 도시구역의 차단 특성과 유출 경로를 고려하여 분석을 수행하였다. 강우-유출 해석을 위해서는 고층 건물 벽면에서 발생하는 유출을 독립적으로 분석하기 위해 Shot noise process 기반 모형을 이용하였다. 이후 본 연구의 방법론은 서울시 역삼 배수분구 단위 유역에 적용되었으며, 건물에 따라 유출 해석 결과가 어떻게 달라지는지 확인해보았다. 본 연구의 주요 결과들을 정리하면 아래와 같다.

- (1) 본 연구에서는 고층 건물의 영향을 고려하기 위해 건물의 벽면과 지붕을 독립적인 소유역으로 간주하여 강우-유출 해석을 수행하였다. 고층 건물의 벽면의 입력되는 강우량은 Cho et al. (2020)이 제안한 차단량 추정 공식을 적용하여 계산하였다. 건물 벽면에 내린 강우가 벽면을 타고 흘러내려가는 속도는 De Vogelaere and Pacco (2012)의 실험 결과로 계산하였으며, 강우의 자유낙하 속도는 Ferro (2001)의 경험식을 이용하여 산정하였다. 지붕에 내린 강우는 우수 수직관을 통해 지면에 도달하며, 우수 수직관을 통과하는데 걸리는 시간은 Wylly and Eaton (1961)이 제시한 공식으로 추정하였다.
- (2) Shot noise process 기반 강우-유출 모형을 이용하여 서울시 역삼 배수분구 단위 유역에 대한 단위응답함수를 유도할 수 있었다. 역삼 배수분구 단위 유역은 155개의 소유역으로 분할되어 분석되었으며, 소유역을 분할하는 과정에 건물의 차단 영향 범위를 고려하였다. 155개 소유역 내에 존재하는 건물들은 하나로 병합되어 분석되었으며, 각 소유역별 지붕, 벽면, 지면에 대한 단위응답함수를 유도하였다. 단위응답함수는 건물을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 유도되었으며, 건물을 고려함에 따라 단위응답함수의 첨두치가

커지는 것을 확인하였다.

- (3) 역삼 배수분구 단위 유역을 대상으로 강우-유출 과정을 해석해본 결과, 고층 건물로 인해 침투유출량이 뚜렷하게 증가할 수 있음을 확인하였다. 역삼 배수분구의 소유역 중 W/B ratio가 가장 큰 9-2 유역에서는 침투유출량이 22.2%까지 증가하였으며, W/B ratio가 세 번째로 큰 3-8 유역에서도 침투유출량이 10.2%까지 증가하였다. 다음으로, 배수관망의 흐름 방향을 고려하여 소유역별 유출량을 누적시킨 결과를 분석해보았다. 그 결과, 고층 건물에 의해 침투유출량이 10.0% 이상 증가하는 소유역일지라도 다음 소유역 출구까지 침투유출량의 증가율이 5.0% 보다 크게 유지되는 경우는 찾아볼 수 없었다. 아울러, 역삼 배수분구 단위 유역 전체에 대한 유출해석 결과 또한 건물 고려 유무에 따른 차이가 유의하게 나타나지 않았다. 이에 따라 건물에 의해 침투유출량이 증가하는 현상은 본 연구의 소유역 단위 정도의 국소적인 범위에서만 발생한다는 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구의 결과는 고층 건물이 존재하는 도시유역의 강우-유출 해석 과정을 더욱 정교하게 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러, 본 연구의 결과를 통해 도시유역의 홍수저감 계획을 수립하는 과정에 고층 건물의 영향을 반영할 수 있게 된다. 반면, 본 연구의 결과는 실제 관측 자료와 비교를 통해 검증되지 않았다는 한계가 있다. 추후 실제 규모의 건물 벽면에서 발생하는 유출을 관측하고, 관측 결과를 통해 본 연구의 결과를 해석할 필요가 있다. 아울러, SWMM 모형을 비롯한 기존 강우-유출 모형의 결과 본 연구의 결과를 비교한다면 본 연구에서 제안한 방법론의 적용성을 개선할 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물환경사업의 지원을 받아 연구되었습니다(127559).

References

Beijer, O., and Johansson, A. (1976). *Driving rain against external walls of concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute at the Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Bernier, J., Morlat, G., O'Connell, P.E., O'Donnell, T., Sneyers, R., Delaporte, P.J., et al. (1970). Inventaire des modeles de processus stochastiques applicables a la description des debits journaliers des rivières. *Revue de l'institut International de Statistique*, Vol.

38, No. 1, pp. 49-104.

Best, A.C. (1950). The size distribution of raindrops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 76, No. 327, pp. 16-36.

Blocken, B., and Carmeliet, J. (2012). A simplified numerical model for rainwater runoff on building facades: Possibilities and limitations. *Building and Environment*, Vol. 53, pp. 59-73.

Brocca, L., Melone, F., and Moramarco, T. (2011). Distributed rainfall-runoff modelling for flood frequency estimation and flood forecasting. *Hydrological Processes*, Vol. 25, No. 18, pp. 2801-2813.

Cho, E. (2020). *Development of rainfall-runoff analysis method considering high-rise buildings*. Ph.D. dissertation, Korea University.

Cho, E., Yoo, C., Kang, M., Song, S., and Kim, S. (2020). Experiment of wind-driven-rain measurement on building walls and its in-situ validation. *Building and Environment*, Vol. 185, 107269. doi:10.1016/j.buildenv.2020.107269

Cho, K., Hong, S., and Hwang, K.S. (2004). Effects of neighboring building on wind loads. *Proceedings of Tall Buildings in Historical Cities-Culture and Technology for Sustainable Cities*, CTBUH Seoul, Korea, pp. 516-523.

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.

De Vogelaere, T., and Pacco, M. (2012). *Development of a numerical model for rainwater run-off on vertical planes extended with experimental verification*. Master's thesis, Ghent University.

Ferro, V. (2001). Tecniche di misura e monitoraggio dei processi erosivi. *Quaderni di Idronomia Montana*, Vol. 21, No. 2, pp. 63-128.

Gabel, J., Shehadi, A., Ursini, S., and Gerometta, M. (2017). 2016 Another record-breaker for skyscraper completions; 18 "Tallest titles" bestowed. *CTBUH Journal*, Vol. 2017, Issue 1, pp. 38-45.

Hall, C., and Kalimeris, A. (1982). Water movement in porous building materials—V. Absorption and shedding of rain by building surfaces. *Building and Environment*, Vol. 17, No. 4, pp. 257-262.

Huong, H.T.L., and Pathirana, A. (2013). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 17, pp. 379-394.

- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). (1999). *The collection of hydraulic formulae*. Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan.
- 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*, Vol. 51, No. 1, pp. 19-33.
- Kikumoto, H., Ooka, R., Sugawara, H., and Lim, J. (2017). Observational study of power-law approximation of wind profiles within an urban boundary layer for various wind conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 164, pp. 13-21.
- Li, G.F., Xiang, X.Y., Tong, Y.Y., and Wang, H.M. (2013). Impact assessment of urbanization on flood risk in the Yangtze River Delta. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, No. 7, pp. 1683-1693.
- Li, Q.S., Zhi, L., and Hu, F. (2010). Boundary layer wind structure from observations on a 325 m tower. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, No. 12, pp. 818-832.
- Lu, L., and Sun, K. (2014). Wind power evaluation and utilization over a reference high-rise building in urban area. *Energy and Buildings*, Vol. 68, pp. 339-350.
- Masseroni, D., Cislighi, A., Camici, S., Massari, C., and Brocca, L. (2017). A reliable rainfall-runoff model for flood forecasting: Review and application to a semi-urbanized watershed at high flood risk in Italy. *Hydrology Research*, Vol. 48, No. 3, pp. 726-740.
- Ministry of Environment (ME). (2015). *Guidelines for establishing the basic plan for sewerage maintenance*. ME, Sejong, Korea.
- Ministry of Environment (ME). (2017). *Sewer design criteria*. ME, Sejong, Korea.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Improvement of probable rainfall depth and complementary research*. MLTM, Sejong, Korea.
- 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.
- Park, J.C., Kim, I.H., and Jung, H.J. (2019). Feasibility study of fluctuating wind pressure around high-rise buildings as a potential energy-harvesting source. *Energies*, Vol. 12, No. 21, 4032. doi:10.3390/en12214032
- Plate, E.J. (1999). Methods of investigating urban wind fields—physical models. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, No. 24-25, pp. 3981-3989.
- Safarik, D., Wood, A., Carver, M., and Gerometta, M. (2015). An all-time record 97 buildings of 200 meters or higher completed in 2014. *CTBUH Journal*, Vol. 2015, Issue 1, pp. 40-47.
- Saghafian, B., Farazjoo, H., Bozorgy, B., and Yazdandoost, F. (2008). Flood intensification due to changes in land use. *Water Resources Management*, Vol. 22, No. 8, pp. 1051-1067.
- Suriya, S., and Mudgal, B.V. (2012). Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed—A case study. *Journal of Hydrology*, Vol. 412-413, pp. 210-219.
- Tamura, Y., Iwatani, Y., Hibi, K., Suda, K., Nakamura, O., Maruyama, T., and Ishibashi, R. (2007). Profiles of mean wind speeds and vertical turbulence intensities measured at seashore and two inland sites using Doppler sodars. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95, No. 6, pp. 411-427.
- Weiss, G. (1977). Shot noise models for the generation of synthetic streamflow data. *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 1, pp. 101-108.
- Wyly, R.S., and Eaton, H.N. (1961). *Capacities of stacks in sanitary drainage systems for buildings*. US Department of Commerce, National Bureau of Standards (NBS) Monograph 31, Maryland, USA.

Received	September 8, 2020
Revised	September 10, 2020
Accepted	October 7, 2020