



Analysis of runoff speed depending on the structure of stormwater pipe networks

Lee, Jinwoo^a · Chung, Gunhui^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Hoseo University

Paper number: 17-075

Received: 15 September 2017; Revised: 13 November 2017 / 26 November 2017; Accepted: 26 November 2017

Abstract

Rainfall falling in the impervious area of the cities flows over the surface and into the stormwater pipe networks to be discharged from the catchment. Therefore, it is very important to determine the size of stormwater pipes based on the peak discharge to mitigate urban flood. Climate change causes the severe rainfall in the small area, then the peak rainfall can not be discharged due to the capacity of the stormwater pipes and causes the urban flood for the short time periods. To mitigate these type of flood, the large stormwater pipes have to be constructed. However, the economic factor is also very important to design the stormwater pipe networks. In this study, 4 urban catchments were selected from the frequently flooded cities. Rainfall data from Seoul and Busan weather stations were applied to calculate runoff from the catchments using SWMM model. The characteristics of the peak runoff were analyzed using linear regression model and the 95% confidence interval and the coefficient of variation was calculated. The drainage density was calculated and the runoff characteristics were analyzed. As a result, the drainage density were depended on the structure of stormwater pipe network whether the structures are dendritic or looped. As the drainage density become higher, the runoff could be predicted more accurately. it is because the possibility of flooding caused by the capacity of stormwater pipes is decreased when the drainage density is high. It would be very efficient if the structure of stormwater pipe network is considered when the network is designed.

Keywords: SWMM model, Drainage density, Linear regression model, Peak runoff, Speed of runoff

우수관망 구조에 따른 유출 속도 분석

이진우^a · 정건희^{a*}

^a호서대학교 건축토목환경공학부 토목공학전공

요 지

도시 지역의 불투수층에 내린 강우는 지표면을 따라 흐르다가 대부분 우수관으로 유입되어 유역에서 배출된다. 그러므로 도시 우수관의 설계빈도를 결정하고 설계홍수량을 결정하는 일은 도시 홍수 저감을 위한 구조적인 대책 중 가장 우선적으로 고려되어야 하고, 또 가장 중요한 대책이기도 하다. 그러나 최근 들어 기후변화 등으로 인해 짧은 시간에 큰 강우강도의 호우가 발생하는 일이 잦아지고 있다. 이런 형태의 호우는 불투수면이 많은 도시 지역에서 갑작스럽게 유출량을 증가시켜 증가된 유출량이 일시에 우수관으로 유입되지 못하고 일시적이고 국부적인 홍수를 야기하기도 한다. 그러므로 도심지의 홍수 저감을 위해 우수관망의 적절한 설계가 매우 중요하다. 그러나 무한정 큰 관경의 우수관을 건설하는 것은 경제적으로 타당한 방법이 될 수 없으므로, 적절한 크기의 우수관을 설계하고 유출해석의 신뢰도를 높이기 위한 노력이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 과거 홍수피해가 빈번히 발생했던 도시 유역들 중 유역면적과 우수관망의 구조가 다른 4개의 도시를 서울과 부산지역에 선정하여 다양한 강우에 따른 유출해석을 실시하였다. 서울과 부산 기상 관측소의 과거 호우 자료에 대한 EPA-SWMM 모형에서의 유출해석 결과, 첨두유출량의 변화에 따른 첨두유출량의 변화를 선형회귀모형으로 분석하였다. 회귀모형의 결정계수와 95% 신뢰구간 및 변동계수를 비교하고, 수계밀도 개념을 적용하여 첨두유출량의 변화를 해석한 결과, 우수관망이 조밀하게 건설되어 수계밀도가 높을수록 증가된 첨두강우량에 따라 함께 증가하는 첨두유출량의 예측이 상대적으로 정확하게 가능함을 확인하였다. 이는 수계밀도가 높을수록 유출응답이 빨라지고 국부적인 우수관의 통수능 부족으로 발생하는 침수의 발생 가능성이 낮아지기 때문인 것으로 보이며, 갑작스러운 강우에 대한 대응이 수월함을 의미한다. 이러한 우수관의 구조적인 특성에 따른 유출 응답 속도를 고려하여 우수관을 설계한다면, 보다 효율적인 우수관 설계가 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어: EPA-SWMM 모형, 수계밀도, 선형회귀분석, 첨두유출량, 유출 응답

*Corresponding Author. Tel: +82-41-540-5797
E-mail: gunhuic@gmail.com (G. Chung)

1. 서론

최근 기후변화 등에 따른 이상기후의 결과로 집중호우 및 게릴라성 폭우 발생 빈도가 늘어나고 있으며, 도시 지역의 우수관 설계 빈도를 초과하는 강우강도가 발생하면 우수관의 통수능 부족으로 인해 일시적이고 국부적인 침수가 발생하기도 한다. 2010년 재해연보에 따르면 서울 및 수도권에서 발생한 집중호우로 이재민 64,752명과 약 600억의 재산피해가 발생하였다. 이와 같이 도시 지역의 침수는 자연 유역에 비해 막대한 재산 및 인명 피해를 야기할 수 있기 때문에 도시 지역의 홍수 피해 저감을 위한 유출해석은 가능하면 정확하게 이루어져야 한다. 도시지역의 유출해석은 대부분 SWMM모형을 이용하여 강우-유출해석을 수행하고 있다. 그러나 강우로 인한 유출이 발생하는 자연현상은 정확하게 모의하는 것은 실제로 불가능하다. 그러므로 신뢰성 있는 유출해석에 있어서 실제 자연 현상을 해석하는데 한계를 갖는 모형 유량예측의 불확실성을 연구하기 위해 Chung *et al.* (2015)는 SWMM 모형 매개변수의 불확실성 정량화 지수를 산정하였고, 중국 베이징에서의 사례를 토대로 GLUE 방법을 이용한 SWMM 모델링의 성능에 영향을 주는 매개변수 연구(Li *et al.*, 2016)가 있었다. Enrique *et al.* (2014)는 몬테카를로 분석을 이용한 무작위로 선택된 매개 변수 세트를 사용하여 반복적인 시뮬레이션을 통하여 모형의 불확실성을 정량화하였다. 또한 Kim *et al.* (2009)는 HEC-HMS 모형으로부터 모의된 유출량을 Meta-Gaussian 기법을 적용하여 불확실성을 분석하였다. 대부분 연구에서는 모형의 매개변수가 가지는 불확실성을 정량화하기 위해 다양한 강우와 유출의 시나리오를 기반으로 분석하였다. 이것은 자연의 유출현상을 모의하기 위해 구현된 모형이 가지는 한계를 극복하고 보다 정확한 모의를 하기 위한 하나의 방법이 될 수 있다. 그러나 실제로 강우자료 자체가 가지는 불확실성도 존재하므로 Choi *et al.* (2007)은 강우 관측에서 생기는 오차를 이용하여 유출량에 미치는 영향을 분석하여 정량적으로 평가하였고, Lee *et al.* (2009)은 강우의 불확실성을 구조적인 불확실성과 비구조적인 불확실성으로 구분하여 검토하였다. Hilary *et al.* (2011)은 강우의 공간적 다양성은 유역 규모에 관계없이 홍수 모델링의 불확실성의 주요 원인 중 하나라고 하였다. 레이더강우에 관한 연구로는 Kang *et al.* (2017)은 임의의 값을 추정하는데 있어 하나의 값이 아닌 가능한 값들의 범위를 정의하거나 확률분포를 표시할 수 있는 확률론적인 방법을 제시하고 이를 레이더 강우에 적용하여 활용성을 평가하였다. 우수관망의 구조에 따른 유출량의 변화를 직접적으로 수행한 경우는 많지 않지만, 자연하천의 수계밀도와

유출량의 관계는 Carlston (1963)가 미국 동부 13개의 유역 자료를 이용하여 수계밀도와 월별 최소유출량과의 관계를 제시하였다. 또한 Ogden *et al.* (2011)은 자연하천이지만 도시화율이 높은 유역에서의 불투수지역, 수계밀도 등이 유출량에 영향을 미치는 영향을 분석하고 이 중 수계밀도의 영향이 가장 큰 것으로 지적하였다. 도시 지역의 우수관망은 인위적으로 건설된 것이므로 우수관망의 유출 특성을 분석한다면 보다 효율적인 우수관망의 설계가 가능할 것이다. 그러므로 본 연구에서는 자연 유역에 주로 적용되는 하천의 수계밀도라는 개념을 도시 우수관망에 적용하여 분석하였다. 우수관망의 수계밀도에 따라 호우 응답속도가 달라진다고 알려져 있다. 그러므로 도시 지역의 다양한 크기의 우수관망에 수계밀도를 적용하여 침투강우량과 침투유출량 사이의 관계를 규명하였다.

2. 분석 방법

2.1 EPA-SWMM

EPA-SWMM은 도시지역의 강우에 의한 홍수량을 산정하기 위하여 1971년에 미국 EPA의 지원으로 개발된 모형으로서, 도시지역 하수시스템 내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 구성되어진 유역 유출모형이다. SWMM은 강우주상도, 기상자료, 소유역의 자료, 하수 관로자료를 입력하여 유역의 유출 유량과 수질을 예측하고, 오염물질에 대한 처리를 모의할 수 있다. SWMM은 단일·연속강우와 용설에 의한 유출모의를 수행할 수 있다. 연산시간 간격은 강우사상에 대해 임의 조절이 가능하다. 그리고 소(小)배수유역에서 대(大)배수유역까지 적용이 가능하며 최대 3,000개의 소유역, 2,000개의 수로 또는 관로를 사용할 수 있다. 유출은 강우와 용설로 인하여 발생하고 지표유출은 비선형 저류방정식을 사용하여 추적하며, 침투량 산정에는 Horton 또는 Green-Ampt 식을 사용한다(Hong *et al.*, 2005).

SWMM모형의 유역 유출 해석 방법은 steady state, kinematic wave 및 dynamic wave법 등의 3가지를 적용할 수 있다. 강우사상을 적용하여 유출해석을 할 경우 주로 Kinematic wave과 Dynamic wave를 이용하며, Kinematic wave 법은 사면구배가 비교적 급할 경우 마찰구배를 사면구배와 같다고 가정하고 하류단의 조건이 상류에 미치지 않음을 전제로 한다. Kinematic wave법은 큰 시간 계산 간격을 가지므로 장기적이 예측에 일반적으로 적용한다. 부정류의 연속방정식과 운동량 방정식을 해석하는 Dynamic wave법은 홍수 시 도시지역의 관거 내 흐름특성을 고려하고 대상유역 내 관거의 일부 구간에서 발생

하는 역경사 및 만관으로 인한 압력영향 등을 고려할 수 있다. 강우초기에는 자유수면을 가지는 개수로의 흐름에서 지속적인 강우가 발생하면 관로의 수위가 상승하여 압력차에 의한 흐름으로 전환되는 것을 고려할 때 적용한다(Kang *et al.*, 2015).

Dynamic wave법은 아래 운동량방정식을 이용하며 운동량방정식에서는 흐름이 1방향이며, 흐름단면에서는 균일 유속분포를 보인다고 가정한다. 정수압이 작용되고 흐름의 경사가 완만하다고 가정한 후 마찰 손실을 Manning 식으로 계산하여 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{V^2}{y} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (1)$$

여기서, V 는 흐름의 평균유속, y 는 수심, S_f 는 에너지선의 경사 또는 마찰경사, \bar{q} 는 측방 유입량, g 는 중력가속도, S_0 는 하도의 경사이다. Dynamic wave법은 위의 방정식에서 관성력과 관련되는 첫 번째 항, 두 번째 항과 압력을 표시하는 세 번째 항, 중력 및 마찰력에 관련되는 다섯 번째 항이 중요한 역할을 하며 측방류가 없거나, 측방류에 의한 흐름의 네 번째 항인 운동량변화항을 무시할 수 있을 경우 연속방정식을 간략화해서 해석하는 방법이다. 폭이 넓고 수심이 그다지 크지 않은 자연 하천에서의 홍수파의 이동이나 댐 파괴로 인한 하류로의 홍수 전파 등을 계산하는데 사용된다.

본 연구에서는 홍수 시 도시유역의 관거 내 흐름특성을 고려하고 대상유역 내 관거의 일부 구간에서 발생하는 역경사 및 만관으로 인한 압력영향 등을 고려할 수 있는 Dynamic wave법을 이용하였다.

2.2 단순 선형회귀분석

실제 자료분석에 있어서는 관측값이 쌍으로 주어졌을 때 하나의 변수값을 이용하여 다른 변수값을 예측하고자 하는 경우가 있다. 상관분석에서는 두 변수 사이의 관계에 있어서 원인과 결과의 관계는 설명할 수 없다. 선형회귀분석이란, 쌍으로 관찰된 두 연속형 변수들 사이에 선형관계가 있다고 전제 한 후에 한 변수를 원인으로 하고 다른 변수를 결과로 하여 두 변수 사이의 선형식을 구하는 통계분석방법이다. 선형회귀 분석에서 원인의 역할을 하는 변수를 설명변수(explanatory variable; 독립변수, independent variable)라 하고, 결과를 관측하는 변수를 반응변수(response variable; 종속변수, dependent variable)라고 한다. 회귀분석 기본식은 아래와 같다.

$$Y = \alpha + \beta x \quad (2)$$

여기서, Y 는 종속변수이고, x 는 독립변수이며 α 는 Y 절편, β 는 회귀계수이다.

결정계수(R-squared; R^2)는 추정된 선형 모형이 주어진 자료에 적합한 정도를 재는 척도이다. 반응 변수의 변동량 중에서 적합한 모형으로 설명가능한 부분의 비율을 가리킨다. 결정계수는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (3)$$

여기서, SST (Total Sum of Squares)는 총 제곱합, SSR (Sum of Squares due to Regression)은 회귀 제곱합의 약어이다. SST는 관측된 Y_i 값이 Y_i 들의 평균로부터 얼마나 떨어져 있는지를 뜻하며, SSR은 추정치가 평균로부터 얼마나 떨어져 있는지를 뜻한다. 결정계수의 범위는 $0 \leq R^2 \leq 1$ 을 만족하며, 1에 가까울수록 회귀 모델이 데이터를 더 잘 설명한다고 할 수 있다.

2.3 수계밀도

수계밀도(Drainage Density)는 유역 내에서 하계망의 조밀한 정도를 나타내는 수치로서 아래와 같이 정의된다.

$$\text{수계밀도} = \frac{\text{본} \cdot \text{지류의 총연장}}{\text{유역면적}} \quad (4)$$

수계밀도가 높다는 것은 단위면적당 하천 길이가 길며 강우 발생 시 유출속도가 상대적으로 빠르고 배수가 양호함을 의미하고, 수계밀도가 낮다는 것은 단위면적당 하천 길이가 짧으며 강우에 대한 유출속도가 느리다는 것을 의미한다.

3. 자료 구축

3.1 대상지역 선정 및 기상자료 구축

기후변화로 인해 집중호우가 증가하고 태풍이 내습하는 현상이 빈번해짐으로써 홍수피해의 빈도가 늘어나고 있다. 이러한 태풍 및 집중호우로 인하여 배수시스템의 통수능력 부족, 제방의 붕괴 및 월류 등의 발생 확률이 증가하고 있으며, 침수로 인한 인명 손실과 극심한 재산피해가 발생하여 사회적 문제를 야기하고 있다(Kim *et al.*, 2013). 매년 피해가 반복되고 있는 도시 내 상습수해지구는 전국적으로 719개소이며 (2003년 12월 기준), Shim (2008)에 따르면, 이들 도시 내 상습수해지구의 피해원인은 내수침수가 524개소로 전체의 73%

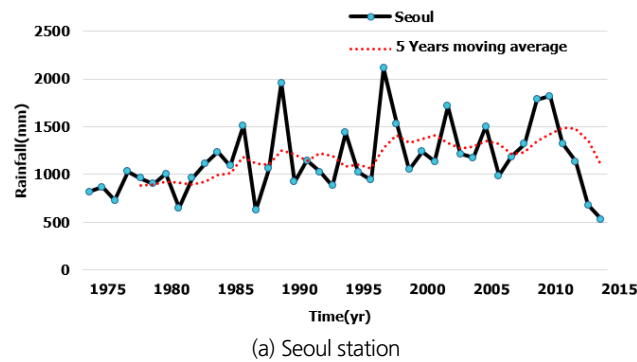
Table 1. Flooding damages in the study catchments during last 10 years (2004~2013) by districts

District	Total amount of flooding damage ($\times 10^3$ KRW)	Number of flooding years
Yeongdeungpo-gu (Seoul)	163,050	4
Guro-gu (Seoul)	172,671	6
Geumcheon-gu (Seoul)	162,667	4
Yeonje-gu (Busan)	773,354	5

Data were acquired from Meteorological data link portal and WAMIS

를 차지한다. 내수침수의 원인을 구체적으로 보면, 지형적인 저지대 문제, 배수능력 부족, 하천의 수위상승으로 인한 배수 불량 등으로 해안보다는 하천에서 발생하는 피해가 대부분이며, 저지대에 설치된 우수관의 배수 불량이나 우수관의 통수능 부족에 의한 배수불량 등이 원인인 것으로 나타났다. 그러므로 우수관의 통수 특성을 분석하기 위해 재해연보의 침수 피해이력 자료를 활용하여 상습 침수 지역을 조사하였다. 상습 침수 지역 중 연구의 대상유역으로는 안양천 인근에 위치하고 있는 가산1 빗물펌프장(금천구), 대림3동 빗물펌프장(영등포구), 그리고 목감천(구로구)과 부산광역시의 온천천 유역을 선정하였다. 통계청 자료에 의하면 서울특별시의 영등포구, 구로구, 금천구와 부산광역시의 연제구의 10년 간 (2004~2013) 침수 피해액과 침수 발생 횟수는 Table 1과 같다. 즉, 서울시 구로구는 최근 10년 동안 총 6년간 침수피해가 발생하여 홍수피해에 매우 취약한 것으로 드러났으며, 부산시 연제구 역시 최근 10년 동안 5년 간 침수피해가 발생하였으며 그 피해액도 대상 유역 중 가장 많았다.

Fig. 1은 지점별 연평균 우기 강수량(6~10월)을 나타내었다. Fig. 1과 같이 1975년부터 2015년까지 연평균 강수량은 변동폭이 매우 커서 증가추세는 뚜렷하지 않지만, 다소 증가하는 추세를 보이고 있다.



3.2 유역 특성

앞서 선정한 4개의 유역인 가산1 빗물펌프장 유역, 대림3동 빗물펌프장 유역, 목감천 유역, 온천천 유역의 간단한 SWMM 모형의 소유역 및 관망의 현황은 Table 2에 명시되어 있으며, 유역 관망도는 Fig. 2에 나타나 있다. 서울시 하수정보 시스템 및 하수도대장과 부산광역시에서 제공하는 대상유역의 GIS파일을 바탕으로 관망도를 구축하였다. 도시유역의 우수관로는 매우 복잡한 형태로 구성되어 있으므로 우수관로의 간략화를 위하여 Park *et al.* (2017)에 따라 간략화를 하였다.

유역들 중 가산1 빗물펌프장 유역은 서울특별시 금천구가 산동에 위치하고, 30년 설계빈도로 9,000 m³의 우수지 용량을 갖고 있다. 최근 2대의 펌프가 증설되어 총 5대의 펌프로 토출량은 340 m³/min이다. 배수유역 면적은 48 ha로 공업지역이 전체의 73%로 대부분을 차지하고 있으며, 기타 상업지역 등이 27% 등을 차지하는 대표적인 공업지역이다(Jang, 2009a). 유역 면적이 작아 노드와 관의 수도 적어 기본적으로 수시상형의 말단 관망 형태를 가지고 있으나 크기는 망형의 구조를 가진 것을 알 수 있다.

대림3동 빗물펌프장은 서울시 영등포구 대림3동에 위치하였고, 30년 설계빈도로 36,200 m³의 우수지 용량을 갖고 있다. 2010년 펌프시설 증설로 총 토출량이 2,206 m³/min에서 3,411 m³/min로 증가하였다. 대림3동 빗물펌프장의 배수유역에 대한 토지이용현황으로 일반주택지 60%, 상업·업무지 15%, 고층주택지 9%로 전체면적의 약 80% 이상을 차지하고 있는 전형적인 도심지의 형상을 가지고 있다(Jang, 2009b). 대상 유역 중 유역면적은 두 번째로 크지만, 매우 복잡한 망형으로 구성되어 있어 우수관의 길이가 가장 길고, 노드와 우수관의 수도 가장 많다.

지방 2급 하천인 목감천 유역의 하류에는 두 개의 빗물펌프장이 존재하여, 각각 개봉1, 2 빗물펌프장이다. 본 연구에서 사용한 목감천 유역 중 서울시 구간의 면적 892 ha은 개봉2

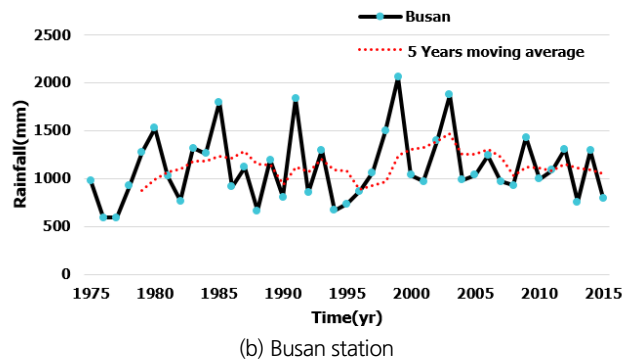
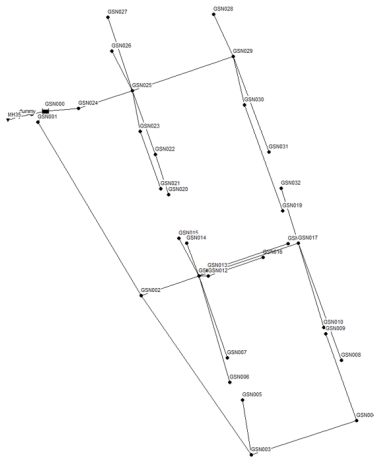


Fig. 1. Total rainfall during the rainy season (Jun.~Oct.) and moving average in meteorological stations

Table 2. Statistics of stormwater pipe networks in SWMM

Catchment	No. of Subcatchments	No. of Nodes	No. of Links	Area (ha)	Total pipe length (m)
Gasan 1 stormwater pumping station	32	35	35	48	5,219
Daelim 3 stormwater pumping station	1,643	1,881	2,053	248	59,976
Mokgamcheon	620	620	632	892	37,586
Oncheoncheon	196	196	236	5,724	29,134



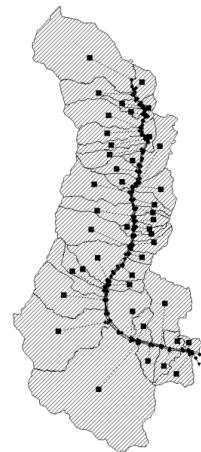
(a) Gasan 1 rainwater pumping station



(b) Daelim 3 rainwater pumping station



(c) Mokgamcheon



(d) Oncheoncheon

Fig. 2. Stormwater pipe network in SWMM

빗물펌프장이 안양천으로 배제시키고 있다. 설계빈도는 개봉 1동 빗물펌프장은 5년 빈도이며 저수용량은 156,000 m³이고 개봉 2동 빗물펌프장은 10년 빈도이며 저수용량은 3,460 m³이다. 개봉1,2 빗물펌프장의 배수구역이 포함되어있는 구로구의 경우 총 면적 2,011 ha 중 대지가 39.44%인 793 ha으로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 임야가 387 ha으로 19.25%로 두 번째로 높은 비율을 차지하고 있다. 광명시 토지의 총면적 3,851 ha 중 임야가 1,453 ha, 37.73%로 가장 높은 비율을

보이고 있으며, 시흥시 또한 총면적 13,452 ha 중 임야가 4,075 ha, 30.29%로 가장 높은 비율로 조사되었다(Jang, 2009c). 목감천의 우수관망은 Fig. 2에서 알 수 있는 것과 같이 대부분 수지상형으로 구성되어 있다.

마지막으로 온천천 유역은 부산광역시의 대표적 도시 하천으로 하천 주위에 건물이 밀집해 있고, 제방이 도로로 활용되고 있는 등 토지이용도가 상당히 높은 하천이다. 하천 주변 지역의 지반고가 계획홍수위보다 낮으며 일부 지역은 하천의

하상고보다 낮다(동래소방서 및 수민동 주변 지반고는 EL. 4.0~5.1 m, 온천천 계획홍수위 EL. 5.3 m). 따라서 온천천 유역은 자연배수가 어렵고, 홍수 시 하천수위가 상승하는 경우 하수관거 역류로 인한 내수침수가 빈번하게 발생하고 있는 실정이다(Shon *et al.*, 2010). 온천천은 유역면적이 다른 유역들에 비해 매우 크지만, 전체적으로 수지상형의 우수관망으로 구성되어 있어 우수관의 길이는 상대적으로 짧다.

4. 분석 및 결과

4.1 침투강우와 침투유출량

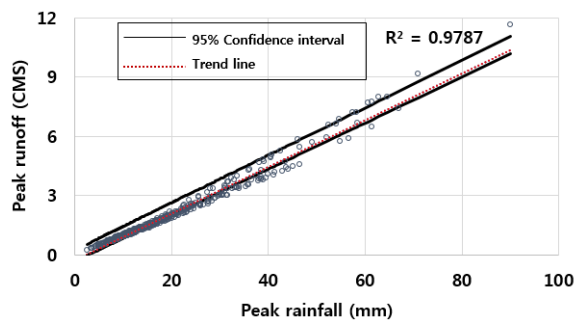
서울관측소와 부산관측소에서 관측된 1975년부터 2015년까지의 연속된 시강우자료로부터 강우사상을 분리하였다.

연속적인 또는 불연속적인 강우기록으로부터 각각의 개별적인 강우사상을 분리하기 위해서 각 강우사상의 시작과 끝을 구별할 수 있는 기준으로 Lee *et al.* (2017)에서 제시한 서울관측소와 부산관측소의 무강우시간 11시간을 기준으로 하여 강우사상을 분리한 다음 독립된 강우사상 중 강우량의 합이 30 mm 이상인 강우사상만을 모형에 사용하였다. 그 결과 본 연구에서 사용한 관측소 별 강우사상의 개수는 서울관측소의 경우 427개, 부산관측소는 419개이다.

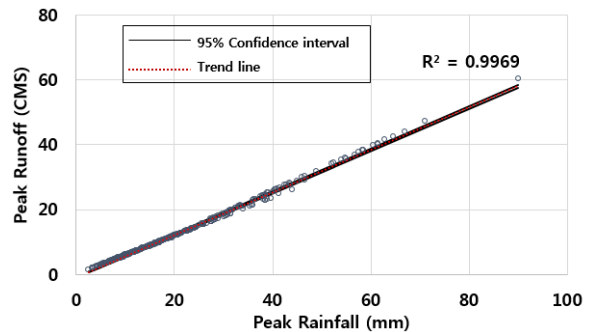
EPA-SWMM 모형을 이용하여 4개 유역의 대해 분리된 강우사상 총 1,700개의 침투유출량을 산정하였다. 유역별로 침투강우량과 침투유출량의 관계를 회귀 분석한 결과, Table 3 과 Fig. 3에 나타난 것과 같이 모든 경우의 결정계수(R^2)가 0.9 이상으로 나타났다. 이는 침투강우량이 증가함에 따라 침투유출량이 거의 선형적으로 증가하는 것을 나타낸다. 그러나

Table 3. Regression analysis results

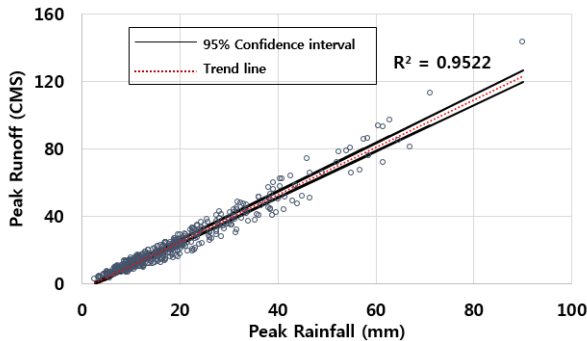
Catchment	Regression equation	R^2	Average width of 95% confidence interval (m^3/s)
Gasan 1 stormwater pumping station	$y = 0.1182x - 0.2834$	0.9787	0.63
Daelim 3 stormwater pumping station	$y = 0.6554x - 0.907$	0.9969	0.29
Mokgamcheon	$y = 1.4049x - 3.0924$	0.9522	2.56
Oncheoncheon	$y = 9.7278x - 34.355$	0.9079	20.82



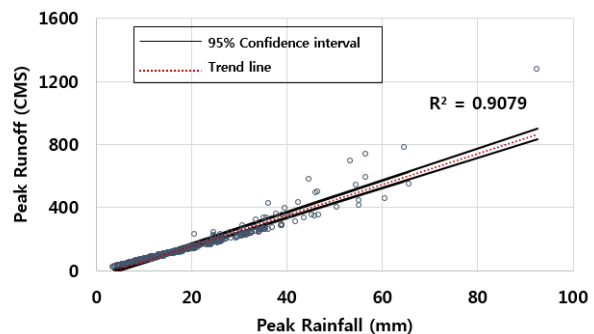
(a) Gasan 1 stormwater pumping station



(b) Daelim 3 stormwater pumping station



(c) Mokgamcheon



(d) Oncheoncheon

Fig. 3. Regression analysis by catchment

침투강우량이 커질수록 침투유출량이 완벽하게 선형적으로 증가하지 않고 변동폭이 발생하는 것을 알 수 있다. 이를 95% 신뢰구간으로 표현한 결과, 가산 1 빗물펌프장, 대림 3동 빗물펌프장, 목감천과 온천천 유역의 95% 신뢰구간의 평균 폭은 0.63 m³/s, 0.29 m³/s, 2.56 m³/s, 20.82 m³/s로 나타났다.

유역별로 살펴보면, 대림 3동 빗물펌프장의 결정계수는 거의 1에 가까워, 침투강우량이 증가함에 따라 유출량의 증가를 높은 신뢰도로 예측할 수 있다. 즉 95% 신뢰구간의 폭이 가장 좁다. 이것은 대림 3동 빗물펌프장의 우수관의 구조가 망형이므로 강우 강도가 증가하여 저지대나 우수관의 통수능이 부족한 지역이 발생하더라도 우수의 흐름 가능 방향이 다양하여 빠르게 초과된 강우량의 배제가 가능하기 때문인 것으로 판단된다.

반대로 95% 신뢰구간의 폭이 가장 큰 온천천 유역의 경우에는 회귀식의 결정계수도 가장 작게 나타났다. 이것은 Fig. 2의 우수관망 네트워크에서 알 수 있듯이, 온천천 우수관은 수지상형으로 구성되어 있어 강우 강도가 증가하여 저지대나 우수관의 통수능이 상대적으로 부족한 지역에서 다른 지역으로 우수관이 배제되지 못하고, 지면 저류되었다가 유출되는 등 우수 배제 흐름의 방향이 탄력적이지 못하기 때문인 것으로 분석된다. 그러므로 침투강우량이 증가하여도 우수관의 통수 능력이 제한되어 침투유출량은 증가하지 못하고 유출이

지체되어 발생하게 된다. 특히 온천천 유역은 유역면적이 크기 때문에 비슷한 수지상형의 우수관을 가지고 있는 목감천 유역에 비해 침투유출량의 예측력이 더욱 떨어지는 것으로 보인다.

4.2 수계밀도

수계밀도를 계산한 결과 Table 4와 같이 수계밀도가 가산 1 빗물펌프장 107.7 ha/m, 대림 3동 빗물펌프장 241.3 ha/m, 목감천 42.1 ha/m, 온천천 5.1 ha/m 로 산정되었다. 수계밀도가 가장 큰 대림 3동 빗물펌프장의 경우 R²가 0.9969로 가장 높았으며, 95% 신뢰구간 평균 폭은 0.29 m³/s로 가장 낮은 반면 수계밀도가 가장 작은 온천천의 경우 R²가 0.9079로 가장 낮았으며, 95% 신뢰구간 평균 폭은 20.82 m³/s로 가장 크게 나타났다. 또한 평균에 대한 표준편차의 크기를 의미하는 변동계수를 계산하여 본 결과 역시 수계밀도가 작은 온천천이 가장 크고, 수계밀도가 큰 대림 1동 빗물펌프장이 가장 작게 계산되었다. 즉, 수계밀도가 높아서 유역 내 우수관이 촘촘히 배치되어 있다면 우수관이 망형으로 건설되었을 가능성이 높고, 이는 강우강도가 증가하였을 때 초과된 강우량을 다양한 경로로 배출하여 유역 내 유출 응답을 빠르게 한다는 것을 의미한다.

Table 4. Results of drainage density calculation

Catchment	Drainage density (m/ha)	R ²	Average width of 95% confidence interval (m ³ /s)	Coefficient of variation
Gasan 1 stormwater pumping station	107.7	0.9787	0.63	77.8
Daelim 3 stormwater pumping station	241.3	0.9969	0.29	72.7
Mokgamcheon	42.1	0.9522	2.56	80.0
Oncheoncheon	5.1	0.9079	20.82	85.6

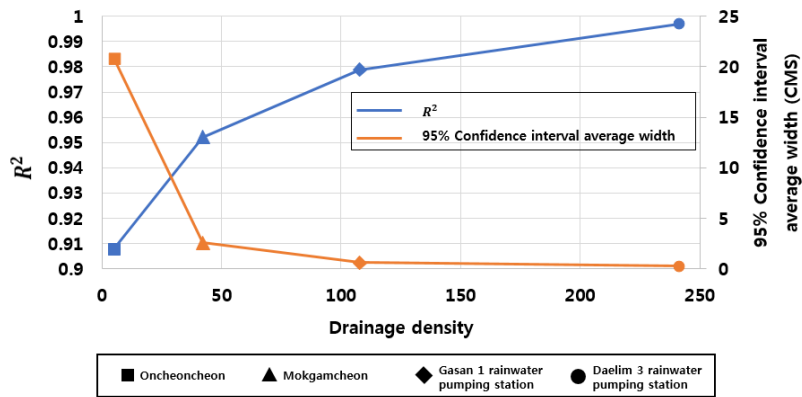


Fig. 4. Drainage density and 95% confidence interval width

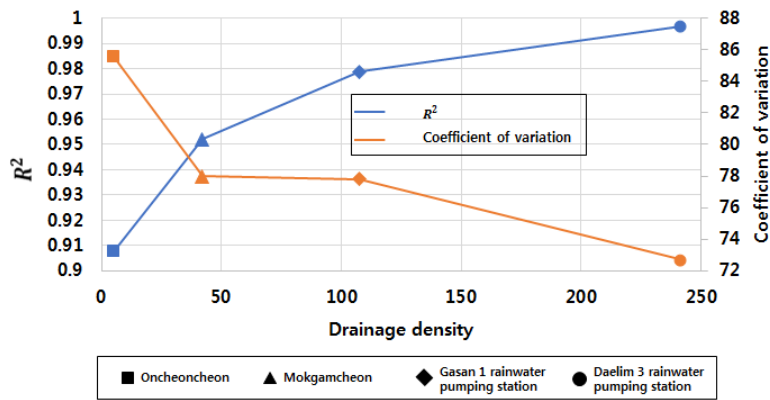


Fig. 5. Drainage density and coefficient of variation

Fig. 4는 수계밀도에 따른 R²와 95% 신뢰구간의 평균 폭의 변화이다. 그림에서 수계밀도가 커질수록 R²가 증가하며 95% 신뢰구간의 평균 폭은 낮아짐을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5는 수계밀도에 따른 침투 유출량의 변동계수를 나타낸 그림으로서 수계밀도가 커질수록 변동계수가 낮게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 서울 기상관측소와 부산 기상관측소에서 관측된 41개년(1975~2015년)의 강우 자료를 이용하여 도시 지역의 우수관망의 유출특성을 분석하였다. 과거 홍수 피해 발생이 빈번했던 도시 중 서울시의 가산 1 빗물펌프장, 대림 3동 빗물펌프장과 목감천, 부산시의 온천천 등 4개 유역을 대상유역으로 선정하여 침투강우량의 증가에 따른 침투유출량의 관계를 선형회귀모형을 이용하여 분석하였다. 그 결과 침투강우량이 증가함에 따라 증가하는 침투유출량을 예측하는 신뢰도가 도시 우수관의 구조에 따라 달라지는 수계밀도를 계산하여 추정할 수 있음을 확인하였다. 침투강우량의 증가에 따른 침투유출량의 증가는 선형회귀모형의 결정계수가 모두 0.9 이상으로 매우 높게 나타났으나 수계밀도가 작아져서 유역 내 우수관의 배치가 촘촘하지 않거나 수지상인 경우에는 결정계수가 작아지고 회귀모형의 95% 신뢰구간 폭이 커지며, 변동계수 또한 커지는 것을 확인하였다. 이는 수계밀도에 따라 호우에 대한 유출응답속도가 달라지는 것을 의미한다. 예를 들어, 망형으로 촘촘히 설치된 우수관을 가지고 있는 유역에서는 유출량에 대한 예측력이 상대적으로 우수함을 보였다. 이는 수계밀도가 높을수록 국부적인 우수관의 통수능 부족으로 발생하는 침투의 발생 가능성이 낮아지기 때문인 것으로 보이며, 갑작스러운 강우에 대한 대응이 수월함을 의미한다.

하지만 반대로 우수관이 수지상형으로 건설된 유역의 수계밀도는 상대적으로 낮고 강우의 변화에 대한 대응 능력이 상대적으로 낮음을 의미한다. 따라서 향후 도시 지역의 우수관 설계 시 우수관의 밀도에 대한 기준도 제시한다면 보다 효과적인 도시 우수 저감이 가능하며 더 나아가 도시 홍수 저감도가 가능할 것으로 보인다. 다만, 망형과 수지상형의 구조적인 차이에 따른 유출 변화나 우수관 설계 시 기준이 되는 우수관 밀도 등에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 건설기술연구사업 2014년의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(17SCIP-B089409-03)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

Carlston, C. W. (1964). *Drainage density and streamflow*. U.S.G.S. Professional Paper, No.422-C, pp. 1-8.

Choi, K. S., Kyoung, M. S., Kim, H. S., and Kim, B. S. (2007). “Evaluation of effects of rainfall errors on discharge.” *Proceedings 33rd Annual Meeting of the Korean Society of Civil Engineers CIVIL EXPO*, pp. 1958-1961.

Chung, G. H., Sim, K. B., and Kim, E. S. (2015). “Uncertainty quantification index of SWMM model parameters.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 2, pp. 105-114.

Enrique, M., Pedro, T., and Gabriel, O. (2014). “Uncertainty in rainfall input data in a conceptual water balance model: effects

- on outputs and implications for predictability.” *Earth Sciences Research Journal*, Vol. 18, No. 1, pp. 69-75.
- Hilary, M., Bethanna, J., Martyn, C., Dmitri, K., and Ross, W. (2011). “Rainfall uncertainty in hydrological modelling: an evaluation of multiplicative error models.” *Journal of Hydrology*, Vol. 400, No. 1-2, pp. 83-94.
- Hong, J. B. (2005). *Assessment of food flow conveyance for urban stream using XP-SWMM*. Master’s Thesis, Inha University, Incheon, Republic of Korea, p. 113.
- Jang, H. C. (2009a). *Basic and detailed design for improvement of rainwater pump station facilities (expansion 1 area) Gasan 1 rainwater pump station report*, Seoul: River Management Section.
- Jang, H. C. (2009c). *Basic and detailed design for improvement of rainwater pump station facilities (extension 3 area) Daerim 3 rainwater pump station*, Seoul: River Management Section.
- Jang, H. C. (2009b). *Basic and detailed design for improvement of rainwater pump station facilities (expansion 3 area) Gaebong 1 rainwater pump station*, Seoul: River Management Section.
- Kang, N., Joo, H., Lee, M., and Kim, H. S. (2017). “Generation of radar rainfall ensemble using probabilistic approach.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 3, pp. 155-167.
- Kang, S. H., Heo, W. M., and Kang, S. H. (2015). “Water balance estimate of LID technique for circulating urban design.” *Journal of Environmental Science International*, Vol. 24, No. 8, pp. 1065-1073.
- Kim, B. S., Kim, B. K., and Kwon, H. H. (2009). “Evaluation of the uncertainties in rainfall-runoff model using Meta-Gaussian approach.” *Journal of Korean Wetlands Society*, Vol. 11, No. 1, pp. 49-64.
- Kim, E. S., Yoo, J. Y., Chung, G., Park, M. J., and Choi, H. I. (2013). “Analysis of the disaster environmental change considering climate change: 2. flood risk area assessment.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 4, pp. 219-226.
- Lee, H., Jeon, M. W., Balin, D., and Rode, M. (2009). “Application of rainfall runoff model with rainfall uncertainty.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 10, pp. 773-783.
- Lee, J. (2017). “Estimation of interevent time definition using in urban areas.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 4, pp. 287-294.
- Li, M., Yang, X., Sun, B., Chen, L., and Shen, Z. (2016). “Parameter uncertainty analysis of SWMM based on the method of GLUE.” *Proceedings 2016 7th International Conference on Biology, Environment and Chemistry*, Vol. 98, No. 11.
- Meteorological data link portal. <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do> (accessed July 30, 2017).
- Ogden, F. L., Pradhan, N. R., Downer, C. W., and Zahner, J. A. (2011). “Relative importance of impervious area, drainage density, width function, and subsurface storm drainage on flood runoff from an urbanized catchment.” *Water Resources Research*, Vol. 47, No. 12, pp. W12503.
- Park, J., Lee, S., and Lee, B. (2017). “Development of Storm Sewer-Network Extraction Tool (SS-NET) for creating pipe network input data of urban rainfall-runoff model.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 1, pp. 79-86.
- Shim, U. B. (2008). “Characteristics of the flood damage in Korea and the corresponding task.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 9, pp. 41-46.
- Shon, T. S., Kang, D. H., Jang, J. K., and Shin, H. S. (2010). “A study of assessment for internal inundation vulnerability in urban area using SWMM.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 4, pp. 105-117.
- WAMIS. <http://www.wamis.go.kr> (accessed July 30, 2017).