



## 하수관로 수위를 이용한 우수관망 모형의 매개변수 추정

# A Study on the Parameter Estimation of Sewer Network Model Using Sewer Level Data

임오성\* · 유도근\*\* · 이의훈\*\*\* · 김종훈\*\*\*\*

Lim, Oseong\*, Yoo, Do Guen\*\*, Lee, Eui Hoon\*\*\*, and Kim, Joong Hoon\*\*\*\*

### Abstract

The rainfall-runoff analysis model in urban watersheds should be constructed to establish flood damage countermeasures. SWMM (Storm Water Management Model) is a representative model for rainfall-runoff analysis of urban watersheds. While this model is based on many parameters and provides relatively reliable results, it contains many ambiguous parameters. Therefore, parameter estimation is essential for rainfall-runoff analysis model and can be done using optimization algorithms. Harmony search algorithm was used to automatically estimate the parameters of the SWMM. Unlike the previous studies, the parameters were estimated by considering not the inflow data but the sewer level data. Parameter estimation was applied to the flood simulation on the catchment of Yongdap pump station. The results estimated by the sewer level data were reliable in terms of both inflow and sewer level. The verification results of the calibrated model show the error within 5%, which are within the allowable error range.

**Key words :** SWMM, Parameter Estimation, Sewer Level, Harmony Search Algorithm

### 요 지

침수피해 대책을 수립하기 위해서는 도시구역의 강우-유출 해석 모델을 구축할 필요가 있다. SWMM은 도시구역에서의 강우-유출해석을 위한 대표적인 모형으로, 다양한 매개변수에 기반을 두어 상대적으로 신뢰할만한 결과를 제공하는 반면에 불확실한 매개변수 또한 다수 포함하고 있다. 그러므로 이러한 매개변수 추정은 강우-유출 해석 모형에서 필수적이며 이는 최적화 알고리즘을 통해 이루어질 수 있다. 본 연구에서는 화음탐색법(harmony search algorithm)을 사용하여 SWMM의 매개변수를 자동으로 추정하였으며, 선행연구들과는 달리 유입량이 아닌 하수관로 수위를 사용하여 최적화를 수행하였다. 매개변수 최적화는 용담 빗물펌프장 구역에서의 홍수해석으로 진행되었다. 하수관로 수위에 의한 매개변수 추정 결과는 유입량과 하수관로 수위 모두의 측면에서 신뢰할 수 있는 결과를 나타내었다. 보정된 모형의 검증 결과 5% 이내의 오차를 나타내었고, 이는 허용 가능한 오차범위 이내라고 판단된다.

**핵심용어 :** SWMM, 매개변수 추정, 하수관로 수위, 화음탐색법

## 1. 서 론

최근 급격한 기후변화에 따른 강우특성의 변화로 인해

도시구역에서 대규모 침수피해가 자주 발생하고 있으며, 이로 인해 인명 및 재산피해가 지속적으로 나타나고 있다. 2010년 9월 21일 수도권 지역에 발생한 집중호우는 100년

\*정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정(E-mail: dw4642@korea.ac.kr)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

\*\*정회원, 수원대학교 건설환경에너지공학부 조교수

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Suwon

\*\*\*고려대학교 방재과학기술연구소 연구교수

Research Professor, Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University

\*\*\*\*교신저자, 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수(Tel: +82-2-3290-3316, Fax: +82-2-3290-4722, E-mail: jaykim@korea.ac.kr)

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

빈도 이상의 극한 강우사상으로, 서울지역에서만 총 11,744 건의 주택침수가 발생하였으며 159억 원에 달하는 재난지원금이 지급된 것으로 나타났다(Moon and Yoon, 2010). 이와 같이 도시유역은 밀집된 인구와 재산으로 인해 피해규모가 매우 크게 발생하기 때문에 도시유역의 침수피해 방지는 매우 중요한 문제이다.

도시침수를 줄이기 위한 대책으로는 빗물저류조와 우수관로 등의 내배수시설의 신·증설 및 우수관로의 역구배 개선 등의 구조적인 대책과 내배수시설의 운영 방안 개선 등의 비구조적인 대책이 있다. 도시유역의 적절한 침수피해 대책을 수립하기 위해서는 도시유역의 홍수유출이 반드시 선행되어야 하며, 따라서 이를 위한 모형이 필요하다. 1971년 미 환경보존국(Environmental Protection Agency: EPA)에서 개발되어 현재까지 보완 및 개선되고 있는 SWMM (Storm Water Management Model)은 도시유역의 홍수유출을 해석하기 위한 대표적인 강우-유출 모형으로, 소유역과 노드 및 관거 등으로 구성된 우수관거 네트워크에 강우가 발생하였을 때 이에 대한 유출모의가 가능하다. 우리나라에서도 도시유역의 홍수유출 해석에서 SWMM을 사용하도록 권장하고 있으며, 내배수시설의 신·증설을 위한 설계 및 검토에서 필수적으로 사용되고 있다(Korea Water Resources Association, 2009; Lee et al., 2010).

우수관거 네트워크의 수리학적 해석을 위해서는 해당 유역의 다양한 정보가 필요하며, 이 정보들은 다양한 매개변수의 형태로 수치화하여 입력된다. SWMM은 다양한 매개변수들을 기반을 두고 있기 때문에 신뢰적인 결과를 제공하는 반면에, 불명확한 매개변수가 다수 포함되어 있는 점 때문에 매개변수의 정밀한 추정이 필요하다. 매개변수의 추정치는 모형의 보정 및 검증을 통해 수행되며, 이는 시행착오에 의한 수동적인 방법과 최적화에 의한 자동적인 방법으로 구분된다. 최근에는 최적화 알고리즘의 발전으로 자동적인 검보정 방법이 많이 적용되고 있다.

SWMM의 매개변수를 추정하기 위한 연구는 SWMM이 개발된 이후로 지속되어 왔다. Liong et al. (1991)은 SWMM에서 각각의 매개변수가 유출곡선에 미치는 영향에 대한 민감도 분석을 연구하였으며, 이들은 소유역의 Manning값, 경사, 폭 등 10개의 매개변수를 사용하여 분석을 진행하고 이러한 매개변수의 변화를 통해 유출곡선의 침투값과 전체적인 개형을 보정할 수 있다고 주장하였다. Di Piero et al. (2005)은 8개의 매개변수를 사용하여 유출량 부피 오차와 침투 유량 오차를 함께 고려한 다목적 다중이벤트(MOME)를 적용할 경우 단일 목적함수에 의한 기존의 결과들보다 뛰어난 매개변수 추정이 가능하다고 발표하였다. Barco et al. (2008)은 GIS를 통해 유역의 불투수율 및 폭 등을 추정하고 이를 유입량 예측에 다중 목적함수로 적용하고 이에 대한 신뢰도를 확보하였다. 국내에서는 유전자 알고리즘과 집합체 혼합 진화 알고리즘 등을 이용한 연구가 진행된 바 있다(Cho and

Lee, 2006; Cho and Seo, 2007; Kang et al., 2012).

연구에 따라 추정하는 매개변수의 우선순위가 다르게 나타난 경우도 있었으며, Krebs et al. (2013)은 SWMM의 해석에 있어 해당 유역의 지역적 특성이 뚜렷하여 매개변수의 경계가 좁다면 Manning값과 요지 저류량이 가장 뚜렷한 영향 인자로 작용하여, 이 매개변수들만 이용하여도 매개변수 추정에 있어 좋은 결과를 도출할 수 있다고 하였다. Mancipe-Munoz et al. (2014)은 원격탐사(Remote Sensing; RS)와 GIS를 통해 매개변수에 관한 정보를 얻고 7개의 매개변수를 사용하여 매개변수 최적화를 수행하였다. 이들은 불투수지역의 조도계수 및 요지 저류량이 매개변수 최적화에 있어 가장 중요한 역할을 하며, RS와 GIS를 통한 이들의 추정이 필요하다고 주장하였다.

일반적으로 도시유역 우수관망의 SWMM 매개변수를 추정할 때 목적함수로 유역의 유출량을 사용한다. 그러나 빗물 펌프장에는 유량 관측계가 설치되어 있지 않은 경우가 대부분이며, 우수지 수위의 변화와 펌프 운영을 바탕으로 유입량을 계산하는 방법을 사용한다. 이 경우 빗물펌프장에서의 펌프 가동은 일반적으로 배수문을 닫은 상황에서 이루어지기 때문에 배수문이 열려있는 강우 초기단계에서는 유입량을 추정하기 힘들다는 단점이 있다. 또한, 여러 계산과정을 거치면서 오차가 비교적 크게 발생할 수 있고 이는 SWMM 매개변수의 정확성을 떨어뜨릴 수 있다. 실제로 배수문이 닫혀있어 자연적인 배수가 이루어지지 않는 상황에서 펌프로 인한 배수량에 비해 우수지의 내수위의 감소량이 큰 경우가 종종 발생한다. 이 경우 펌프장에서의 유입량이 음의 값으로 나타나며, 이는 유입량 산정 과정에서의 신뢰도를 감소시키는 요인으로 작용한다.

한편 빗물펌프장과 그다지 멀리 떨어져 있지 않은 하수관로의 수위 자료를 빗물펌프장의 유입량과 비교하면 거의 유사한 형태의 그래프 개형을 나타낸다. 그러므로 수위변화가 빗물펌프장의 유입량과 비슷한 거동을 보이는 직상류 관거에서의 수위를 이용하여 SWMM의 매개변수 추정을 진행하면 높은 신뢰도를 확보할 수 있다. 또한, 하수관로 수위는 유입량과 다르게 강우 초기단계에서도 관측 장비를 통해 실측값을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 강우에 의한 침수피해를 실시간으로 대응하기 위해 서울시에는 총 104개소의 하수관로 관측지점이 설치되어 있으며, 1분 단위로 기록되어 보관되기 때문에 유입량 자료에 비해 비교적 높은 신뢰도를 가진다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기존에 사용되던 유입량이 아닌 하수관로 수위를 목적함수로 적용하여 SWMM 매개변수를 추정하였다. 이를 통해 구축된 우수관망 모형의 모의값을 실측값과 비교하여 추정된 매개변수의 정확성을 검토하였다. 그리고 제안된 방법을 통해 매개변수 추정이 완료된 우수관망 모형을 다른 강우사상을 통해 검증하였다.

## 2. 매개변수 추정을 위한 모형 구축

### 2.1 SWMM과 화음탐색법의 연계

강우-유출 모형 중 하나인 SWMM은 도시유역에서 강우 사상으로 인해 발생하는 유출흐름에 관한 다양한 모의를 할 수 있다. 1971년 개발된 이후 여러 기관 및 업체에서 다양한 종류의 SWMM을 개발하였는데, 본 연구에서는 EPA에서 가장 최근에 개발한 버전인 SWMM 5.1을 사용하였다.

SWMM 내에는 여러 모듈이 존재하는데 이 중에서 유출 해석과 홍수추적 해석에 관한 모듈이 핵심적인 역할을 한다.

유출 해석 모듈에서는 소유역에서의 증발, 침투, 오염물 이동 등의 모의를 수행하며, 홍수추적 모듈에서는 관거, 수로, 저류지, 펌프 등에서의 홍수 이동의 모의를 수행한다. 유역추적의 경우 비선형저류방정식 및 단위도 방법이 있으며, 하도추적의 경우에는 정상류(steady flow), 운동파(kinematic wave) 및 동역학파(dynamic wave)가 있다. 본 연구에서는 유역추적 방법으로 유역의 물리적인 특성에 근거할 수 있는 비선형저류방정식을 채택하였고, 유역 내에 역경사로 이루어진 관거가 없기 때문에 하도추적 방법으로는 일반적으로 많이 사용되는 운동파 모형을 적용하였다.

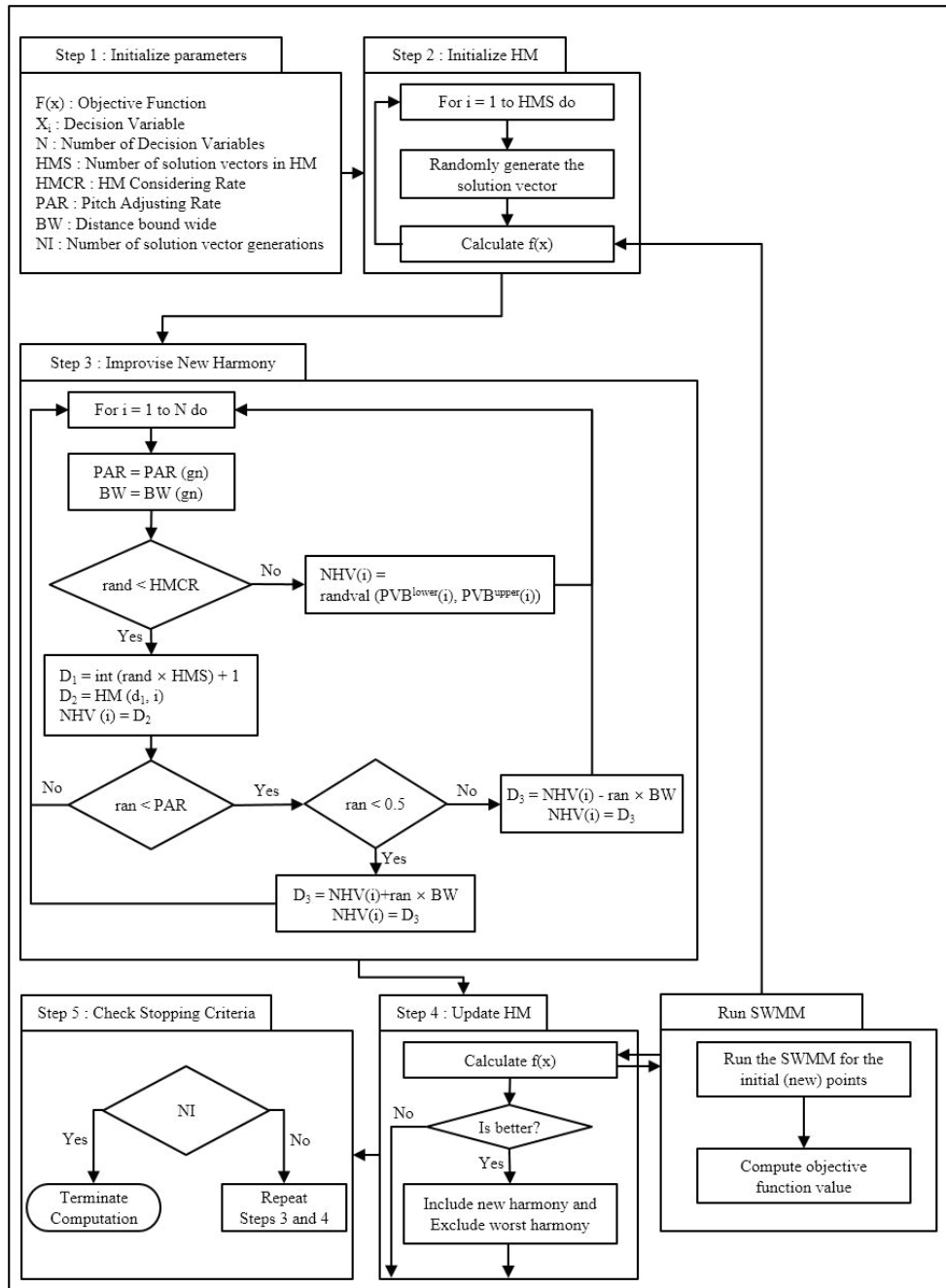


Fig. 1. Flow Chart of Connection Between SWMM and Harmony Search Algorithm

본 연구에서는 SWMM의 매개변수 추정을 위한 최적화 알고리즘으로 화음탐색법(harmony search algorithm)을 사용하였다. 화음탐색법은 Geem et al. (2001)에 의해 개발되었으며 음악을 연주할 때 화음을 조합하는 것에서 착안한 메타휴리스틱(meta-heuristic) 알고리즘이다. 음악을 연주하는 프로세스를 알고리즘의 과정에 접목하였으며, 개발된 이후로 여러 분야에서 복잡하고 다양한 최적화 문제에 적용되고 있다.

화음탐색법은 최적해 탐색을 위해 하모니 메모리(Harmony Memory; HM)를 초기해로 설정하고 각각의 반복과정에서 새로운 하모니를 생성한다. 새로운 하모니를 생성하는 과정에서 하모니 메모리에 기억하고 있는 화음에서 화음 간의 조합을 통해 새로운 화음을 결정할 것인지, 혹은 조금 변형시켜서 결정할 것인지를 Harmony Memory Considering Rate (HMCR), Pitch Adjustment Rate (PAR), Bandwidth (BW)와 같은 매개변수를 사용하여 결정한다. HMCR은 하모니 메모리를 사용할 것인지, 혹은 이에 새로운 탐색을 할 것인지를 결정하는 확률이다. PAR은 새롭게 만든 화음을 그대로 사용할지, 혹은 약간의 조정을 할 것인지를 결정하는 확률이며, BW는 새로운 조합을 조정하기로 결정될 경우에 적용되는 값으로 이 값을 기준으로 조정을 하게 된다. 화음탐색법의 계산과정 및 SWMM과의 연계를 위한 구성은 Fig. 1과 같이 나타난다.

## 2.2 목적함수 및 평가지표 구성

최적화 문제는 목적함수를 어떻게 구성하느냐에 따라서 결과가 다르게 나타날 수 있기 때문에 목적함수의 선정은 매우 중요한 요소이다. 기존에 선행된 연구들에서는 유입량을 고려하여 목적함수를 선정하였으나, 본 연구에서는 하수관로 수위를 고려하여 목적함수를 선정하고자 하였다. 이를 위해 선행 연구들에서 매개변수 추정에 활용된 목적함수들을 검토하였으며 최종적으로 Nash - Sutcliffe Efficiency (NSE)를 변형시킨 형태의 식을 목적함수로 채택하였다(Eq. (1)).

$$\frac{\sum_{t=1}^N (d_t^{ob} - d_t^{sm})^2}{\sum_{t=1}^N (d_t^{ob} - d_{mean}^{ob})^2} \quad (1)$$

여기서, N은 시계열의 개수,  $d_t^{ob}$ 와  $d_t^{sm}$ 는 관측 및 모의된 하수관로 수위의 시계열 (m),  $d_{mean}^{ob}$ 는 관측 하수관로 수위의 평균값 (m)을 나타낸다. 변형된 형태의 식은 0에서 1 사이의 값을 가지며, 기존의 NSE가 아닌 변형된 식이기 때문에 0에 가까울수록 우수한 결과를 나타낸다.

각각의 목적함수에 따라 보정된 모형을 검토하기 위해서는 평가지표를 구성할 필요가 있다. 이를 위해서 평균오차의 제곱근(Root Mean Square Error; RMSE)과 NSE를 검토하였다(Table 1).

Table 1. Criteria for Model Assessment

Criteria	Equation	Optimal Value
Root Mean Square (RMSE)	$\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (X_t^{ob} - X_t^{sm})^2}{N}}$	0
Nash - Sutcliffe Efficiency (NSE)	$1 - \frac{\sum_{t=1}^N (X_t^{ob} - X_t^{sm})^2}{\sum_{t=1}^N (X_t^{ob} - X_{mean}^{ob})^2}$	1

## 2.3 대상유역

본 연구에서 제안한 SWMM의 매개변수 추정 모듈은 서울특별시 성동구 용답동에 위치한 용답 빗물펌프장 배수유역에 적용되었다. 용답 빗물펌프장 배수유역의 유역면적은 34.7 ha이며, 토지이용 현황은 주거지역이 80%, 공공용지 6%, 도로 및 빗물펌프장구역 14%로, 해당 지역은 도시화가 이루어진 전형적인 도시유역이다. 유역의 출구부에 위치한 용답 빗물펌프장은 배수유역 좌측에 위치한 청계천으로 우수지의 물을 방류하며, 12,100 m<sup>3</sup>의 우수지와 352 m<sup>3</sup>/min의 펌프용량을 갖추고 있다. Fig. 2는 용답 빗물펌프장의 배수유역경계와 주요 관거를 나타내며, 원 안의 지점은 하수관로 수위 모니터링 지점을 나타낸다.

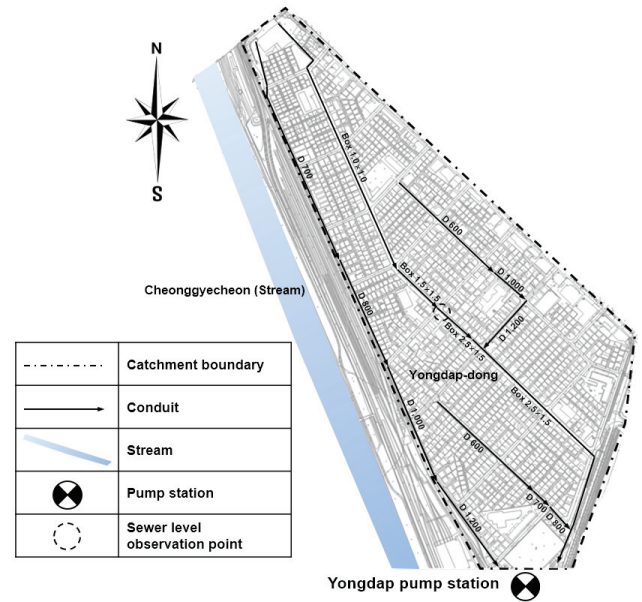


Fig. 2. Conduits in the Yongdap Pump Station Basin

## 2.4 입력자료 구축

### 2.4.1 유입량 및 하수관로 수위 추정

강우-유출 모형(SWMM)의 입력 자료를 구축하고 이를 모의하여 실측 결과와 비교하기 위해서는 강우량, 빗물펌프장의 유입량 및 하수관로 수위 등의 실측값이 필요하다.

강우량의 경우 대상유역에 가까이 위치한 성동관측소의 데이터를 대상으로 하였다.

용담 빗물펌프장의 배수유역 내에는 빗물펌프장의 유입량을 측정하는 시설이 존재하지 않기 때문에, 유입량 자료를 활용하기 위해서는 적절한 자료를 활용하여 이를 추정해야 한다. 용담 빗물펌프장에서는 우수지의 수위가 청계천의 수위보다 높을 경우에 배수문에 연결된 자연방류관로(2.0 m × 1.8 m)를 통해 우수지의 우수를 청계천으로 방류한다. 만약 지속된 강우로 인해 청계천의 수위가 상승하여 자연방류가 발생하기 어려울 경우, 수문을 닫고 펌프를 이용하여 물을 강제로 토출한다. 용담 빗물펌프장에서는 강우가 발생하였을 때 펌프의 운영을 위해 우수지의 수위를 관측하여 기록하고 있으며, 펌프가동기록 또한 마찬가지로 기록하고 있다. 본 연구에서는 이들을 이용하여 강우 발생 시 용담 빗물펌프장의 실제 유입량을 추정하였다.

추정된 용담 빗물펌프장의 유입량은 10분 단위로 계산되었는데, 이는 빗물펌프장에서 우수지의 수위가 10분 단위로 기록되어 저장되기 때문이다. 10분 단위의 평균 유입량을 추정하는 식은 Eq. (2)와 같다.

$$Q = \frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t} + D_{pump} \quad (2)$$

여기서,  $Q$ 는 현재까지 10분 동안의 유입량( $m^3/10min$ )을 나타내며,  $S_t$  및  $S_{t-1}$ 은 각각 현재 ( $t$ ) 및 10분 전 ( $t-1$ )의 우수지 저류량 ( $m^3$ ),  $D_{pump}$ 는 10분 동안의 펌프에 의한 토출량을 나타낸다.

Eq. (1)에서 우수지의 저류량을 구하기 위해서는 우수지의 수위-용적 계산이 선행되어야 한다. 서울시(Seoul City, 2010)는 용담 빗물펌프장의 우수지의 저수위(Low Water Level; L.W.L)에서 홍수위(High Water Level; H.W.L)까지의 수위-저수용량 관계를 Fig. 3과 같이 제시하고 있다.

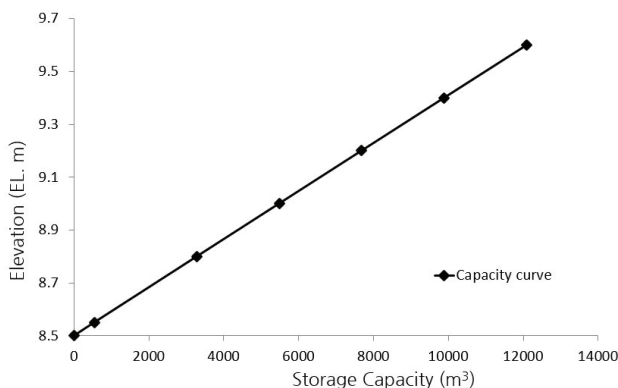


Fig. 3. Elevation - Storage Capacity Curve in Yongdap Detention Reservoir

우수지의 수위-저수용량곡선을 이용하여 관측된 수위에

다른 저류량을 산정하고, 기록된 실제 펌프가동기록을 고려하여 Eq. (1)을 통해 용담 빗물펌프장의 유입량을 추정하였다.

하수관로 수위의 경우 서울시에서 제공하는 하수관로 수위 모니터링 현황의 자료를 활용하였다. 용담 빗물펌프장 배수유역 내에 존재하는 모니터링 지점의 실측값을 모의에 사용하였으며, 이 지점의 위치는 Fig. 2에 나타내었다.

#### 2.4.2 추정대상 매개변수 선정

SWMM에서 소유역(subcatchments)과 관거(conduits)의 매개변수는 물리적 매개변수(physical parameters)와 수문학적 매개변수(hydrologic parameters)로 구분할 수 있다. 물리적 매개변수는 유역의 면적이나 관거의 연장 등과 같이 일종의 제원으로 나타나서 특정 값으로 정의될 수 있는 매개변수인 반면, 수문학적 매개변수는 정확한 값을 파악할 수 없어 추정이 반드시 필요한 매개변수이다.

본 연구에서는 추정이 필요한 수문학적 매개변수를 추정대상 매개변수로 선정하였다. 선행 연구들에서는 주로 관거가 아닌 소유역의 매개변수를 대상으로 추정하였는데, 관거의 매개변수는 소유역의 매개변수에 비해 큰 영향력을 갖지 못하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 소유역의 수문학적 매개변수 몇 가지를 추정하고자 하였으며, 선행 연구들을 참고하여 총 8개의 매개변수를 선정하였다(Table 2).

Table 2. Types and Ranges of Estimated Parameters

Parameters	Lower Bound	Upper Bound
Percent of Impervious Area (%)	65	99
Manning's N for Pervious Area	0.15	0.40
Manning's N for Impervious Area	0.010	0.015
Depth of Depression Storage on Pervious Area (mm)	2.5	5.0
Depth of Depression Storage on Impervious Area (mm)	1.3	2.5
Percent of Impervious Area with No Depression Storage (%)	10	30
Characteristic Width of Overland Flow Path (m)	0.7	1.3
Average Surface Slope (%)	0.7	1.3

선정된 매개변수 중에서 불투수지역의 면적비(percent of impervious area), 투수지역 조도계수(Manning's N for pervious area), 불투수지역 조도계수(Manning's N for impervious area), 투수지역 요지저류량 깊이(depth of depression storage on pervious area), 불투수지역 요지저류량 깊이(depth of depression storage on impervious area), 요지저류가 없는 불투수지역비(percent of impervious area with no depression storage)는 선행 연구(Cho et al., 2007; Barco et al.,

2008; Kang et al., 2012) 및 SWMM 매뉴얼(Rossman, 2004)을 참고하여 적정 범위를 도출하였다. 유역 폭(characteristic width of overland flow path)과 평균 경사(average surface slope)는 GIS나 RS 등의 지형정보시스템에 의해 소유역 별로 추정된 고유한 값이 있고, 범위가 매우 커서 임의로 범위를 설정하기 힘들다. 따라서 연구에서는 이 두 매개변수에 대해서 기존에 추정된 값에서 일정 범위의 배수를 곱하는 방식으로 변화시켜 최적해를 찾으려 하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 목적함수에 따른 모형 보정

앞서 제시한 목적함수를 적용하여 용담 빗물펌프장 유역에 대한 강우-유출 모형의 매개변수 추정을 수행하였다. SWMM 모의에 적용된 강우는 2013년 7월 13일에 발생한 강우사상이며, 해당 강우의 일강우량은 175 mm이고 시간 최대 강우는 42.5 mm/hr이다. 이를 위한 최적화 과정에서 회음탐색법의 매개변수인 HM, HMCR, PAR은 각각 30, 0.95, 0.7로 동일하게 설정하고 모의를 수행하였다.

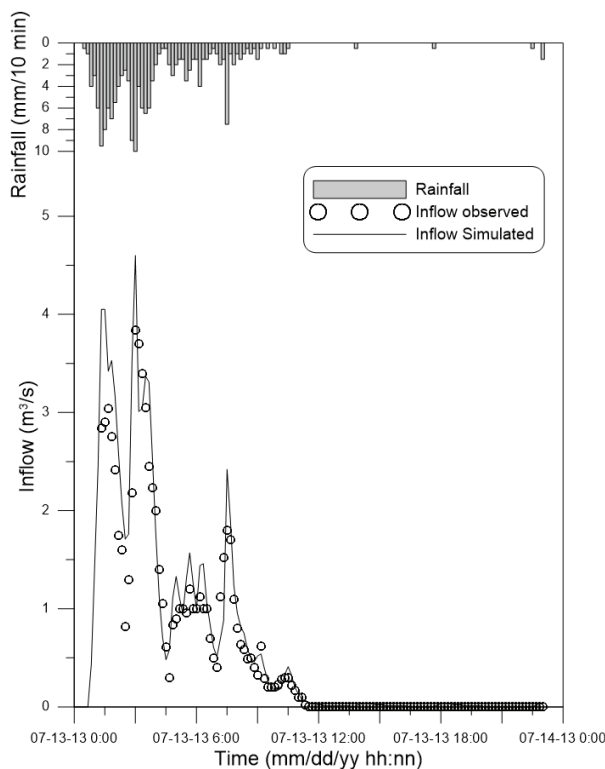
최적화를 통해 진행한 매개변수 추정 결과는 Table 3과 같다. 해당 표는 하수관로 수위를 맞추기 위한 목적함수로 추정된 매개변수를 갖는 우수관망 모형에서 해당 강우를 모의하였을 때, 유입량과 수위에서 어느 정도의 오차를 나타내는지 의미한다. 도출된 평가지표에서 NSE의 경우는 무차

원이기 때문에 유입량을 기준으로 하는 값과 하수관로 수위를 기준으로 하는 값에서 큰 차이를 나타내지 않는다. 하지만 RMSE의 경우는 하수관로 수위를 기준으로 계산하였을 때 유입량을 기준으로 한 것보다 훨씬 작은 값을 나타내는데, 이는 RMSE가 유입량과 수위 각각에서 m<sup>3</sup>/s와 m로 서로 다른 단위를 갖기 때문이다.

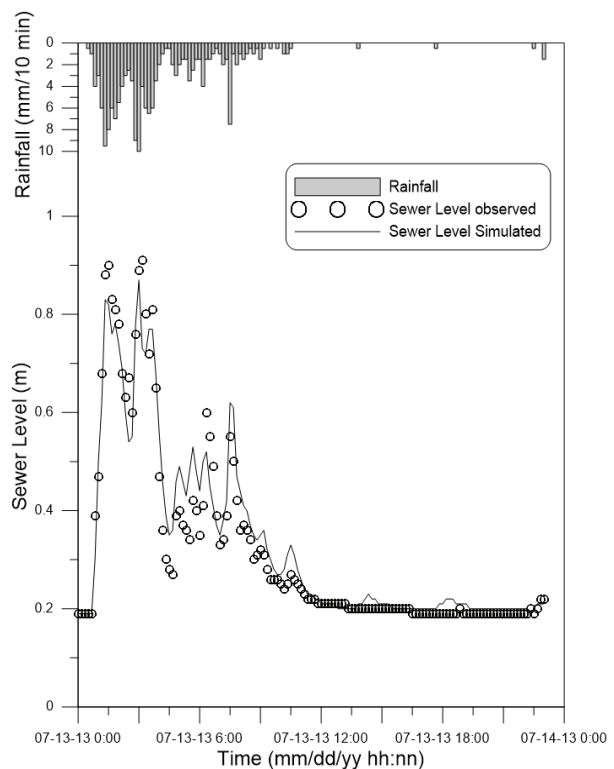
**Table 3.** Assessment Results for the Calibration

Classification	RMSE	NSE	r <sup>2</sup>
Inflow	0.312	0.914	0.942
Sewer Level	0.047	0.933	0.946

수위 관측지점에서의 하수관로 수위를 목적함수로 하여 매개변수를 추정한 모형의 결과는 Fig. 4와 같다. 유입량의 경우 배수문이 열려있는 강우 초기에는 추정된 유입량이 존재하지 않는 반면에, 하수관로 수위는 항상 1분 단위로 관측되므로 어느 시간대에서도 모의값과 실측값을 비교할 수 있다. 앞서 서술한 바와 같이 유입량과 하수관로 수위는 각각 단위만 다를 뿐 그래프의 개형이 매우 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 해당 관측지점의 하수관로 수위는 강우 발생 시 빗물펌프장의 유입량 특성과 매우 유사한 패턴으로 거동하는 지점이라고 해석할 수 있다.



(a) Inflow of Pump Station



(b) Sewer Level at Observation Point

**Fig. 4.** Automatic Calibration Results

하수관로 수위를 목적함수로 하였기 때문에 도출된 우수관망 모형에서 유입량의 모의값이 하수관로 수위에 비해 실측값과의 오차가 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만 서로 유사한 거동을 보이는 유입량과 하수관로 수위의 특성상 하수관로 수위를 목적함수로 보정한 모형에서 유입량의 평가지표와 하수관로의 평가지표가 큰 차이를 나타내지 않는다. 강우-유출 모형에서 NSE의 신뢰 기준이 0.8이라는 선행연구 및 다른 매개변수 검보정 관련 연구결과(Tan et al., 2008; Mancipe-Munoz et al., 2014; Kang et al., 2012)와 비교하여, 보정 결과로 나타난 0.91 이상의 NSE는 신뢰할 수 있는 결과를 나타내었다고 판단된다.

본 연구의 목적은 SWMM의 매개변수를 합리적인 값으로 찾는 것이므로 추정된 매개변수의 타당성을 검토하였다 (Table 4). 목적함수에 따라 추정된 매개변수가 기설정된 매개변수의 최솟값과 최댓값 중 하나의 값을 갖는다면 매개변수의 가능 범위를 넓힐 경우 더 크거나 작은 값이 도출될 수 있기 때문에 최적화가 완료되지 않은 것이라 판단할 수 있다. 모형의 보정에서 추정된 결과에 따르면 매개변수가 최솟값이나 최댓값을 갖지 않고 전반적으로 범위 내에서 고르게 분포하고 있다. 특히 불투수지역의 면적비의 경우 도시화가 완료되어 대부분의 지면이 아스팔트로 포장된 해당 소유역의 특성을 고려하면 합리적인 것으로 판단된다. 유역 폭과 평균 경사는 기존에 지형정보시스템에 의해 소유역 별로 추정된 고유한 값과 거의 유사한 값을 사용하면서 좋은 결과를 나타내었기 때문에 매개변수의 추정이 합리적인 것으로 판단된다.

**Table 4.** Parameters Estimated by Optimization

Parameters	Estimated Value
Percent of Impervious Area (%)	94
Manning's N for Pervious Area	0.36
Manning's N for Impervious Area	0.011
Depth of Depression Storage on Pervious Area (mm)	4.882
Depth of Depression Storage on Impervious Area (mm)	1.334
Percent of Impervious Area with No Depression Storage (%)	28.91
Characteristic Width of Overland Flow Path (m)	1
Average Surface Slope (%)	0.99

### 3.2 모형 검증

강우-유출 모형 중에서 SWMM은 수많은 매개변수로 이루어져있기 때문에 입력강우에 따라서 모형의 신뢰도가 달라질 수 있다. 예를 들어 각기 다른 매개변수의 조합으로 두 가지 모형을 구축할 수 있는데, 이 경우 하나의 강우사상에

대해서는 거의 유사한 결과를 나타내지만 다른 강우사상에 대해서는 상당히 다른 차이를 나타낼 수 있다. 따라서 보정이 완료된 모형에는 보정에 적용한 것과 다른 강우사상을 적용하여 검증을 거쳐야 한다.

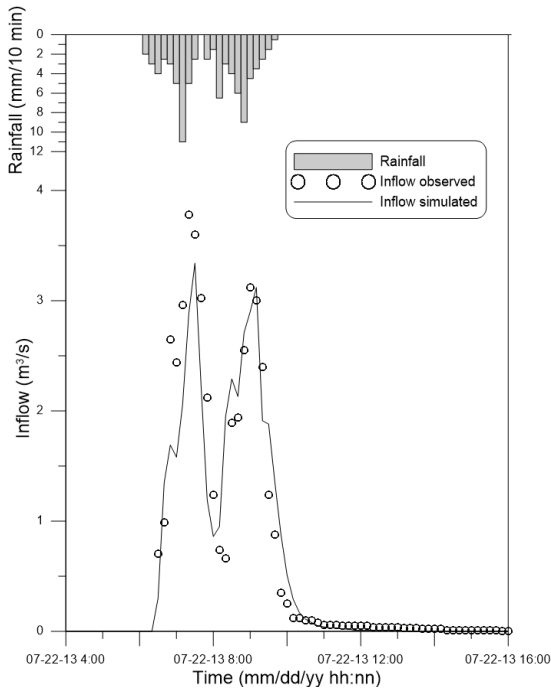
연구에서는 하수관로 수위를 목적함수로 한 회음탐색법을 이용하여 매개변수를 추정하여 모형을 보정하였다. 이에 대해 2013년 7월 22일과 2014년 7월 24일의 강우를 이용하여 각각 검증하였다. 각각의 관측 유입량과 관측 하수관로 수위 및 최적화를 위한 회음탐색법의 매개변수는 모형의 보정에 사용된 것과 동일한 방법으로 산정하였다.

Fig. 5는 2013년 7월 22일과 2014년 7월 24일의 강우사상에 대하여 관측된 유입량 및 하수관로 수위 각각에 대해 보정된 모형에 의한 유입량 및 하수관로 수위와 함께 나타낸 그림이다. 두 가지 강우사상에서도 마찬가지로 빗물펌프장의 상류에 존재하는 하수관로의 시간에 따른 수위 변화 개형이 시간에 따른 수위 변화 개형이 시간에 따른 빗물펌프장 유입량의 변화 개형과 매우 유사하게 나타난다. 평가지표 결과에서 보정 결과에 비해 좀 더 큰 오차가 발생하였지만, 오차 범위가 5% 이내이므로 허용 가능한 오차범위 이내라고 판단된다. 또한, NSE가 0.87 이상으로 두 강우사상 모두에 대해서 대체적으로 실제의 홍수유출 해석을 잘 모의하는 것으로 나타났다 (Table 5).

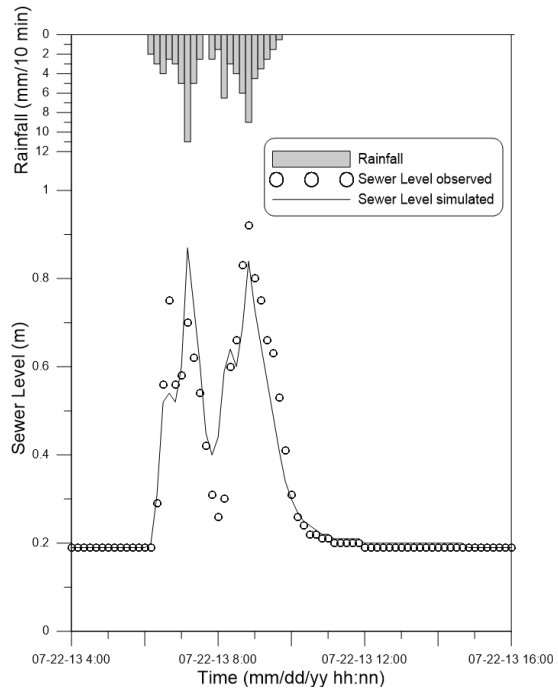
## 4. 결론

본 연구에서는 최적화 알고리즘 중 하나인 회음탐색법을 이용하여 도시유역의 홍수유출을 해석하기 위한 SWMM의 매개변수 추정을 수행하였다. SWMM의 매개변수 추정을 위한 대상유역은 서울특별시 성동구에 위치한 빗물펌프장 배수유역으로 하였으며, 입력자료 구축에 사용된 유입량과 하수관로 수위는 각각 빗물펌프장 기록과 수위 모니터링 기록 자료들을 이용하여 추정하였다. 연구에서 추정된 매개변수는 불투수 면적비, 투수지역 조도계수, 유역 폭 등 총 8개이며 합리적인 범위 내에서 변경되도록 하였다.

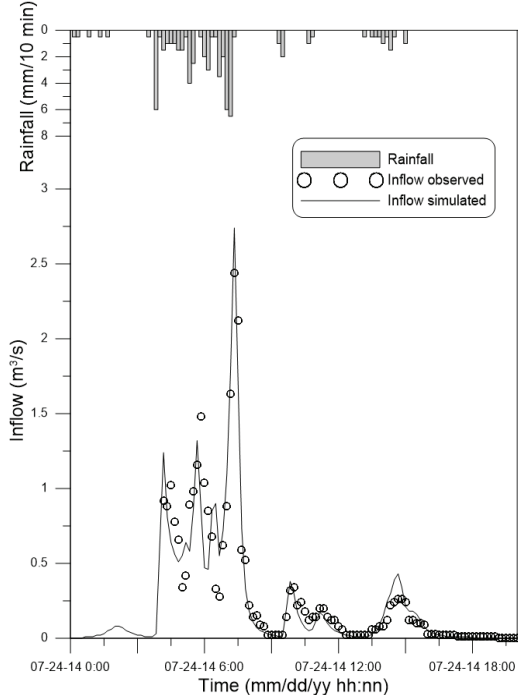
연구에서는 기존의 방법인 유입량을 목적함수로 하는 매개변수 추정이 아닌 하수관로 수위를 목적함수로 하여 매개변수를 추정하고자 하였다. 최적화 문제를 적용하기 위해 하수관로 수위를 목적함수로 설정하고 SWMM의 매개변수 추정을 진행하였으며, 실측값과의 오차를 분석하고 추정된 매개변수의 타당성을 검토하였다. 최종적으로 보정된 모형에서 평가지표인 RMSE, NSE 및  $r^2$ 가 유입량을 기준으로 하였을 때 각각 0.312, 0.914와 0.942로 나타났으며, 하수관로 수위를 기준으로 하였을 때는 각각 0.047, 0.933과 0.946으로 나타났다. 유입량과 하수관로 수위 모두에서 합리적인 결과가 나타난 것으로 판단되며, 특히 유입량의 경우는 펌프장의 가동기록에 의존하여 추정되기 때문에 실측값의 오차가 상당히 크다는 점을 고려하면 허용 가능한 오차



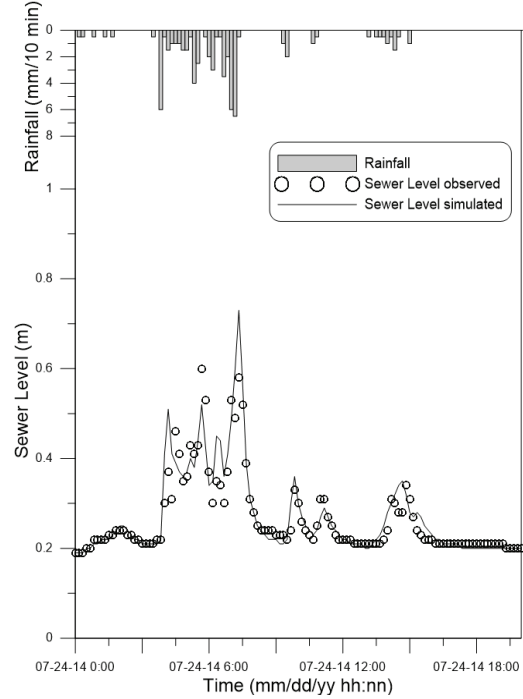
(a) Inflow of Pump Station on July 22, 2013



(b) Sewer Level at Observation Point on July 22, 2013



(c) Inflow of Pump Station on July 24, 2014



(d) Sewer Level at Observation Point on July 24, 2014

Fig. 5. Verification Results of Calibrated Model

Table 5. Assessment Results for the Verification

Classification	Storm Event	RMSE	NSE	$r^2$
Inflow	2013. 07. 22	0.367	0.877	0.909
Sewer Level		0.066	0.876	0.912
Inflow	2014.07. 24	0.133	0.889	0.904
Sewer Level		0.034	0.927	0.922



내에서 매개변수의 추정이 이루어졌다고 판단할 수 있다. 그리고 최종 보정된 모형을 2개의 다른 강우사상에 대해 검증하였으며, 비교적 합리적인 오차범위 내의 값을 나타내어 유의한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해 하수관로 수위자료를 사용한 강우-유출 모형인 SWMM의 매개변수 추정이 적절히 수행되었다고 판단되며, 해당 모형은 대상구역의 특성을 잘 반영하여 홍수유출 해석 및 유입량 예측 등에 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 대상구역으로 선정된 단일 배수구역에 대해 특정 강우사상에 대한 해석만을 수행하였다. 이로 인해 다른 구역에 동일하게 적용할 수 있는 범용성은 검토되지 못하였다. 연구에서 적용된 용답 빗물펌프장 배수구역의 경우 유역면적이 크지 않고 해당 하수관로 수위 모니터링 지점에서의 수위 변화가 빗물펌프장의 유입량 변화와 유사한 거동을 보이기 때문에 모니터링 지점이 배수구역 내에 하나밖에 존재하지 않음에도 좋은 결과가 나온 것으로 판단된다. 따라서 유역면적이 크지 않으며 하수관로 관측지점이 존재하는 유역에서 유입량의 측정이 불가능하거나 어려울 경우, 하수관로 수위 실측값을 이용하여 SWMM의 매개변수를 추정하는 것은 적절한 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다. 이와 관련하여 추가적으로 하수관로 모니터링 지점이 다수 존재하는 큰 규모의 배수구역에서 다목적함수를 통한 매개변수의 추정 및 정확도 평가 등을 추가 진행하는 것은 본 연구의 완성도를 위해 향후 필요한 연구라고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2016R1A2A1A05005306).

### References

Barco, J., Wong, K.M., and Stenstrom, M.K. (2008) Automatic Calibration of the US EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 4, pp. 466-474.

Cho, J.H., and Seo, H.J. (2007) Parameter Optimization of SWMM for Runoff Quantity and Quality Calculation in a Eutrophic Lake Watershed Using a Genetic Algorithm. *Water Science and Technology: Water Supply*, Vol. 7, No. 5-6, pp. 35-41.

Di Pierro, F., Khu, S.T., and Savić, D. (2006) From Single-Objective to Multiple-objective Multiple-rainfall Events Automatic Calibration of Urban Storm Water Runoff

Models Using Genetic Algorithms. *Water Science and Technology*, Vol. 54, No. 6-7, pp. 57-64.

Kang, T.U., Lee, S.H., Kang, S.U., and Park, J.P. (2012) A Study for an Automatic Calibration of Urban Runoff Model by the SCE-UA. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 15-27.

Korea Water Resources Association (2009) *Commentary of Rivers Design Standard*.

Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Koivusalo, H., and Setälä, H. (2013) A High Resolution Application of a Stormwater Management Model (SWMM) using Genetic Parameter Optimization. *Urban Water Journal*, Vol. 10, No. 6, pp. 394-410.

Lee, J.M., Jin, K.N., Kim, Y.J., and Yoon, J.R. (2010) A Study on the Establishment of Reasonable Guidelines for Prior Review System on the Influence of Disasters.

Liong, S.Y., Chan, W.T., and Lum, L.H. (1991) Knowledge-based System for SWMM Runoff Component Calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 117, No. 5, pp. 507-524.

Mancipe-Munoz, N.A., Buchberger, S.G., Suidan, M.T., and Lu, T. (2014) Calibration of Rainfall-runoff Model in Urban Watersheds for Stormwater Management Assessment. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 6, pp. 05014001.

Moon, Y.I., and Yoon, S.G. (2010) 9.21 Analyzing Causes of Local Flood Damage and Local Countermeasures: Focused on Seoul City. *Water and Future*, Vol. 43, No. 12, pp. 23-32.

Rossman, L. (2004). Storm Water Management Model (SWMM version 5.0) User's Manual. *United States Environment Protection Agency*.

Seoul City (2010) *Basic and Detailed Design for Improvement of Rainwater Pump Station Facilities: Yongdap Pump Station*.

Tan, S.B., Chua, L.H., Shuy, E.B., Lo, E.Y.M., and Lim, L.W. (2008) Performances of Rainfall-runoff Models Calibrated Over Single and Continuous Storm Flow Events. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 7, pp. 597-607.

---

Received	February 20, 2018
Revised	February 23, 2018
Accepted	March 6, 2018