



Parameter estimations to improve urban planning area runoff prediction accuracy using Stormwater Management Model (SWMM)

Koo, Young Min^a · Seo, Dongil^{a*}

^aDepartment of Environmental Engineering, Chungnam National University

Paper number: 17-021

Received: 27 February 2017; Revised: 10 April 2017; Accepted: 10 April 2017

Abstract

In environmental impact assessments for large urban development projects, the Korean government requires analysis of stormwater runoff before, during and after the projects. Though hydrological models are widely used to analyze and prepare for surface runoff during storm events, accuracy of the predicted results have been in question due to limited amount of field data for model calibrations. Intensive field measurements have been made for storm events between July 2015 and July 2016 at a sub-basin of the Gwanpyungcheon, Daejeon, Republic of Korea using an automatic monitoring system and also additional manual measurements. Continuous precipitation and surface runoff data used for utilization of SWMM model to predict surface runoff during storm events with improved accuracy. The optimal values for Manning's roughness coefficient and values for depression storage were estimated for pervious and impervious surfaces using three representative infiltration methods; the Curve Number Methods, the Horton's Method and the Green-Ampt Methods. The results of the research is expected to be used more efficiently for urban development projects in Korea.

Keywords: SWMM, Continuous stormwater event, Hydrological modeling, Infiltration parameters, Stormwater monitoring

SWMM을 이용한 도시계획지역 유출량 예측 정확도 향상을 위한 매개변수 산정

구영민^a · 서동일^{a*}

^a충남대학교 환경공학과

요 지

우리나라에서는 도시 개발사업을 위한 환경영향평가를 실시하는데 있어 개발 전·중·후의 강우유출량을 분석하도록 규정하고 있다. 도시개발에 따른 수문학적 변화를 분석하고 대책을 수립하기 위해 수문모델이 사용되고 있으나 대부분의 경우 현장의 자료가 충분하지 않은 관계로 그 산정결과와 신뢰도가 문제될 수 있다. 본 연구에서는 대전의 관평천 일부구역에서 2015년 7월 부터 2016년 7월 까지 자동 모니터링 장치를 이용하고 또한 현장 측정을 통해 확보된 강우량 및 유출유량의 연속자료를 활용하여 SWMM을 이용하는 경우 강우 유출량 예측의 정확도를 제고하고자 하였다. 토양침투량 산정을 위해 대표적으로 사용되는 Curve Number 방법, Horton 방법 및 Green-Ampt 방법들을 사용한 경우에 대해서 투수지역과 불투수 지역에 대해 각각 최적의 Manning 조도계수와 지표면 저류깊이를 산정하여 제시하였다. 본 연구의 결과는 우리나라의 도시 유역에서 실측자료를 이용하여 강우 유출 모델을 보정하였다는 면에서 의미가 있다고 판단되며 추후 유역의 개발등의 상황에 대해서는 강우 시 유출량 및 수질현상을 더욱 정확하게 예측하고 나아가서 향후의 유역 내 수문조건 변화 요인에 대한 영향을 분석하는 데 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어: SWMM, 연속강우, 수문모델링, 강우모니터링, 침투계수

*Corresponding Author. Tel: +82-42-821-6679
E-mail: seodi@cnu.ac.kr (D. Seo)

1. 서론

어느 지역의 개발은 해당 지역의 지형, 토지이용, 우수관거, 지표면 포장 등의 변화로 지표면의 저류, 침투, 증발 및 저수량 등의 변화를 초래할 뿐 만 아니라 강우시 표면유출의 흐름특성의 변화에 따라 도시표면에 축적된 오염물질의 전달율이 대폭 상승되는 등, 도시 하천의 양적 질적 특성에 매우 커다란 영향을 야기한다. 따라서 우리나라 환경부에서는 일정 규모 이상의 지역에 대한 개발 사업을 실시하는 경우 도시의 개발에 따라 발생 가능한 하천의 영향 및 재해 대책을 위해 환경영향평가(MOE, 2016)를 실시하도록 정하고 있다. 환경영향평가에서는 RRL (Road Research Laboratory Method, Terstriep and Stall, 1969), SWMM (Stormwater Management Model, Rossman and Huber, 2016) 등 도시 우수유출해석 모형을 사용하여 개발 전, 개발 중 및 개발 후의 강우유출량의 변화를 분석하도록 하고 있다. 한편 대상사업지가 도시지역 일 경우 국토교통부는 SWMM, ILLUDAS (ILLinois Urban Drainage Area Simulator, Terstriep and Stall, 1974) 등의 도시유출모형을 이용하여 도시개발 사업에 따른 사전재해영향성검토를 실시하도록 명시하고 있으며, 자연재해대책법에 따라 각 지방자치단체는 방재성능목표를 설정하기 위해 합리식(Rational Method), RRL, ILLUDAS 및 SWMM 등을 활용하여 홍수 유출량을 산정하도록 하고 있으며, 유역종합치수 계획에서는 적절한 수리·수문모형의 모의를 통한 최적 홍수량 및 홍수방어 계획을 도출 및 산정하도록 하고 있다. 한편 국민안전처(MPSS, 2016) 또한 호우에 대한 내수침수 및 우수배제시설의 적정용량 등에 대한 정량적 검토는 SWMM 등의 도시유출 모형을 이용하도록 정하고 있다. 미국에서는 우수의 종합적인 계획을 수립하는데 있어 대상 유역에 적합한 모형을 선정하여 이용하고 있으며, 그 외 우수관망 계획, 유역계획 및 CSO (Combined System of Sewage) 계획 등을 수립하는데도 사용되고 있다(USEPA, 2014). 수문모형을 포함한 수식으로 구성된 모델들은 이론식 또는 경험식을 이용하여 자연현상을 재현하고자 한다. 그러나 이러한 과정은 자연현상을 수식으로 단순화하는 과정에서 필연적으로 오차를 포함하기 마련이다. 따라서 이러한 모델들은 사용에 앞서 모델에 적용되는 식의 매개변수를 추정하여 관찰 결과와 최대한 유사하게 나타낼 수 있도록 보정과정을 거치게 된다(Misgana and John, 2005). 그러나 수문 상황에 대한 자료는 불규칙하게 발생하는 강우특성상, 충분하게 확보하는 것이 어려운 실정이며 결과적으로 대부분의 사업에서는 제한된 현장 자료를 활용하거나 기존의 문헌이나 보고서에서 사용된 자료를 이용해야

한다. 한편 도시개발 이후의 유출특성을 추정하는 데 있어서 개발 전 상황에서 보정에 사용한 매개변수를 수정 없이 사용하는 경향이 있으나 유역의 개발에 따라 토양 및 토지이용 뿐만 아니라 배수유역, 경사, 지표면 저류 및 토양다짐 등 다양한 상황이 복합적으로 변화하기 때문에 이러한 방법은 합리적이라 볼 수 없다.

본 연구에서는 도시개발에 따른 유출특성을 예측하기 위해 유역 모델을 사용하는 데 있어서 향후의 조건을 조금 더 합리적으로 반영할 수 있는 방법론을 도출하고자 수행되었다. 대상유역은 대전 관평천으로서 본 연구진이 운영하는 빗물 자동 모니터링 시스템을(Seo and Fang, 2012, Han and Seo, 2014, Yin et al., 2015) 이용하여 지속적으로 연구를 수행하고 있으며, 본 연구에서는 2015년 7월부터 2016년 7월까지의 연속 측정을 수행한 결과를 활용 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 SWMM 적용 사례

SWMM은 유역의 강우로 인해 발생하는 지표면 유출, 지하수 및 증발 등 수문학적 특성분석과 관수로 및 개수로 등 관망 및 하천에 대한 유출량 및 수질을 예측하는 데 사용할 수 있는 모델이다. SWMM은 미국 환경부의 지원에 의해 Metcalf & Eddy사, University of Florida 그리고 WRE (Water Resources Engineers)사 등의 세 연구 그룹에 의해 1970년대 초반에 개발되었으며(Lee, 1998), 이후 Huber와 Dickinson에 의해 수정되었고, 현재까지 SWMM 5.1 version이 개발되어 관리되고 있다(Rossman and Huber, 2016).

SWMM은 국내·외 도시유역의 홍수유출 해석에 관한 연구에 널리 사용되고 있다(Choi and Ball, 2002; Javier et al., 2006; Barco et al., 2008; Lee and Yeon, 2008; Kang et al., 2012; Kim et al., 2012, Lee and Choi, 2015). Kang et al. (2015)은 식생수로와 연계한 우수관거 계획을 수립하는 데에, Lee et al. (2013)은 도시지하저류조의 최적 위치를 선정하는 데에, Jang (2009)은 침수예상지역 우수저류조의 적정 크기를 결정하는데 SWMM을 각각 사용한다. 또한 최근 도시개발에 있어 저영향개발(LID, Low Impact Development)에 대한 관심이 증가하면서 SWMM에 포함된 LID 모의기능을 이용한 수문학적 변화(Koo et al., 2014) 및 비점오염원에 관한 분석 등(Park et al., 2013)이 활발하게 진행되고 있다. 이외에서 SWMM을 이용한 연구 결과는 매우 많은 편이며, Table 1은 SWMM에 적용되는 필수 선택사항이 기입되어 있

Table 1. Previous researches using SWMM

Source	Purpose using SWMM	Collection, Calibration Method	Calculation Time Step	Infiltration Method	Channel Routing Method	Watershed
Choi K. S. and Ball J., 2002	Parameter Estimation for Urban Runoff Modelling	3, Single Event	5 min	Horton		Residential and Park Catchment
Gremmer & Associates, Inc., 2003	City of Mennasha, Road Stormwater Management	Reference	30 min	Horton	Dynamic	
HDR Engineering, 2007	City of Boulder, Stormwater Master Plan	Reference	-	Horton	-	Multi Urban Area
Javier T. et al., 2006	Stormwater quality calibration	8, Single Event		Horton / Green-Ampt	Kinematic	CSO Area
Kang, T. and Lee, S., 2012	Reasonable Application of the SWMM	4, Single Event	1 hr / 10 min	CN / Green-Ampt	Kinematic / Dynamic	Rural Watershed, Urban
Kang, T. and Lee, S., 2014	Development on an Automatic Calibration Module	Continuous	10 min	CN	Kinematic	Rural Areas
Koo, Y. et al., 2014	Non-point Pollution Source Reduction by Permeable Pavement	2, Single Event	5 min	Green-Ampt	Kinematic	292 km ² , Large Watershed
Lee, H. W. and Choi, J. H., 2015	Analysis of Rainfall-Runoff	6, Single Event		Horton		Industrial Estate
L. Yao et al., 2016	Rainfall-Runoff Process	3, Single Event	-	Horton	Kinematic	Multiplex House Area
Maryland Department of the Environment, 2003	Analysis of Average Annual Delivered Loads	Continuous	1 day	Horton	-	1,241 km ² , Large Watershed
M. Borris et al., 2013	TSS Load in Urban Runoff	3 day Event	-	Horton	Kinematic	Residential Area
M. F. Chow et al., 2012	Modelling Runoff Quantity and Quality	7, Peak Flow	5 min	Horton	Kinematic	Residential, Commercial, Industrial
S. Oraei Zare et al., 2012	BMPs Control			CN	Kinematic	Urban Area
Versar, Inc., 2007	Cameron run Watershed Plan	1 year / Continuous	15 min	Horton	Kinematic	Multi Landuse

는 일부의 연구 결과를 정리하고 있다. 도시유역 외에도 다양한 복합 유역에 대한 분석을 수행된 바 있으며, 미국의 우수관리계획을 수립하는데 있어 매개변수는 참고문헌을 인용하여 적용하고 있다.

2.2 연구 대상 지역 및 자동 모니터링 시스템

본 연구의 대상지역은 2005년경 대전시 유성구 관평동에 조성된 대덕테크노밸리 중 산업, 주거, 상업 및 문화시설이 복합적으로 구성된 소규모 도시유역이다. 관평천은 지방하천으로 금강의 제 1지류인 갑천으로 유입된다(Yin et al., 2015).

강우에 의한 영향을 예측하는 데에 SWMM을 사용하기 위해서는 정확한 매개변수 보정이 필요하며 이를 위해서는 강우 시 연속적인 강우 유출량 자료를 확보하는 것이 필수적이다. 본 연구진은 연구 대상 지역의 강우 유출수가 최종적으로 유입되는 우수지의 우수관거 출구에서 강우에 의한 유량 및 수질

변화를 측정하기 위해 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 강우량, 유량 및 수질 자동 모니터링 시스템을 구축하여 운영하고 있다. 모니터링 시스템은 강우량계, 초음파 수위계, 자동채수장치, 자동수질 측정 센서 및 데이터 로거 등으로 이루어져 있으며 강우 시 사전에 결정된 강우량, 수위 조건 등에 따라 자동 또는 수동으로 작동하며 유량 및 수질의 연속 측정이 가능하다.

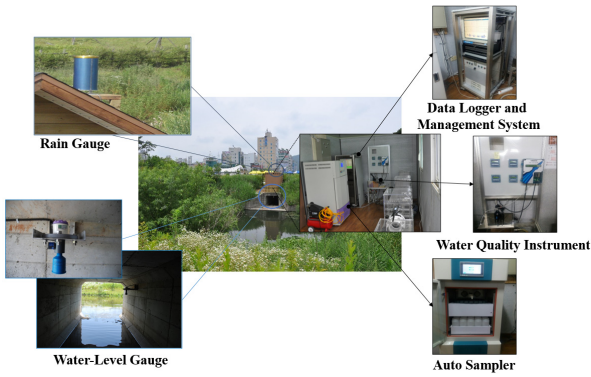


Fig. 1. The stormwater runoff automatic monitoring system installed in the study site

2.3 SWMM 구축

SWMM을 구축하여 수문학적 특성을 예측하는 데에는 유역 경사, 토양 및 토지이용 특성 등 유역의 물리적 정보를 파악하는 것이 필요하며, 이를 위해서는 지형도, 항공사진, GIS (Geographic Information System) 및 CAD (Computer Aided Design) 등의 자료 등이 이용된다. 또한 수리학적 거동 특성을 예측하기 위해서는 소유역별로 하도 및 관망의 특성에 관한 자료 및 저류지, Pump, Orifice 및 보(Weir) 등 흐름에 영향을 미치는 자료 등이 필요하다.

Fig. 2는 유역의 토지이용 자료와 SWMM을 이용하여 대상

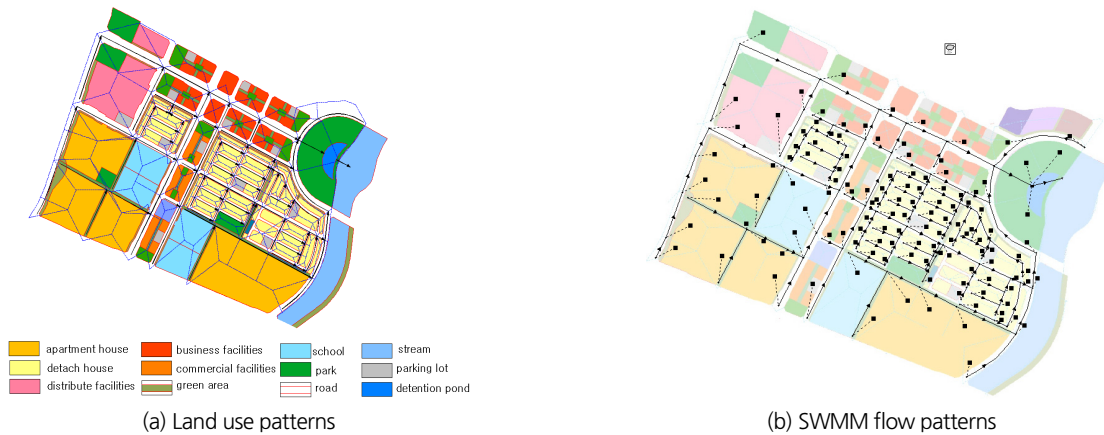


Fig. 2. Land use patterns(a) and construction of the SWMM(b) of the study area

Table 2. Important options and construction summary for SWMM simulation of this study

SWMM Options			
Infiltration Model	Curve Number, Horton, Green-Ampt	Start - End Date	2015.7.1. ~ 2016.7.31.
Flow Routing	Dynamic Wave	Simulation Interval	5 min
Subcatchment Summary			
Subcatchments	128 ea	Total Area	63.28 ha
Mean Impervious Area (%)	79.13%	Mean Slope%	0.86%
Conduits/Node Summary			
Junction Nodes	125 ea	Conduit Links	126 ea
Conduits Shape	Circular, Rect_closed	Storage Volume	3,494 m ³
Conduits Roughness	0.0125		

유역의 흐름 경로를 나타낸 그림이다. 대상유역을 구축하는데 있어 유역의 경우 토지이용도, 배수분구, 면적 및 경사, 관망 자료는 우수관망 크기, 길이, 고도(경사) 및 깊이를 개발계획에 작성된 물리적 특성을 반영하였다.

유역의 지표면 유출이 우수관망을 통해 우수지로 유입되기 때문에 우수지까지 포함하여 모형을 구축하였으며, 본 연구에서는 지하수에 대한 해석을 하지 않았다. 하도추적은 우수관망에 대한 모의를 위해 동역학과 모형을 선택하였다. 강우자료는 5분 단위로 수집하였고 이에 따라 모의 간격을 5분으로 하였다. Table 2는 본 연구에서 SWMM 구축을 위해 사용된 선택사항들을 정리하여 나타내고 있다.

2.4 SWMM 보정

SWMM을 이용하여 강우시 유출량을 예측하기 위해서는 투수 및 불투수면의 조도계수, 지표면 저류 및 지하수 모의에 필요한 매개변수의 보정이 필요하다. Table 3은 각종 문헌에서 보고된 유역의 수문학적 매개변수를 나타내고 있다. 이들

값은 국외의 유역이거나, 광범위한 지역의 자료이거나 제한된 실측자료와 비교되는 등 우리나라의 유역 상황에 직접적으로 사용되기에는 다소 어려움이 있다고 판단된다. 본 연구에서는 자동측정장치를 이용하여 매 강우시 연속적으로 측정된 자료를 이용하여 불투수면적 및 투수면적의 조도 계수 및 지표면 저류 깊이에 대한 수문학적 매개변수를 도출하고자 하였다. 이를 위해 Curve Number, Horton 및 Green-Ampt식에 사용된 여타의 침투 매개변수는 미리 조사된 분류 등에 의해 적용이 가능하다고 보고 Table 4와 같이 결정하여 사용하였다. 수문학적 매개변수인 조도계수와 저류깊이를 실측값과 비교분석하기 위해 선형회귀 관계를 판단하는 결정계수(Coefficient of Determination, R²)가 가장 높은 조합을 도출하기 위해 조도계수와 저류깊이를 반복적으로 모의 하였다. 본 연구에서 도출한 매개변수는 우리나라의 유역에 적합한 수치로 제안하고 향후 도시개발 등의 유출량 산정의 정확도 제고에 기여하고자 하였다.

Table 3. Hydrological parameters of SWMM according to previous research results

	Manning's Roughness Coefficient		Depression Storage (mm)	
	N-Impervious	N-Pervious	Impervious	Pervious
Chuanqi Li et al., 2014	0.005 ~ 0.05	0.05 ~ 0.50	1.3 ~ 2.5	2.5 ~ 7.6
Huber and Dickinson, 1988	0.01 ~ 0.015	0.02 ~ 0.45	0.3 ~ 2.5	2.5 ~ 5.1
Jacob C. T., 2007	0.011	0.17, 0.60	1.27	2.54 ~ 7.62
Jang, Y. et al., 2013	0.014	0.33	0.13	0.5
Javier, T. et al., 2006	0.015	0.40	2.5	5.0
Lee, H. W. and Choi, J. H., 2015	0.01	0.16	1.78	5.08
Lee, J. Y. et al., 2008	0.015	0.06	1.0	2.54 ~ 7.62
Maria D. M. et al., 2015	0.012	0.15	1.3	2.6
M. Borris. et al., 2013	0.014	0.08	1~2.5	2.5 ~ 5.5
M. F. Chow et al., 2012	0.011, 0.012	0.03	0.2 ~ 1.05	2.5
Sezar, G and Cevza, M. K. A., 2013	0.012	0.1 ~ 0.15	0.127	0.15 ~ 0.175
W. Ouyang et al., 2012	0.013	0.4	1.9	7.6

Table 4. Pre-assigned parameters to select the optimum manninga roughness coefficients and depression storage of three different infiltration methods

Curve Number Method			
SCS Runoff Curve Number	93	Drying Time for a Fully Saturated Soil	7 days
Horton Method			
Maximum Infiltration Rate of the Horton Infiltration Curve	25.4 mm/hr	Minimum Infiltration Rate of the Horton Infiltration Curve	0.889 mm/hr
Decay Constant of the Horton Infiltration Curve	4.14 /hr	Drying Time a Fully Saturated Soil	7 days
Green-Ampt Method			
Soil Capillary Suction Head	88.9 mm	Soil Saturated Hydraulic Conductivity	3.3 mm/hr

3. 연구방법

3.1 자동 수위 자료 검토

Fig. 3에서 앞의 세 가지 경우는 결정계수가 0.91 이상으로 서 양호한 예측 결과를 보이는 것으로 판단되나 2015년 7월 29일에 측정된 (d)의 경우는 $2\text{ m}^3/\text{sec}$ 를 초과하는 유량에 대해서는 상당한 오차를 보이는 것을 알 수 있다. 또한, 이 그림에서 유량이 다시 $2\text{ m}^3/\text{sec}$ 이하로 감소되어도 수위가 감소하지 않으며 이러한 경우 수위-유량 곡선을 이용한 방법으로는 유출량 산정에 사용될 수 없는 것으로 보인다. 이 현상은 우수지에 유출수가 축적되어 일정 수준 이상으로 수위가 증가하는 경우 우수거로 역류(Backwater) 하는 현상이 발생함에 따라 나타난 현상으로 판단된다. 따라서 이 지역에 대하여 유입 유량이 $2\text{ m}^3/\text{sec}$ 이하인 경우에는 기존의 유량곡선을 사용하여도 무방하나 그 이상의 유량에 대해서는 우수지의 유출 및 저류량을 고려한 기법이 별도로 적용되어야 한다. 본 연구에서는 2015년 7월부터 2016년 7월까지 13개월 기간에 총 59회의 강우에 대해 $2\text{ m}^3/\text{sec}$ 를 초과하는 강우가 발생하는 경우와 또한 수위계의 점검 및 공사 등으로 원활한 측정이 이루어지지 않은 시기를 제외하고 중 28회의 강우 사상의 3,773개의 유량 자료를 대상으로 SWMM을 이용하여 연속적으로 모의하여 매개변수의 보정을 실시하였다.

3.2 Curve Number를 적용한 보정 결과

Curve Number 방법은 단일 강우사상의 유출을 계산하기 위해 널리 사용되며 토양종류 및 토지이용에 따라 산정되는 Curve Number를 이용하여 토양의 최대 저장 용량을 산정하고 이 결과를 통해 지표면 유출량을 결정하게 된다(NRCS, 2004). SWMM은 하나의 소유역에 대해 투수층과 불투수층으로 구분하고 불투수층에 대한 침투를 계산하지 않기 때문에 Curve Number식을 사용하기 위해서는 물리적으로 불투수층이 없다고 가정되어야 하며, 유역의 불투수층 면적 %, 조도 계수 및 저류깊이는 0으로 설정하고 모의해야 한다(Rossman and Huber, 2016).

본 연구 대상지역의 수문학적 토양군은 C로 분류되며 SWMM 매뉴얼에 의해 본 연구에 사용한 Curve Number는 93으로 설정하였으며, 토양의 최대 함수량에서 완전히 건조되는데 걸리는 시간은 일반적으로 2~15일 범위에 있으며, 본 연구는 중점토(Heavy Soil)값에 해당하는 7일로 설정하였다. Fig. 4는 Curve Number방법을 이용하여 SWMM을 보정한 결과와 수위계 관측값을 비교한 그림이며, 결정계수가 가장 큰 매개변수를 이용하여 보정한 결과이다. Fig. 5는 현장에 실측값과 유량을 비교한 그림이며, 결정계수는 0.87로 수위계와 비교한 결과보다 높게 나타났다. Curve Number를 이용하여 매개변수를 추정된 결과 불투수층을 제외하고 투수층의 조도계수와 지표면 저류깊이는 각각 0.025와 0.5 mm로 산정되었다.

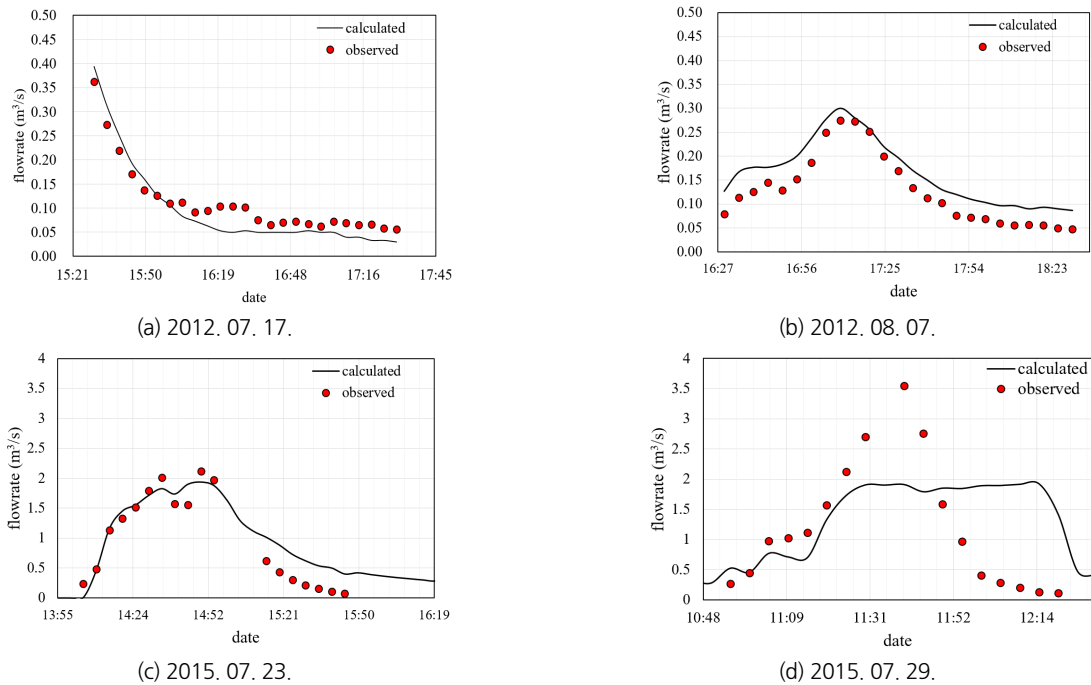


Fig. 3. Calibration of automatic flow monitoring system with field measurements

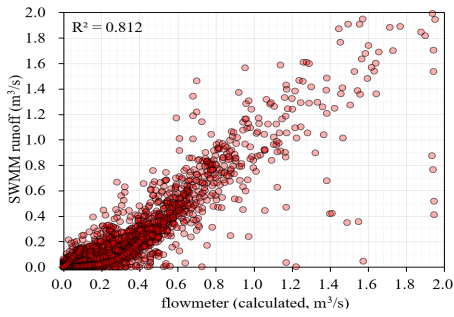


Fig. 4. Relationships between calculated flow using water level meter and SWMM runoff with curve number

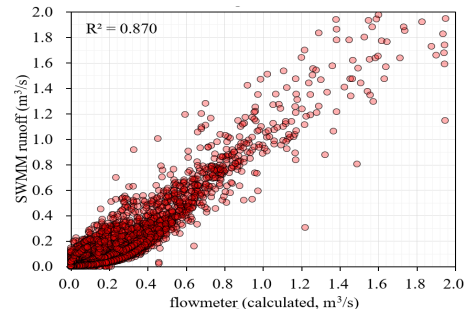


Fig. 6. Relationships between calculated flow using water level meter and SWMM runoff with horton method

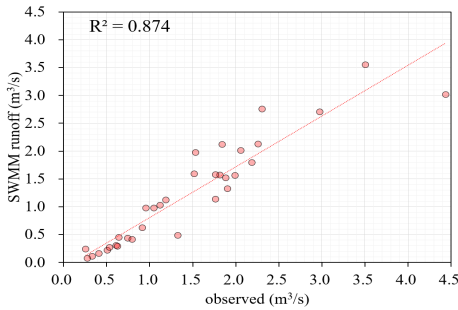


Fig. 5. Relationships between field measured flow and SWMM runoff with curve number

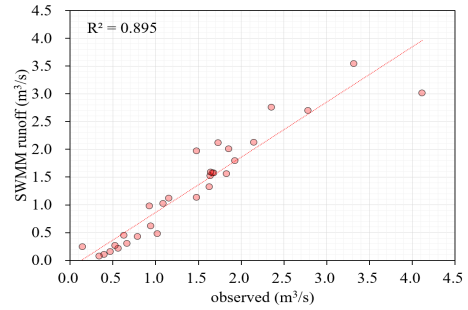


Fig. 7. Relationships between field measured flow and SWMM runoff with horton method

3.3 Horton 침투 모델을 적용한 보정 결과

Horton 방법(Horton, 1940)은 운동파 모의에 있어 오랫동안 사용된 침투 방정식이다. 경험식으로 최소 침투량과 최대 침투량을 이용하여 비선형 방정식으로 계산되며, Horton 곡선은 Newton-Raphson algorithm으로 결정된다(Press et al., 1992).

Gregory et al. (2006)은 개발 사업에 따른 토양 다짐을 고려한 Horton 침투식의 최대 침투율은 30~50 mm/hr의 범위, 최소 침투율은 0~1 mm/hr 범위 그리고 감소계수 4.14 hr⁻¹의 값 등으로 보고한 바 있다. 본 연구에서는 문헌 자료(UDFCD, 2008)의 수문학적 토양군 C에 해당하는 최대 침투율 25.4 mm/hr, 최소 침투율 0.889 mm/hr, 감소계수는 4.14 hr⁻¹, 건조 시간은 Curve Number 방법과 동일하게 7일로 설정하였다.

Fig. 6은 Horton 방식을 이용하여 SWMM을 보정한 결과와 수위계를 이용하여 유량을 산정한 값을 비교한 그림이다. Fig. 7은 현장에 실측값과 유량을 비교한 그림이며, 결정계수는 0.89로 수위계와 비교한 결과보다 높게 나타났다. 매개변수를 추정된 결과 불투수층의 조도계수는 0.035, 투수층의 조도계수는 0.55로 산정되었으며, 불투수층의 지표면 저류깊이는 0.3 mm, 투수층은 1.0 mm로 산정되었다.

3.4 Green-Ampt 침투 모델을 적용한 보정 결과

최초의 Green-Ampt 방정식(Green and Ampt, 1911)은 지표면의 잉여수(Excess Water)양에 의해 결정되는 것으로 가정되었으나 Mein and Larson (1973)에 의해 표면이 포화되기 전의 침투량을 산정할 수 있는 일정강우사상(Steady Rainfall)에 대한 침투식으로 발전되었으며, Chu (1978)에 의해 부정강우사상(Unsteady Rainfall)에 대한 침투식으로 발전되었다. Green-Ampt 방정식은 지표면, 습윤 토양 및 건조 토양으로 구분하고, 습윤 토양과 건조 토양의 경계에 습윤 전선이 이루어져 있으며, 강우가 발생하면 습윤 전선이 내려간다고 가정한 방정식으로 Darcy의 법칙을 기초로 하고 있다.

Green-Ampt식은 토양의 특성에 의해 매개변수가 산정되어야 하지만 도시 개발이 진행되는 경우 성토 및 지반 다짐 등에 의해 토양 특성을 추정하기 어려운 문제가 있다. 본 연구에서는 Kang et al. (2015)이 토양 다짐을 고려하여 양토의 기준으로 적용한 사례를 참고하여 투수계수(Conductivity)를 3.3 mm/hr으로 흡입수두(Suction Head)를 88.9 mm로 사용하였다.

Fig. 8은 Green-Ampt식을 이용하여 SWMM을 보정한 결과와 수위계 자료를 이용한 유량값을 비교한 그림이며 Fig. 9는 SWMM의 산정된 결과와 현장에서 실측한 유량을 비교한 그림이다. 각각의 경우 결정계수는 0.84 및 0.90로 나타났다.

Green-Ampt 식을 이용하는 경우 불투수층의 조도계수는 0.055, 투수층의 조도계수는 0.65로 산정되었으며, 불투수층의 지표면 저류깊이는 0.5 mm, 투수층은 1.5 mm로 보정되었다.

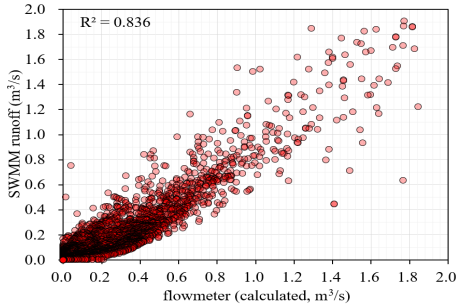


Fig. 8. Relationships between calculated flow using water level meter and SWMM runoff with green-ampt equation

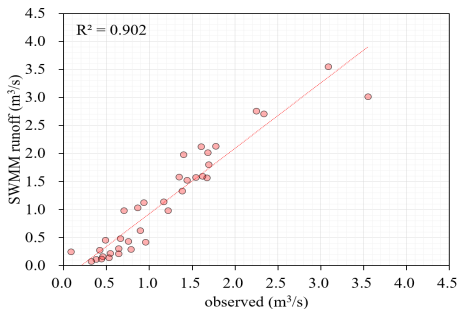


Fig. 9. Relationships between field measured flow and SWMM runoff with green-ampt equation

3.5 침투식에 따른 수문학적 매개변수

Fig. 10은 연속 모의 결과 중 몇 개의 강우 사상에 대한 결과이다. 본 연구의 목적은 연속 모의를 통한 매개변수 도출이기 때문에 하나에 강우 사상에 집중하여 매개변수를 산정하지 않고 13개월에 포함되어 있는 강우사상의 전반적인 현장 측정값과 SWMM 모의 결과를 맞추기 위해 노력하였다.

Table 5는 SWMM을 이용하여 침투량을 계산하는 데 있어서 세 가지 식을 이용하여 Table 3에 나타난 바와 같은 조도계수와 저류 깊이를 추정한 결과를 나타내고 있다. 유역의 불투수층 조도계수는 기존 연구 결과와 비교하였을 경우 상대적으로 높게 나타났으며, 투수층의 조도계수는 Green-Ampt를 제외하고 기존 연구의 범위 안에서 산정된 것으로 보인다. Table 3에 나타난 국내 선행 연구들은 도시유역에 대한 수문학적 매개변수 도출이 연구의 목적이 아니며, 대부분 복합적인 토지이용 형태를 가진 연구 지역의 수문학적 분석을 위해서 매개변수를 산정하였기 때문에 본 연구 결과와 비교하는데 있어 어려움이 있으며, SWMM에 적용된 유역의 형태 및 토지 이용에 따라서 매개변수의 차이가 있는 것으로 판단된다. 국외에서는 매개변수 산정에 대한 연구를 수행되고 있지만 국외 도시개발에 적용되는 불투수 면적은 국내보다 작게 적용되고 있으며, 유역 면적이 매우 크다. 또한 토양 특성 등 복합적인 영향으로 본 연구의 매개변수와 약간의 차이가 있는 것으로 판단된다.

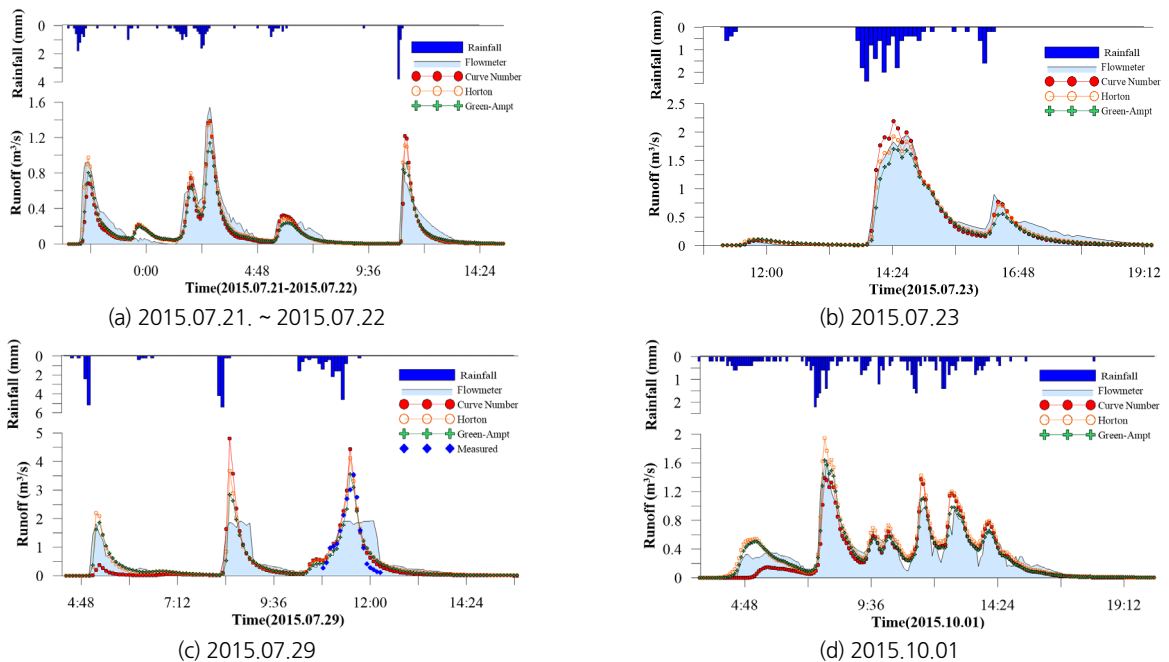


Fig. 10. Calibration results of SWMM runoff and flowmeter runoff

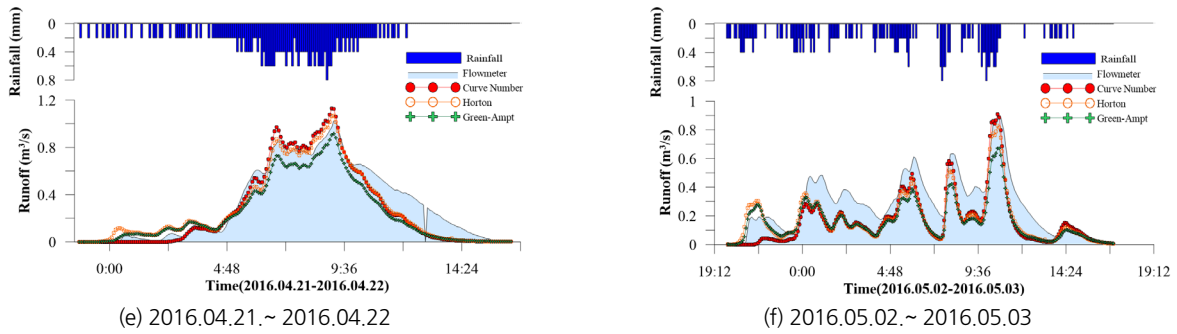


Fig. 10. Calibration results of SWMM runoff and flowmeter runoff (Continue)

Table 5. Results of hydrological parameter derivation

Infiltration Model	Manning's Roughness Coefficient		Depression Storage (mm)		Coefficient of Determination	
	N-Impervious (0.01~0.015)	N-Pervious (0.17~0.60)	Impervious (0.2~2.54)	Pervious (0.15~7.62)	SWMM - Flowmeter	SWMM - Measured
Curve Number	-	0.025	-	0.5	0.81	0.87
Horton	0.035	0.55	0.3	1	0.87	0.89
Green-Ampt	0.055	0.65	0.5	1.5	0.84	0.90

본 연구의 SWMM에서 보정된 13개월 연속 모의 결과와 수위계의 비교하였을 경우 결정계수는 0.8 이상으로 나타났으며, 실측값과 비교한 결과 최소 0.87에서 최대 0.90으로 나타나 신뢰성 있는 보정결과로 판단된다.

4. 결론

우리나라의 개발 사업에 따른 환경영향평가를 하는데 있어 도시개발에 따른 유역의 수문 특성변화를 파악하고 하천 및 호우재해 대책을 수립하기 위해 강우유출량의 변화를 개발 전·중·후에 따른 각각에 대해 분석하도록 하고 있다. 본 연구는 SWMM을 이용하여 개발 후 분석하기 위한 매개변수를 제안하기 위해 전형적인 국내 도시유역을 대상으로 연속 모니터링 결과를 바탕으로 SWMM의 매개변수를 산정하였다.

- 1) 연구 대상유역은 2010년 이후에 만들어진 전형적인 도시 유역으로 분류식 관거 최종 유출구 지점에 모니터링 시스템을 설치하여 실시간으로 수위를 측정하며, 수위계 측정값의 검증에 위해 현장 실측하였다. 2015년 7월부터 2016년 6월까지 수위계 측정 결과를 바탕으로 연속 모의하였다.
- 2) SWMM에 적용되는 3개의 침투식을 각각 이용하여 수문학적 매개변수인 유역의 조도계수 및 지표면 저류깊이를 추정하였으며, 결정계수가 1에 가장 근접하는 매개변수를 산정하였다.

- 3) 각 방법에 대해서 투수지역과 불투수 지역에서 최적의 Manning 조도계수와 저류깊이를 각각 산정하였으며, 결정계수는 자동수위계와 비교하였을 경우 0.81~0.87, 실측 유량과 비교하였을 경우 0.87~0.90의 범위로 각각 나타났다.
- 4) SWMM에 사용되는 3가지의 침투식을 대상으로 위와 같이 산정된 수문학적 매개변수를 사용하는 경우 향후 우리나라의 도시개발에 따른 개발 후 지표면 유출량을 보다 정확하게 산정하는데 유용한 자료로 활용 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원 (12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

References

Barco, J., Wong, K. M., and Stenstrom, M. K. (2008). "Automatic calibration of the U.S. EPA SWMM model for a large urban catchment." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 4, pp. 466-474.

Borris, M., Viklander, M., Gustafsson, A. M., and Marsalek, J. (2014).

- “Modelling the effects of changes in rainfall event characteristics on TSS loads in urban runoff.” *Hydrological Processes*, Vol. 28, pp. 1787-1796.
- Choi, K. S., and Ball, J. E. (2002). “Parameter estimation for urban runoff modelling.” *Urban Water*, Vol. 4, pp. 31-41.
- Chow, M. F., Yusop, Z., and Toriman, M. E. (2012). “Modelling runoff quantity and quality in tropical urban catchments using storm water management model.” *J. Environ. Sci. Technol.*, Vol. 9, pp. 737-748.
- Chu, S. T. (1978). “Infiltration during an unsteady rain, water resources research.” *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 461-466.
- Green, W. H., and Ampt, G. A. (1911). “Studies on soil physics, 1. the flow of air and water through soil.” *Journal of Agricultural Sciences*, Vol. 4, pp. 11-24.
- Gregory, J. H., Dukes, M. D., Jones, P. H., and Miller, G. L. (2006). “Effect of urban soil compaction on infiltration rate.” *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 61, No. 3, pp. 117-124.
- Gremmer & Associates, INC. (2003). *Manitowoc road stormwater management*. Technical Report, Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 61, No. 3, pp. 117-123.
- Han, Y. H., and Seo, D. (2014). “Application of LID methods for sustainable management of small urban stream using SWMM.” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 36, No. 10, pp. 691-697.
- HDR Engineering (2007). *City of boulder stormwater master plan*. Technical Report.
- Horton, R. E. (1940). “An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity.” *Proceeding Soil Science of America*, Vol. 5, pp. 399-417.
- Huber, W. C., and Dickinson, R. E. (1988). *Storm water managemnet model, version 4, user's manual*. United States Environmental Protection Agency Technical Report.
- Jacob, C. T. (2007) *A storm water management model to predict runoff and streamflow in the pennichuck brook watershed*. Master Thesis, Cornell University.
- Jang, S. J. (2009). “A study on the proper size of rainwater stored tank in submerged districts using SWMM program.” *J. Korean Housing Association*, Vol. 20, No. 3, pp. 69-76.
- Jang, Y. S., Mun, S. H., and Yang, S. L. (2013). “An analysis of flood mitigation effect applying to LID in Mokgamcheon watershed using SWMM model.” *Int. J. Highw. Eng.*, Vol. 15, No. 3, pp. 75-83 (in Korea).
- Javier, T., Oscar, A., Juan, C., Joaquin, S., and Inaki, T. (2006). “Stormwater quality calibration by SWMM, A case study in northern Spain.” *Water SA*, Vol. 32, No. 1, pp. 55-63.
- Kang, T. U., and Lee, S. H. (2012). “A study for a reasonable application of the SWMM to watershed runoff event simulation.” *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 6, pp. 247-258 (in Korean).
- Kang, T. U., and Lee, S. H. (2014). “Development on an automatic calibration module of the SWMM for watershed runoff simulation and water quality simulation.” *J. Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 4, pp. 343-356 (in Korean).
- Kang, T. U., Koo, Y. M., and Lee, S. J. (2015). “Design of stormwater pipe considering vegetative swale with water conveyance.” *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 1, pp. 335-343 (in Korean).
- 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.” *Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 15-27 (in Korea).
- Kim, K. U., Kim, S. D., and Kim, C. S. (2012). “A analysis model for urban flooding hazard zone based on the SWMM simulation historical CB.” *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 1, pp. 217-222 (in Korean).
- Koo, Y. M., Kim, Y. D., and Park, J. H. (2014). “Analysis of non-point pollution source reduction by permeable pavement.” *J. Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 1, pp. 49-62 (in Korean).
- Lee, H. W., and Choi, J. H. (2015). “Analysis of rainfall-runoff characteristics in Shiwha industrial watershed using SWMM.” *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 37, No. 1, pp. 14-22 (in Korea).
- Lee, J. H., Song, Y. H., and Jo, D. J. (2013). “Determination of optimal locations of urban subsurface storage considering SWMM parameter sensitivity.” *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 4, pp. 295-301 (in Korea).
- Lee, J. H., and Yeon, K. S. (2008). “Flood inundation analysis using XP-SWMM model in urban area.” *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 8, No. 5, pp. 155-161 (in Korea).
- Lee, J. T. (1998). “Urban runoff and water quality models.” *J. Korea Water Resources Association*, Vol. 31, No.61, pp. 709-725 (in Korea).
- Lee, J. Y., Jang, S. H., and Park, J. S. (2008). Application of SWMM for management of the non-point source in urban area, case study on the pohang city.” *J. Env. Hlth. Sci.*, Vol. 34, No. 3, pp. 247-254 (in Korea).
- Li, C., Wang, W., Xiong, J., and Chen, P. (2014). “Sensitivity analysis for urban drainage modeling using mutual information.” *Entropy*, Vol. 16, pp. 5738-5752.
- Maria, D. M., Andrea, G., Angela, G., Viro, I., Giovanni, I. F., Alberto, F. P., and Ezio, R. (2015). “Build-up/wash-off monitoring and assessment for sustainable management of first flush in an urban area.” *Sustainability*, Vol. 7, pp. 5050-5070.
- Maryland Department of the Environment (2010). *Patapsco/back river watershed SWMM model report*. Technical Report.
- Mein, R. G., and Larson, C. L., (1973). “Modeling infiltration during a steady rain.” *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 384-394.
- Misgana, K. M., and John, W. N. (2005). “Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 306, pp. 127-145.
- MOE (Ministry of Environment) (2016). *Regulations on the preparation of environment impact assessment*. Vol. 22.
- MPSS (Ministry of Public Safety and Security) (2016). *Practical guidelines of pre-disaster impact assessment consultation*. Technical Report, Vol. 79.
- NRCS (Natural Resource Conservation Service) (2004). *Estimation*

- of direct runoff from storm rainfall*. National Engineering Handbook.
- Ouyang, W., Guo, B., Hao, F., Huang, H., Li, J., and Gong, Y. (2012). "Modeling urban storm rainfall runoff from diverse underlying surfaces and application for control design in Beijing." *Journal of Environmental Management*, Vol. 113, pp. 467-473.
- Park, J. Y., Lim, H. M., Lee, H. I., Yoon, Y. H., Oh, H. J., and Kim, W. J. (2013). "Water balance and pollutant load analyses according to LID techniques for a town development." *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 35, No. 11, pp. 795-802 (in Korea).
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. (1992). *Numerical Recipes in C*. The art of Scientific Computing, Cambridge University Press, New York, Second Edition.
- Rossman, L. A., and Huber, W. C. (2016). *Storm water management model reference manual*. Volume 1, Hydrology (Revised), United States Environmental Protection Agency Technical Report.
- Seo, D., and Fang, T. H. (2012). "Application of automatic stormwater monitoring system and SWMM model for estimation of urban pollutant loading during storm event." *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 34, No. 6, pp. 373-381 (in Korea).
- Sezar, G., and Cevza, M. K. A. (2013). "Calibrated hydrodynamic model for sazlidere watershed in istanbul and investigation of urbanization effects." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 18, pp. 75-84.
- Terstriep, M. L., and Stall, J. B. (1969). "Urban runoff by road-research labotory method." ASCE, *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 95, No. HY6, PROC PAPER 6878, pp. 1809-1834.
- Terstriep, M. L., and Stall, J. B. (1974), "Illinois urban drainage area simulator, The ILLUSDAS." State of Illinois, *Department of Registration and Education*, ISWS-74-BUL58.
- UDFCD (Urban Drainage and Flood Control District) (2008). Runoff, Chapter 5 in Volume of Urban Storm Drainage Criteria Manual.
- USEPA (United States Enviromental Protection Agency) (2014). *Greening CSO plans: Planning and modeling green infrastructure for Combined Sewer Overflow(CSO) control*. United States Enviromental Protection Agency Technical Report.
- Versar, Inc. (2007). *Modeling report, cameron run watershed plan*. Technical Report.
- Yao, L., Wei, W., and Chen L. (2016). "How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm case?" *Ecological Indicators*, Vol. 60, pp. 893-905.
- Yin, Z. H., Koo, Y. M., Lee, E. Y., and Seo, D. I. (2015). "Development of integrated management system of stormwater retention and treatment in waterside land for urban stream environment." *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 37, No. 2, pp. 126-135 (in Korea).
- Zare, S. O., Saghafian, B., and Shamsai, A. (2012). "Multi-objective optimization for combined quality-quantity urban runoff control." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 16, pp. 4531-4542.