



Derivation of design and planning parameters for permeable pavement using Water Management Analysis Module

Song, Jae Yeol^a · Chung, Eun-Sung^{b*} · Song, Young Hoon^b

^aDepartment of Civil Engineering, University of Alabama

^bDepartment of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Paper number: 18-012

Received: 6 February 2018; Revised: 6 March 2018; Accepted: 6 March 2018

Abstract

This study presents a systematic framework to derive the best values of design and planning parameters for low impact development (LID) practices. LID was developed to rehabilitate the distorted hydrological cycle due to the rapid urbanization. This study uses Water Management Analysis Module (WMAM) to perform sensitivity analysis and multiple scenario analysis for LID design and planning parameters of Storm Water Management Model (SWMM). This procedure was applied to an urban watershed which have experienced rapid urbanization in recent years. As a result, the design and planning scenario derived by WMAM shows lower total flows and peak flow, and larger infiltration than arbitrary scenarios for LID design and planning parameters. In the future, economic analysis can be added for this application in the field.

Keywords: Hydrological cycle, Low impact development (LID), Storm Water Management Model (SWMM), Water Management Analysis Module (WMAM)

Water Management Analysis Module 모형을 이용한 투수성포장시설의 설계 및 계획 매개변수 도출

송재열^a · 정은성^{b*} · 송영훈^b

^a알라바마 대학교 토목공학과, ^b서울과학기술대학교 건설시스템공학과

요 지

본 연구는 도시 지역의 물 순환을 개선시키기 위해 최근 활발하게 적용되고 있는 저영향개발(low impact development, LID) 시설의 설계 및 계획 매개변수를 선정하기 위한 방법을 제시하였다. 이때 Storm Water Management Model (SWMM) 모형의 LID 시설 모의 기능을 활용하여 다양한 매개변수에 대해 민감도 분석 및 다양한 시나리오를 자동으로 수행하여 비교할 수 있도록 개발된 Water Management Analysis Module (WMAM)을 이용하였다. 본 연구는 최근 도시화가 진행되고 있는 서울의 한 지역에 적용하였다. 적용 결과 LID 중 하나인 투수성포장 시설이 없는 경우와 임의로 결정된 설계 및 계획 시나리오 보다 본 방법을 통해 도출된 시나리오가 총유출량 및 침투유량 감소와 침투량 증가에 더 좋은 효과를 보였다. 향후 경제성을 고려한 방법을 개발한다면 실무에서도 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

핵심용어: 물순환, 저영향개발, Storm Water Management Model (SWMM), Water Management Analysis Module (WMAM)

*Corresponding Author. Tel: +82-2-970-9017
E-mail: eschung@seoultech.ac.kr (E.-S. Chung)

1. 서론

전 세계적으로 도시지역의 불투수율 증가로 물 순환 체계가 악화되고 있는 가운데, 직접유출량의 저류와 침투를 유도하기 위한 저영향개발(low impact development, LID) 시설이 선진국들을 중심으로 적극적으로 검토되거나 설치되고 있다. 다양한 LID 시설들은 이상홍수로 인한 홍수피해 저감과 비점오염으로 인한 피해 저감을 위해 인구밀도가 높은 대도시 지역에 집중적으로 검토되고 있다(Collins *et al.*, 2008; Damodaram *et al.*, 2010; Fassman and Blackbourn, 2010; Ahiablame *et al.*, 2012). 미국환경청(Environmental Protection Agency, EPA)은 2009년 SWMM (Storm Water Management Model; Rossman, 2015) 모형의 편의환경을 개발하면서 다양한 LID 시설의 수문학적 효과를 분석할 수 있도록 보완하여 출시하였으며 이후 지속적으로 수정 및 보완되고 있다.

EPA SWMM을 기반으로 개발된 PC-SWMM, XP-SWMM 모형들은 GIS 정보를 분석할 수 있는 시스템을 포함하고 있는데 이를 활용하여 도시지역의 홍수 저감 및 하수도 시스템의 개선을 위해 LID 시설을 도입하는 사례들이 있다(Park *et al.*, 2010; Irvine *et al.*, 2015; Ahiablame and Shakya, 2016; Bloorchian *et al.*, 2016). 또한, 미국의 EPA에서 개발한 System for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration model (SUSTAIN) 프로그램을 이용하여 도시지역에 LID 시설의 계획에 대한 효과 분석을 수행한 연구들도 있다(Lee *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2015; Martinez *et al.*, 2015). 그러나 각 모형은 사용자가 직접 LID 시설에 대한 설계 및 계획 매개변수를 결정하고 입력해야하는 어려움이 있다. PC-SWMM에는 SRTC (Sensitivity Radio Tuning Calibration) 도구가 포함되어 있어서 대상 유역의 지형적 요소에 변화를 주어 민감도분석이 가능하지만, LID 시설의 설계 또는 계획에 대한 요소에 변화를 주는 분석은 포함되어 있지 않다(Finney and Gharabaghi, 2011; Robinson, 2015).

LID 시설의 설계 및 계획을 위해서는 결정해야하는 다양한 변수들이 존재한다. 특히, LID 시설의 종류와 각 시설의 용량 및 특성에 따라 수문학적 측면에서 다양한 효과를 볼 수 있기 때문에 LID 시설이 적용되는 유역의 특성, LID 시설의 용량, 설치 위치, 시설들의 조합 및 연계 등을 신중하게 고려해야 한다(Wu *et al.*, 2006; Kaini *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2012; Youn *et al.*, 2012; Noh *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2015). LID 시설을 적용하는데 있어서 최적의 시설 크기를 결정하기 위한 프레임워크를 개발하고, 6개의 서로 다른 LID 시나리오를 적용한 연구 사례가 있었으며(Beak *et al.*, 2015), LID 시설에 대한 공간

적 의사결정을 위해 Fuzzy 이론을 활용한 연구 사례도 있다(Kim *et al.*, 2013; Chung and Kim, 2014; Ki and Ray, 2014).

그러나 기존 연구들은 이미 결정된 LID 시설의 종류 및 적용 위치를 선정하는데 그 한계가 있는 것으로 나타났다. LID 시설의 적용 위치와 용량 등과 함께 동시에 고려되어야 하는 다양한 요인 중 LID 시설의 설계와 계획에 필요한 매개변수들의 최적의 값을 도출해 주는 의사결정지원 시스템은 없고, 이와 관련된 연구 또한 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구는 효과적인 LID 시설의 계획을 위해 LID 시설 중 투수성포장을 대상으로 LID 시설의 설계 및 계획변수를 추정하는 방법을 제시하였다. 이때 LID 시설의 설계 및 계획변수들에 대한 민감도 분석과 다양한 설계 및 계획 매개변수 시나리오에 대한 다중시나리오분석을 수행하게 도와주는 의사결정지원시스템인 Water Management Analysis Module (WMAM) 모형(Song *et al.*, 2018)을 이용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 저영향개발(low impact development, LID)

LID 시설은 도시유역의 물 순환을 개발 이전의 자연상태로 복원시키고 유지하기 위한 방법으로 강우량을 저류시키고, 자연적으로 정화시키거나, 보다 많은 물의 침투를 유도하여 지하수를 풍부하게 하는 등 직접유출량을 감소시키고 비점오염 발생량을 감소시키는 것을 목표로 하고 있다. 이와 비슷한 개념으로는 Best Management Practice (BMP), Green Infrastructure (GI), Water Sensitive City 등이 있다(Mouritz, 1992; Prince George's County, 1993; Walmsley, 1995). LID 시설은 다섯 가지 원칙을 바탕으로 이루어지는데, 첫째, 친자연적, 친환경적이며, 둘째 도시 개발로 인한 수문학적 부효과를 최소화시키고, 셋째, 유역의 기저유량(baseflow)을 확보하여 건기의 하천 유량을 확보하고, 넷째, 유역의 물 관리시설을 통합하여 운영하며, 다섯째, 비점오염량을 저감시켜 하천 수질의 향상을 유도한다. 특히, LID 시설은 유출량 및 홍수 관리, 불투수면적의 감소, 지하수질 관리, 하천 유량 증대 및 관리 등을 통해 지역 커뮤니티의 삶의 질을 개선하는 큰 효과를 볼 수 있다.

2.2 SWMM 모형과 LID 설계 및 계획 매개변수

EPA SWMM은 가장 많이 쓰이는 강우-유출 모형 중 하나로, 2009년 7월 이후로 LID 기법의 효과 분석이 가능하도록 업데이트되었다. SWMM 모형을 통해 식생체류장치(bio-

Table 1. Combination of layers to each LID type (Rossman, 2015)

LID type	Surface	Pavement	Soil	Storage	Drain	Drainage mat
Bio-retention cell	○		○	○	×	
Rain garden	○		○			
Green roof	○		○			○
Permeable pavement	○	○	×	○	×	
Infiltration trench	○			○	×	
Rain barrel				○	○	
Vegetative swale	○					
Rooftop disconnection	○				○	

○: required, ×: optional

retention cell), 빗물정원(rain garden), 옥상녹화(green roof), 빗물통(rain barrel), 투수성 포장(permeable pavement), 식생수로(vegetative swale), 침투트렌치(infiltration trench), 옥상연결시설(rooftop disconnection) 등 총 8가지 LID 시설에 대한 모의가 가능하다(Rossman, 2015). SWMM 모형에서 각각의 LID 시설은 Table 1과 같이 LID 시설의 종류에 따라 다른 층(layer)으로 구성되어 있으며, 각 층을 설명하는 다양한 설계 매개변수를 포함하고 있다. 예를 들어 침투트렌치의 경우, 지표층(surface), 저류층(storage), 지하배수층(underdrain)을 포함하고 있으며, 각 층에 해당하는 변수인 식생높이(berm height), 식생단위의 부피(vegetative volume fraction), 표면조도(surface roughness), 표면경사(surface slope), 포장 두께(thickness), 포장의 공극률(void ratio), 저장공간 누수율(seepage rate), 막힘계수(clogging factor), 배수계수(flow coefficient), 배수지수(flow exponent), 배구수 높이(offset height) 등을 설계 매개변수로 포함하고 있다. 또한, 설계 매개변수를 이용하여 설계된 LID 시설을 특정 유역에 적용하기 위하여 규모, 수량 등과 관련된 계획 매개변수를 입력해야 한다.

2.3 민감도 분석

민감도 분석은 수문모의 분석의 자료입력 과정에서 다양하게 발생하는 불확실성을 처리할 수 있다. SWMM 모형에서 LID 시설에 대한 모의 시 LID 시설의 종류와 관련된 설계 매개변수들이 다양하게 적용되는데, 이 때문에 효과적인 LID 시설을 계획하기 위해서는 무한에 가까워지는 설계 매개변수들 간의 조합을 최적의 형태로 적용해야 하는 어려움이 따른다. 민감도 분석은 다양한 설계 매개변수들 중에서 최종결과에 큰 영향을 미치는 설계 매개변수를 골라낼 수 있게 해줌으로써 아주 유용하다. 한편, 수문 모델링은 점점 그 형태가 복잡해지고 있으며, 고려해야 하는 물리적 특성들이 많아지고 있기 때문에 일반적인 방법으로 민감한 매개변수를 찾아내기가 점

점 힘들어지고 있는 실정이다.

특정 매개변수의 변화가 최종결과에 얼마나 영향을 미치는지는 Eq. (1)을 통해 정량화할 수 있다.

$$S_{P_i} = \frac{\partial Q}{\partial P_i} = \frac{f(P_i + \Delta P_i; P_{i \neq 1}) - f(P_1, P_2, \dots, P_n)}{\Delta P_i} \quad (1)$$

여기서, S_{P_i} 는 매개변수 P_i 의 민감도 정도, Q 는 최종결과, P_i 는 고려된 매개변수를 나타낸다.

Eq. (2)는 특정 요소 입력 값(I_c)의 변화량에 따른 결과 값(O)의 변화량을 계산한 값을 보여주며, 이를 통해 입력 값의 변화에 따른 민감도(S)를 계산할 수 있다(Saltelli *et al.*, 2008).

$$S = \frac{\partial O}{\partial I_c} = \frac{\Delta O}{\Delta I_c} \quad (2)$$

WMAM은 민감도 분석 기법 중 하나인 one-at-a-time 방법을 사용하는데, 하나의 요소에 변화를 주는 동안 나머지 요소들은 값을 고정하여 특정 요소 값의 변화에 따른 최종 결과 값의 변화를 통해 민감도 정도를 측정한다(Gardner *et al.*, 1980).

2.4 Water Management Analysis Module (WMAM)

WMAM은 SWMM input 파일을 대상으로 LID 시설의 설계 및 계획과 관련된 매개변수에 대한 다중 시나리오 분석을 통해 수문학적 측면에서 효과적인 시나리오를 도출하는 웹 기반의 프로그램으로 Song and Chung (2016)이 개발하였다. 식생체류장치, 빗물정원, 옥상녹화, 빗물통, 투수성포장, 침투트렌치 총 6가지 시설에 대한 효과분석이 가능하며, 식생수로는 SWMM 모형 내에서의 흐름특성상 통수능을 검토할 수 없으며(Kang *et al.*, 2015), WMAM은 10단계의 과정을 통해,

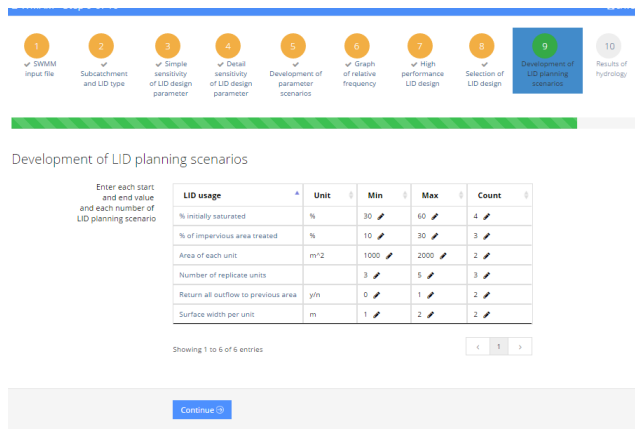
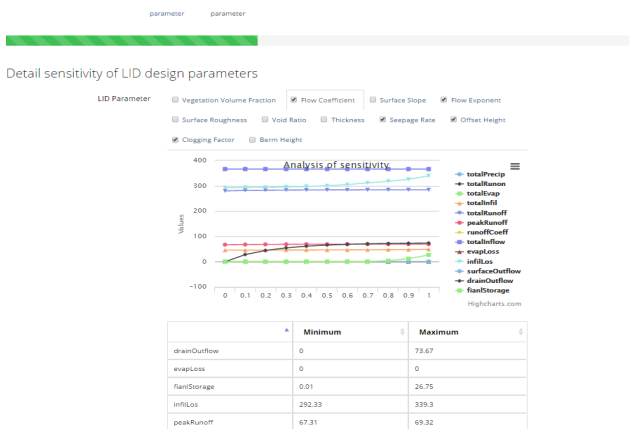


Fig. 1. Screenshot of steps 4 and 9 of WMAM

선택된 LID 시설의 설계 매개변수에 대한 민감도 분석을 수행하고 총유량, 침투유량, 총침투량 등의 결과에 영향력 있는 매개변수를 확인할 수 있고, 계획 및 설계와 관련된 매개변수의 다양한 조합으로 생성되는 많은 시나리오를 짧은 시간동안 빠르게 모의하고 분석하여 사용자로 하여금 여러 차례 반복된 모의를 수행하는데 걸리는 시간과 노력을 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다. Fig. 1은 WMAM의 민감도분석 결과를 확인하는 과정(4단계)과 계획 매개변수의 시나리오를 생성하는 과정(9단계)의 화면을 보여주고 있다.

3. 연구방법 및 자료

3.1 연구방법

본 연구는 LID 시설과 관련된 다양한 설계 및 계획 매개변수를 고려하여 효과적인 LID 시설의 구축을 위해 도시지역의

유역을 대상으로 다음과 같은 세 가지 경우의 수문분석결과를 비교하였다; (1) LID 시설이 없는 경우, (2) 임의로 설계된 LID 시설을 적용한 경우, (3) 민감도분석 및 시나리오 조합을 통해 도출한 LID 시설을 계획한 경우.

Fig. 2는 본 연구의 흐름도를 보여준다. 본 연구의 수행을 위해 도시지역에 위치한 유역을 대상으로 SWMM 모형을 구축한 후(1단계), TOPSIS를 이용하여 SWMM 모형의 입력 및 결과 요소를 고려한 취약성 평가를 기반으로 LID 시설을 계획할 대상유역을 선정하였다(Song and Chung, 2017) (2단계), 적용가능한 LID 시설을 선정하고(3단계), 선택된 유역을 대상으로 기 설계된 LID 시설 설치 전후에 대해 SWMM 모형을 모의하고(4, 5단계), 동일한 LID 시설의 설계 및 계획 매개변수를 대상으로 민감도 분석 및 시나리오 분석을 통해(6, 7단계) 수문학적 측면에서 우수한 효과를 보이는 LID 시설을 도출하였다(8단계). 본 연구의 6, 7단계에서 WMAM을 이용하였다. WMAM의 3~4단계에서는 LID 시설의 설계 매개변수

1	Formulation of SWMM for the study area
2	Selection of target sub-watersheds using TOPSIS
3	Selection of applicable LID types
4	Simulation of SWMM without LID
5	Simulation of SWMM with designated LID
6	Sensitivity analysis of LID design parameters using WMAM
7	Scenario analysis based on LID design and planning parameters using WMAM
8	Determination of LID design and planning parameters

Fig. 2. Procedure of this study

에 대한 민감도 분석을 수행하며, WMAM의 5~7단계에서는 선택된 LID 시설의 설계 매개변수들을 대상으로 시나리오 조합 및 분석을 하여 주어진 조건 안에서 가장 우수한 설계안을 도출한다. WMAM의 8~10단계에서는 도출된 설계안을 기반으로 LID 시설의 계획 매개변수들을 대상으로 시나리오 조합 및 분석을 하여 수문학적 측면에서 우수한 효과를 보이는 LID 시설의 계획안을 도출한다.

3.2 연구 대상지역 및 자료

본 연구는 서울특별시 노원구에 위치한 대학교 캠퍼스를 대상구역으로 선정하였다. Fig. 3은 본 연구의 대상지역의 모습과 이를 SWMM 모형으로 구현한 화면을 보여주고 있다. 대상구역은 근래 여러 건물들이 건설되어 수문 순환이 많이 영향을 받았다고 판단되어 선정하였다. 대상지역은 총 18개의 소유역으로 구분하여 SWMM 모형을 구축하였으며, 총 면적 508,690 m² 중 대부분이 건물부지, 포장도로 및 주차공간으로 활용되고 있어 높은 불투수율을 보이고 있다. 총유역면적의 24.87%가 불투수율 30% 미만(S1,S8,S9,S10)을 차지하며, 9.56%가 불투수율 30% 이상 50% 미만(S14,S15), 65.57%가 불투수율 50% 이상 90% 미만(S2, S3, S4, S5, S6, S7, S11, S12, S13, S16, S17, S18)을 차지한다. 본 연구에서는 총 강우

량 374.5 mm, 최대강우 38 mm/day를 갖는 20일간(2012년 8월 13일~9월 01일, 서울 기상청)의 강우자료를 이용하였다.

3.3 LID 시설 종류의 선정

LID 시설의 설치 구역은 Song and Chung (2017)에서 도출한 결과를 활용하였는데 18개의 소유역 중에서 소유역 S11이 타 소유역에 비해 높은 불투수율 비율로 인해 침투유량이 높고 침투량이 적은 것으로 나타나서 이를 대상으로 하였다. 소유역 S11은 불투수율이 70% 이지만 전체 면적이 커서 불투수 면적이 가장 크다. 따라서 주차장에 LID 시설 중 실질적으로 시공 가능한 투수성포장이 효과적일 것으로 판단하여 이를 적용하였다. 투수성포장은 다공성 콘크리트 또는 아스팔트 믹스를 이용한 포장 또는 자갈로 대상지역을 채우고 유량이 바닥을 통해 침투할 수 있도록 설계된 LID 시설이다. SWMM 모형에서 투수성포장의 수문학적 구성요소는 지표층, 포장층, 토양층, 저류층, 지하배수층이며, Table 2와 같이 각 구성층과 관련된 23개의 설계 매개변수를 포함하고 있다. 본 연구에서 직접 입력한 투수성포장의 설계 매개변수는 Zhang and Guo (2014)의 연구를 참조하였고, 계획 매개변수는 현장 조건에 맞도록 구성하였다.

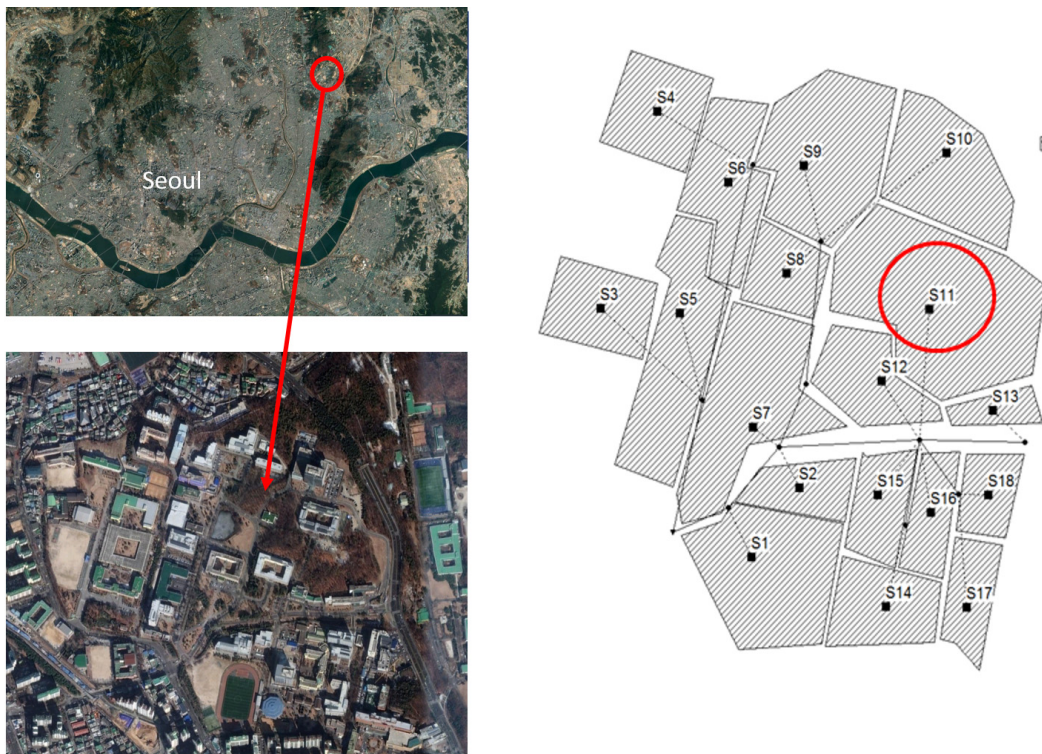


Fig. 3. SWMM modeling map of study area

Table 2. Design and planning parameters of LID (Zhang and Guo, 2014)

Category	Layer	Parameter	Unit	Value
Design	Surface	Berm height	mm	1.5
		Vegetation volume fraction		0
		Surface roughness	Manning's n	0.015
		Surface slope	%	1
	Pavement	Thickness	mm	120
		Void ratio		0.16
		Impervious surface fraction		0
		Permeability	mm/hr	254
		Clogging factor		0
	Soil	Thickness	mm	0
		Porosity		0.5
		Field capacity		0.2
		Wilting point		0.1
		Conductivity	mm/hr	0.5
		Conductivity slope		10
		Suction head	mm	3.5
	Storage	Thickness	mm	450
		Void ratio		0.63
		Seepage rate	mm/hr	3.3
		Clogging factor		0
	Drain	Flow coefficient		1
		Flow exponent		0.5
		Offset height	mm	50
Drainage mat	Thickness	mm	-	
	Void fraction		-	
	Roughness	Manning's n	-	
Planning	Area of each unit	m ²	1,000	
	Number of unit	EA	3	
	Surface width per unit	m	1	
	% initially saturated	%	0	
	% of impervious area treated	%	0	
	Return all outflow to pervious area	y/n	n	

4. 결 과

4.1 WMAM의 민감도 분석

본 연구에 적용한 투수성포장(Permeable Pavement, PP)의 설계 매개변수 16개 각각을 11번의 구간으로 총 176번의 민감도 분석을 실행한 결과, flow coefficient (FC), flow exponent (FE), offset height (OH), seepage rate (SR) 4개의 매개변수만 총침투량, 총유량, 침투유량의 결과에 영향을 미치는 것으로 나타났으며 Table 3에서 그 결과를 보여주고 있다.

예를 들어, FC를 0부터 1까지 0.1 단위로 11번 나눠서 값을 입력하고 나머지 설계 매개변수를 그대로 놔두었을 시, 총침투량은 45.96 (mm)에서 48.78 (mm)까지 결과 값이 변화하였으며, 총유량과 침투유량은 각각 279.67~284.09 (mm)와 67.31~69.32 (LPS)의 변화량을 보였다. 특히, 4개의 설계 매개변수 중 SR는 총침투량에 대해 4.39, 총유량에 대해 4.16, 침투유량에 대해 0.95의 민감도를 보이는 것을 확인 할 수 있었으며, OF는 총침투량과 총유량에 대해 0.16의 민감도를 가지며 침투유량의 결과에는 민감하지 않음을 확인할 수 있었다.

Table 3. Results of sensitivity analysis of the design parameters of PP using WMAM

Design parameters		Flow Coefficient (FC)	Flow Exponent (FE)	Offset Height (OH)	Seepage Rate (SR)
Inserted value	Min	0	0	0	0
	Max	1	0.5	100	3.3
Total Infiltration (mm)	Min	45.96	45.96	42.5	28.41
	Max	48.78	47.51	44.1	50.38
Total Runoff (mm)	Min	279.67	282.27	285.94	279.67
	Max	284.09	284.09	287.55	300.46
Peak Runoff (LPS)	Min	67.31	68.14	69.32	67.31
	Max	69.32	69.32	69.32	72.06
Sensitivity	TI	-2.82	-3.1	+0.16	+6.66
	TR	+4.42	+3.64	-0.16	-6.3
	PR	+2.01	+2.36	0	-4.75

4.2 LID 시설의 설계 및 계획 매개변수 시나리오 분석

WMAM의 민감도 분석 결과를 통해 민감한 설계 매개변수로 선정된 FC (0.1, 0.3, 0.5, 0.7), FE (0.2, 0.3, 0.4, 0.5), OH (40, 60, 80, 100 mm), SR (0.1, 3.3 mm/hr)을 조합하여 총 128개의 시나리오를 생성하고(WMAM 5단계), 생성된 시나리오의 자동 모의를 통해 총침투량, 총유량, 침투유량의 결과(WMAM 6,7단계) 일부를 Table 4에서 보여주고 있다. SR의 경우는 민감도 분석결과 범위내 값들로는 큰 차이를 확인할 수 없기에 양극값인 0.1과 3.3의 값을 사용하였다. Table 4는 총침투량이 많고 총유량 및 침투유량이 적은 아홉 가지 시나리오를 보여주고 있으며, 이 때 FC와 SR은 각각 0.1, 3.3 mm/hr으로 일정하였고, FE와 OH의 변화에 따라 총침투량, 총유량, 침투유량 결과의 변화를 보여주고 있다. 분석 결과, FC가 0.1, FE가 0.2, OH가 100 mm, SR이 3.3 mm/hr 일 경우 총침투량이 48.64 mm로 가장 높은 값을 보였고, 총유량과 침

투유량이 279.96 mm와 67.49 LPS로 가장 낮은 값을 보였다. 시나리오 분석 결과, FC는 값이 작고 SR는 값이 클수록 총침투량은 증가시키고 총유량과 침투유량은 감소시키는데 영향을 많이 미치며, FE와 OH는 FC와 SR에 비해 상대적으로 민감한 정도가 낮은 것으로 나타났다.

LID 시설의 설계 매개변수를 조합한 시나리오 중에서 수문학적 효과가 가장 우수한 시나리오(FC: 0.1, FE: 0.2, OH: 100, SR: 3.3)를 이용하여(WMAM 8단계) Table 5와 같이 LID 시설의 계획 매개변수에 대한 시나리오를 생성하였다(WMAM 9단계). LID 시설의 면적(AoEU)으로는 1,000 m²와 2,000 m², 시설의 개수(NoU)로는 3개, 4개, 5개, 초기포화도(PIS)는 30%, 40%, 50%, 60%, 불투수면의 비율(PoIAT)로 10%, 20%, 30%, 시설의 폭(SWpU)으로는 20 m와 40 m, 모든 유출량을 투수지역으로 환원(RAOtPA)으로는 Yes (0)와 No (1)를 투수성포장의 계획 매개변수로 조합하여 288개의 시나리오를 생성하고 모의하였다.

생성된 288개 시나리오는 WMAM의 10단계를 통해 자동 모의하였으며, 시나리오 분석 결과 AoEU가 2,000 m², NoU가 5 EA인 경우에 수문학적 측면에서 효과적인 결과를 보이

Table 4. Results of simulated scenarios of design parameters of PP (7th step of WMAM)

No.	Generated scenarios		Simulated results		
	FE	OH (mm)	TI (mm)	TR (mm)	PR (LPS)
1	0.2	100	48.64	279.96	67.49
2	0.3	100	48.6	280.05	67.57
3	0.2	80	48.57	280.1	67.5
4	0.4	100	48.54	280.17	67.69
5	0.2	60	48.5	280.26	67.51
6	0.3	80	48.5	280.26	67.6
7	0.5	100	48.47	280.31	67.84
8	0.2	40	48.42	280.4	67.52
9	0.4	80	48.4	280.46	67.74

Table 5. Generation of LID planning scenarios (9th step of WMAM)

LID planning parameters	Unit	Min	Max	Count
Area of each unit (AoEU)	m ²	1000	2000	2
Number of units (NoU)	EA	3	5	3
% initially saturated (PIS)	%	30	60	4
% of impervious area treated (PoIAT)	%	10	30	3
Surface width per unit (SWpU)	m	20	40	2
Return all outflow to pervious area (RAOtPA)	y/n	0	1	2

는 것으로 나타났다. Fig. 4의 내용을 분석한 결과, AoEU, NoU와 RAOtPA는 다른 LID 계획 매개변수들 보다 상대적으로 크게 민감한 것으로 확인되는 반면, SWpU는 상대적으로 결과에 영향을 미치지 않아 민감도 정도가 낮은 것으로 확인되었다. 또한, 미세한 차이로 PIS와 PoIAT 값의 값의 변화에 따라 총 침투량이 변하는 것이 확인 가능하다.

4.3 최종 LID 설계 및 계획 시나리오

WMAM의 10단계 과정을 통해 소유역 S11에 투수성포장을 적용할 경우, 총유량과 첨두유량을 가장 많이 감소시킬 수 있는 시나리오를 Table 6과 같이 도출하였다. 도출된 시나리오를 적용할 경우 Table 7과 같이 총침투량은 128.57 mm, 총유량은 189.01 mm, 첨두유량은 45.85 LPS의 값을 가진다.

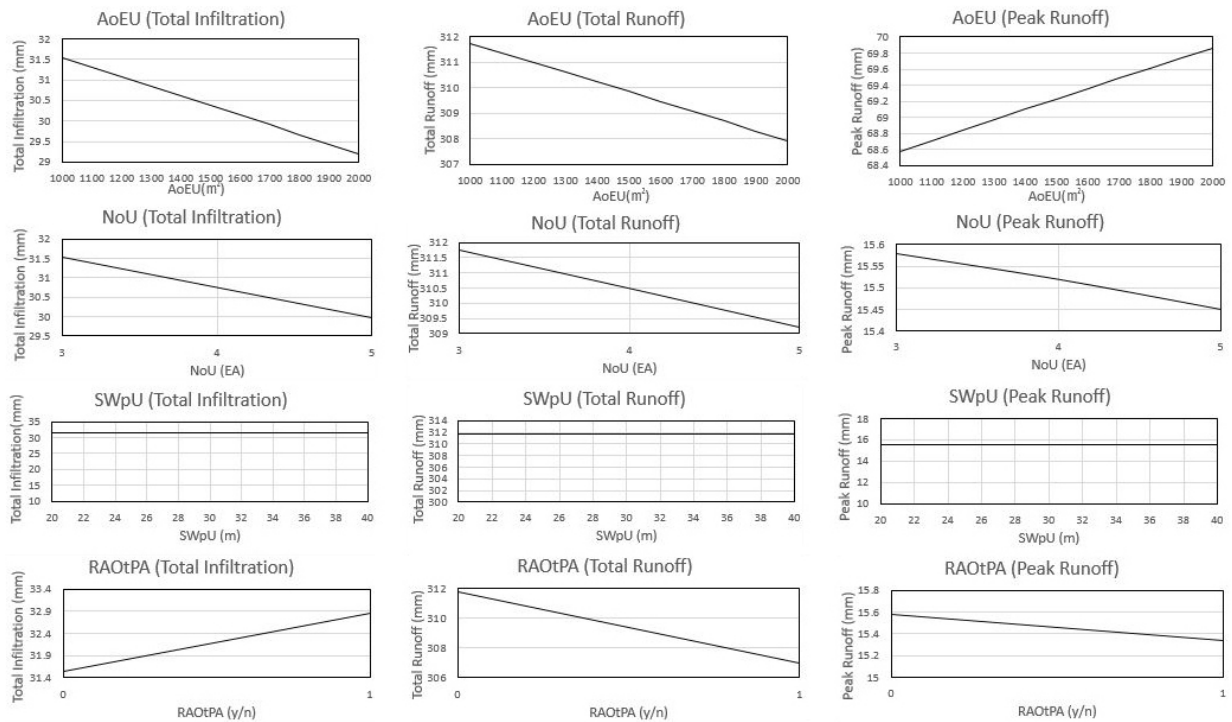


Fig. 4. Results of sensitivity analysis of LID planning parameters

Table 6. Values of derived best LID design and planning parameters using WMAM

Design parameters							
Surface	Berm height (mm)	Vegetative volume fraction			Surface roughness (Manning's <i>n</i>)		Surface slope (%)
	1.5	0			0.015		1
Pavement	Thickness (mm)	Void ratio	Impervious surface fraction		Permeability (mm/hr)		Clogging factor
	120	0.16	0		24		0
Soil	Thickness (mm)	Porosity	Field capacity	Wilting point	Conductivity (mm/hr)	Conductivity slope	Suction head (mm)
	0	0.5	0.2	0.1	0.5	10	3.5
Storage	Thickness (mm)		Void ratio		Seepage rate (mm/hr)		Clogging factor
	450		0.63		3.3		0
Drain	Flow coefficient			Flow exponent		Offset height (mm)	
	1			0.5		50	
Planning parameters							
AoEU (m ²)	NoU (EA)	PIS (%)	PoIAT (%)	SWpU (m)	RAOtPA (y/n)		
2,000	5	30	30	20	n		

Table 7. Comparative performances for use of WMAM and manual parameter determination

Case	Total infiltration (mm)	Total runoff (mm)	Peak runoff (LPS)
Use of WMAM	128.57	189.01	45.85
Manual parameter determination	48.64	279.96	69.49
Changed ratio	164.33%	-32.49%	-34.02%

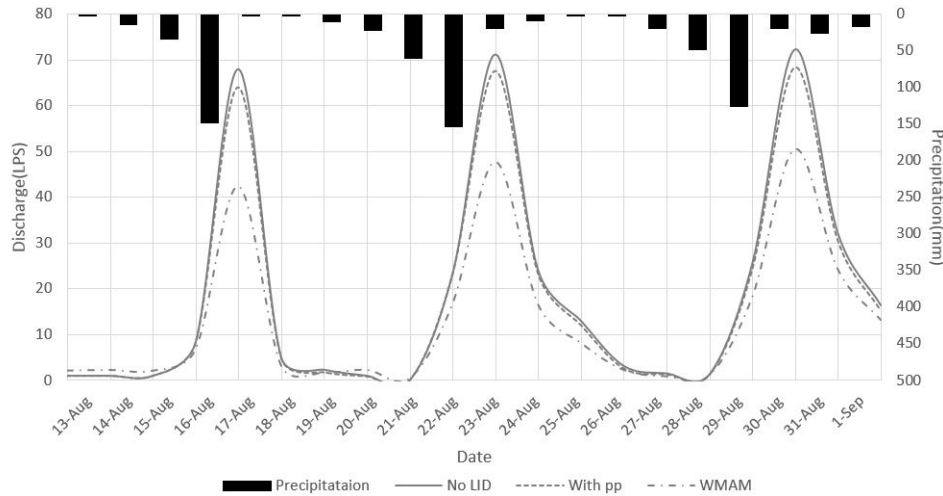


Fig. 5. Hydrograph of sub-catchment S11

WMAM으로 도출된 시나리오와 Table 2에 제시된 시나리오를 각각 분석하여 제시한 결과 총침투량을 164.33% 증가시키고, 총유량과 침투유량을 각각 -32.49%와 -34.02% 만큼 감소시키는 것으로 나타났으며 큰 효과를 보였다.

LID 시설이 없는 경우, 기존에 설계된 투수성포장을 직접 입력한 경우, WMAM의 민감도 분석 및 시나리오 분석 기능을 이용하여 투수성포장에 대한 설계변수들을 도출한 경우에 대해 소유역 S11의 수문곡선을 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 기존에 설계된 투수성포장 시설을 적용한 경우, LID 시설이 없는 경우와 큰 차이는 없지만 상대적으로 총유량 및 침투유량이 감소하였으며, WMAM을 이용하여 설계안을 도출한 경우는 상대적으로 큰 차이가 나타났음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 도시지역에 효과적인 LID 시설의 설계 및 계획 매개변수의 결정을 위해 민감도 분석 및 시나리오 분석 기능을 포함하는 WMAM을 이용하였으며, WMAM을 이용하여 도출한 수문 분석 결과와 기존 설계된 LID 시설을 대상 유역에 적용한 경우의 수문분석 결과를 비교하였다. WMAM을 활용하여 LID 시설안을 도출할 경우, 기존 설계된 LID 시설 계획보

다 총유량 및 침투유량을 감소시키고, 총침투량을 증가시키는 효과를 볼 수 있는 것으로 나타났다.

WMAM에 포함된 민감도 분석 및 시나리오 분석 기능을 통해 대상유역에 투수성포장 시설을 적용할 경우에 수문결과에 영향을 미치는 설계 및 계획 매개변수를 파악할 수 있었다. 설계 매개변수의 경우, 투수성포장과 관련된 23개의 매개변수 중에서 flow coefficient와 seepage rate 두 개의 매개변수가 최종 수문결과에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, flow exponent와 offset height가 그 뒤를 이었다. 계획 매개변수의 경우, LID 시설의 면적과 개수가 절대적으로 수문결과에 영향을 미치며, 초기포화도와 불투수면의 비율이 비교적 수문결과에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 이용하여 실제 LID 시설을 설계하고 계획할 시 고려가 가능할 것으로 판단된다. 또한, WMAM은 짧은 시간동안 투수성포장의 설계 매개변수에 대한 민감도 분석을 위해 176번, 투수성포장의 설계 매개변수와 관련된 시나리오 분석 모의를 위해 128번, 투수성포장의 계획과 관련된 시나리오 분석 모의를 위해 288번, 총 669번의 모의를 수행하여 SWMM 모형 사용자의 반복적인 모의를 통한 시간과 노력을 효과적으로 절감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 여러 가지 LID 시설 중에서도 투수성포장만 활용하였기 때문에, 다른 시설물인 침투트렌치, 식생체류장치,

옥상녹화 등에 대한 연구를 추가적으로 수행하면 보다 구체적인 효과 분석이 가능할 것으로 보인다. 또한, 여러 유역 중에서 하나의 대상유역에 집중하여 분석을 수행하였기 때문에, 다른 유역에 대한 분석을 동반한다면 더 효과적인 분석이 가능할 것으로 판단된다. 향후 LID 시설의 위치선정을 위한 연구, 경제성을 고려한 LID 시설의 계획, LID 시설의 계획에 따른 수질 측면에서의 효과 등이 연구될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 18AWMP-B083066-05)으로 수행되었습니다. 또한 본 연구는 한국연구재단의 일반연구지원사업(NRF-2016 R1D1A1B04931844)의 연구비를 받아서 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Ahiablame, L., and Shakya, R. (2016). "Modeling flood reduction effects of low impact development at a watershed scale." *Journal of Environmental Management*, Vol. 171, No. 15, pp. 81-91.
- Ahiablame, L., Engel, B., and Chaubey, I. (2012). "Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research." *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 223, No. 7, pp. 4253-4273.
- Baek, S.-S., Choi, D.-H., Jung, J.-W., Lee, H.-J., Lee, H., Yoon, K.-S., and Cho, K.H. (2015). "Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban area, Korea: experimental and modeling approach." *Water Research*, Vol. 86, pp. 122-131.
- Bloorchian, A. A., Ahiablame, L., Osouli, A., and Zhou, J. (2016). "Modeling BMP and vegetative cover performance for highway stormwater runoff reduction." *Procedia Engineering*, Vol. 145, pp. 274-280.
- Chung, E.-S., and Kim, Y. (2014). "Development of fuzzy multi-criteria approach to prioritize locations of treated wastewater use considering climate change scenarios." *Journal of Environmental Management*, Vol. 146, pp. 505-516.
- Collins, K. A., Hunt, W. F., and Hathaway, J. M. (2008). "Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, pp. 1146-1157.
- Damodaram, C., Giacomoni, M. H., Prakash Khedun, C., Holmes, H., Ryan, A., Saour, W., and Zechman, E.M. (2010). "Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 46, No. 5, pp. 907-918.
- Fassman, E. A., and Blackbourn, S. (2010). "Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 15, pp. 475-485.
- Finney, K., and Gharabaghi, B. (2011). "Using the PCSWMM 2010 SRTC tool to design a compost biofilter for highway stormwater runoff treatment." *Journal of Water Management Modeling*, R241-R209.
- Gao, J., Wang, R., Huang, J., and Liu, M. (2015). "Application of BMP to urban runoff control using SUSTAIN model: Case study in an industrial area." *Ecological Modelling*, Vol. 318, pp. 177-183.
- Gardner, R. H., Huff, D. D., O'Neill, R. V., Mankin, J. B., Carney, J., and Jones, J. (1980) "Application of error analysis to marsh hydrology model." *Water Resources Research*, Vol. 16, pp. 659-664.
- Irvine, K., Sovann, C., Suthipong, S., Kok, S., and Chea, E. (2015). "Application of PCSWMM to assess wastewater treatment and urban flooding scenarios in Phnom Penh, Cambodia: A tool to support eco-city planning." *Journal of Water Management Modeling*, C389.
- Kaini, P., Artita, K., and Nicklow, J. W. (2012). "Optimizing structural best management practices using SWAT and genetic algorithm to improve water quality goals." *Water Resources Research*, Vol. 26, pp. 1827-1845.
- Kang, T., Koo, Y., and Lee, S. (2015). "Design of stormwater pipe considering vegetative swale with water conveyance." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* Vol. 15, pp. 335-343.
- Ki, S.J., and Ray, C. (2014). "Using fuzzy logic analysis for siting decisions of infiltration trenches for highway runoff control." *Science of the Total Environment*, Vol. 493, pp. 44-53.
- Kim, Y., Chung, E., Jun, S., and Kim, S. U. (2013). "Prioritizing the best sites for treated wastewater instream use in an urban watershed using fuzzy TOPSIS." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 73, pp. 23-32.
- Lee, J. G., Selvakumar, A., Alvi, K., Riverson, J., Zhen, J. X., Shoemaker, L., and Lai, F.-H. (2012). "A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices." *Environmental Modelling and Software*, Vol. 37, pp. 6-18.
- Martinez-Martinez, E., Nejadhashemi, A. P., Woznicki, S. A., Adhikari, U., and Giri, S., (2015). "Assessing the significance of wetland restoration scenarios on sediment mitigation plan." *Ecological Engineering*, Vol. 77, pp. 103-113.
- Mouritz, M., (1992). *Sustainable urban water systems; policy & professional praxis*. Perth, Australia: Murdoch University.
- Noh, S., Chung, E., and Seo, Y. (2015). "Performance of a rain barrel sharing network under climate change." *Water*, Vol. 7, pp. 3466-3485.
- Park, I., Kim, H., Chae, S.-K., and Ha, S. (2010). "Probability mass first flush evaluation for combined sewer discharges." *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 22. No. 6, pp. 915-922.

- Prince George's County Department of Environmental Resources (1993). *Design manual for use of bioretention in stormwater management*, Prince George's County, Maryland. Maryland, USA: Division of Environmental Management, Watershed Protection Branch.
- Robinson, B. (2015). "Modeling sanitary sewer groundwater inflow rehabilitation effectiveness in SWMM5 using a two aquifer approach." *Journal of Water Management Modeling*, C385.
- Rossman, L.A. (2015). *Storm water management model user's Manual Version 5.1*. United States Environmental Protection Agency, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., and Tarantola, S. (2008) *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons: West Sussex, UK.
- Song, J. Y., and Chung, E. S. (2017). "A multi-criteria decision analysis framework for prioritizing sites and types of low impact development practices." *Water*, Vol. 9, No. 4, doi: 10.3390/w9040291.
- Song, J., Chung, E. S., and Kim, S. H. (2018). "Decision support systems based on SWMM5.1 for urban water planning and management." *Water*, Vol. 10, 146; doi:10.3390/w10020146.
- Walmsley, A. (1995). "Greenways and the making of urban form." *Landscape and Urban Planning*, Vol. 33, No. 1, pp. 81-127.
- Wu, J., Yu, S. L., and Zou, R. (2006). "A water quality-based approach for watershed wide BMP strategies." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 42, pp. 1193-1204.
- Yang, J., Son, M., Chung, E., and Kim, I. (2015). "Prioritizing feasible locations for permeable pavement using MODFLOW and multi-criteria decision making methods." *Water Resources Management*, Vol. 29, pp. 4539-4555.
- Youn, S., Chung, E., Kang, W. G., and Sung, J. H. (2012). "Probabilistic estimation of the storage capacity of a rainwater harvesting system considering climate change." *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 65, pp. 136-144.
- Zhang, S., and Guo, Y. (2014). "SWMM simulation of the storm water volume control performance of permeable pavement systems." *Journal of Hydrologic Engineering*. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001092.