

도시유역의 물순환 및 수질 개선을 위한 저영향개발 시설의 비용 효율 분석

최정현¹ · 김경민² · 심인경³ · 이옥정^{4a} · 김상단^{4b,†}

¹부경대학교 지구환경시스템과학부 (환경공학전공) · ²토지주택연구원 건설환경연구실
³주식회사 핵코리아 수자원부 · ⁴부경대학교 환경공학과

Cost-Effectiveness Analysis of Low-Impact Development Facilities to Improve Hydrologic Cycle and Water Quality in Urban Watershed

Jeonghyeon Choi¹ · Kyungmin Kim² · Inkyeong Sim³ · Okjeong Lee^{4a} · Sangdan Kim^{4b,†}

¹Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University

²Construction Environment Research Department, Land & Housing Institute

³Department of Water Resources Engineering, HECOREA. INC

⁴Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

(Received 6 April 2020, Revised 25 May 2020, Accepted 26 May 2020)

Abstract

As urbanization and impermeable areas have increased, stormwater and non-point pollutants entering the stream have increased. Additionally, in the case of the old town comprising a combined sewer pipe system, there is a problem of stream water pollution caused by the combined sewer overflow. To resolve this problem, many cities globally are pursuing an environmentally friendly low impact development strategy that can infiltrate, evaporate, and store rainwater. This study analyzed the expected effects and efficiency when the LID facility was installed as a measure to improve hydrologic cycle and water quality in the Oncheon stream in Busan. The EPA-SWMM, previously calibrated for hydrological and water quality parameters, was used, and standard parameters of the LID facilities supported by the EPA-SWMM were set. Benchmarking the green infrastructure plan in New York City, USA, has created various installation scenarios for the LID facilities in the Oncheon stream drainage area. The installation and maintenance cost of the LID facility for scenarios were estimated, and the effect of each LID facility was analyzed through a long-term EPA-SWMM simulation. Among the applied LID facilities, the infiltration trench showed the best effect, and the bio-retention cell and permeable pavement system followed. Conversely, in terms of cost-efficiency, the permeable pavement systems showed the best efficiency, followed by the infiltration trenches and bio-retention cells.

Key words : Bio-retention cells, Combined sewer overflows, EPA-SWMM, Infiltration trenches, Permeable pavement systems, Water cycle

¹ 박사과정(Ph.D. Student), jeonghyeon202@naver.com, https://orcid.org/0000-0003-4803-654X

² 연구원(Assistant Researcher), kmin1392@naver.com, https://orcid.org/0000-0001-6862-4707

³ 사원(Staff), ik4529@naver.com, https://orcid.org/0000-0002-4018-2625

^{4a} 박사후연구원(Postdoctoral Scholar), lover1804@nate.com, https://orcid.org/0000-0001-5442-7024

^{4b,†} Corresponding author, 교수(Professor), skim@pknu.ac.kr, https://orcid.org/0000-0001-6244-6612

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

도시화에 따른 불투수지역의 확장은 토양으로 침투하는 강우의 양을 감소시켜 강우유출수의 증가 및 증발산량의 감소 등 도시 지역의 수문순환 과정을 왜곡시킨다(Dewan, 2013; O'Driscoll et al., 2010; Roy et al., 2014). 건기동안 불투수 지역에 축적된 비점오염물질은 강우 시 강우유출수와 함께 하천으로 직접적으로 유입되어 도시지역의 하천에 악영향을 미친다. 이와 함께, 강우유출수의 증가와 불충분한 하수관거의 용량으로 인해 발생하는 합류식 하수관거 월류수(Combined Sewer Overflows, CSOs)는 도시하천오염의 주된 원인들 중 하나이다(Butler and David, 2000; Qin et al., 2013; Schmitt et al., 2004). 구시가지지역의 CSOs에 의해 발생하는 문제는 1970년대부터 지적되어 왔으며(Butler and Davies, 2000), CSOs에 포함되어 유입되는 오염물질에 의한 수질문제는 지속적으로 언급되어 왔다(Kafi et al., 2008). 그러나 합류식 하수관거는 여전히 전 세계의 많은 도시에서 적용되고 있으며(Liao et al., 2015), 인구 증가 및 노후화로 합류식 하수관거 시스템의 용량은 점차 한계에 부딪히고 있다(Nilsen et al., 2011).

우리나라 하수처리 시스템 또한 아직까지 완전한 분류식 하수관망을 설치하지 못하고 있기 때문에, 강우 시 CSOs로 인한 오염 피해를 지속적으로 받고 있다. 부산시의 하수도 보급률은 2017년 기준으로 99.3%로 높은 비율을 나타내고 있으나, 절반 이상이 합류식 하수관거로 설치되어 있다(Kim et al., 2019). 실제로, 부산시의 도시하천인 온천천의 경우 매년 특정 크기 이상의 강우 발생 시, CSOs의 발생으로 인해 단기간에 수질이 악화되어 주민의 삶의 질을 심각하게 훼손하는 요인으로 작용하고 있다. 부산시 보건환경연구원에서는 2018년 일부 강우사상을 대상으로 온천천의 수질변화를 측정한 결과, 약 10 mm의 강우에도 CSOs가 발생하여 온천천 상·하류 전반에 걸쳐 수질이 악화되었다는 조사결과를 발표한바 있다(BMC, 2019).

이러한 문제를 해결하기 위해 전 세계적으로 저영향개발(Low Impact development, LID) 기법을 적용하고 있다(U. S. EPA., 1994). LID는 기존의 그레이 인프라 보다 더 효과적이고 환경 친화적으로 강우 및 강우유출수를 제어할 수 있다(Coffman, 2000). 또한, 비점오염물질 부하량의 감소에도 효과를 기대할 수 있는 것으로 알려져 있다(Liu, Ahlblade et al., 2015). LID는 설계 시 시설의 규모 설정이 비교적 자유로우며, 분산 배치, 우수한 효과, 미관 향상 등 다양한 장점을 가진다(Dietz and Clausen, 2008). 이러한 이유로 미국의 뉴욕시를 비롯한 선진국의 도시에서는 LID 시설을 적극적으로 적용하고 있다(De Sousa et al., 2012; Eckart et al., 2017). 우리나라 또한 “물순환 선도도시 조성사업”을 통해 일부 도시에 대해 LID를 시범적으로 도입하고 있다.

LID의 효율성은 수문학적인 개선효과와 오염물질의 저감에 대한 성능평가를 통해 이루어진다(U. S. EPA., 2000). 특

히, 모델링은 LID의 적용에 따른 효과를 살펴보기 위한 유용한 방법이다(Ahiablame et al., 2012; Artina et al., 2005). 일반적으로 LID 모델링에는 EPA-SWMM (Storm Water Management Model), Sytem for Urban Stormwater Treatment and Analysis Integration(SUSTAIN), Western Washington Hydrologic Mode 1 (WWHM) 등이 주로 이용되고 있다. 많은 연구에서 측정 자료를 기반으로 컴퓨터 모델링을 통해 LID의 적용에 따른 수문 및 수질측면의 개선 효과를 살펴본바 있다(Ahmed et al., 2017; Akhter et al., 2016; Freni et al., 2010; Liao et al., 2015; Tao et al., 2017; Xu et al., 2017). 특히, EPA-SWMM은 도시지역의 수문 및 수질 현상을 모의하는데 많이 이용되며, 최근 LID 모듈이 제공되어 LID 시설의 효과를 살펴보는 데 유용하다(U. S. EPA., 2015). EPA-SWMM의 LID 모듈의 이용한 대부분의 연구는 수문학적인 측면(홍수, 유출 등)에서 개선효과를 확인하는데 초점을 맞추고 있다(Abi Ada et al., 2010; Choi et al., 2019; Huang et al., 2014; Jia et al., 2012; Kim and Joo, 2017; Muhaisen et al., 2009; Qin et al., 2013; Yeon et al., 2015). 일부 연구에서 LID 시설의 수질개선효과를 살펴본바 있으나(Cho et al., 2013; Choi et al., 2018; Jia et al., 2012; Lee et al., 2010; Oraei Zare et al., 2012), 대부분 비점오염원에 국한된 연구이며, 비점오염물질과 함께 하천의 수질에 많은 문제를 야기하는 CSOs에 의해 유입되는 오염물질에 대한 LID 시설의 저감효과를 살펴본 연구는 상대적으로 다소 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 부산의 구도심지역을 관통하는 온천천의 배수분구를 대상으로 LID 시설을 설치하였을 경우 기대되는 수문 및 수질 개선효과를 살펴보고자 하였다. 특히, 앞서 언급한 바와 같이 온천천 유역은 오래된 배수시스템으로 인한 CSOs에 의한 수질 악화가 현재 주요한 문제이기에, EPA-SWMM을 이용하여 수문요소뿐만 아니라 비점오염원 및 CSOs 부하량을 추가적으로 모의함으로써 CSOs에 의한 수질오염 저감 측면에서의 LID 시설의 효과 또한 함께 살펴보고자하였다. LID 시설은 수문기상학적인 특성을 비롯하여 다양한 외부조건에 영향을 받기 때문에 LID를 효율적으로 설계하기 위해서는 현장의 고유한 조건을 반드시 고려할 필요가 있다(Johnson and Sample, 2017; Zahmatkesh et al., 2015). 즉, 모델링을 통해 대상지역을 구축하고 매개변수의 보정을 통해 현재의 수문 및 수질현상을 재현함으로써 구축된 모형에 해당 지역의 고유한 특성과 조건을 매개변수로 반영한 후, LID 시설의 설치에 따른 효과를 살펴보는 것이 필요하다. 이를 위해 본 연구의 사전연구인 Kim et al. (2019)에서 온천천 유역의 관측 기상자료, 유량 및 수질 자료를 이용하여 구축된 EPA-SWMM과 LID 시설 설치 시나리오를 기반으로 온천천 배수분구에 다양한 LID 시설(생태저류지, 침투도랑, 투수성포장 시스템)의 모의를 통해 각 시설의 효과 및 비용-효율을 수문학적인 요소(강우유출고, 증발산량, 침투량)와 수질관리적인 요소(비점오염부하량, CSOs 부하량)에 대해 분석하였다.

2. Materials and Methods

2.1 연구대상 유역 및 모형 구축

본 연구는 Kim et al. (2019)의 후속연구로, 부산시 구시가 지역을 관통하는 온천천을 대상으로 연구를 수행하였다. 해당 연구에서는 부산시 도시정보시스템(Urban Information System, UIS) 및 하수도정비기본계획의 자료를 바탕으로 온천천 배수분구를 EPA-SWMM을 이용하여 총 43개의 소유역으로 구성하였다(Fig. 1 참고). 또한, 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 자료인 토지이용도, 정밀토양도 등을 이용하여 소유역별 면적, 불투수면적률, 무차원 유출곡선 지수(Curve Number, CN) 등 소유역별 입력 매개변수를 산출하고 적용하였다. 참고로 토지이용도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복지도를 이용하였으며, 정밀토양도는 국립농업과학원에서 제공하는 자료를 사용하였다. 관망자료는 부산시 하수도정비기본계획과 UIS를 참고하여 하천과 차집관거, 주요 관망을 구현하였다. 정확한 수질 모의를 위해 점오염원 및 유지용수에 따른 총인(Total Phosphorus, TP) 유입 자료를 구축하여 EPA-SWMM의 입력자료로 사용하였다. 특히, CSOs 모의에 필요한 점오염원 입력자료의 경우 부산시 하수도정비기본계획을 참고하여 하수처리분구별 일 평균 계획 오수량을 기준으로 면적 가중 방식으로 할당하여 소유역별로 오수량이 입력되었으며, 오수농도의 경우 공간적 변동성은 없다고 가정하여 하수처리장으로 유입되는 T-P의 농도인 6.4 mg/L가 모든 소유역에 동일하게 적용되었다.

그 후, EPA-SWMM 상의 flow-divider를 이용하여 차집관거의 설계용량을 넘을 경우 CSOs의 모의가 가능하게 하였다. 소유역으로부터 합류식하수관거를 통하여 flow-divider로 유입된 유량(Q_i)은 차집관거의 최대용량(Q_{max})보다 적은 경우(즉, $0 \leq Q_i \leq Q_{max}$)에는 Q_i 가 그대로 차집관거를 통해 하수처리장으로 유입되며, 유량이 차집관거의 최대용량을 초과

할 경우(즉, $Q_{max} < Q_i$)에는 Q_{max} 만큼 차집관거를 통해 하수처리장으로 유입되며, 초과유량(즉, $Q_i - Q_{max}$)은 하천으로 유입되며 이를 CSOs로 정의하였다. 이를 간단히 개념화하여 Fig. 2에 나타내었으며, 보다 자세한 사항은 Jang et al. (2007)을 참고할 수 있다.

2014년부터 2015년까지의 22개의 강우 사상에 대한 관측 유량 이용하여 SWMM과 Matlab을 연계한 모듈을 통해 자동 최적화 기법으로 대상 유역의 수문 매개변수의 보정을 수행하였다. 또한, 2016년부터 2018년까지 14개의 강우 사상에 대한 관측 유량을 이용하여 수문 매개변수의 검증이 수행되었다. 수질 매개변수의 경우 2013년 8월부터 2017년 8월까지 15개 강우사상에서 관측된 TP 농도와 유량자료를 이용하여 보정이 수행되었다. 사용된 강우사상에 대한 정보를 Table 1에 정리하여 나타내었으며, 해당 연구의 수문 및 수질 검 · 보정 결과를 Table 2와 Fig. 3에 나타내었다. 참고로, Table 2에서 제시되는 f_W 는 소유역의 폭에 대한 조정계수, f_{CN} 은 소유역별 CN 조정계수, $f_{B_{max}}$ 는 토지이용별 TP의 최대

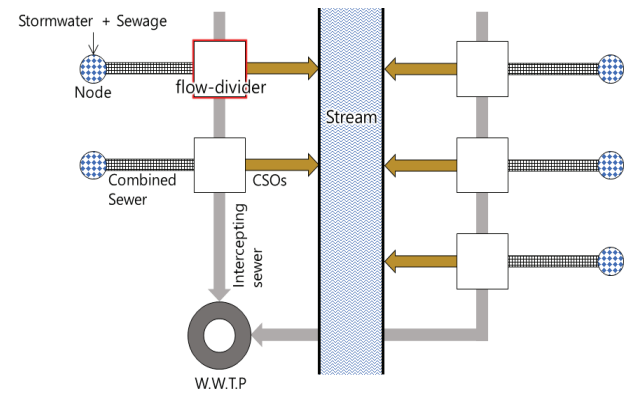


Fig. 2. Conceptualization of flow network for CSOs modeling in EPA-SWMM.

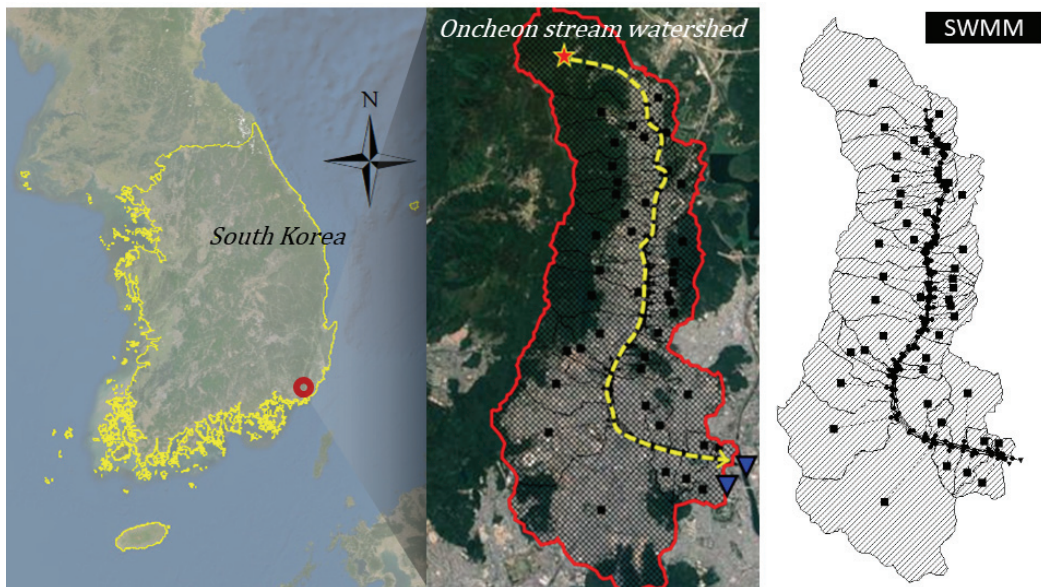


Fig. 1. Configured EPA-SWMM for study drainage catchment (Kim et al., 2019).

Table 1. Number of rainfall event according to the range of rainfall

Where to use	Period	0-20 (mm)	20-40 (mm)	40-60 (mm)	60-80 (mm)	Over 80 (mm)
calibration of stormwater depth	2014-2015	4	8	4	4	2
verification of stormwater depth	2016-2018	7	3	3	1	0
calibration of water quality	2013-2017	3	5	5	1	1

Table 2. Calibrated parameters for hydrology and water quality

Parameters	Hydrology parameters			
	f_W (coefficient)	f_{CN} (coefficient)	$d_{s(perv)}$ (mm)	$d_{s(imperv)}$ (mm)
Value	2.0	0.450	4.0	1.5
Parameters	Water quality parameters			
	f_{Bmax} (coefficient)	K_B (/day)	f_{EMC} (coefficient)	
Value	4.7578	0.98135	1.25	

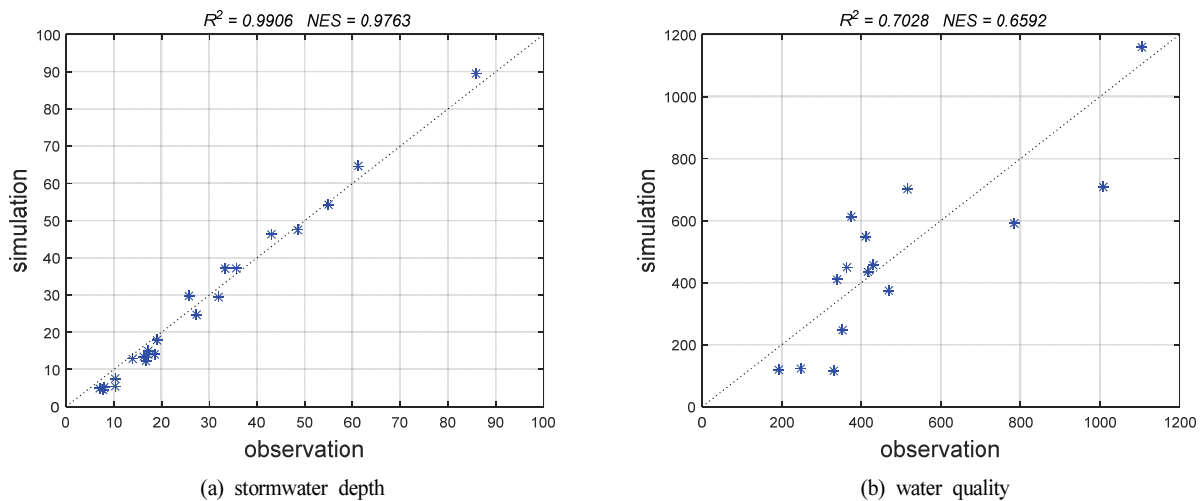


Fig. 3. Hydrology (stormwater depth) and water quality (TP load) calibration results (Kim et al., 2019).

축적량에 대한 조정계수, f_{EMC} 는 토지이용별 Event Mean Concentration (EMC)에 대한 조정계수로 각 조정계수의 보정을 통해 소유역 또는 토지이용별로 EPA-SWMM 내의 매개변수를 일괄적으로 보정하여 작은 값은 상대적으로 작게 보정이 되고, 큰 값은 상대적으로 크게 보정이 되도록 하였다. 이 외에 $d_{s(perv)}$, $d_{s(imperv)}$ 는 각각 투수지역과 불투수지역의 지면저류고(mm)이며, K_B 는 TP의 축적상수(/day)이다. 모형 구축 및 검·보정에 대한 보다 자세한 사항은 Kim et al. (2019)을 참고할 수 있으며, 위의 과정을 통해 최종적으로 구축 및 보정된 모형을 이용하여 본 연구를 수행하였다.

2.2 LID 시설의 적용

본 연구에서는 사전에 구축된 온천천 모델에 LID 시설을 적용하였을 때 기대되는 수문 및 수질 개선 효과를 확인하고자 하였다. EPA-SWMM에서 제공하는 LID 시설은 생태저류지, 식생지붕, 침투도랑, 투수성포장, 식생수로 등 총 8 종류가 있으며(U. S. EPA., 2015), 본 연구에서는 그 중 생태저류지 (Bio-retention cell), 침투도랑(Infiltration trench), 투수성포장

(Permeable pavement system)을 적용하여 효과를 살펴보았다.

2.2.1 표준 LID 시설 매개변수 설정

EPA-SWMM에서 생태저류지는 지표층, 토양층, 저장층으로, 침투도랑은 지표층과 저장층, 투수성포장은 지표층, 포장층, 토양층, 저장층으로 구성된다(Table 3 참조). Choi et al. (2019)에서는 다수의 문헌으로부터 종합된 생태저류지와 침투도랑 등의 LID 시설에 대한 표준 매개변수를 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 해당 논문에서 제시된 값을 생태저류지와 침투도랑의 표준 매개변수로 설정하였다. 투수성포장의 경우 Jato-Espino et al. (2016), Zhang and Guo (2015)을 참고하여 표준 매개변수를 선정하였다. 각 시설의 표준 매개변수를 Table 3에 나타내었다.

Table 3에서 주의해서 살펴볼 사항은 공극률이다. 생태저류지의 토양층과 저장층, 침투도랑의 저장층의 공극률 중에서 생태저류지 토양층의 공극률이 가장 큰 것으로 조사되었다. 일반적으로 입자가 작고 고를수록 공극률이 작다고 생각하기 쉽지만, 입자의 크기보다는 입자의 크기가 다양할수록

Table 3. Major design parameter for each LID facility

LID type	Parameters		Value	Unit
Bio-retention cell	Surface	Berm Height	300	mm
		Vegetation Volume Fraction	0	-
		Surface Roughness	0	-
		Surface Slope	0	%
	Soil	Thickness	600	mm
		Porosity	0.45	-
		Field Capacity	0.30	-
		Wilting Point	0.15	-
		Conductivity	50	mm/hr
		Conductivity Slope	46.9	-
		Suction Head	61.3	mm
	Storage	Thickness	300	mm
		Void Ratio (Voids/Solids)	0.625	-
		Seepage Rate	4	mm/hr
		Clogging Factor	0	-
Drain	Coefficient	0.23094	-	
	Exponent	0.5	-	
	Offset Height	300	mm	
Infiltration trench	Surface	Berm Height	0	mm
		Vegetation Volume Fraction	0	-
		Surface Roughness	0	-
		Surface Slope	0	%
	Storage	Thickness	1,500	mm
		Void Ratio (Voids/Solids)	0.4	-
		Seepage Rate	4	mm/hr
	Drain	Clogging Factor	0	-
		Coefficient	0.23094	-
		Exponent	0.5	-
Permeable pavement system	Surface	Offset Height	300	mm
		Berm Height	1.5	mm
		Vegetation Volume Fraction	0	-
		Surface Roughness	0.015	-
	Pavement	Surface Slope	1	%
		Thickness	200	mm
		Void Ratio	0.16	-
		Impervious	0	-
	Soil	Permeability	254	mm/hr
		Thickness	30	mm
		Porosity	0.40	-
		Field Capacity	0.062	-
		Wilting Point	0.024	-
		Conductivity	2540	mm/hr
		Conductivity Slope	48	-
Storage	Suction Head	50	mm	
	Thickness	450	mm	
	Void Ratio (Voids/Solids)	0.63	-	
	Seepage Rate	4	mm/hr	
Drain	Clogging Factor	0	-	
	Coefficient	0.23094	-	
	Exponent	0.5	-	
Offset Height	300	mm		

공극률이 작다. 따라서 주로 자갈로 구성된 침투도랑의 저장층이 입자 크기가 비교적 큰 자갈 사이에 작은 입자가 채워지기 때문에 공극률이 가장 작게 된다.

LID 시설은 시설별로 선호되는 설치위치와 차집, 배수, 저류 등의 수문기작 및 특성에 차이가 있기에 적정 시설면적과 그에 따라 시설이 수용할 수 있는 영향면적이 다르다. 따라서 본 연구에서는 다수의 문헌을 조사하여 시설별로 표준 시설면적 및 영향면적을 설정하였다. Kim et al. (2019)에서는 다수의 문헌으로부터 생태저류지의 영향면적이 500 m² - 4,000 m²으로 제시되고 있으며 영향면적의 4%를 생태저류지의 시설면적으로 설계하고 있음을 확인하였다. 따라서 영향면적 2,000 m²을 기준으로 생태저류지 시설면적은 80 m²로 설정되었으며, 이를 표준 생태저류지 1 unit로 규정하였다. 이와 같이 본 연구에서도 생태저류지 외 침투도랑과 투수성포장의 표준 시설면적과 영향면적을 규정하기 위해 문헌조사를 수행하였다(RC, 2011; U. S. EPA., 2015; VWRRC, 2013; WMS, 2008). 침투도랑은 200 m²에서 8,000 m²가 영향면적으로 제시되고 있으며, 또한 시설면적은 영향면적의 3%로 권장된다. 따라서 표준 침투도랑 1 unit을 영향면적 4,000 m²을 기준으로 120 m²의 시설면적으로 규정하였다. 투수성 포장의 영향면적은 최소 25 m²부터 다양하게 제시되고 있으나, 시설면적과 영향면적은 1:2의 비율로 설치할 것이 권장된다. 따라서 일반적인 주차장 크기인 500 m²을 시설면적으로 가정하여, 영향면적을 1,000 m²으로 설정하여 이를 투수성 포장의 1 unit으로 규정하였다.

2.2.2 LID 시설 표준 용량 및 소요 비용 산정

LID 시설들의 적용에 앞서 표준 LID 시설들의 강우유출수 처리용량과 비용을 계산하였다. 각 시설의 처리용량은 시설의 저장용량과 침투에 의해 확보된 용량의 합으로 계산할 수 있다. 이는 앞서 규정된 각 시설의 표준 매개변수로부터 산정할 수 있다.

시설의 저장용량은 시설 각 층의 공극을 고려한 유효저류용량으로 설명할 수 있다. 예를 들어, 지표층, 토양층, 저장층으로 구성된 생태저류지의 저류용량은 지표층의 저장공간(300 mm × 80 m²), 토양층의 공극(600 mm × 0.45 × 80 m²), 저장층의 공극(300 mm × [0.625/(1+0.625)] × 80 m²)의 합으로 계산된다.

침투에 의해 확보된 용량은 시설에서 기존 토양으로 침투되는 침투능에 평균 강우지속시간을 곱하여 산정할 수 있다. 기존토양으로의 침투능은 앞서 표준제원에 적용된 4.0 mm/hr을 적용하였다. Kim et al. (2019)에서는 기상청 부산지점의 최근 10년 동안의 강우자료의 분석을 통해 평균 강우

지속시간을 4-시간으로 산정하였으며, 본 연구에서도 이를 이용하였다. 예를 들어, 표준 시설면적이 80 m²인 생태저류지의 경우, 침투에 의해 확보할 수 있는 용량은 4.0 mm/hr × 4 hr × 80 m²로 계산될 수 있다.

본 연구에서 적용된 LID 시설들의 처리용량을 Table 4에 정리하였다.

또한, 각 시설의 비용 대비 효율을 살펴보기 위해 각 시설별 소요비용을 산정하였다. LID 시설의 처리용량에 따른 소요비용은 Eq. (1)과 같이 계산할 수 있다(CRWA, 2010; U. S. EPA., 2016).

$$C = V \times c \times f \tag{1}$$

여기서, C는 LID 시설의 소요비용(\$), V는 LID 시설의 처리용량(m³), c는 처리용량 당 소요비용(\$/m³), f는 LID 시설이 설치되는 지역의 개발 정도에 따른 조정계수이다. U. S. EPA. (2016)에서는 LID 시설의 저장용량에 따른 설치비용을 생태저류지의 경우 545.96 \$/m³, 침투도랑은 441.08 \$/m³, 투수성포장은 187.87 \$/m³로 제시하고 있다. 이를 이용하여 각 시설의 1 unit 당 소요비용을 산정하였다. 이 때, 앞서 산정된 각 시설별 처리용량이 이용되었으며, 개발된 지역에서 새롭게 설치되는 LID 시설에 해당하는 조정계수(f = 2.0)을 적용하였다. 따라서 각각의 표준 LID 시설 1 unit에 소요되는 비용은 생태저류지 6,960 만원, 침투도랑 5,349 만원, 투수성포장 4,932 만원으로 산정되었다. 참고로 계산에 활용된 환율은 Kim et al.(2019)과 동일하게 1,137 원이 적용되었다.

2.2.3 LID 시설 설치 시나리오 구성 및 모의

도시화에 따라 왜곡된 수문현상과 수질의 악화 개선을 목적으로 LID 시설을 설치하기 위한 전략을 수립하기 위해서는 시설의 규모, 설치가능 위치 및 재정 여건 등을 고려해야 한다. 미국 뉴욕시에서는 2002년부터 Green Infrastructure Plan을 통해 뉴욕시 전역에 LID 시설을 설치하기 위한 계획을 장기기간에 걸쳐 진행 중에 있다(NYC-DEP, 2017). 해당 프로젝트의 주요 목표는 토지이용도 대분류 기준으로 대지의 10%에 해당되는 면적에서 발생하는 강우유출수 1 inch (25.4 mm)를 LID 시설로 차집하는 것이다.

본 연구에서는 이를 참고하여 온천천 배수분구 대지면적 10%에서 발생하는 강우유출수 1 inch를 저감하기 위해 필요한 LID 시설 unit 수를 산정해보았다. 온천천 배수분구의 총 면적은 56,280,000 m²이며, 대지면적은 27,575,847 m²이다. 여기서 대지면적은 대분류 토지피복지도를 기준으로 대지로 분류되는 면적을 의미하며, 본 연구에서 사용된 중분류를 기

Table 4. Treatment capacity of each LID facility

LID type	Storage capacity (m ³)				Infiltration capacity (m ³)	Treatment capacity (m ³)
	surface	pavement	soil	storage		
bio-retention cell	24.00	-	21.60	9.20	1.28	56.08
Infiltration trench	-	-	-	51.43	1.92	53.35
Permeable pavement	0.75	13.79	6.00	86.96	8.00	115.50

Table 5. LID facilities installation scenario in Oncheon stream watershed

Scenarios	Subcatchment No.	Bio-retention cell		Infiltration trench		Permeable pavement	
		No. of LID facilities (unit)	Cost (100 million ₩)	No. of LID facilities (unit)	Cost (100 million ₩)	No. of LID facilities (unit)	Cost (100 million ₩)
A	39, 40	35.7	24.8	37.5	20.0	17.3	8.5
B	36, 38, 41	82.6	57.5	86.8	46.4	40.1	19.8
C	36, 38, 39, 40, 41	118.3	82.3	124.3	66.5	57.4	28.3
D	34, 37, 39, 40	140.1	97.5	147.3	78.8	68.0	33.5
E	34, 36, 37, 38, 39, 40, 41	222.7	155.0	234.1	125.2	108.1	53.3
F	Full installation	1236.3	860.4	1299.5	695.1	600.3	296.1

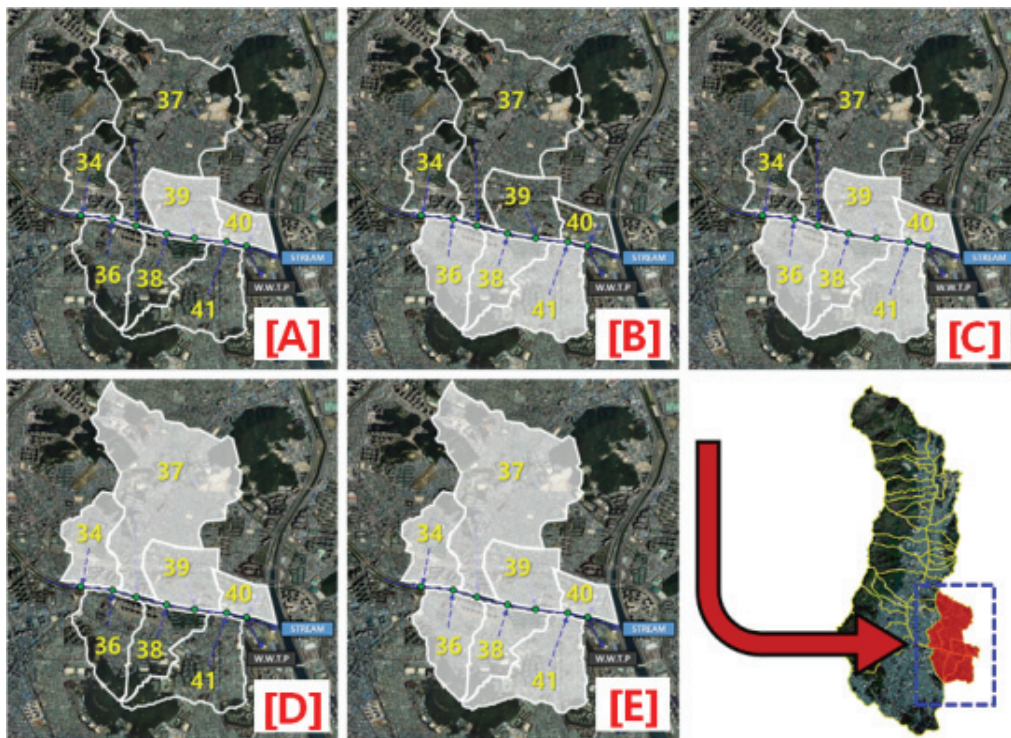


Fig. 4. Selected subcatchments for study scenarios.

준으로 주거지역, 상업지역, 공업지역, 공공시설지역, 교통지역, 위락시설지역이 포함된다. 목표 차집 강우유출수량은 대지면적의 10%에 1 inch의 강우유출수를 곱한 값으로 총 70,043 m³이다. 이를 표준 LID 시설의 1 unit 당 처리용량으로 나누면 온천천 유역에 설치되어야 하는 각 LID 시설별 unit 개수를 산정할 수 있다. 따라서 생태저류지는 총 1,236 unit, 침투도랑은 총 1,300 unit, 투수성포장을 설치할 경우에는 총 600 unit이 설치되어야 한다.

그러나 앞서 산정한 1 unit 당 소요비용을 이용하여 총 비용을 계산할 경우, 각각 860억 원, 695억 원, 296억 원으로, 재정여건을 감안한다면 매우 큰 비용이 요구되는 것을 알 수 있다. 따라서 비용대비 효율을 고려하여 우선적으로 LID 시설이 설치되어야 할 소유역을 판별할 필요가 있다. Kim et al. (2019)에서는 생태저류지의 비용-효율적인 측면을 고려하여 물순환 개선 효과를 극대화하기 위해서 대지면적의 비율이 높은 유역 최하류에 위치한 7개의 소유역을 대상으로

LID 시설 설치 사업의 시나리오를 작성하였다(Table 5 및 Fig. 4). 참고로, 시나리오 별로 설치되어야 하는 LID 시설의 unit 개수를 산정하기 위하여, 사용된 7개 소유역 각각의 대지면적을 이용하여 위와 동일한 방법으로 각 소유역별 LID 시설의 unit 개수를 산출하였다. Table 5에 제시된 시나리오 별 LID 시설에 따른 unit 개수는 각 시나리오에서 고려된 소유역들의 LID 시설별 unit 개수를 합산한 값이다.

본 연구에서도 동일한 시나리오를 이용하여 생태저류지 외 침투도랑과 투수성포장 시설을 설치하였을 때 기대할 수 있는 수문학적 요소 및 수질관리적 요소의 개선 효과를 살펴보고, 비용-효율적인 측면도 함께 살펴보았다. 이때, 수문학적이 요소로 강우유출고, 증발산량, 침투량과 함께 각 LID 시설의 물순환 개선효과를 보다 직관적으로 확인하기 위해 강수량에서 증발산량과 침투량 합을 확인할 수 있는 물순환 지수(Hydrologic Cycle Index, HCI)를 정의하여 살펴보았다(Table 6). HCI는 습윤량/강수량으로 정의되며, 습윤량

Table 6. HCI for each LID facility

Scenarios		A	B	C	D	E	F
w/o LID facility		0.049	0.121	0.099	0.120	0.121	0.273
bio-retention cell	after installation	0.073	0.144	0.123	0.143	0.144	0.287
	change rate (%)	▲ 48.71	▲ 19.35	▲ 23.62	▲ 19.15	▲ 19.22	▲ 4.87
infiltration trench	after installation	0.084	0.155	0.134	0.155	0.155	0.293
	change rate (%)	▲ 72.02	▲ 28.65	▲ 34.96	▲ 28.33	▲ 28.45	▲ 7.21
permeable pavement	after installation	0.069	0.140	0.119	0.140	0.140	0.285
	change rate (%)	▲ 41.00	▲ 16.18	▲ 19.79	▲ 16.14	▲ 16.15	▲ 4.17

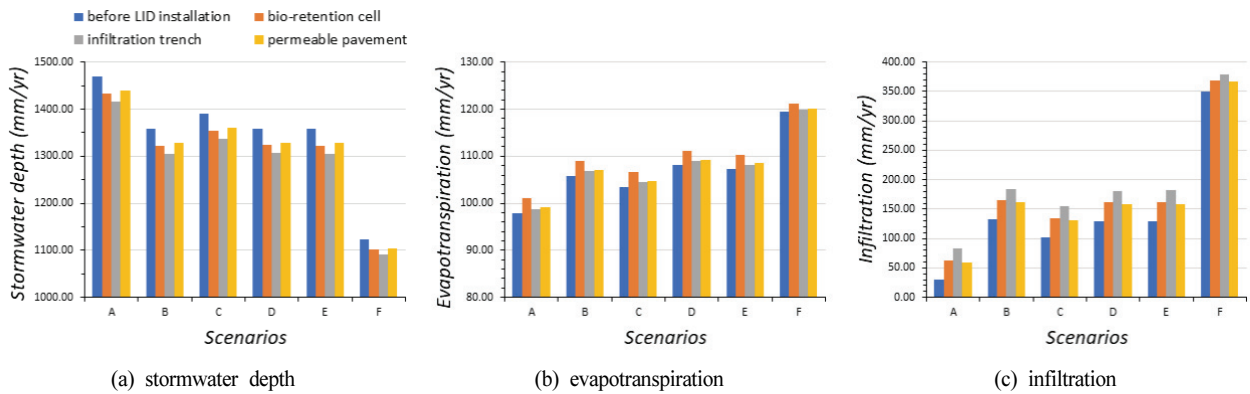


Fig. 5. Responses of hydrologic components to each LID facility.

은 증발산량과 지하로 침투된 물의 양을 합한 것이다. HCI가 높을수록 유역에서 증발산 및 침투가 활발히 일어남을 의미한다. 수질관리적인 요소로는 비점오염 부하량 및 CSOs 부하량을 모의하여 살펴보았다.

3. Results and Discussion

3.1 물순환 및 수질 개선효과

본 연구에서는 구축된 EPA-SWMM을 이용하여 기상청 부산지점의 최근 10년 강수량과 증발산자료를 입력하여 LID 시설 설치 전 온천천 배수분구의 물순환 요소(강우유출고, 증발산량, 침투량)와 수질 요소(비점오염부하량, CSOs 부하량)들을 모의하였다. 이를 기준으로 각 LID 시설을 앞서 구성된 시나리오에 따라 설치하여 모의된 결과를 이용하여 시나리오에 따른 LID 시설별 개선효과를 살펴보았다(Fig. 5).

각 시나리오별 결과는 해당 시나리오의 소유역들의 지표를 면적가중 평균하여 산정하였다. 전체 소유역에 LID 시설이 설치되는 시나리오 F를 제외한 모든 시나리오에서 생태저류지는 설치 전후로 강우유출수를 평균 2.6%, 침투도량은 3.9%, 투수성포장은 2.2% 저감할 것으로 분석되었으며, 증발산량은 각각 2.9%, 0.8%, 1.2% 정도 증가하는데 기여할 것으로 나타났다. 또한, 침투량은 각각 시나리오 별로 다양한 증가율을 나타냈지만, 일반적으로 침투도량, 생태저류지, 투수성포장 순으로 높은 증가율을 보여주었다.

시나리오별로 각 LID 시설의 물순환 개선효과를 직관적으

로 확인하기 위해 강수량에서 증발산량과 침투량 합을 확인 할 수 있는 물순환 지수 살펴보았다(Table 6). Table 6에서 확인할 수 있듯이, 시설별로 비교하였을 때, 모든 시나리오에서 침투도량이 다른 시설과 비교하여 월등히 높은 개선효과를 나타내고 있었으며, 생태저류지와 투수성포장은 비슷한 효과를 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 이는 동일한 처리용량을 가지더라도 침투도량은 자갈로 채워진 저류층으로 강우유출수가 직접적으로 유입되어 저류공간을 충분히 활용하는 반면, 토양층 또는 포장층 등을 거쳐 유입되는 생태저류지와 투수성포장의 경우 시설에 사용되는 토양 또는 포장재의 투과율과 지역의 강우특성 등에 따라 저류층의 공극을 활용하지 못하는 경우가 발생함에 따른 결과로 판단된다.

LID 시설의 설치에 따른 수질 개선효과는 TP를 대상으로 비점오염부하량과 CSOs 부하량의 변화를 비교하여 살펴보았다. 비점오염부하량은 소유역별 모의결과로부터 확인하여 합산하였으며, CSOs 부하량은 EPA-SWMM에서 설정된 차집관개의 flow-divider에서 발생하는 CSOs 부하량을 별도로 계산하여 결과를 분석하였다. LID 시설 설치에 따른 비점오염물질 및 CSOs 부하량의 변화를 Table 7과 8에 나타내었다.

비점오염부하량과 CSOs 부하량의 경우, 시나리오 A에서 F 순으로 LID 시설의 저감 성능이 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 단순히 시나리오 A에서 F 순으로 설치되는 LID 시설이 많기 때문이다(Table 5 참고). LID 시설이 많이 설치될수록 부하량 저감 효과 또한 뚜렷하게 증가한다. 앞서 HCI와 동일하게 수질 개선측면에서도 침투도량이 가장 높은 저감 성능을 보여주었다. 침투도량에 이어 생태저류지가 좋은

Table 7. Reduction of non-point source pollution loadings for each LID facility

Scenarios		A	B	C	D	E	F
w/o LID facility		481.67	894.51	1,376.18	1,629.13	2,523.64	15,595.19
bio-retention cell	after installation	461.93	854.45	1,316.38	1,557.60	2,412.05	15,071.97
	reduction	▼ 19.74	▼ 40.06	▼ 59.80	▼ 71.53	▼ 111.59	▼ 523.22
infiltration trench	after installation	450.58	831.00	1,281.58	1,516.19	2,347.19	14,767.91
	reduction	▼ 31.10	▼ 63.51	▼ 94.60	▼ 112.94	▼ 176.45	▼ 827.28
permeable pavement	after installation	466.52	864.53	1,331.05	1,575.06	2,439.59	15,198.17
	reduction	▼ 15.15	▼ 29.98	▼ 45.13	▼ 54.07	▼ 84.05	▼ 397.02

Table 8. Reduction of CSOs loadings for each LID facility

Scenarios		A	B	C	D	E	F
w/o LID facility		748.52	1,569.48	2,318.00	2,679.31	4,248.79	28,285.69
bio-retention cell	after installation	724.72	1,502.13	2,226.86	2,572.25	4,074.39	27,240.78
	reduction	▼ 23.80	▼ 67.34	▼ 91.14	▼ 107.06	▼ 174.40	▼ 1044.91
infiltration trench	after installation	708.45	1,445.80	2,154.25	2,485.22	3,931.02	26,349.61
	reduction	▼ 40.07	▼ 123.68	▼ 163.75	▼ 194.10	▼ 317.78	▼ 1936.08
permeable pavement	after installation	733.14	1,533.89	2,267.03	2,617.32	4,151.21	27,751.37
	reduction	▼ 15.38	▼ 35.58	▼ 50.96	▼ 62.00	▼ 97.58	▼ 534.32

성능을 나타내고 있으며, 투수성포장은 가장 낮은 저감량을 나타내었다. 특히, CSOs 부하량은 LID 시설의 강우유출수 저감 효과와 증첩되어 비점오염부하량 저감 효과보다 상대적으로 높은 저감 성능을 나타내고 있음을 살펴볼 수 있다.

현재까지의 결과를 종합하여 판단하였을 때, 예산이 충분할 경우 물순환 및 수질을 개선하기 위해서는 침투도랑을 위주로 설치하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단된다. HCI를 통한 개선 효과, 비점오염물질 부하량 및 CSOs 부하량 저감량 모두 세 종류의 LID 시설 중에서는 가장 우수한 성능을 나타내었다. 그 뒤로는 생태저류지가 두 번째로 좋은 성능을 나타냈으며, 투수성 포장의 성능은 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

3.2 비용을 고려한 LID 시설의 효율

앞서 비용을 고려하지 않고 동일한 용량으로 설치할 경우 본 연구에서 고려한 세 종류의 LID 시설 중에서는 침투도랑

이 가장 큰 성능을 나타냈음을 살펴보았다. 그러나 재정 여건은 한정되어 있기에 비용-효율적인 측면을 고려한 시설의 효율을 살펴볼 필요가 있다. Table 9에 각 시설별로 비용(1억 원)대비 효과를 산정한 결과를 나타내었다.

시나리오별로 각 시설의 효율을 살펴보았을 때 모든 시설이 시나리오 A로 설치되었을 경우 가장 우수한 물순환 개선 효과를 나타냈다. 반면, 시나리오 F에서는 물순환 개선효과가 가장 낮게 나타났으며, 이는 효율이 좋지 못한 소유역까지 모두 LID 시설이 설치되었기 때문이다. 하지만, 시나리오 F는 효율을 위한 시나리오가 아닌 온천천 배수분구 전체의 물순환 개선을 위한 최종목표 시나리오이며, 절대적인 개선 효과는 다른 시나리오에 비해 높다는 것을 숙지하여야 한다.

비용을 고려할 경우는 LID 시설 중 투수성포장이 가장 효율적인 방안으로 나타났다. 시나리오 F를 기준으로 1억 원을 투입하여 투수성 포장을 설치할 경우 물순환 지수는 0.014 % 증가, 비점오염물질 부하량은 연간 1.341 kg 저감되어 타

Table 9. Cost efficiency of each LID facility for hydrologic and water quality components

Scenarios		A	B	C	D	E	F
Change rate of HCI (%)	bio-retention cell	▲ 1.963	▲ 0.337	▲ 0.287	▲ 0.196	▲ 0.124	▲ 0.006
	infiltration trench	▲ 3.593	▲ 0.617	▲ 0.526	▲ 0.360	▲ 0.227	▲ 0.010
	permeable pavement	▲ 4.802	▲ 0.818	▲ 0.699	▲ 0.481	▲ 0.303	▲ 0.014
Non-point source pollution loading reduction (kg/yr)	bio-retention cell	▼ 0.796	▼ 0.697	▼ 0.727	▼ 0.734	▼ 0.720	▼ 0.608
	infiltration trench	▼ 1.551	▼ 1.367	▼ 1.423	▼ 1.434	▼ 1.409	▼ 1.190
	permeable pavement	▼ 1.774	▼ 1.515	▼ 1.594	▼ 1.612	▼ 1.576	▼ 1.341
CSOs loading reduction (kg/yr)	bio-retention cell	▼ 0.959	▼ 1.171	▼ 1.107	▼ 1.098	▼ 1.125	▼ 1.214
	infiltration trench	▼ 1.999	▼ 2.663	▼ 2.463	▼ 2.464	▼ 2.538	▼ 2.785
	permeable pavement	▼ 1.802	▼ 1.799	▼ 1.800	▼ 1.848	▼ 1.830	▼ 1.805

시설에 비해 효율적인 것으로 나타났다. 반면 CSOs 부하량 저감만을 목적으로 할 경우에는 침투도랑의 설치가 효율적임을 알 수 있다. 이는 Table 8에서 확인 할 수 있듯이, CSOs 부하량 저감에 있어서 침투도랑이 타 시설에 비해 월등히 높은 효과를 나타내기 위해 비용을 고려하더라도 침투도랑이 CSOs 부하량 저감에는 가장 효과적인 것으로 판단된다.

3.3 LID 시설의 저류기능

앞서 분석한 결과로 확인할 수 있듯 LID는 도시지역의 물순환 및 수질 개선을 위한 유용한 방안이다. 이미 LID의 이러한 개선효과는 물론 환경적, 경제적인 이익을 창출하는데 효과적임을 다수의 논문을 통해 검증되어 왔다(Fenner, 2017; Liao et al., 2015; Liu, Bralts et al., 2015). 특히 본 연구에서 온천천 배수분구를 대상으로 LID 시설의 성능을 확인하였을 때, 성능적인 측면만을 고려할 경우 타 시설과 비교하여 침투와 저류기능을 온전히 활용할 수 있는 침투도랑이 월등한 성능을 나타내었다.

생태저류지와 투수성포장에 비해 침투도랑의 성능이 높은 것은 시설의 처리용량 회복속도와 관련이 있다. 건조한 조건에서 단일 강우사상에 의한 시설의 유입과 유출 실측자료만을 살펴볼 경우 생태저류지 토양층의 저류 능력으로 인하여 생태저류지의 성능이 더 우수하게 도출되는 경우가 발생될 수도 있을 것이다. 이는 생태저류지 토양층이 물을 더 오래

잔류시킬 수 있기 때문이다. 그러나 이는 단일한 강우사상에 대한 결과이며, 장기간의 연속적인 강우유출과정에서는 오히려 생태저류지가 처리용량을 회복하는데 소요되는 시간이 길어진다는 것을 의미한다. Fig. 6은 41번 소유역(Fig. 4 참고)에 설치된 동일한 처리용량을 가진 생태저류지와 침투도랑 내 물의 평균적인 거동을 살펴본 것이다. 생태저류지의 경우(Fig. 6a), 앞서 발생한 강우에 의해 시설로 유입된 물이 지속적으로 시설 내에 잔류하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 유입수가 토양층을 통해 전량이 저장층으로 이동하는 것이 아닌, 일정량은 흙의 보수성에 의해 토양층 내에 잔류하며 증발산만을 통해 서서히 시설의 용량을 회복하고 있음을 표현한다. 반면, 토양층이 없는 침투도랑은 소유역에서 발생한 강우유출수의 전량이 저장층으로 유입되어 일정기간 저류하면서 원토양으로 침투되며, 상대적으로 시설의 용량 회복속도가 빠름을 확인 할 수 있다(Fig. 6b). 참고로, Fig. 6에서 시설 내 물이 포화되지 않는 것으로 보이는 이유는 해당 시간마다 침투 또는 드레인 유출, 증발산 등에 의해 수위가 감소했기 때문이다.

단, 본 연구에서는 기존토양으로 침투된 양은 지하수를 통해 하천으로 유입되기까지엔 상당한 시간이 소요될 것으로 판단하여 침투된 양은 시설에 의해 처리된 것으로 가정하였다. 따라서 침투된 양 또한 시설의 처리용량에 포함되었으며, 시설로 유입된 물은 조건에 따라 월류 또는 드레인유출로 다

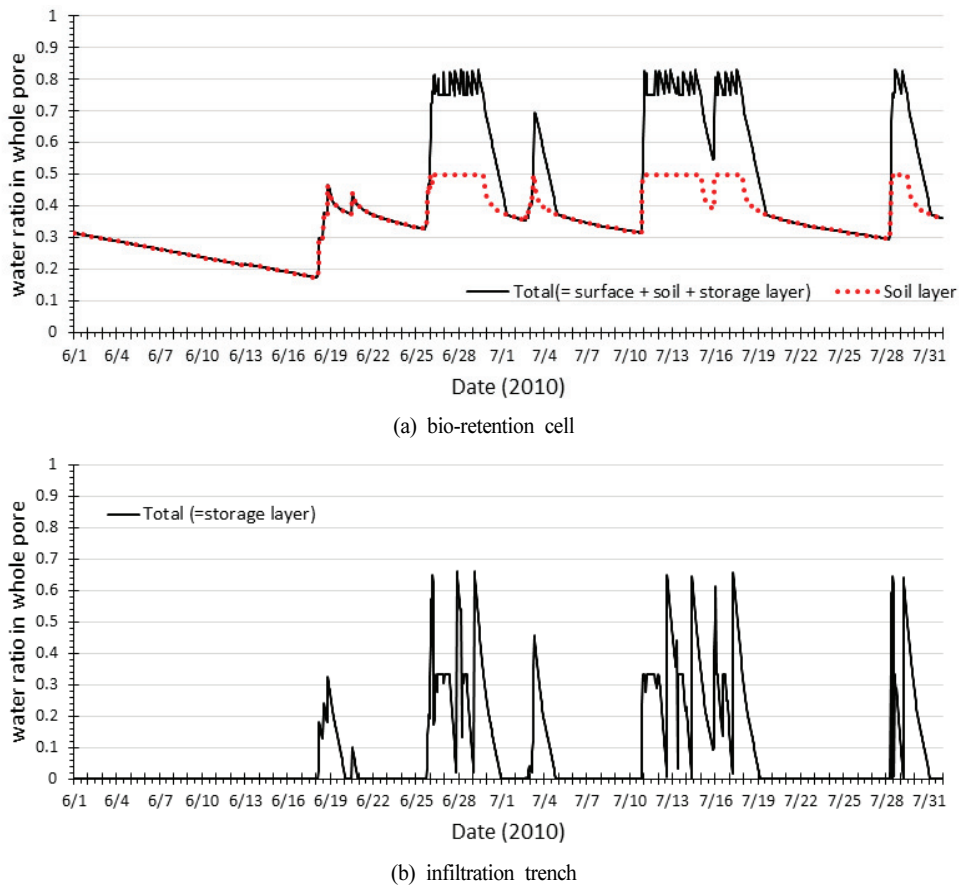


Fig. 6. Temporal behavior of water ratio in each LID facility.

시 하천으로 유입되는 것만이 고려되었다. 그러나 지하수가 고려될 경우에는 지하수위가 시설에 미치는 영향과 시설에서 침투된 물이 지하수를 통해 하천으로 도달하는 시간 및 유출량 등에 따라 LID 시설들의 성능이 본 연구의 결과와 달라질 수 있기에 보다 자세한 시설의 성능을 분석하기 위해서는 추후 연구를 통해 침투능에 의해 발생하는 지하수까지 고려하는 방안을 살펴볼 필요가 있다.

본 연구의 결과를 토대로 살펴볼 경우, LID 시설의 기능 중 침투기능뿐만 아니라 저류기능 또한 중요한 부분임을 알 수 있다. 그러나 본 연구의 결과를 모든 지역에 대해 일반화하기에는 무리가 있다. Kim and Joo (2017)에서는 연평균 강우유출수 저감율이 생태저류지 39.8%, 침투도랑 66.8%, 투수성포장은 38.6%로 나타나 시설별 절대적인 성능은 본 연구의 결과와 차이를 보였지만, 시설간의 상대적인 성능은 본 연구와 유사한 결과를 제시하였다. Joksimovic and Alam (2014)에서도 PCSWMM을 이용하여 캐나다 런던시를 대상으로 생태저류지, 침투도랑, 투수성포장, 식생수로, 옥상녹화, 빗물통의 효과를 살펴본바있으며, 강우유출수 저감효과를 살펴볼 경우 침투도랑, 생태저류지, 투수성포장 순으로 효과를 나타내었다. 반면, Huang et al. (2014)에서는 투수성포장이 가장 높은 강우유출수 저감성능을 나타내었으며, 침투도랑 및 생태저류지 순으로 저감성능을 나타내었다. 서론에서 언급한 바와 같이 LID 시설은 지역의 수문기상학적특성 및 조건에 많은 영향을 받는다. 또한 침투강우 발생위치와 같은 강우패턴에 따라 LID 시설간의 상대적인 성능 또한 다르게 나타날 수 있다(Qin et al., 2013). 즉, 어느 배수분구를 대상으로 하느냐에 따라 LID 시설별 성능에 차이를 나타낼 가능성이 있으며, 따라서 본 연구의 결과 또한 온천천 배수분구 또는 이와 비슷한 수문기상학적 특성을 가지는 지역에 한정된 결과일 것이다.

그러나 기후변화에 따라 증가할 것으로 예상되는 강우와 그에 따른 강우유출수를 통제하기 위해서는 LID 시설의 저류기능이 더욱 강조될 가능성이 있다. 본 연구에서는 온천천 배수분구만을 대상으로 연구를 수행하였기에 강우특성에 대한 별도의 분석을 수행하지는 않았다. 그러나 LID 시설이 설치되는 강우의 특성은 시설의 효과에 많은 영향을 미친다(Gallo et al., 2012). 특히, 짧은 지속기간에 많은 강우가 발생하는 강우 사상에서는 강우강도가 LID 시설의 침투능력을 월등히 초과할 경우 저류능력의 중요성은 더욱 증가할 것이다. 실제로 Hunt et al. (2008)에서는 40 mm 이하의 강우사상에서 생태저류지의 성능이 현저히 저하됨을 확인한 바 있다. 최근 LID는 기후변화에 따라 예상되는 강우량의 증가를 대비하기 위한 도시지역의 강우유출수 관리 대책으로 거론되고 있다(Eckart et al., 2017). 기후변화에 따라 강우강도가 점차 증가할 것으로 예상하고 있다(IPCC, 2007). 특히, 짧은 지속기간에 높은 강우강도를 가진 강우사상의 발생이 더욱 빈번해 질 것으로 예상되고 있다(Hassanzadeh et al., 2014; Kuo et al., 2015; Yang et al., 2019). 이는 기후변화에 따라 요구되는 LID 시설의 처리용량 또한 증가함을 의미한다. 저류기능이 우수한 침투도랑이 가장 큰 성능을 나타낸 본 연구

의 결과와 함께 이를 살펴보면 LID 시설이 가지는 저류기능은 미래 기후변화에 따라 강우강도의 증가할 경우 그 중요성은 보다 더 커질 수 있음이 유추가능하다. LID 시설의 처리용량은 LID 시설 자체의 용량과 침투능에 따라 결정되나, 침투능은 LID 시설 아래의 기존토양의 특성에 좌우된다. 따라서 높은 강우강도의 강우사상의 발생 증가할수록 침투도랑과 같은 저류기능이 우수한 LID 시설의 활용성이 높아 질 것으로 생각된다.

또한, 앞서 확인한 바와 같이 비용적인 문제를 무시할 수 없을 것이다. 본 연구에서는 비용을 고려하였을 때 투수성포장이 강우유출수를 가장 효율적으로 저감하는 것을 확인하였다. 그러나 성능만을 두고 비교한다면 투수성포장은 침투도랑의 약 절반의 성능을 보이고 있다. LID 시설의 설치가 가능한 지역은 한정되어 있으며, 이는 시설의 비용-효율적인 측면만을 고려한다면 특정 목표치를 달성하는데 한계가 있을 수 있음을 의미한다. 이 밖에도 우리나라에서 LID 시설은 그 자체의 기능뿐만 아니라 조경시설로써 미관적인 기능이 기대되는 부분이 있으며, 이러한 모든 조건들을 고려하기 위해서는 저류를 목적으로 하는 기존의 그레이 인프라와의 연계를 통한 복합적인 관리방안을 고려할 필요도 있을 것이다(Dietz, 2007; Lioa et al., 2015).

4. Conclusion

본 연구에서는 미국 뉴욕시의 Green Infrastructure Plan을 참고하여 목표 저감 강우유출수량을 산정하고, 이를 기반으로 부산시 구도심지역인 온천천 배수분구를 대상으로 LID 시설의 처리용량을 제시하였다. 이를 기반으로 단일 LID 시설을 적용하였을 때 각 시설별 효과 및 효율을 정량화하였다. 이를 위하여 사전에 구축된 부산시 온천천 배수분구의 EPA-SWMM을 이용하였다. 또한 미국 뉴욕시의 Green Infrastructure Plan을 참고하여 온천천 유역의 대지면적 10%에 해당하는 강우유출수 25.4 mm를 목표 저감 강우유출수량으로 설정하였다. 문헌조사를 통해 LID 시설들의 표준제원을 설정하고, 그에 따른 비용을 추정하였다.

각 시나리오에 대해 강우유출수, 증발산량, 물순환 지수, 비점오염부하량, CSOs 부하량을 LID 시설 도입 전후로 계산하여 비교하였다. 그 결과, LID 시설의 적용을 통해 강우유출수의 저감 및 증발산량과 침투량의 증가를 확인하였다. 또한 비점오염물질 부하량과 CSOs 부하량의 저감 효과를 확인하였다. LID 시설에 따른 효과를 살펴보면, 동일한 처리용량을 가지는 시설로 설치하였을 경우, 본 연구에서 적용된 LID 시설 중 침투도랑이 물순환 및 수질 개선에 가장 큰 효과를 나타내었다. 그 다음 생태저류지, 투수성 포장 순으로 확인되었다. 반면 예산의 한정을 고려하여 동일한 비용으로 LID 시설을 설치할 경우 투수성포장이 물순환 개선 및 비점오염부하량 저감에는 가장 높은 효율을 나타내었으며, CSOs 부하량 저감에는 침투도랑이 효율적인 것으로 나타났다. 반면 생태저류지는 비용을 고려한다면 두 시설보다 효율이 낮은 것으로 확인되었다. 따라서 잦은 CSOs 발생으로 인한 하

천의 수질오염이 심각한 온천천의 경우 CSOs 부하량 저감을 목적으로 한다면 침투도랑의 설치가 비용대비 가장 높은 효율을 가질 것이며, 부차적으로 물순환 개선과 비점오염원 저감에 대한 높은 성능 또한 함께 기대할 수 있을 것이다. 그러나 물순환 개선 또는 비점오염원 저감을 주요 목적으로 LID 시설을 설치하고자 할 경우에는 투수성포장이 비용효율 측면에서 가장 우수하지만, 단순 성능 측면에서는 세 시설 중 가장 낮은 성능을 보이기에 적용 시 이를 고려할 필요가 있다. 단, 본 연구에서는 시설별 소요비용 산정에 있어서 US EPA(2016) 등의 문헌을 참고하여 시설의 처리용량만을 고려하며 유지비용과 실제 현장에서 발생할 수 있는 다양한 비용 등은 고려되지 않기에 실제 현장에 적용하는 경우와 다소 차이가 발생할 수 있음을 인지하여야 하며, 소요비용 산정에 대한 보다 정확한 방안을 제시할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 LID 시설 각각의 효과 및 효율을 비교하고자, 단일한 시설이 유역전체에 적용되었을 경우에 대한 시설의 성능을 살펴보았다. 그러나 실제로는 다양한 LID 시설을 복합적으로 고려하기 때문에 실제 사업을 위한 LID 시설의 정확한 효과 또는 효율을 살펴보기 위해서는 LID 시설의 구성에 대한 시나리오를 현장여건에 맞게 설정하여 추가적으로 분석하는 연구가 필요할 것이다. 또한 앞 절에서 언급한 바와 같이 LID 시설은 강우의 특성에 많은 영향을 받으며, 기후변화에 따른 강우특성의 변화가 예상되는 만큼 기후변화 시나리오를 이용하여 기후변화 대응전략으로서의 LID 시설 또는 LID 시설과 기존 그레이 인프라의 연계 시스템의 효과를 살펴보는 것 또한 진행될 필요가 있을 것이다.

Acknowledgement

이 논문은 2019년도 부산녹색환경지원센터의 연구사업비 지원을 받아 연구되었음(19-1-30-33).

References

- Abi Aad, M., Suidan, M., and Shuster, W. (2010). Modeling techniques of best management practices: Rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5, *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 434-443.
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., and Chaubey, I. (2012). Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research, *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(7), 4253-4273. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-012-1189-2>
- Ahmed, K., Chung, E. S., Song, J. Y., and Shahid, S. (2017). Ices in two urbanized watersheds: retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. ial Area of the City of Oslo, Norwaase of Malaysia, *Water*, 9(3), 173. <http://dx.doi.org/10.3390/w9030173>
- Akhter, M., Hewa, G., and Shahid, S. (2016). Effective design and planning specification of low impact development practices using water management analysis module (WMAM): case of Malaysia, *Water*, 8(11), 511. <http://dx.doi.org/10.3390/w8110511>
- Artina, S., Becciu, G., Maglionico, M., Paoletti, A., and Sanfilippo, U. (2005). Performance indicators for the efficiency analysis of urban drainage systems, *Water Science and Technology*, 51(02), 109-118.
- Busan Metropolitan City (BMC). (2019). *Health and environment research institute report*, Busan Metropolitan City, 28(1), 257-265.
- Butler, D. and David, J. W. (2000). *Urban Drainage E & FN* Spon, London, UK.
- Charles River Watershed Association (CRWA). (2010). *Stormwater management plan for spruce pond brook subwatershed*, U. S. Environmental Protection Agency-Region 1.
- Cho, S., Kang, M., Kwon, H., Lee, J. W., and Kim, S. (2013). Evaluation of the effectiveness of low impact development practices in an urban area: non-point pollutant removal measures using EPA-SWMM, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(4), 466-475.
- Choi, J., Lee, O., Kim, Y., and Kim, S. (2018). Improvement of estimation method of load capture ratio for design and evaluation of bio-retention LID facility, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(6), 569-578.
- Choi, J., Lee, O., Lee, J., and Kim, S. (2019). Estimation of stormwater interception ratio for evaluating LID facilities performance in Korea, *Membrane and Water Treatment*, 10(1), 19-28. <https://doi.org/10.12989/mwt.2019.10.1.019>
- Coffman, L. (2000). *Low-impact development design strategies, an integrated design approach*, Prince George's Country, Maryland, Department of Environmental Resource, Programs and Planning Division. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, 841-B-00-003.
- De Sousa, M. R. C., Montalto, F. A., and Spataro, S. (2012). Using life cycle assessment to evaluate green and grey combined sewer overflow control strategies, *Journal of Industrial Ecology*, 16(6), 901-913.
- Dewan, A. (2013). *Floods in a megacity: Geospatial techniques in assessing hazards, risk and vulnerability*, Springer, New York, USA. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5875-9>
- Dietz, M. E. (2007). Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions, *Water, Air, and Soil Pollution*, 186, 351-363.
- Dietz, M. E. and Clausen, J. C. (2008). Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision, *Journal of Environmental Management*, 87(4), 560-566.
- Eckart, K., McPhee, Z., and Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development-A review, *Science of the Total Environment*, 607-608(2017), 413-432.
- Fenner, R. A. (2017). Spatial evaluation of multiple benefits to encourage multi-functional design of sustainable drainage in blue-green cities, *Water*, 9(12), 953.
- Freni, G., Mannina, G., and Viviani, G. (2010). Urban storm-water

- quality management: centralized versus source control, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 268-278.
- Gallo, C., Moore, A., and Wywrot, J. (2012). Comparing the adaptability of infiltration based BMPs to various U. S. regions, *Landscape and Urban Planning*, 106(4), 326-335. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.04.004>
- Hassanzadeh, E., Nazemi, A., Elshorbagy, A. (2014). Quantile-based downscaling of precipitation using genetic programming: Application to IDF curves in Saskatoon, *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(5), 943-955. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000854](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000854)
- Huang, J. J., Li, Y., Niu, S., and Zhou, S. H. (2014). Assessing the performances of low impact development alternatives by long-term simulation for semi-arid area in Tianjin, northern China, *Water Science & Technology*, 70(11), 1740-1745.
- Hunt, W. F., Smith, J. T., Jadlocki, S. J., Hathaway, J. M., and Eubanks, P. R. (2008). Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte, N.C., *Journal of Environmental Engineering*, 134(5), 403-408. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2008\)134:5\(403\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2008)134:5(403))
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Fourth assessment report (Climate Change 2007: Synthesis Report No. Contributions of Working Groups I, II, and II)*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom; NY, USA.; Geneva, Switzerland.
- Jang, J. H., Kim, S. D., Sung, K. J., and Sin, H. S. (2007). Eco-hydrologic assessment of maintenance water supply on Oncheon stream, *Journal of Environmental Science International*, 16(8), 973-983.
- Jato-Espino, D., Sillanpää, N., Charlesworth, S. M., and Andrés-Doménech, I. (2016). Coupling GIS with stormwater modelling for the location prioritization and hydrological simulation of permeable pavements in urban catchments, *Water*, 8(10), 451.
- Jia, H., Lu, Y., Yu, S. L., and Chen, Y. (2012). Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village, *Separation and Purification Technology*, 84, 112-119.
- Johnson, R. D. and Sample, D. J. (2017). A semi-distributed model for locating stormwater best management practices in coastal environments, *Environmental Modelling & Software*, 91(May), 70 - 86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.015>
- Joksimovic, D. and Alam, Z. (2014). Cost efficiency of low impact development (LID) stormwater management practices, *Procedia Engineering*, 89, 734-741.
- Kafi, M., Gasperi, J., Moilleron, R., Gromaire, M. C., and Chebbo, G. (2008). Spatial variability of the characteristics of combined wet weather pollutant loads in Paris, *Water Research*, 42(3), 539-549.
- Kim, J. and Joo, J. (2017). A study on the performance comparison of the low impact development facilities for long-term stormwater reduction, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(5), 337-344. [Korean Literature]
- Kim, K., Choi, J., Kim, S., Kang, L. S., Shin, H., and Kim, S. (2019). Analysis of the effect of bio-retention cells to improve water cycle and water quality in urban streams, *Journal of Wetlands Research*, 21(3), 224-235. [Korean Literature]
- Kuo, C. C., Gan, T. Y., and Gizaw, M. (2015). Potential impact of climate change on Intensity Duration Frequency curves of central Alberta, *Climate Change*, 130(2), 115-129. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-015-1347-9>.
- Lee, S. B., Yoon, C. G., Jung, K. W., and Hwang, H. S. (2010). Comparative evaluation of runoff and water quality using HSPF and SWMM, *Water Science & Technology*, 62(6), 1401 - 1409.
- Liao, Z., Zhang, G., Wu, Z., He, Y., and Chen, H. (2015). Combined sewer overflow control with LID based on SWMM: an example in Shanghai, China, *Water Science Technology*, 71(8), 1136-1142. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.076>
- Liu, Y., Ahiablame, L., Bralts, V. F., and Engel, B. A. (2015). Enhancing a rainfall-runoff model to assess the impacts of BMPs and LID practices on storm runoff, *Journal of Environmental Management*, 147, 12-23.
- Liu, Y., Bralts, V.F., and Engel, B.A. (2015). Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model, *Science of the Total Environment*, 511, 298-308.
- Muhaisen, O. S., Osorio, F., and Garcia, P. A. (2009). Two-copula based simulation for detention basin design. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 26(4), 355-366.
- New York City Department Environmental Protection (NYC-DEP). (2017). *Green infrastructure annual report*, New York City Department Environmental Protection, NY, USA.
- Nilsen, V., Lier, J. A., Bjerkholt, J. T., and Lindholm, O. G. (2011). Analysing urban floods and combined sewer overflows in a changing climate, *Journal of Water and Climate Change*, 2, 260-271.
- O'Driscoll, M., Clinton, S., Jefferson, A., Manda, A., and McMillan, S. (2010). Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the southern United States, *Water*, 2(3), 605-648.
- Oraei Zare, S., Saghafian, B., and Shamsai, A. (2012). Multi-objective optimization for combined quality-quantity urban runoff control, *Hydrology Earth System Sciences*, 16(12), 4531-4542.
- Qin, H. P., Li, Z. X., and Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics, *Journal of Environmental Management*, 129, 577-585.
- Riverside County (RC). (2011). *The design handbook for low impact development best management practices*, Riverside County Flood Control and Water Conservation District, Canada.
- Roy, A., Rhea, L. K., Mayer, A. L., Shuster, W. D., Beaulieu,

- J., Hopton, M. E., Morrison, M. A., and Amand, A. (2014). How much is enough? Minimal responses of water quality and stream biota to partial retrofit stormwater management in a suburban neighborhood, *PLoS One*, 9(1), e85011. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085011>
- Schmitt, T. G., Thomas, M., and Ettrich, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems, *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 300-311.
- Tao, J., Li, Z., Peng, X., and Ying, G. (2017). Quantitative analysis of impact of green stormwater infrastructures on combined sewer overflow control and urban flooding control, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(4), 11. doi: 10.1007/s11783-017-0952-4
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (1994). Combined sewer overflow (CSO) control policy, *Federal Register*, 75(59), 18688-18698.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (2000). *Low Impact Development (LID) A Literature Review*, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (2015). *Storm water management model user's manual version 5.1*, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (2016). *Opti-tool for stormwater and nutrient management: user's guide*, U. S. Environmental Protection Agency-Region 1.
- Virginia Water Resources Research Center (VWRRC). (2013). *Virginia DCR stormwater design*, Virginia Water Resources Research Center, VA, USA.
- Watershed Management Services (WMS). (2008). *Low Impact Development Design Guidance Manual*, Watershed Management Services, Project Management and Engineering Department of Anchorage, AK, U.S.A. https://nacto.org/docs/usdg/lid_design_guidance_uskh.pdf.
- Xu, T., Jia, H., Wang, Z., Mao, X., and Xu, C. (2017). SWMM-based methodology for block-scale LID-BMPs planning based on site-scale multi-objective optimization: a case study in Tianjin, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(4), 1. <http://dx.doi.org/10.1007/s11783-017-0934-6>
- Yang, Y., Gan, T. Y., and Tan, X. (2019). Spatiotemporal changes in precipitation extremes over Canada and their teleconnections to large-scale climate patterns, *Journal of Hydrometeorology*, 20(2), 275-296.
- Yeon, J. S., Choi, H. I., Shin, H. S., and Kim, E. S. (2015). Rainfall runoff reduction analysis for the construction and maintenance costs of LID facilities, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 15(4), 281-287. [Korean Literature]
- Zahmatkesh, Z., Burian, S. J., Karamouz, M., Tavakol-Davani, H., and Goharian, E. (2015). Low impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: case study of new York City, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(1), 4014043. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000770](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000770)
- Zhang, S. and Guo, Y. (2015). SWMM simulation of the storm water volume control performance of permeable pavement systems, *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(8), 06014010.