

## 다목적 최적화를 이용한 유역 관리 방안 탐색: TP 배출부하량 및 강우유출수 저감을 중심으로

### Basin Management using Multi-objective Optimization: Focus on Reductions of TP Loading and Runoff

박윤경\* · 김이호\*\* · 장종경\*\*\* · 송양호\*\*\*\* · 양동민\*\*\*\*\*

Park, Yoonkyung\*, Kim, Reeho\*\*, Jang, Jong-kyung\*\*\*, Song, Yangho\*\*\*\*,  
and Yang, Dong Min\*\*\*\*\*

#### Abstract

Recently, in urban areas, watershed management paradigms have changed the water cycle and water quality. This study explored the implementation of multiple low impact development (LID) facilities to improve the water cycle and water quality according to the paradigms. The study area was the Daeyeon campus of Pukyong National University, Busan. In this area, permeable pavement is installed in various LID facilities. In this study, a total of 35 optimal implementation plans of permeable pavement are presented. The suggested optimal designs confirm that the installation of a permeable pavement considering one purpose alone (for example, water quality improvement) does not satisfy the other purposes (for example, runoff reduction); in other words, such an installation is uneconomical. Therefore, this study proposes optimal installation designs for permeable pavements that can achieve multiple purposes (in this case, water quality improvement and runoff reduction) with a limited budget using the methodology suggested herein.

**Key words** : LID, Multi-objective Optimization, Stormwater Runoff, Water Quality

#### 요 지

최근 도시지역 수자원을 수질뿐만 아니라 물순환 개선까지 고려하는 것으로 유역관리 패러다임이 변화하고 있다. 이러한 패러다임에 맞추어 본 연구는 물순환, 수질 개선할 수 있는 다수의 LID 시설 적용안을 탐색하고자 하였다. 이를 위해 부산광역시 소재 부경대학교 대연캠퍼스에 다수의 투수성 포장(투수성 포장)이 적용되는 경우로 연구를 수행하였다. 그 결과, 총 35개의 투수성 포장 적용안이 탐색되었다. 탐색된 적용안을 살펴보면, 하나의 목적(예를 들어 수질개선)만을 고려하여 투수성 포장을 설치할 경우 다른 목적(예를 들어 강우유출수 감소)의 대한 효과가 미미하거나 예산이 과도하게 사용될 수 있는 여지가 있음을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 제시하는 방법을 이용한다면 한정된 예산에서 두 가지 목적(수질개선 및 강우유출수 감소)을 모두 달성할 수 있는 투수성 포장 설치안 제시가 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 저영향개발, 다목적 최적화, 강우유출수, 수질

\*정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 도시물순환연구센터 박사후연구원(E-mail: parkyoonkyung@kict.re.kr)

Member, Postdoctoral Fellow, Urban Water Cycle Research Center, Department of Land, Water & Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*\*정회원, 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 도시물순환센터 센터장(E-mail: rhkim@kict.re.kr)

Member, Head of Center, Urban Water Cycle Research Center, Department of Land, Water & Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*\*\*정회원, (주)하이텍스 이사(E-mail: jkcopyleft@naver.com)

Member, Director, HYDEX Co., Ltd.

\*\*\*\*정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 연구교수(E-mail: syho@daum.net)

Member, Research Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

\*\*\*\*\*교신저자, 정회원, 노아SNC(주) 대표이사(Tel: +82-2-6105-6600, Fax: +82-2-6105-6625, E-mail: ydm320@naver.com)

Corresponding Author, Member, President, NOAA SNC., Ltd.

# 1. 서론

최근 도시화로 인해 불투수 면적이 증가하고 그에 따라 다양한 환경문제들이 발생하고 있다(Fig. 1). 불투수면적의 증가로 인하여 토양으로 침투되는 강우량이 감소하고 강우 유출수 양이 증가하게 되었으며, 강우유출수의 증가는 곧 하천으로 유입되는 비점오염물질의 양이 증가함을 의미한다. 이러한 현상을 개선하기 위하여 저영향개발(Low Impact Development, LID)이 도입되고 있다. 이러한 시설들은 강우유출수를 지면 아래로 저류시켜 천천히 유역 밖으로 내보내는 역할과 함께 비점오염물질을 저감하는 효과를 가지고 있다.

LID 시설을 적용함에 따라 발생하는 효과를 분석하는 연구들은 다양한 연구자들에 의해서 수행되어지고 있다. Hong and Kim (2016)은 식생이 조성된 LID시설의 효율을 평가하기 위해 실규모로 조성된 식생체류지, 소규모 인공습지, 빗물정원, 나무여과상자 등의 시설을 조성하고 각 시설별 물순환 효과 및 비점오염물질 저감 능력을 평가하였다. Choi et al. (2017)은 LID 시설설계에 사용되는 강우유출수 처리비에 지역별 강우특성을 반영하기 위한 연구를 수행하였다. 이 때, 연구를 위해 선정된 LID 시설은 생태저류지(Bio-retention cell)이다. Sim et al. (2017)은 비점오염저감을 위해 생태저류지의 최적설계용량을 수확체감의 법칙을 적용하여 탐색하여, 기존 환경부에서 제시하고 있는 LID 시설 설계가 과소평가되고 있음을 시사하였다. 이와 같이 기존의 연구들의 경우 LID 시설을 적용함에 따라 강우유출수 저감효과, 비점오염물질 저감효과 등 하나의 목표만을 고려하는 연구가 진행되고 있는 실정이다. 최근 우리나라에서는 물환경보전법이 개정되면서 물순환 관리에 대한 관심이 높아지고 있다. 비점오염원 관리뿐만 아니라 도시를 수자원을 사용하기만 하는

공간이 아닌 수자원을 관리할 수 있는 공간으로 조성하고자 한다. 이를 위해서 LID 시설에서 강우유출수를 저류 또는 침투하는 능력을 활용할 수 있으며, 해당 시설을 설치함으로써 비점오염물질 저감 효과도 볼 수 있다.

LID 시설을 운영하기 위해서는 효과뿐만 아니라 비용적인 요소도 함께 고려되어야 한다. 비용 부분에서 LID 시설 적용 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 투자비용 대비 강우유출수 저감 효율이 가장 높은 LID시설의 용량과 위치를 최적화 하는 연구가 진행되었다(Harrell and Ranjithan, 2003; Maringanti et al., 2009; Zhang et al., 2013). 이와 유사하게 Lee et al. (2018)에서는 다수의 식생체류지 설치에 다목적최적화를 적용하여 TP저감 효과와 시설 적용에 따른 비용을 고려한 연구를 진행하였다. 국내에서는 Lee et al. (2013), Park et al. (2016)이 LID 시설의 최적 규모와 개소수를 산정하고 그에 따른 비용을 도출하는 연구를 진행한 바 있다. Baek et al. (2018)은 도시 주거단지 규모에서 LID 기술의 경제성과 실효성을 분석하고자 LID 기술을 적용에 따른 물순환 개선효과와 비용편익 분석을 수행하였다. 그 중 Park et al. (2016)은 본 논문의 선행연구로서 동일한 지역에서 다수의 투수성 포장 적용에 따른 비용대비 TP 부하량 저감 효과가 최대가 되는 투수성 포장 적용안이 탐색되어진다. 비용을 고려하여 LID 시설의 효과를 분석한 선행 연구의 경우에도 단일 효과와 비용만을 고려한 것으로서, LID 시설이 가지는 다양한 효과를 고려한 분석이라고 할 수 없다. 본 연구에서는 Park et al. (2016)에서 수행한 연구대상지역 및 방법론을 차용하여 실제적으로 유역관리에서 강우유출수 저감과 비점오염물질(그 중에서도 총인, 이후 TP) 저감 효과를 함께 고려하여 비용적 측면에서 효과적인 관리방안을 제시하고자 한다.

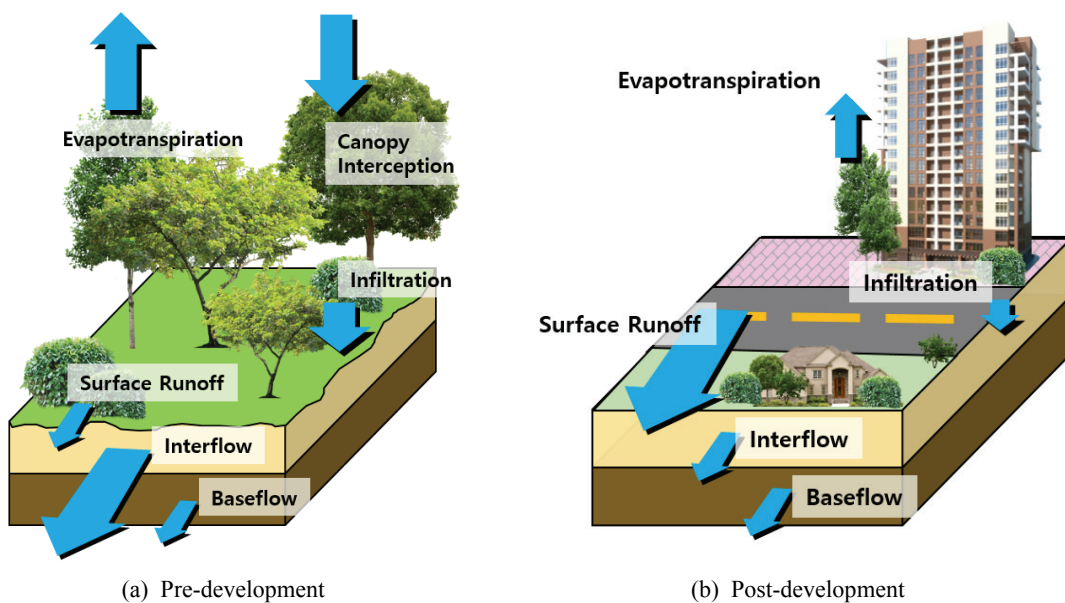


Fig. 1. Water Cycle According to Development

## 2. 연구방법

### 2.1 대상유역 및 EPA-SWMM 구성

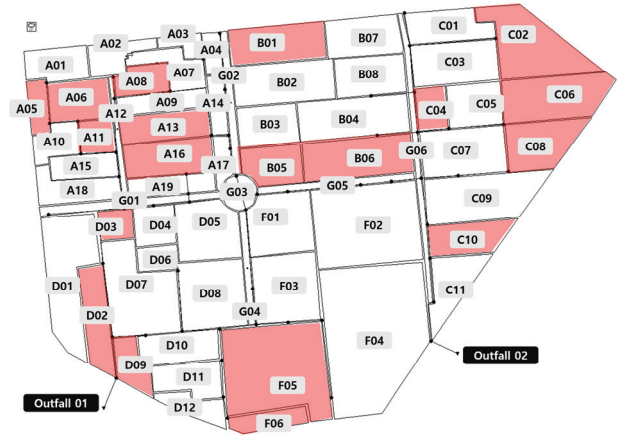
본 연구의 대상유역 및 EPA-SWMM의 구축은 Park et al. (2016)의 연구 자료를 활용하였다. 전체 약 34.95 ha의 부경대학교 대연캠퍼스 유역은 불투수 지역 약 60%, 투수지역 약 40%로 구성된다. 해당 지역의 우수관망도를 활용하여 총 62개의 소유역과 2개의 유출 출구점을 가지도록 EPA-SWMM이 구축되며(Fig. 2), 수치지형도(1:25,000)를 이용하여 획득한 30 m × 30 m DEM, 환경부에서 제공하는 중분류 토지이용도(1:5,000), 농촌진흥청에서 제공하는 정밀토양도(1:25,000)

를 활용하여 유역 특성을 입력하였다.

본 연구는 다수의 투수성 포장을 설치하여 도시지역의 물순환 개선을 목적으로 한다. 따라서 투수성 포장을 설치할 수 있는 장소를 주차장으로 제한하였으며, 설치 가능 소유역과 주차장 면적을 각각 Fig. 2(음영 처리된 소유역)와 Table 1에 제시하였다. 이 때, 주차장 면적은 투수성 포장이 최대로 설치 될 수 있는 면적을 의미한다. 본 연구에서는 19개 소유역에서 투수성 포장이 설치 가능하며, 투수성 포장이 유역에 최대로 설치될 경우 전체 면적에 약 6.6%의 면적을 차지하는 것으로 확인되었다.



(a) Aerial image



(b) EPA-SWMM

Fig. 2. Study Area

Table 1. Sub-basin Areas and Parking Lot Areas in Study Area

Name	Area (ha)	Parking lot area (ha)	Name	Area (ha)	Parking lot area (ha)	Name	Area (ha)	Parking lot area (ha)	Name	Area (ha)	Parking lot area (ha)
A01	0.4094	-	A17	0.1722	-	C06	0.8660	0.0453	D11	0.4595	-
A02	0.3271	-	A18	0.4278	-	C07	0.8021	-	D12	0.2764	-
A03	0.1549	-	A19	0.3138	-	C08	0.6276	0.1800	F01	0.7687	-
A04	0.1578	-	B01	0.7198	0.3225	C09	0.9991	-	F02	1.6411	-
A05	0.2171	0.2171	B02	0.8326	-	C10	0.4848	0.0130	F03	0.8499	-
A06	0.5010	0.0300	B03	0.4941	-	C11	0.5326	-	F04	2.6989	-
A07	0.3570	-	B04	0.8758	-	D01	1.1269	-	F05	1.8991	0.0100
A08	0.3052	0.0660	B05	0.4549	0.0875	D02	0.5159	0.3180	F06	0.3023	0.3023
A09	0.3334	-	B06	0.8839	0.0105	D03	0.2131	0.2131	G01	0.3340	-
A10	0.2850	-	B07	0.5453	-	D04	0.3282	-	G02	0.1941	-
A11	0.2303	0.2303	B08	0.5154	-	D05	0.7060	-	G03	0.1969	-
A12	0.1278	-	C01	0.4923	-	D06	0.1946	-	G04	0.1831	-
A13	0.5119	0.0450	C02	1.0181	0.0480	D07	1.1085	-	G05	0.2251	-
A14	0.2211	-	C03	0.7273	-	D08	0.8891	-	G06	0.4083	-
A15	0.3346	-	C04	0.2712	0.0830	D09	0.3035	0.0400			
A16	0.6415	0.0420	C05	0.4630	-	D10	0.4900	-			

## 2.2 EPA-SWMM 매개변수 추정

연구 대상지역은 강우유출수 및 수질항목에 대한 관측 자료가 존재하지 않기 때문에 매개변수 추정을 위해 참조자료를 구축하였다. 불투수 지역은 NRCS-CN방법, 투수 지역은 SMI방법(Soil Moisture Index, Park et al., 2015 참조)을 통해 산정하였다. 수질항목인 TP는 NIER (2012)에서 제시한 원단위(Table 2 참조)로부터 계산된 연평균 토지계 배출부하량을 이용하여 모형 매개변수 추정을 위한 참조자료를 생산하였다. 월단위로 산정된 참조자료는 EPA-SWMM 모의결과와 비교하여 매개변수를 추정하였다. 강우유출수와 TP 부하량을 모의하기 위해 추정된 매개변수 목록은 Table 3과 같다. 본 연구에서는 모형 매개변수 추정을 위한 EPA-SWMM 과 Matlab 연동 모듈을 구성하여(Choe et al., 2015; Park et al., 2016; Lee et al., 2018) 자동적으로 매개변수가 추정될 수 있도록 하였다. 상기 매개변수들을 추정을 위하여 2011년부터 2013년 월 강우유출수 자료, 월 TP 배출부하량 자료를 보정자료로 활용하였으며, 2016년부터 2018년까지의 월 강우유출수 자료, 월 TP 배출부하량 자료를 이용하여 검증하였다.

## 2.3 설계 강우사상의 산정

Zhang et al. (2013)은 도시지역의 LID시설의 최적설계안을 탐색하는데 10년 빈도 24시간 설계 강우사상을 사용하였으며, 탐색시간은 약 23시간이 소요되었다. LID 시설의 투자

비용, LID 시설의 효과와 같이 서로 상충하는 두 가지 목적을 탐색하는데 많은 시간이 소요되는 것을 알 수 있다. Park et al. (2016)과 Lee et al. (2018)에서도 모의시간 절약을 위하여 설계 강우사상을 적용하였다. 본 연구에서는 Park et al. (2016)과 동일한 방법을 적용하여 산정하였다. 해당 방법을 채택한 이유는 비점오염물질의 경우 강우유출수와 함께 하천으로 유입되기 때문에, 강우유출수가 발생하지 않는 강우사상을 적용하는 것을 적절하지 않다. 따라서 해당 지역의 평균적인 강우유출수를 유발할 수 있는 강우사상을 산정하는 방법을 이용하였다. 이 때 사용한 강우자료는 2010년부터 2018년까지의 부산지점 시간 강우자료를 활용하였다. 설계 강우에 대한 자세한 사항은 Fig. 3 또는 Park et al. (2016)을 참조할 수 있다.

해당 방법을 이용하여 산정된 설계 강우유출량은 25.1345 mm이며, 설계 강우량은 42.21 mm로 추정되었다. 설계 지속시간은 27시간, 설계 무강우시간은 140시간으로 산정되었다. Fig. 4는 Park et al. (2016)에서 산정된 설계강우사상과 본 연구에서 산정된 설계강우사상을 강우주상도로 나타낸 것이다. Park et al. (2016)과 비교하여 설계 강우량과 설계 강우유출량은 유사하게 산정되었으나 설계 지속시간은 28시간에서 27시간으로, 설계 무강우시간은 145시간에서 140시간으로 감소하였다. 설계 강우량을 산정하는 강우시간의 시점이 크게 차이는 나지 않지만 기후변화로 인하여 강우지속시간이 짧아지는 현상이 반영되고 있음을 확인할 수 있다.

**Table 2.** Basic Unit of Land Sources Pollutant About TP ( $\text{kg}/\text{km}^2 \cdot \text{day}$ )

Land use	The basic unit of land source pollutant	Land use	The basic unit of land source pollutant	Land use	The basic unit of land source pollutant
Residential	0.600	Rice field	0.467	Broadleaf forest	0.089
Industrial	0.855	Field	5.371	Coniferous forest	0.035
Commercial	1.385	Vinyl house plantations	3.511	Mixed forest	0.058
Amusement	0.609	Orchard	0.630	Golf course	0.738
Traffic	0.391	Other plantations	0.813	Other grassland	0.295
Public facility	0.447			Others	0.027

**Table 3.** Description of Estimated Model Parameters

Items	Parameter	Description
Stormwater Runoff	% Slope	Average surface slope (%)
	N-Imperv	Mannings N for impervious area
	N-Perv	Mannings N for pervious area
	Dstore-Imperv	Depth of depression storage on impervious area (mm)
	Dstore-Perv	Depth of depression storage on pervious area (mm)
	Curve Number	NRCS curve number
Water quality (TP)	Max. Buildup	Maximum possible buildup
	Rate Constant	Rate constant of buildup function

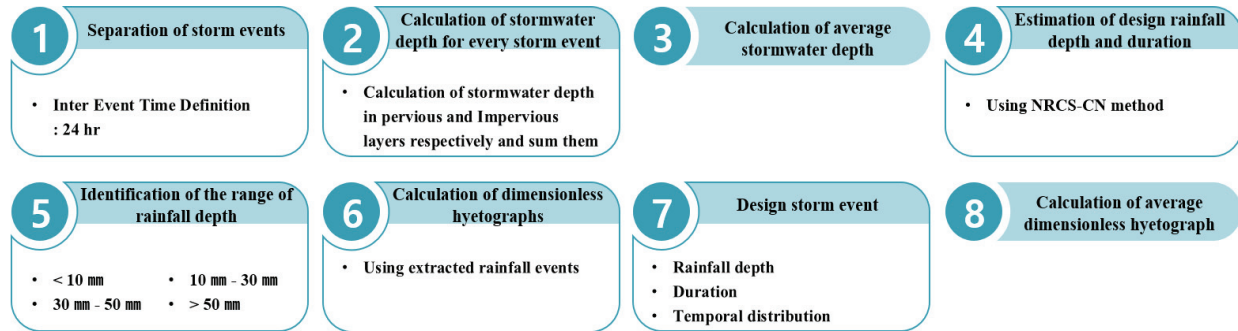


Fig. 3. Design Rainfall Hyetograph Estimation Procedure

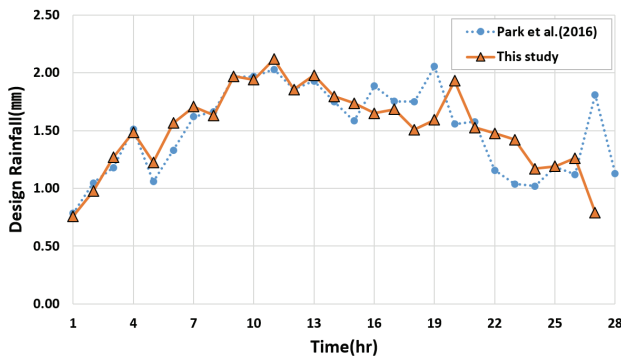


Fig. 4. Design Rainfall Event Comparing with Previous Study

## 2.4 EPA-SWMM과 Matlab 연동 모듈을 이용한 투수성 포장 설치의 다목적 최적화

투수성 포장 최적화를 위해서는 1)비점오염물질(TP) 배출량, 2) 강우유출수와 3)투수성 포장 설치에 따른 설치 및 유지관리비용(투자비용)이 모두 고려되어야 한다. 투수성 포장의 설치면적이 증가하면 TP 배출량은 감소하며, 투수성 포장으로 인해 강우의 저류량이 증가하기 때문에 토양으로 수분이 침투되는 양과 투수성 포장에 대한 투자비용이 증가하게 된다. 즉, TP 배출량, 침투량, 투수성 포장의 투자비용은 서로 상충된 관계를 갖게 된다. 서로 상충된 관계의 목적을 모두 만족시키는 단일 목적함수를 구성하는 것은 불가능하기 때문에 일부 목적을 희생하여 여러 개의 최적해 집합을 찾는 다목적 최적화기법을 적용하였다. Eq. (1)에서부터 Eq. (3)은 본 연구에서 적용된 목적함수이다.

$$f_{op,1} = \sum_{i=1}^N 78 \times A_i + 6.175 \times A_i \quad (1)$$

$$f_{op,2} = TP_{total} \quad (2)$$

$$f_{op,3} = R \quad (3)$$

Eq. (1)은 투수성 포장을 설치한 면적에 대한 투자비용(원)

을 의미한다. 여기서,  $N$ 은 설치된 투수성 포장의 개수이다.  $A$ 는 투수성 포장의 설치면적( $m^2$ )으로 투수성 포장의 최대 설치면적은 Table 1에서 제시하고 있는 주차장 면적으로 정의할 수 있다. 해당 식의 계수는 투수성 포장 설치의 단위면적( $m^2$ ) 당 설치비용(78천원/ $m^2$ )과 25년 동안의 유지관리비용(6.175천원/ $m^2$ )이다. 해당 값은 Environmental Management Corporation (2009)에서 제시하고 있는 LID 시설의 설치비용 및 유지관리 비용을 채택하여 활용하였다.

Eq. (2)는 투수성 포장 설치에 따른 TP 배출부하량(kg)이며, Eq. (3)은 유역 밖으로 배출되는 강우유출수(m)를 의미한다. 투수성 포장 설치에 따라 TP 배출부하량을 감소시키고, 유역 밖으로 배출되는 강우유출수를 감소하는 것에 집중하게 되면, 즉  $f_{op,2}$ 와  $f_{op,3}$ 이 감소하기 위해서는 투수성 포장 면적이 증가하게 된다. 이는 곧  $f_{op,1}$ 이 증가하는 것을 의미한다. 만약 투수성 포장의 투자비용 최소화에 집중하게 되면 그로 인해 TP 배출부하량과 강우유출수 저감 효과는 반감될 것이다.

다수의 투수성 포장의 최적 적용안을 탐색하기 위해서 본 연구에서 제시한 방법은 투수성 포장 면적에 따라 변화하는 효과 및 투자비용을 활용한 것이다. 따라서 투수성 포장에서 면적 이외에 유출특성에 영향을 미치는 설계인자(투수성 포장 두께, 공극 등)는 문헌에서 제시하는 값을 적용하였으며 (EPA, 2010), 그 내용은 Fig. 5와 같다.

## 3. 연구결과

### 3.1 대상유역 강우유출수 및 TP 거동 모의

MATLAB과 EPA-SWMM의 연동모듈을 통해 EPA-SWMM에 적용되는 매개변수 보정 및 검증은 실시하였다. NRCS-CN 방법과 SMI 방법을 이용하여 생산한 강우유출수와 NIER (2012)에서 제시한 방법을 이용하여 생산한 TP 배출부하량을 참조자료로 하여 2011년부터 2013년까지의 월자료는 매개변수 보정기간으로, 2016년에서 2018년까지는 매개변수 검증기간으로 활용하였다. Fig. 6은 매개변수 보정 및 검증결과로서 강우유출수, TP 배출부하량 각각에 대해 나타

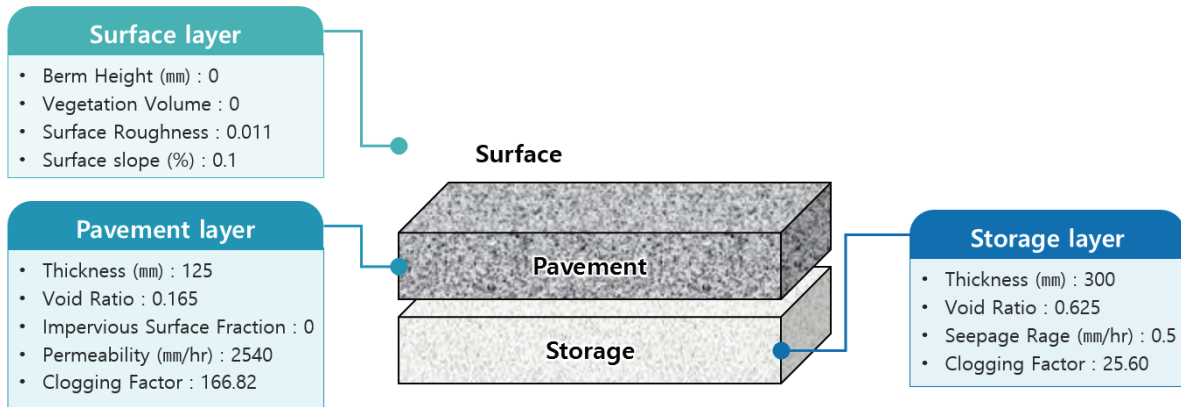


Fig. 5. Model Parameters for Permeable Pavement

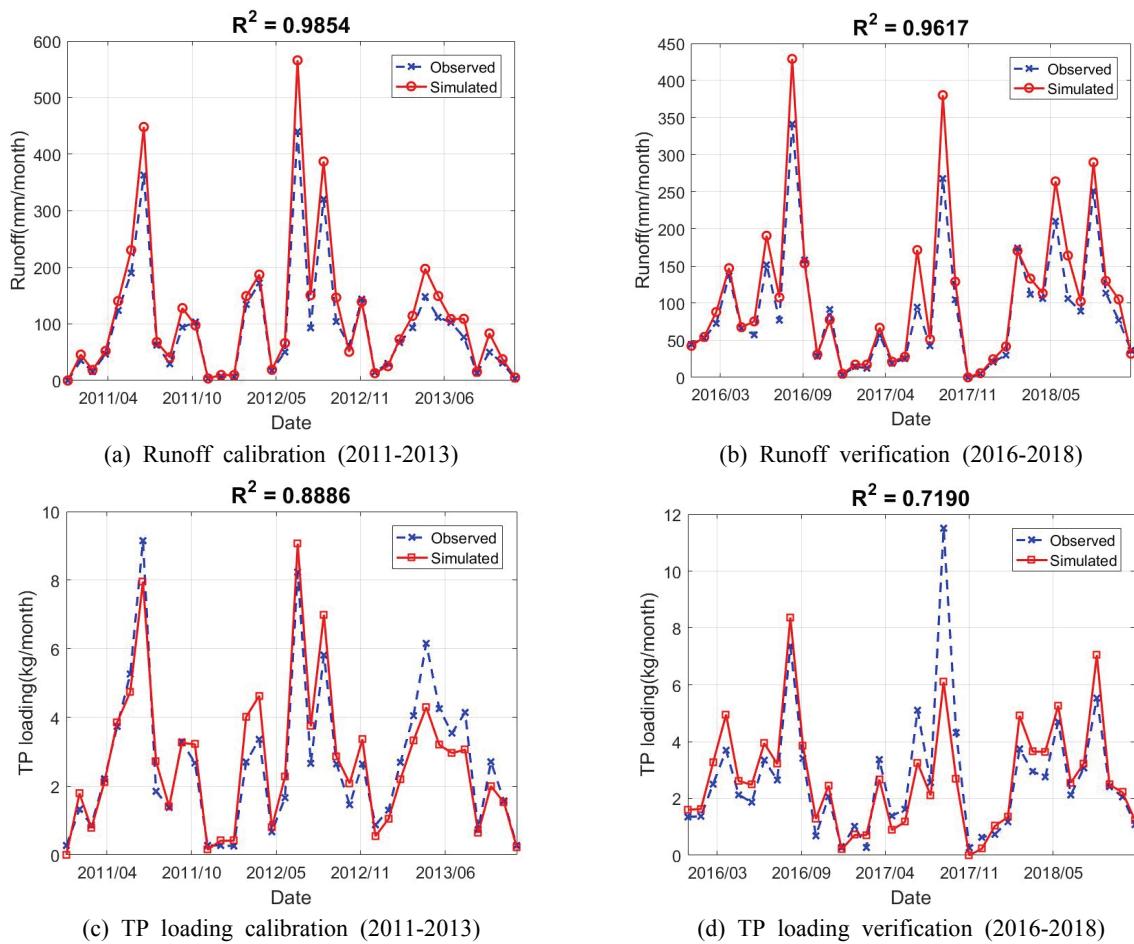


Fig. 6. Results of Calibration and Verification

내었다. 강우유출수의 경우 보정 및 검증결과 모두 모형 결정계수가 0.9 이상으로 산정되어 실제 대상유역의 강우유출 패턴을 잘 묘사하고 있음을 확인하였다. TP 배출부하량은 모형 결정계수가 0.7이상으로 산정되어 강우유출수 만큼은 아니지만 대상유역에서 배출되는 TP부하량의 거동을 높은 수준으로 묘사하고 있음을 확인하였다. 이 후 투수성 포장의 다목적 최적화에 대한 분석은 강우유출수 및 TP 배출부하량

보정 및 검증이 완료된 EPA-SWMM 모형을 활용하고자 하였다.

### 3.2 다수의 투수성 포장 설치를 위한 다목적 최적화

2.3절에서 산정한 설계 강우사상을 이용하여 투수성 포장 설치 최적설계안을 도출하고자 하였다. 이 때, EPA-SWMM

과 MATLAB을 연동하여 최적설계안이 도출될 때까지 자동적으로 모의할 수 있도록 모형을 구성하였다. 투수성 포장 설계를 위한 목적함수는 총 세 가지로, 1) 시설의 설치 및 유지비용, 2) TP 배출부하량, 3) 유역 밖으로 배출되는 강우유출수량으로 설정하였다. 세 가지 목적함수를 만족시키는 최적안은 파레토 방식을 통해 탐색된다. 투수성 포장 설치의 최적 설계안을 탐색한 결과, 총 35개가 탐색되었다. Fig. 7은 투수성 포장 설치 최적 설계안 탐색결과로서, 다양한 각도에서 탐색 결과를 확인할 수 있다. 투수성 포장의 설치면적이 증가함에 따라 소요비용이 증가하나 배출되는 TP 부하량과 강우유출수가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구 결과는 제한적인 예산에서 TP 배출부하량뿐만 아니라 강우유출수 저감효과 까지 고려할 수 있는 투수성 포장 설치안을 탐색할 수 있는 장점을 가진다.

Fig. 7 내에 파란색 사각형 기호는 TP 배출부하량이 가장 적게 배출시키는 투수성 포장 적용안(이후, Plan A), 빨간색 원형 기호는 강우유출수가 가장 적게 배출되는 투수성 포장 적용안(이후, Plan B)을 의미한다. 검은색 삼각형 기호는 탐색된 35개 적용안 중 TP 배출부하량, 강우유출수, 소요비용을 종합적으로 고려하여 투자비용 대비 TP 배출부하량과

강우유출수 저감효과가 가장 클 것으로 판단되는 적용안 (Plan C)을 나타낸 것이다.

Table 4는 투수성 포장이 전혀 설치되지 않은 현 상태를 포함하여 다목적 최적화를 통해 탐색된 Plan A, B, C에서의 TP 배출부하량, 강우유출수량, 투수성 포장 설치 비용 및 설치면적을 나타내었다. 강우유출수 저감 효과(저감율 18.6%)가 가장 큰 Plan B는 투수성 포장의 적용면적 및 소요비용이 세 가지 경우 중 가장 큰 것으로 확인되었다. 이 때, TP 배출부하량은 약 6.3%의 저감 효과를 보이고 있으나 그 효과가 Plan A(저감율 12.2%), Plan C(저감율 11.3%)의 절반 수준 인 것으로 확인되었다. Plan A는 TP 배출부하량이 가장 적은 경우로서 강우유출수 저감효율이 약 11.7%로 나타났다. Plan C는 TP 배출부하량 저감효과, 강우유출수 저감효과, 소요비용을 종합적으로 고려한 적용안이다. 세 가지 적용안 중 소요되는 비용이 가장 작지만 강우유출수 저감과 TP 배출부하량 저감효과가 Plan A나 Plan B와 비교해서 경제적인 것을 확인할 수 있다. 따라서 강우유출수와 TP 배출부하량을 경제적으로 저감하기 위해서는 Plan C를 적용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

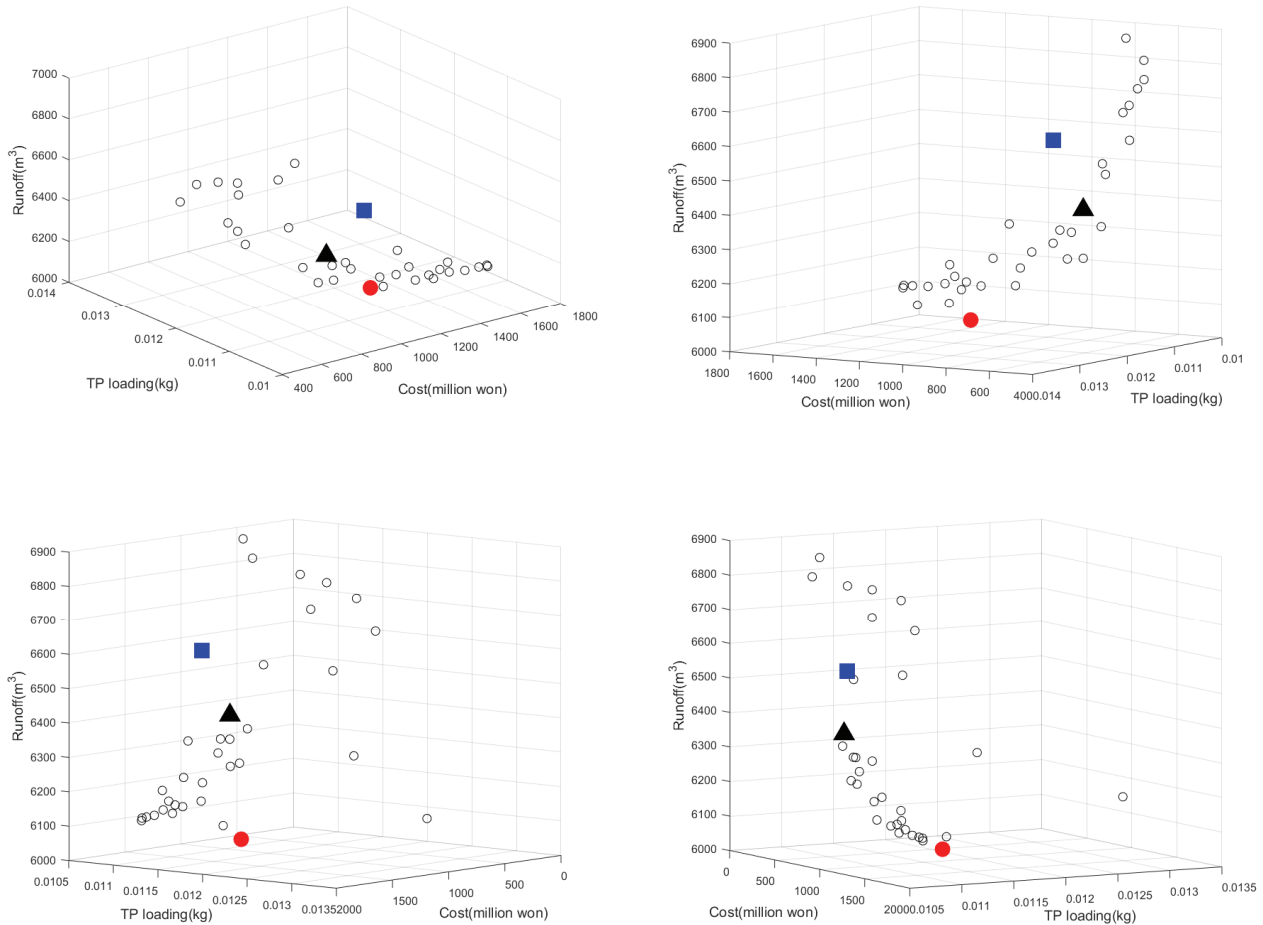
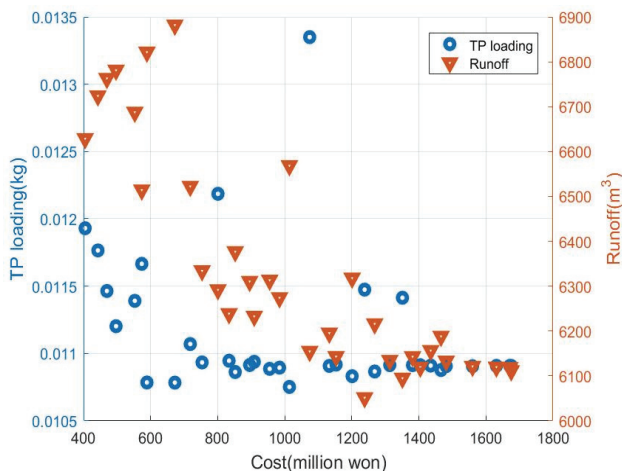


Fig. 7. 3-D graph of Multi-objective Optimization Results According to Various Angles

**Table 4.** Result of Multi-objective Optimization about Specific Cases

Type	TP loading (kg)	Runoff (m <sup>3</sup> )	Cost (Million won)	Applied LID area (m <sup>2</sup> )
No LID	0.0122	7,438.1	-	-
Plan A	0.0108	6,568.5	1,013.8	12,043.91
Plan B	0.0115	6,051.4	1,238.2	14,709.25
Plan C	0.0109	6,376.9	852.2	10,124.65

Fig. 8은 Fig. 7의 결과를 2차원 그래프로 표현하여 살펴본다. 가로축은 투수성 포장 적용하는데 소요되는 비용, 왼쪽 세로축은 TP 배출부하량, 오른쪽 세로축은 유역에서 배출되는 강우유출량을 의미한다. 전술한 바와 같이 투수성 포장을 설치하기 위해 소요되는 비용이 증가할수록 TP 배출 부하량과 강우유출수량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. TP 배출 부하량을 감소시키는 것만을 목적으로 할 때 가장 경제적으로 판단되는 적용 안은 약 6억 원이 소요되는 것으로서, 그 이상으로 투수성 포장을 설치하는데 금액을 투자하더라도 그 효과가 미미할 것으로 예측된다. 강우유출수량 감소만을 목적으로 하는 경우에는 TP 배출부하량과 다르게 약 12억 원이 투자되는 것이 금액 대비 가장 경제적인 적용 안인 것으로 예측된다. TP 배출부하량을 저감하는데 가장 경제적인 적용안을 채택할 경우 강우유출수 저감효과는 있지만 유역에 적용할 수 있는 투수성 포장의 저감효과를 충분히 발휘할 수 없다. 반대로 강우유출수 저감에 가장 경제적인 적용안을 채택할 경우에는 TP 배출부하량 저감에 있어 과도하게 투수성 포장이 설치되었음을 Fig. 8을 통해 확인할 수 있다. 따라서 두 가지 목적을 효과적으로 달성하기 위해서는 각각의 목적에서 가장 최선의 방안을 찾는 것이 아니라 두 가지 목적을 함께 고려한 방안을 탐색하는 것이 적절할 것으로 판단된다.



**Fig. 8.** Reduction Efficiencies According to Implementation of Permeable Pavement

## 4. 결론

Park et al. (2016)이나 Lee et al. (2018) 등과 같이 이전 연구는 TP 배출부하량 저감과 LID 시설 설치에 따른 비용만을 고려한 설계안으로 단순히 도시하천의 수질개선에 대해서만 초점을 맞추고 있었다. 최근 우리나라 도시지역에서는 수자원의 양적 관리, 수질관리를 포함한 물순환 관리의 개념을 도입하여 유역관리를 수행하고자 하는 법·제도 마련과 연구들이 진행되고 있다. 물순환 관리 개념으로 변화하는 도시 수자원 관리 패러다임에 맞추기 위해서는 수질 개선뿐만 아니라 불투수 지역 증가로 인해 감소한 침투량을 증가시키는 것과 같은 물순환 개선부분까지 고려해야 한다. 본 연구는 이러한 패러다임에 맞추어 도시지역의 물순환 개선을 위한 LID 시설(투수성 포장 한정)의 최적 적용안을 제시하는 연구이다. 최적 설계안은 EPA-SWMM과 MATLAB을 연동하여 자동적으로 탐색할 수 있도록 모듈을 구성하였으며, 탐색방법은 파레토 방식을 채택하였다. 본 연구에서는 총 35개의 투수성 포장 설계안이 탐색되었으며, 이를 통해 제한적인 예산에서 TP 배출부하량과 강우유출수 저감에 효과적인 투수성 포장 적용안을 제시할 수 있다. 두 가지 목적(TP 배출부하량 저감, 강우유출수 저감)을 따로따로 구분하여 투수성 포장을 적용하게 된다면, 하나의 목적을 효과적으로 달성할 수 있으나, 그 외의 목적은 과도하게 고려되거나 그 효과가 미미한 것으로 확인되었다. 따라서 다양한 항목의 유역관리를 효과적으로 수행하기 위해서는 달성하고자 하는 목표를 동시에 고려하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 제한적인 예산에서 투수성 포장 적용만을 고려한 것으로서 단일 LID 시설만 적용한 한계점을 가지고 있다. 본 연구의 연구 대상지역인 부경대학교 대연캠퍼스와 같은 지구단위에서의 유역에서는 단일 LID 시설이 적용되는 것이 아니라 다양한 종류의 LID 시설이 다수 적용된다. 따라서 본 연구방법을 현업에서 적극적으로 활용하기 위해서는 다양한 LID 시설을 고려한 다목적 최적화가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 ‘국가과학기술연구회 핵심연구분야 우수인력 발굴지원 사업’ 및 ‘한국건설기술연구원’의 지원을 받아



수행한 연구결과이며, 행정안전부 재난예측및저감연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(MOIS-재난-2015-05).

## References

- Back, J., Lee, S., Shin, H., and Kim, H. (2018). Analysis of effectiveness for water cycle and cost-benefit according to LID application method in environmentally-friendly village. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 34, No. 1, pp. 57-66.
- Choe, B., Lee, J., Sim, H., Lee, J., Cho, K., and Kim, S. (2015). Bio-retentions design practice for suspended solids management at industrial areas. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 5, pp. 267-273.
- Choi, J., Lee, O., and Kim, S. (2017). Estimation of stormwater interception rate for bio-retention LID facility. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 33, No. 5, pp. 563-571.
- Environmental Management Corporation. (2009). *The Study report of Zeroing the feasibility for non-point source pollutant in urban areas*. Environmental Management Corporation.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2010). *Storm water management model user's manual*.
- Harrell, L.J., and Ranjithan, S.R. (2003). Detention pond design and land use planning for watershed management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 2, pp. 98-106.
- Hong, J.S., and Kim, L.-H. (2016). Assessment of performances of low impact development (LID) facilities with vegetation. *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 3, No. 2, pp. 100-109.
- Lee, J., Park, Y., Shin, H.-S., Kim, J., and Kim, S. (2013). A study on applicability of SUSTAIN in a Korean urban catchment. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 29, No. 6, pp. 730-738.
- Lee, O., Kim, S., Lee, J., and Park, Y. (2018). Optimal design of bioretention cells using multi-objective optimization technique. *Desalination and Water Treatment*, Vol. 102, pp. 134-140.
- Maringanti, C., Chaubey, I., and Popp, J. (2009). Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control. *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 6, W06406. doi:10.1029/2008WR007094
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2012). *The technical guideline of water pollutant load management*. NIER.
- Park, M., Park, Y., Ahn, M., and Kim, S. (2015). Examination of the possibility of applying SMI method to estimate long-term surface runoff. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 15, No. 2, pp. 385-391.
- Park, Y., Jang, S.H., and Kim, S. (2016). Optimum installation of permeable pavement using multi-objective optimization technique. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 313-321.
- Sim, K.B., Yeon, J.S., Lee, O., Kim, S., and Kim, E.S. (2017). Estimation of optimum bio-retention design capacity using the law of diminishing returns. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 5, pp. 393-400.
- Zhang, G., Hamlett, J.M., Reed, P., and Tang, Y. (2013). Multi-objective optimization of low impact development designs in an urbanizing watershed. *Open Journal of Optimization*, Vol. 2, No. 4, pp. 95-108.

---

Received	November 3, 2019
Revised	November 5, 2019
Accepted	November 29, 2019