

생태저류지 LID 시설의 설계 및 평가를 위한 삭감대상부하비 산정방법 개선

최정현^{1a} · 이옥정^{1b} · 김용석² · 김상단^{1c,†}

¹부경대학교 지구환경시스템과학부 (환경공학전공)

²국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Improvement of Estimation Method of Load Capture Ratio for Design and Evaluation of Bio-retention LID Facility

Jeonghyeon Choi^{1a} · Okjeong Lee^{1b} · Yongseok Kim² · Sangdan Kim^{1c,†}

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

²Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received 30 August 2018, Revised 1 October 2018, Accepted 8 October 2018)

Abstract

To minimize the negative alterations in hydrologic and water quality environment in urban areas due to urbanization, Low Impact Development (LID) techniques are actively applied. In Korea, LID facilities are classified as Non-point Pollution Reduction Facilities (NPRFs), and therefore they are evaluated using the performance evaluation method for NPRFs. However, while LID facilities are generally installed in small, distributed configuration and mainly work with the infiltration process, the existing NPRFs are installed on a large scale and mainly work with the reservoir process. Therefore, some limitations are expected in assessing both facilities using the same method as they differ in properties. To solve these problems, in this study, a new method for performance evaluation was proposed with focus on bio-retention LID facilities. EPA SWMM was used to reproduce the hydrologic and water quality phenomena in study area, and SWMM-LID module used to simulate TP interception performance by installing a bio-retention cell under various conditions through long-term simulations. Finally, an empirical formula for Load Capture Ratio (LCR) was derived based on storm water interception ratio in the same form as the existing method. Using the existing formula in estimating the LCR is likely to overestimate the performance of interception for non-point pollutants in the extremely low design capacity, and also underestimate it in the moderate and high design capacity.

Key words : Bio-retention, EPA SWMM, LID, Load Capture Ratio

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

^{1b} 박사과정(Ph.D. Student), lover1804@nate.com, <https://orcid.org/0000-0001-5442-7024>

² 소장(Director), nierkys@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0002-0130-3906>

^{1c,†} Corresponding author, 교수(Professor), skim@pknu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-6244-6612>

1. Introduction

다양한 사회기반시설들의 건설에 따라 급속하게 도시화가 진행되고 있으며(Damodaram et al., 2010; Grimmond, 2007), 도시 개발로 인하여 회색 인프라가 확대됨에 따라 도시환경의 측면에서 부정적인 영향이 나타나고 있다. 자연적인 침투량의 감소로 강우유출수의 유출량과 침투유량이 증가하고 도달시간이 감소함에 따라 지역적인 침수피해가 발생하고 있다. 또한, 불투수면적의 확대는 점오염원과는 달리 불특정장소에서 불특정하게 발생하는 비점오염원의 확대로 이어지며, 비점오염원은 점오염원과는 달리 오염물질의 배출경로가 명확하지 않고 기상조건과 유역특성에 의해 발생시기와 발생량이 크게 좌우되기에 관리에 어려움이 있다(ME, 2016). 이에 도시의 물순환 체계의 변화와 도시지역의 비점오염원으로 인한 수질오염증가 등 환경변화를 최소화하기 위한 노력의 필요성이 제기되고 있다.

우리나라에서는 도시환경변화 최소화의 일환으로 2006년부터 일정규모 이상의 개발사업에 대하여 비점오염저감시설의 설치를 의무화 하여 강우유출수 및 비점오염물질을 관리하고 있다(ME, 2016). 이와 함께 최근 미국 및 유럽을 중심으로 도시의 강우유출수 및 비점오염원의 관리를 위해 활발하게 적용되고 있는 저영향개발(Low Impact Development, LID)이 합리적인 대안으로 주목받고 있으며, 환경부에서는 제2차 물환경관리기본계획(2016~2025)을 통해 LID의 적용 및 확대를 추진하고 있다(Choi et al., 2017). LID 시설은 기존의 물관리시스템과는 달리 투수면적의 확대를 통해 침투작용을 활성화함으로써 강우유출수 제어 및 정화기능을 강화하고 친환경적인 강우유출환경을 조성하여 건강한 물순환체계를 구축하는 것을 목표로 한다(Han, 2011).

LID 시설은 비점오염저감시설로 분류되며, 이에 따라 수질오염총량관리기술지침(NIER, 2014)에서 제시하고 있는 비점오염저감시설의 성능평가 방법이 LID 시설의 성능평가에 그대로 적용되고 있다. 그러나 해당 방법은 모든 시설에 대하여 종류와 관계없이 설계기준강우를 이용하여 시설의 성능을 평가하고 있어, 설계기준강우가 동일할 경우 시설의 강우유출수처리비 및 삭감대상부하비가 동일하게 계산된다. 즉, 어떠한 시설이든 시설의 내부 저류공간의 규모가 동일하다면 같은 양의 강우유출수와 비점오염물질이 유입되는 것으로 산정된다. 이러한 개념은 큰 규모의 비워진 저류공간으로 구성되어 상대적으로 넓은 유역에서 발생하는 다량의 강우유출수 및 비점오염물질을 차집하고 처리하는 기존의 비점오염저감시설에는 적합하지만, 특성이 다른 LID 시설에 적용하기에는 다소 한계가 있을 것으로 판단된다. LID 시설은 자연형 비점오염저감시설로 구분되지만(Elliott et al., 2009), 일반적으로 여러 곳에 분산하여 상대적으로 작은 규모로 설치되며 공학적으로 처리된 흙이나 자갈 사이에 존재하는 공극을 이용하기 때문에, 기존의 비점오염저감시설과 LID 시설의 특성에 차이가 존재한다. 예

를 들어, 빗물저류조와 같은 비점오염저감시설은 비워진 저류공간을 이용하기 때문에 해당 처리대상구역에서 발생하는 비점오염물질이 포함된 강우유출수를 설계기준강우량만큼 전량 차집하여 처리하는 저류지 프로세스에 기반하고 있는 반면, 생태저류지와 같이 공극을 이용하는 LID 시설의 경우에는 동일한 설계기준강우량으로 설치되더라도 시설 내의 식생, 매질, 토양수분 또는 기존 토양의 특성에 따라 강우유출수와 이에 포함된 비점오염물질을 선택적으로 차집하고 처리하는 침투 연계형 저류 프로세스에 기반하고 있다. 따라서 설계기준강우량을 기반으로 LID 시설을 평가한다면 LID 시설의 강우유출수 또는 비점오염물질의 저감 성능을 왜곡할 가능성이 있다. 또한, 생태저류지와 식생수로, 투수성 포장 등과 같이 LID 시설들 사이에도 각 층별 구성에 따라 다양한 특성을 나타낸다. 따라서 각 LID 시설에 적합한 새로운 성능평가 공식이 마련된 필요성이 제기되고 있다.

본 연구에서는 LID 시설 중 가장 대표적인 시설 중 하나인 생태저류지(bio-retention cells)를 대상으로 LID 시설의 영향면적(처리대상구역의 면적) 대비 시설면적의 비를 이용하는 강우유출수처리비 공식을 제시한 Choi et al. (2017)의 연구를 기반으로, EPA SWMM을 사용한 장기간 유출모의를 통해 수질항목 중 TP를 대상으로 삭감대상부하비 산정공식을 새롭게 제시하고자 하였다. 이에 해당연구에서 제시된 수문관련 매개변수 보정방법을 개선하고 수질관련 매개변수를 추가적으로 보정하여 연구를 수행하였다. 그 후, SWMM의 장기유출모의를 통해 다양한 조건에서의 삭감대상부하비 산정 수치실험을 시행하여 생태저류지 LID 시설에 적합한 새로운 삭감대상부하비 산정공식을 제안하였다. 본 연구에서 수행된 간략한 절차를 Fig. 1에 나타내었다.

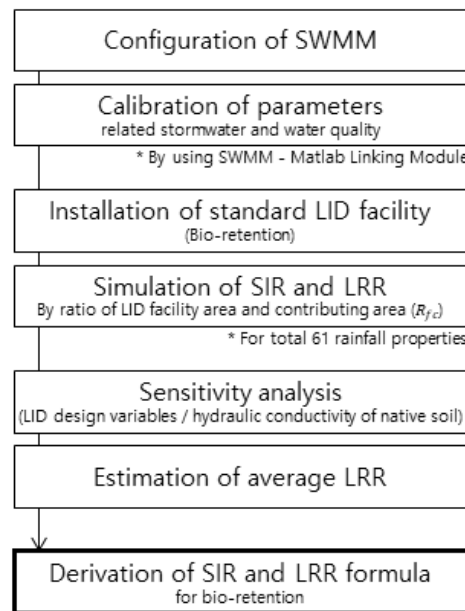


Fig. 1. Flow chart.

2. Materials and Methods

2.1 EPA SWMM - 녹산공단 모형 구축

본 연구에서는 EPA SWMM을 이용하여 생태저류지 LID 시설의 삭감대상부하비를 산정하고자, 관측 강우 및 강우유출고, TP 부하량 자료가 존재하는 녹산 국가산업단지 일부 지역을 연구대상지역으로 선정하였다. 해당 지역은 포장된 표면과 철재건물 등으로 구성된 약 13,000 m²의 불투수지역이다. EPA SWMM을 이용하여 대상지역을 구성하였으며, 모두 불투수면적으로 설정하였다. 이때 보다 정확한 매개변수의 추정을 위해, 연구대상지역을 건물 구역과 비건물 구역으로 구분하여 세 개의 소유역으로 구성하였다. 소유역 1(S1, 4,212 m²)과 소유역 3(S3, 4,069 m²)은 건물로 구성된 지역이며, 소유역 2(S2, 4,719 m²)는 비건물 지역으로 모두 불투수율 100 %로 설정되었다. 대상지역의 위치 및 구축된 모형의 소유역도를 Fig. 2에 도시하였다.

2.2 EPA SWMM 매개변수 추정

EPA SWMM을 이용하여 삭감대상부하비를 산정하기 위해서는 해당지역의 수문 및 수질 특성의 정확한 재현이 필요하다. 본 연구에서는 모형 매개변수 보정에 앞서 U. S. EPA(2015, 2016a, 2016b)를 참고하여 수문 및 수질현상의 재현을 위한 EPA SWMM 매개변수를 선정하였다.

첫 번째로 수문현상을 재현하기 위해, 불투수면적으로 이루어진 소유역에 대한 강우유출수 모의에서는 소유역의 폭(W)과 지면저류고(d_s)가 주요한 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 이에 본 연구에서는 위의 두 개의 매개변수 W , d_s 와 추가적으로 소유역에서 d_s 가 적용되지 않는 면적비를 나타내는 매개변수 %Zero을 모형 보정 대상 매개변수로 선정하였다. 그 후, 수질현상을 재현하기 위하여 축적(Build-up)과 쓸림(Wash-off)관련 매개변수를 선정하였다. TP의 축적현상은 지수 성장 곡선(Exponential growth curve)을 적용하였으며 쓸림 현상은 EMC(Event mean concentration)를 적용하여, 최대축적량(B_{max})과 속도상수(K_B), 평균농도(EMC)를

보정 대상 매개변수로 선정하였다.

모형에 의해 모의되는 결과는 매개변수의 값에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 사용자 임의의 매개변수 입력에 따른 신뢰도의 하락을 방지하기 위해 EPA SWMM과 Matlab 연계 모듈을 이용하여 강우유출수 수량 및 수질과 관련된 매개변수를 자동적으로 추정하도록 하였다. 해당 모듈은 Kling-Gupta efficiency(KGE)(Gupta et al., 2009)를 목적함수로 하여 Matlab의 Patternsearch 기법을 이용하여 자동적으로 관측자료와 모의자료를 비교하고 최적의 매개변수를 추정한다.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (1)$$

여기서 r 은 관측 자료와 모의 자료간의 상관관계수, α 는 관측 자료의 평균과 모의 자료의 평균의 비이며, β 는 관측 자료의 표준편차와 모의 자료의 표준편차의 비이다. Fig. 3은 EPA SWMM-Matlab 연계모듈의 매개변수 추정 방법을 간략하게 나타낸 것이다.

우선적으로 강우유출고를 재현하는 수문관련 매개변수를 최적화한 후, 추정된 수문관련 매개변수를 고정한 후, TP

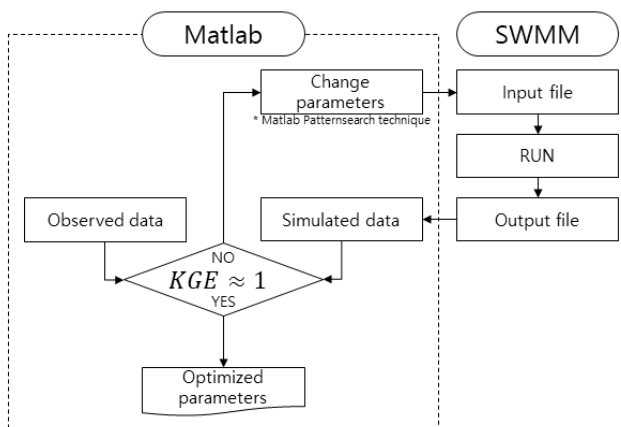


Fig. 3. SWMM-Matlab linking module.

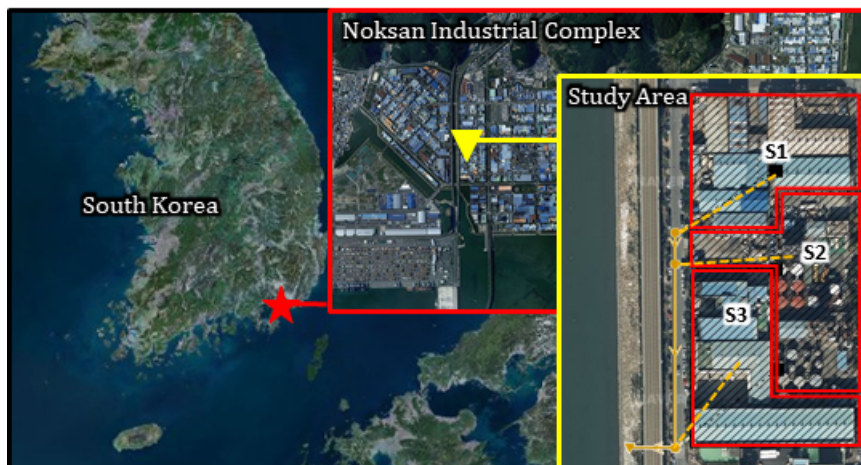


Fig. 2. Study area.

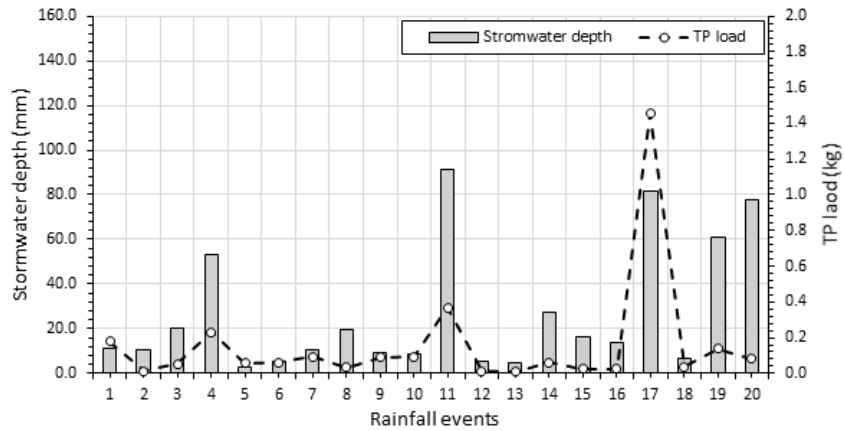


Fig. 4. Observed stormwater depth and TP load.

부하량을 재현하는 수질관련 매개변수를 추정하였다. 이때, 2009년 4월부터 2012년 7월까지 20 개의 강우 사상에 대하여 대상지역의 우수관거에서 직접 관측한 강우유출고 및 TP 부하량 모니터링자료가 사용되었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, 모니터링 자료의 강우유출고의 경우, 최소 3 mm에서 최대 91.5 mm까지 관측되어 일반적인 강우에 의한 강우유출수와 강한 비에 의한 강우유출수 등 다양한 크기의 강우유출수가 관측되었으며, 평균 26.9 mm를 나타내었다. TP 부하량 또한 평균 0.1553 kg으로 0.0072 kg부터 1.4548 kg까지 다양한 크기로 관측되었으며, 강우유출수와 유사한 패턴을 나타냄을 확인할 수 있다.

2.3 생태저류지 구축

EPA SWMM에서는 LID 시설 설치에 따른 도시유역의 수문현상을 모의할 수 있도록 LID 모듈을 제공하고 있다. 본 연구에서는 EPA SWMM에서 모의가 가능한 LID 시설 중 생태저류지를 대상으로 연구를 수행하였다. 표준 생태저류지를 구성하기 위한 EPA SWMM의 생태저류지 관련 매개변수는 다수 국내외 문헌(CVC, 2012; DOEE, 2013; DER, 2011; KECO, 2009; Palhegyi, 2010; U. S. EPA, 1999; U. S. EPA, 2015; VWRRC, 2013)의 조사를 통해 Choi et al. (2017)에서 제시하고 있는 값을 사용하였다(Table 1). 생태저류지의 경우 현업에서는 일반적으로 500 m²에서 4,000 m² 사이의 영향면적에 대비 약 4%를 시설면적으로 설계하고 있으며, 표층 300 mm, 토양층 600 mm 및 저류층 300 mm으로 구성된다. 따라서 구축된 연구대상지역의 소유역 중 S2(Fig. 2 참고)의 말단에 영향면적 2,359.5 m²의 표준 생태저류지 LID 시설이 설치되는 것으로 가정하였다. 또한, 주로 침투작용을 이용하여 강우유출수 및 비점오염 물질을 처리하는 LID 시설의 경우 시설 아래의 원 토양의 배수능력이 시설의 성능에 중요한 역할을 한다. 일반적으로 생태저류지는 미국의 Natural Resources Conservation Service(NRCS)에서 제시하는 수문학적 토양 그룹 중 배수능력이 높은 A 또는 B 유형의 토양 위에 설치하는 것이 권장된다(ADEM, 2007). 따라서 본 연구에서는 지침용 성능평가 공식을 제시하기 위해 시설의 성능을 보수적으로

Table 1. Used parameters of Bio-retention cell (Choi et al., 2017)

Parameter		Value	Unit
Area	Contributing Area	2,359.5	m ²
	Percent of Facility Area	4	%
Surface	Berm Height	300	mm
	Vegetation Volume Fraction	0	-
	Surface Roughness	0	-
Soil	Surface Slope	0	%
	Thickness	600	mm
	Porosity	0.45	-
	Field Capacity	0.30	-
	Wilting Point	0.15	-
	Conductivity	50	mm/hr
	Conductivity Slope	46.9	-
Storage	Suction Head	61.3	mm
	Thickness	300	mm
	Void Ratio (Voids/Solids)	0.625	-
	Seepage Rate	4	mm/hr
Drain	Clogging Factor	0	-
	Coefficient	0.23094	-
	Exponent	0.5	-
	Offset Height	300	mm

산정할 필요가 있다고 판단하여, B 유형 중 가장 보수적인 값인 4 mm/hr로 생태저류지 아래 원 토양의 투수율을 설정하였다.

2.4 강우유출수처리비 및 삭감대상부하비 산정

삭감대상부하비 산정에 앞서 강우유출수처리비를 산정하기 위하여 본 연구에서는 Choi et al. (2017)이 제시한 방법을 참고하였다. 해당 연구에서는 기존의 설계기준강우 기반의 강우처리비 산정공식의 문제점을 개선하고자 시설면적과 영향면적의 비 기반의 강우유출수처리비 산정공식을 제시하였다. 또한, 강우유출수처리비(S_{IR})는 처리대상구역에

Table 2. Depth of each layer used in sensitivity analysis

LID type	Depth (mm)		
	Surface layer	Soil layer	Storage layer
Bio-retention cell	200 ~ 400	600	300
	300	500 ~ 700	300
	300	600	200 ~ 400

서 발생한 강우유출수 대비 LID 시설에서 차집되는 강우 유출수의 비로, 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$S_{IR} = \frac{R_D - R_L}{R_D} \quad (2)$$

여기서, R_D 는 LID 시설 설치 전 처리대상구역에서 발생한 연평균 강우유출수량(mm)이며, R_L 은 LID 시설 설치 후 처리대상구역에서 발생한 연평균 강우유출수량(mm)이다. 이때, Choi et al. (2017)에서는 시설의 성능 산정에 포함될 수 있는 강우특성에 따른 오차를 최소화하고자 기상청에서 제공하는 전국 61개 지점의 2003년부터 2013년까지의 시간강우자료를 이용하여 전국 평균 강우유출수처리비가 산정되었다.

본 연구에서는 동일한 방법을 사용하되 2006년부터 2016년까지의 관측된 시간강우자료를 이용하여 강우유출수처리비를 산정하였다. 이때, 모델의 초기 값에 대한 영향을 제외하기 위하여 2006년의 모의결과는 분석에 포함하지 않았다. 또한, 동일한 과정을 통해 61개 지점의 강우특성에 따른 삭감대상부하비를 모의하고 전국 평균 삭감대상부하비를 산정하였다. 삭감대상부하비는 비점오염물질의 차집능력을 나타내는 지표로, 처리대상구역에서 발생한 비점오염물질 부하량 대비 LID 시설로 유입되는 부하량의 비로 설명된다. LID 시설로 유입되는 비점오염물질의 부하량은 LID 시설 설치 전 처리대상구역에서 발생한 연평균 부하량(W_D , kg)에서 LID 시설 설치 후 처리대상구역에서 발생하는 연평균 부하량(W_L , kg)을 제외한 양으로 나타낼 수 있다. 따라서 삭감대상부하비(L_{CR})를 산정하기 위한 식은 다음과 같다.

$$L_{CR} = \frac{W_D - W_L}{W_D} \quad (3)$$

2.5 삭감대상부하비 비교 및 산정공식 유도

기존의 기술지침에서 제시하는 설계기준강우 기반의 공식을 이용하여 계산된 삭감대상부하비와 본 연구에서 SWMM을 이용하여 시설면적과 영향면적의 비에 따라 산정된 삭감대상부하비를 비교하였다. 비교를 위해 본 연구에서는 생태저류지를 강우량기준 시설로 보았으며, ME (2016)를 참고하여 생태저류지의 표준제원을 바탕으로 시설면적과 영향면적의 비를 아래 식을 통해 설계기준강우량(P , mm)로 환산하였다.

$$P = \frac{WQ_v}{A \times 10} \quad (4)$$

여기서, WQ_v 는 수질처리용량(m^3)이며, A 는 영향면적(ha)이다.

환산된 설계기준강우량에 기술지침에서 제시하는 경험상수를 이용하여 강우처리비를 계산하고 다시 삭감대상부하비를 계산하였다. 기술지침에서 제시하는 강우처리비(R_{IR}) 및 삭감대상부하비(L_{CR}) 산정공식은 다음과 같다.

$$R_{IR} = a \times \ln(P) + b \quad (5)$$

여기서, a 와 b 는 기술지침에서 제시된 회귀상수로, P 가 강우량 기준인 시설의 경우 각각 0.2716, -0.2425이다.

$$L_{CR} = e^{\{c \times [\ln(R_m)]^2 + d \times \ln(R_m)\}} \quad (6)$$

여기서, c 와 d 는 수질항목에 따라 다르게 주어지며, 본 연구에서 다루는 TP의 경우 각각 -0.0018, 0.7931이다.

본 연구에서는 앞서 모의를 통해 산정된 전국 평균 삭감대상부하비를 이용하여 생태저류지를 대상으로 한 강우유출수처리비 기반의 삭감대상부하비 산정공식을 새롭게 유도하였다. 이때 기존의 삭감대상부하비 산정공식 Eq. (6)와 동일한 형태로 구성하였다.

2.6 삭감대상부하비에 영향을 미치는 요인들에 대한 민감도 분석

본 연구에서는 표준 생태저류지 LID 시설을 기반으로 삭감대상부하비를 산정하였다. 따라서 생태저류지의 제원이 표준제원과 다르게 변경될 경우 삭감대상부하비에 미치는 영향을 살펴보는 것이 실무적으로 중요한 사안이 될 것이다. 이에 Table 2에 나타난 바와 같이, 생태저류지의 각 층별 깊이를 변경하여 삭감대상부하비의 변화율을 분석하였다. 표준제원을 기준으로 각 층별 깊이를 ± 50 mm 및 ± 100 mm씩 조정하여 EPA SWMM 모의를 수행하여 제원 변경에 따른 영향을 살펴보았다.

앞서 본 연구에서는 가장 보수적인 값을 적용하여 NRCS 수문학적 토양 그룹 중 B 유형의 최저 투수율인 4 mm/hr로 설정하였다(Table 1 참고). 그러나 불투수면적 아래의 기존 토양의 상태는 LID 시설의 성능에 많은 영향을 미칠 것으로 판단되기에, 기존 토양의 투수율이 LID 시설의 성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 따라서 유형 B 토양의 최저 투수율인 4 mm/hr에서 유형 A 토양의 최대 투수율인 12 mm/hr까지, 2 mm/hr씩 증가시켜 그 영향을 분석하였다.

이때, 서울, 인천, 부산, 강릉, 광주 등 9개 주요지점의 강우시계열을 각각 적용하여 삭감대상부하비를 산정함으로써 시설의 제원 및 투수율에 따른 영향과 함께 지역별 강우특성에 대한 결과의 차이를 함께 살펴보았다.

3. Results and Discussion

3.1 매개변수 보정결과

본 연구에서는 연구대상지역의 강우유출수 및 TP 부하량의 거동을 재현하고자 EPA SWMM-Matlab 연계모듈을 이용하여 관련 매개변수를 자동적으로 보정하였다. 강우유출수 보정을 위해 사용된 EPA SWMM의 유출관련 매개변수들은 각 소유역의 W , d_s , %Zero로, W 의 경우 각 소유역의 면적에 비례하여 각각 추정하였으며, 나머지 d_s 및 %Zero는 동일한 값을 가지도록 추정하였다. 매개변수 최적화 과정을 통해 최종적으로 산정된 매개변수는 Table 3과 같다.

매개변수를 이용하여 모의한 강우사상별 강우유출수의 유출고(mm)와 실측된 강우유출수의 유출고(mm)를 Fig. 5에 나타내었다. 두 값의 상관성을 분석한 결과 해당 매개변수를 사용하였을 때 결정계수(R^2)와 모형효율계수(NSE) 값은 각각 0.98과 0.94로 나타났다.

또한 연구대상지역의 TP의 거동을 재현하기 위하여 매개변수 보정에 사용된 관련 매개변수는 각 소유역별 축적과 관련된 B_{max} 와 K_B , 쓸림과 관련된 EMC이다. 건물지역과 비건물지역을 구분하여 건물지역인 S1과 S3의 매개변수는 동일한 값을 사용하도록 하였으며, S2는 개별적인 값을 사용하도록 설정하였다. 매개변수 최적화를 통해 산정된 TP 부하량 관련 매개변수를 Table 4에 나타내었다.

Fig. 6는 추정된 최종 매개변수를 이용하여 모의한 강우사상별 TP의 부하량(kg)과 실측된 TP의 부하량(kg)을 나타낸 것이다. 두 값을 비교한 결과 결정계수(R^2)과 모형효율

계수(NSE) 값이 각각 0.81과 0.75로 산정되었다.

Chung et al. (1999)은 결정계수가 0.5 이상이고 모형효율계수는 0.3 이상, Green et al. (2006)은 결정계수가 0.5 이상, 모형효율계수는 0.4 이상의 값을 나타내면 모의 결과가 실측값을 잘 반영한다고 제안한바 있다. 따라서 본 연구에서 EPA SWMM과 Matlab 연계 모듈을 이용하여 최적화된 매개변수는 연구대상지역의 강우유출수 유출고 및 TP 배출부하량을 비교적 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

3.2 강우유출수처리비 및 삭감대상부하비 산정

우선, 기상청 61개 강우관측지점의 2006년부터 2016년까지의 시간강우자료를 이용하여 장기간 유출모의를 통해 다양한 지점의 강우시계열 적용에 따른 강우유출수처리비와 삭감대상부하비를 산정하였다. 그 결과, 지역별 강우특성에 따라 LID 시설의 성능에 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 LID 시설이 어떤 지역에 설치되는지에 따라 시설의 성능에 차이가 있을 수 있음을 의미하며, 기후변화 등으로 인하여 강우 특성이 변화된다면 시설의 성능 또한 그에 따라 영향을 받을 수 있음을 의미한다. Choi et al. (2017)에서 제시한 결과와 동일하게 지역별 강우특성은 강우유출수처리비 산정에 큰 영향을 미쳤으며(Fig. 7 참고), 강우특성이 LID 시설의 강우유출수처리비에 영향을 미침에 따라 삭감대상부하비 또한 강우특성에 적지 않은 영향을 받는 것으로 나타났다(Fig. 8 참고). 특히, 시설면적과 영향면적의 비(R_{fc})가 0.04인 표준 생태저류지를 설치하였을 때, 삭감대상부하비는 강우특성에 따라 최대 0.788(성산 지점), 최소 0.681(강화 지점)로 나타났으며, 평균적인 삭감대상부하비(0.736)를 기준으로 약 15% 정도의 변화율을 나타내

Table 3. Optimized parameters related to stormwater

Subcatchments	W (m)	d_s (mm)	%Zero (%)
S1	30.09	2.9731	0.0052
S2	33.71		
S3	29.06		

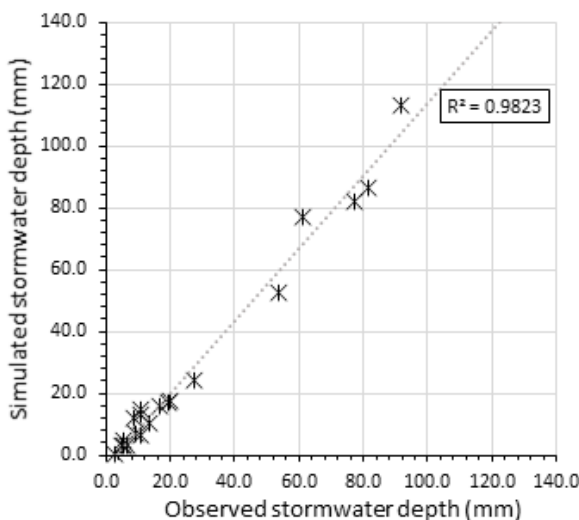


Fig. 5. Result of stormwater optimization.

Table 4. Optimized parameters related to water quality (TP)

Subcatchments	B_{max} (kg)	K_B (day ⁻¹)	EMC (mg/L)
S1, S3	4.5209	0.005	0.875
S2	4.5209	0.005	0.875

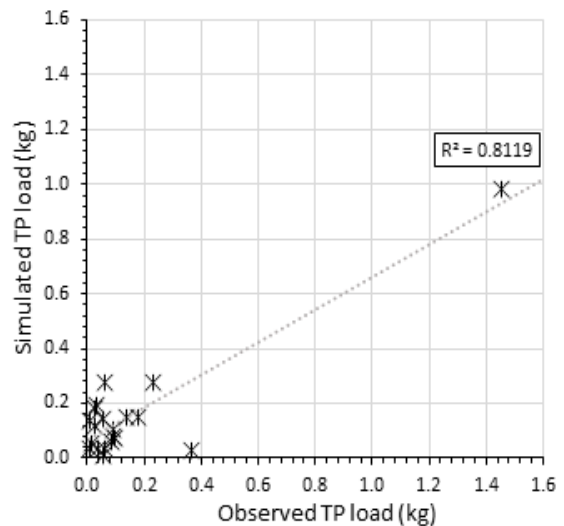


Fig. 6. Result of TP load optimization.

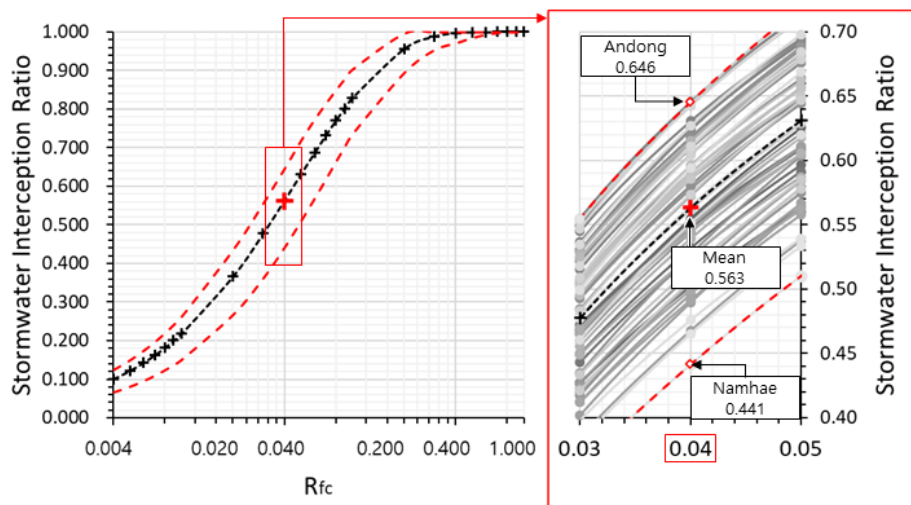


Fig. 7. Stormwater interception ratio with various local rainfall properties.

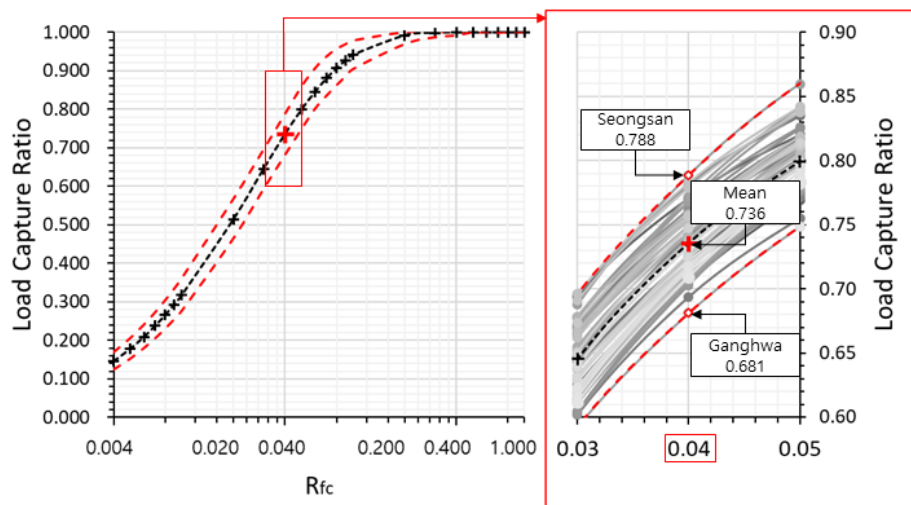


Fig. 8. Load capture ratio with various local rainfall properties.

는 것을 확인할 수 있었다.

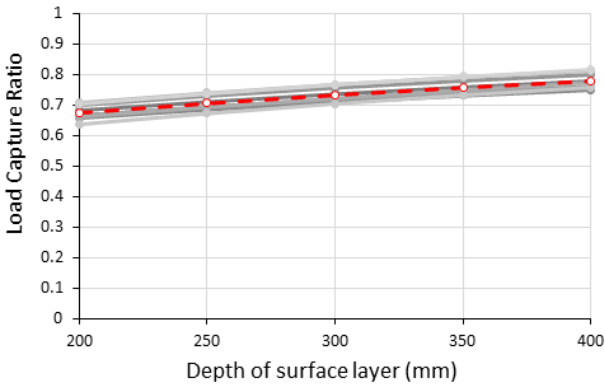
이에 지역별 강우특성에 따른 성능오차를 최소화하고자 61개 강우특성별로 모의된 강우유출수처리비 및 삭감대상부하비를 시설면적과 영향면적의 비에 따라 평균하여 전국 평균 강우유출수처리비 및 삭감대상부하비를 산정하였다. 참고로 Fig. 7와 Fig. 8에서 빨간색 점선은 강우특성에 따른 강우유출수처리비 또는 삭감대상부하비의 오차범위를 나타내며, 검은색 점선은 전국 평균 강우유출수처리비 및 삭감대상부하비를 나타낸다.

3.3 시설제원이 삭감대상부하비에 미치는 영향 분석

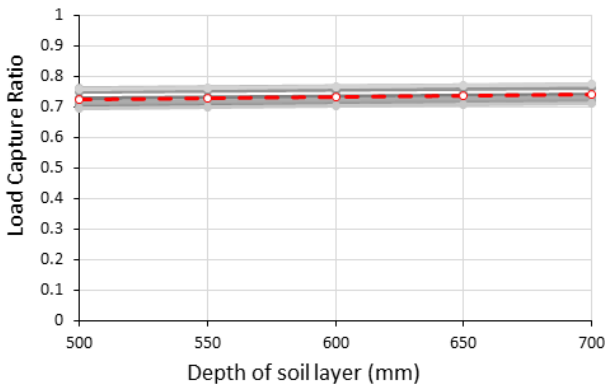
LID 시설의 제원이 LID 시설의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, 생태저류지 각 층의 깊이를 다양하게 변경 시켜가면서 여러 지점(서울, 부산, 강릉, 인천, 대전, 대구, 울산, 광주, 제주) 장기간 강우 시계열을 적용하여 삭감대상부하비를 산정하였다. 이때, 생태저류지의 시설면적과 영향면적의 비는 표준 값(0.04)으로 고정하였다.

앞서 확인한 바와 같이 지역별 강우특성에 따라 삭감대상부하비의 절대적인 값에는 차이를 나타냈으나, 제원의 변경에 따른 삭감대상부하비의 변화량은 상대적으로 큰 변화가 없음을 살펴볼 수 있었다. 참고로, Fig. 9에서의 각 실선은 지점별 강우를 각각 적용한 결과를 나타내며, 빨간색 점선은 평균 삭감대상부하비를 의미한다.

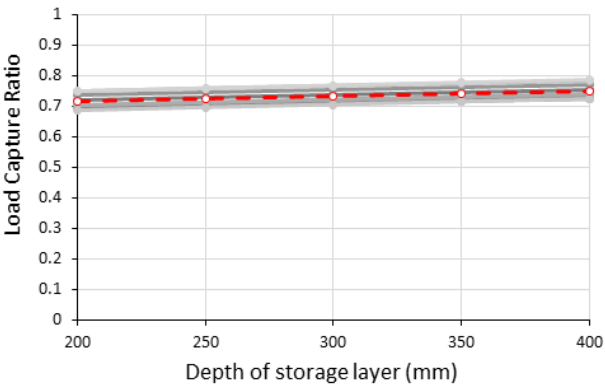
삭감대상부하비는 표층을 제외한 토양층이나 저장층의 깊이가 변경된다 하더라도, 시설의 성능에는 큰 변화가 없는 것으로 확인되었다. 가장 큰 변화를 나타낸 표층의 경우, 깊이가 100 mm 증가할 때 표준제원 대비 7%의 변화율을 나타내었다. 이는 만약 표준제원에서 표층의 깊이를 200 mm 증가시켜 설계할 경우(즉, 표층의 깊이를 500 mm로 설계), 삭감대상부하비가 약 14% 증가됨을 의미한다. 이는 다양한 지점의 강우시계열을 적용할 때 얻게 되는 최대 변화율과 유사한 결과이지만, 현실적으로 생태저류지의 표층의 깊이를 500 mm로 설계하는 것은 과도한 값으로 현실성을 확보하기 어렵기 때문에, 실제 적용 범위 내에서



(a) Surface layer (Soil layer = 600 mm, Storage layer = 300 mm)



(b) Soil layer (Surface layer = 300 mm, Storage layer = 300 mm)



(c) Storage layer (Surface layer = 300 mm, Soil layer = 600 mm)

Fig. 9. Load capture ratio for change of depth of each layer.

생태저류지 체원의 변화가 삭감대상부하비에 미치는 영향은 한계가 있을 것으로 판단된다. 표층 이외에 토양층과 저장층의 깊이 변화가 삭감대상부하비에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

3.4 기존 토양의 투수율이 삭감대상부하비에 미치는 영향 분석

LID 시설 아래의 기존 토양의 배수능이 시설의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 생태저류지가 설치되는 기존 토양의 투수계수를 변경시켜가면서 모의함으로써 삭감대상부하비에 미치는 영향을 살펴보았다. 기존 토양의 투수계수는 NRCS 수문학적 토양 그룹을 기준으로 B 유형 토

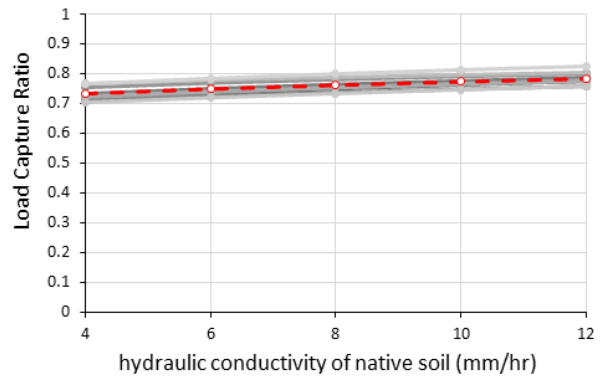


Fig. 10. Load capture ratio for hydraulic conductivity of native soil.

양의 최저 투수율인 4 mm/hr에서 A 유형의 최대 투수율인 12 mm/hr까지 변경시켰다.

주요 9개 지점의 강우시계열을 각각 적용하여 기존 토양의 투수율이 삭감대상부하비에 미치는 영향을 분석한 결과, 기존 토양의 배수능력이 좋을수록 생태저류지의 비점오염 물질 차집 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 10에 나타난 바와 같이, 만약 생태저류지가 12 mm/hr인 투수율을 가진 토양 위에 설치된다면, 현재 LID 시설이 설치될 수 있는 가장 보수적인 값으로 판단하여 적용한 4 mm/hr의 투수율보다 약 7% 증가한 삭감대상부하비가 산정되는 것으로 나타났다.

이는 생태저류지가 어떠한 토양 위에 설치되는지에 따라 시설의 성능에 유의한 차이를 보일 수 있음을 의미한다. 어떤 지점의 강우시계열을 적용하였는지(즉, 어느 지역에 LID 시설이 설치되었는지)에 따른 민감도(14%)보다는 작지만, 생태저류지가 설치 가능한 토양인 NRCS 수문학적 토양그룹 B 유형과 A 유형의 최소-최대 배수능 사이의 시설 성능 차이 7%는 생태저류지의 표층 100 mm의 변화와 유사한 민감도라고 할 수 있다. 따라서 NRCS 수문학적 토양그룹 A 유형인 토양에 표층 깊이 300 mm의 생태저류지와 동일 성능의 생태저류지를 NRCS 토양그룹 B 유형인 토양에 설치하고자 한다면, 표층 깊이를 400 mm로 증가시킴으로써 의도된 성능을 확보할 수 있을 것이다. 또한, Fig. 8의 결과로부터 NRCS 수문학적 토양그룹 C 유형이나 D 유형의 토양 위에 설치된 생태저류지가 설치될 경우에는 원하는 성능을 얻기가 매우 어려울 것임을 간접적으로 살펴볼 수 있다.

한편, 본 연구에서 최종적으로 제시하고자하는 지침으로써의 성능평가 공식은 시설의 성능을 보수적으로 산정하는 것이 타당하다고 판단되기에 원 토양의 투수계수를 4 mm/hr로 설정하여 삭감대상부하비 산정공식을 다음 절에서와 같이 유도하였다.

3.5 삭감대상부하비 공식 산정 및 비교

본 연구에서 산정된 삭감대상부하비와 기존의 기술지침에서 제시하고 있는 회귀상수를 이용하여 설계기준강우를

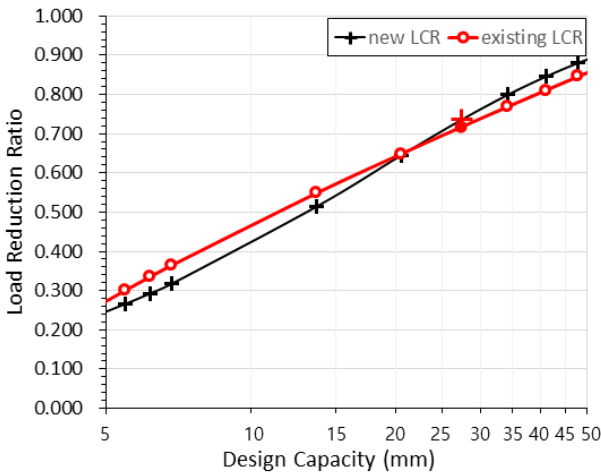


Fig. 11. Comparison between new and existing load capture ratio.

기준으로 산정된 삭감대상부하비를 비교하였다. 이를 위해 Eq. (4)를 이용하여 시설면적과 영향면적의 비를 설계기준 강우량으로 환산하고, 이를 기술지침에서 제시하는 경험공식(Eq. 5)에 대입하여 강우처리비를 산정한 후 다시 Eq. (6)을 이용하여 삭감대상부하비를 산정하였다. 기술지침에서는 5~50 mm 범위의 설계기준강우량으로부터 경험공식을 제시하고 있기에, 이에 상응하는 시설면적과 영향면적의 비(0.007~0.07)에 대한 삭감대상부하비를 비교하였다. Fig. 11는 본 연구에서 산정된 삭감대상부하비(new L_{CR})와 기술지침의 삭감대상부하비(existing L_{CR})를 나타낸 것이며, 이때 빨간색으로 채워진 원 및 십자표시는 표준 시설면적과 영향면적의 비에서의 삭감대상부하비를 의미한다.

약 5~15 mm의 낮은 설계기준강우량에서는 본 연구에서 산정한 삭감대상부하비가 기존의 삭감대상부하비보다 작게 산정되는 것을 확인할 수 있다. 반대로 25~50 mm의 높은 설계기준강우량에서는 기존의 삭감대상부하비보다 크게 산정되었다. 즉, 시설의 설계기준강우량이 낮은 경우, 즉 시설의 규모가 매우 작을 경우에는 기존의 삭감대상부하비 산정공식은 생태저류지의 비점오염물질 차집 성능을 과대평가할 가능성이 있으나, 시설의 설계기준강우량이 클 경우, 즉, 시설의 규모가 적절한 수준 이상으로 확보되었을 경우에는 생태저류지의 비점오염물질 차집 성능을 과소평가할 가능성이 있는 것으로 해석할 수 있다. 표준 시설면적과 영향면적의 비(0.04)에 해당하는 27.4 mm의 설계기준 강우량에 대한 삭감대상부하비는 기존의 회귀상수를 이용하였을 때는 0.716, 본 연구에서 제시한 방법을 이용하였을 때는 0.736으로 산정되어 약 3%의 오차가 발생하는 것으로 나타났다.

최종적으로 생태저류지의 삭감대상부하비 산정공식을 유도하기 위하여 앞서 산정된 강우유출수처리비와 삭감대상부하비의 관계를 분석하였다. 그 후, 기술지침에서 제시하고 있는 산정공식(Eq. 6)과 동일한 형태의 강우유출수처리비 기반 산정공식을 도출하였으며, TP에 대한 새로운 회귀상수를 유도하였다(Fig. 12). 이때, 모든 범위의 강우유출

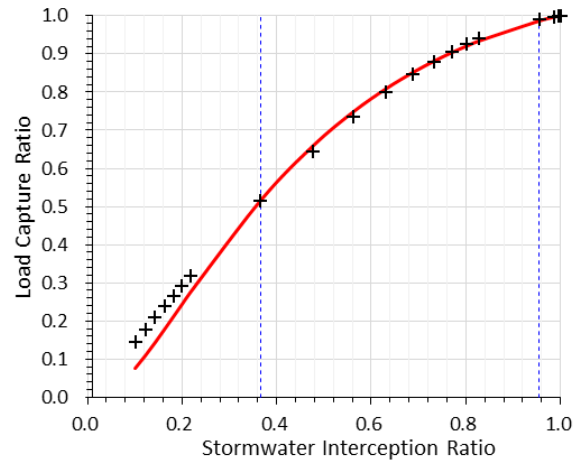


Fig. 12. Load capture ratio for stormwater interception ratio.

수처리비를 고려하여 경험공식을 유도할 경우 삭감대상부하비가 왜곡될 가능성이 있기에 실무적인 범위의 시설면적과 영향면적의 비(0.004~0.2)에서 산정된 강우유출수처리비(0.37~0.96)에 대하여 삭감대상부하비 경험공식을 유도하였다(Eq. 7). 참고로 Fig. 10에서 검은색 십자표식은 전국 평균 강우유출수처리비에 따른 삭감대상부하비, 빨간색 직선은 새로운 경험공식을 이용하여 산정된 삭감대상부하비, 그리고 파란색 점선은 경험공식 유도에 사용된 강우유출수처리비의 범위를 나타낸다.

$$L_{CR} = e^{\{-0.3548 \times [\ln(S_m)]^2 + 0.3139 \times \ln(S_m)\}} \quad (7)$$

4. Conclusion

현재 LID 시설의 성능평가에 이용되고 있는 기술지침의 성능평가 공식은 LID 시설의 성능을 평가하는데 적절하지 못할 가능성이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 LID 시설 중 생태저류지에 적합한 삭감대상부하비를 새롭게 제시하여 LID 시설의 성능평가 방법을 개선하고자하였다. 이에 우선적으로 EPA SWMM을 이용하여 불투수면적으로 구성된 연구대상지역의 수문 및 수질 현상을 재현하고, 표준 생태저류지 LID 시설에 대하여 다양한 지점의 강우시계열에 따른 시설의 성능을 살펴보았다. 그 후, 생태저류지의 시설제원, 기존 토양의 투수율에 대한 시설 성능의 민감도를 분석하였으며, 최종적으로 생태저류지에 적합한 삭감대상부하비 산정 공식을 새롭게 유도하였다.

본 연구를 통해 산정된 생태저류지의 삭감대상부하비를 기존의 비점오염저감시설을 대상으로 고안된 성능평가 방법과 비교한 결과, 기존의 방법은 생태저류지의 비점오염물질의 차집 성능을 왜곡할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시된 방법을 이용한다면 보다 현실에 부합하는 생태저류지의 성능을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 본 연구에서는 61개의 지점의 강우시계열을 각각 적용하여 모의된 결과를 단순 평균하여 지침으로서의 단일

한 회귀공식을 제시하여 성능평가지 지역별 강우특성에 따른 오차를 감소시키고자 하였다. 그러나 연구결과에서 확인할 수 있듯이 강우특성은 LID 시설에 큰 영향을 미치기 때문에 추후 강우특성을 권역별 또는 강우크기 등으로 세분화하여 회귀상수를 제시하여 성능평가의 정확성을 향상시킬 필요가 있을 것이다.

추가적으로 LID 시설 아래의 원 토양의 배수능력이 LID 시설의 성능에 미치는 영향을 살펴본 결과, 원 토양의 배수능력은 LID 시설의 성능에 유의한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 지침으로써의 성능평가공식 산정을 위해 LID 시설 아래의 토양의 투수율을 최대한 보수적으로 설정하였으나, LID 시설을 토양의 배수가 양호한 지역에 설치할수록 시설의 성능은 유의하게 증가하기 때문에 보다 더 정확한 성능을 평가하기 위해서는 기존토양의 특성을 고려할 필요가 있을 것이다. 그러나 토양의 특성에 의한 영향을 단일한 공식으로 표현하는 것에는 한계가 있으며, 이를 고려하기 위해서는 추가적인 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

또한, 아직까지 LID 시설의 성능에 대한 체계적인 모니터링 작업이 부재하며 실측값과의 비교가 불가능하기에, 추후 실제 모니터링 자료를 확보하여 기존 성능평가 방법의 정량적인 문제점과 본 연구에서 모델링을 통해 산정된 방법의 타당성을 보다 자세히 검증할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경정책기반공공기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2016000200002).

References

- Alabama Department of Environmental Management (ADEM). (2007). *Low impact development handbook for the state of Alabama*, Alabama Department of Environmental Management.
- 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*, 33(5), 563-571. [Korean Literature]
- Chung, S. W., Gassman, P. W., Kramer, L. A., Williams, J. R., and Gu, R. R. (1999). Validation of EPIC for two watersheds in southwest Iowa, *Journal of Environmental Quality*, 28(3), 971-979.
- Credit Valley Conservation (CVC). (2012). *Low impact development stormwater management planning and design guide*, Credit Valley Conservation.
- 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 storm water management, *Journal of The American Water Resources Association*, 46(5), 907-918.
- Department of Energy and Environment (DOEE). (2013). *Stormwater management guidebook*, Department of Energy and Environment, 99-128.
- Department of Environmental Resources (DER). (2001). *The bioretention manual*, Prince George's County Department of Environmental Resources Programs and Planning Division, Maryland.
- Elliott, A. H., Trowsdale, S. A., and Wadhwa, S. (2009). Effect of aggregation of on-site storm-water control devices in an urban catchment model, *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, 14(9), 975-983.
- Grimmond, S. (2007). Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming, *The Geographical Journal*, 173(1), 83-88.
- Green, C. H., Tomer, M. D., Di Luzio, M., and Arnold, J. G. (2006). Hydrologic evaluation of the soil and water assessment tool for a lager tile-drained watershed in Iowa, *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 49(2), 413-422.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, 377(1), 80-91.
- Han, W. (2011). Cases and implications of low impact development for urban stormwater management improvement in USA, *Korea Research Institute for Human Settlements Policy brief*, 344, 1-6. [Korean Literature]
- Korea Environmental Corporation (KECO). (2009). *The study report of zeroing the feasibility for non-point source pollution in urban areas*, Korea Environmental Corporation, 222-225. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2016). *Installation, administration manual of non-point sources pollution control facilities*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2014). *The total amount of water pollution management technical guidance*, National Institute of Environmental Research, 67-68.
- Palhegyi, G. E. (2010). Modeling and sizing bioretention using flow duration control, *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 417-425.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (1999). *Storm water technology fact sheet: bioretention*, United States Environmental Protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA).. (2015). *Storm water management model user's manual version 5.1*, United States Environmental Protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2016a). *Storm water management model reference manual volume I - Hydrology*, United States Environmental Protection Agency.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2016b). *Storm water management model reference manual volume III - Water Quality*, United States Environmental Protection Agency.
- Virginia Water Resources Research Center (VWRRC). (2013). *Virginia DCR stormwater design specification No.9*, Virginia Water Resources Research Center, 47-59.