

## 저영향개발 시설 설계 기준에 따른 용량 평가 방법 연구

임지열·길경익\*†

고양시정연구원 도시정책연구실  
\*서울과학기술대학교 건설시스템공학과

### Research on Design Capacity Evaluation of Low Impact Development according to Design Criteria

Jiyeol Im·Kyungik Gil\*\*

*Department of Urban & Environmental Research, Go-Yang Research Institute*

*\*Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology*

(Received : 23 December 2021, Revised : 14 February 2022, Accepted : 14 February 2022)

#### 요약

전 세계적으로 도시화로 인해 파괴된 자연물 순환시스템 회복을 위해 저영향개발 (Low Impact Development, LID) 시설에 대한 관심이 커지고 있다. 하지만, LID 시설 용량 적정성 평가를 위한 종합적인 분석이 이루어지지 않아 LID 시설 도입에 많은 어려움이 제기되고 있다. 본 연구에서는 LID 시설 4개소(식생수로, 식생여과대, 식생체류지 및 투수블록)의 강우 모니터링 결과를 바탕으로 저감 효율 및 적정 용량 산정 방안을 분석하였다. WQV와 WQF을 설계 기준으로 하는 LID 시설의 강우 유출수(37%) 및 오염물질(TSS, BOD, TN 및 TP) 별 저감 효율(20% ~ 37.1%)이 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 용량 적정성 평가를 위한 SA/CA 그래프 도출 결과 모든 항목에서 결정계수 0.5 이상(비선형회귀모형 기준)으로 나타났으며, 특히 강우 유출수 및 TP에서 높은 결정계수를 보였다. 그리고 본 연구에서 제안하는 LID 시설의 구조적 차이를 고려한 'SA/CA & L/CA' 그래프 도식 결과, 'SA/CA'보다 강우 유출수, TSS 및 TP 결정계수가 향상됨을 확인하였다. 본 연구를 통해 LID 시설의 용량 적정성 평가를 위한 'SA/CA & L/CA' 적용 가능성을 확인하였으며, 향후 일반화 및 표준화를 위한 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다.

핵심용어 : 비점오염원, 그린인프라, LID, 용량설계기준

#### Abstract

The interest in LID facilities is increasing worldwide for recovery of natural water cycle system to destroy by urbanization. However, problems are raised when installation of LID because comprehensive analysis about design capacity adequacy of LID facilities was not conducted completely. In this research, removal efficiency and design volume adequacy of LID facilities were analyzed based on rainfall monitoring data in four LID facilities(Vegetated Swale, Vegetative Filter Strip, Bio-Retention and Permeable Pavement). As a result, group of LID facility designed on WQV was shown higher flow(37%) and pollutants(TSS, BOD, TN and TP) removal efficiencies(20 ~ 37%) than group of LID facility designed on WQF. SA/CA graph was drawn for evaluation of design volume adequacy based on rainfall monitoring data. In this SA/CA graph, coefficient of determination show over 0.5 in all parameter, especially, Flow and TP were show over 0.95. And, 'SA/CA & L/CA' graph considering difference of structure mechanism in LID facility suggested in this research was confirmed that improved coefficient of determination in flow, TSS and TP than SA/CA graph. According to this research results, feasibility of applying 'SA/CA & L/CA' graph for evaluation of design volume adequacy in LID facility, and it is necessary to follow up research for generalization and normalization.

Key words : Non-point pollution source, Green Infrastructure, LID, Design volume criteria

†To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology  
E-mail: [kgil@seoultech.ac.kr](mailto:kgil@seoultech.ac.kr)

• Jiyeol Im Department of Urban & Environmental Research, Go-Yang Research Institute / Associate Research Fellow ([jiyim@gyri.re.kr](mailto:jiyim@gyri.re.kr))  
• Kyungik Gil Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology / Professor ([kgil@seoultech.ac.kr](mailto:kgil@seoultech.ac.kr))

# 1. 서 론

우리나라 중앙정부 및 지방자치단체의 물순환과 관련된 주요 정책으로 도시 물순환을 위한 저영향개발 및 그린인프라(Green Infrastructure, GI)를 들 수 있다(Lee and Kim, 2016). 이는 급격한 도시화로 인한 불투수면적의 증가로 인해 야기되는 건천화, 도시 홍수, 도시 가뭄 및 수생태계 오염의 문제 등을 자연적인 물순환 시스템을 회복하여 해결하고자 하는 목적이다(Eckart et al., 2017; Vogel et al., 2015). 또한 미국, 독일, 호주 및 일본 등 해외 각국에서도 우리나라와 같이 도시 물순환 시스템 구축에 관심을 기울이고 있다(Kang et al., 2014a; Kang et al., 2014b, Kim 2014). 국가마다 다소 정책 명칭에서 차이가 있으나, 핵심 사항으로 도시 개발로 인해 발생한 물순환 체계 왜곡을 개발 이전상태로 되돌리려고 하는 것은 공통사항이다. 이러한 각국의 기술들은 각 나라의 실정을 고려하여 구축된 것으로 무분별한 국내 도입은 오히려 국내 물순환 시스템 구축에 혼란을 일으킬 가능성이 크다. 따라서 국내 실정에 적합한 그린인프라의 조성 방안이 필요한 시점이다(Kang et al., 2014b; Kim and Zoh, 2015, Lee et al., 2016).

앞서 언급한 대로, GI 구축을 위한 대표적인 LID 시설은 식생수로, 식생여과대, 식생체류지, 투수블록 및 인공습지 등이 있다(MOE, 2013a; MOE, 2013b; MOE, 2016). 이와 같은 LID 시설의 공통사항은 강우 유출수를 침투, 침투 및 저류를 통해 유출을 억제하고, 강우 유출수 내 함유된 오염물질(비점오염물질)을 침전, 여과 및 식생을 이용하여 저감시킨다는 것이다(Shin and Gil, 2015; Valiinski and Chandler, 2015). 또한 각 LID 기술별 설계 및 유지관리를 위한 인자 및 범위에 대해 많은 연구가 이루어져 다양한 LID 기술 설계 매뉴얼 등이 발간되었다(MOE, 2009; MOE, 2013b; MOE, 2016). 특히, 2016년 환경부에서 발간한 ‘비점오염 저감 시설 설계 및 유지관리 매뉴얼’에서는 설계 용량 산정 기준을 비점오염 저감 시설 및 LID 시설의 기본 구조를 고려하여 수질 처리용량(Water Quality Volume, WQV)과 수질처리용량(Water Quality Flow, WQF)으로 분류하고 있다. 이처럼 국내 비점오염 저감 시설(LID 포함)의 설계 매뉴얼은 현재까지도 개정 및 보완되고 있으며, 최적 설계를 위한 적정 설계 인자 및 범위에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다(Palla and Gnecco, 2015). 그중 최근 LID 시설의 적정 면적 선정을 위해 시설 면적 / 유역 면적비(Surface area / Catchment area, SA/CA)를 이용하는 방안이 제시되어 많은 연구가 이루어지고 있다(Hong and Kim, 2016; Park and Gil, 2018). 기존 연구에서는 LID 시설의 종류와 관

계없이 공통적으로 시설과 유역의 면적비를 활용하는데 이는 시설의 기본 구조를 고려하지 못한 분석이다. WQF를 설계 인자로 활용하는 시설은 기본 구조가 흐름인 반면, WQV를 설계 인자로 활용하는 시설은 기본 구조가 저류로 명확한 차이가 있다. 하지만, 시설 면적비로 분석할 경우 WQF로 설계하는 시설의 특성을 명확하게 반영하지 못할 가능성이 크며, 이에 대한 보완 방안을 마련해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 국내에 도입된 대표적인 LID 시설인 식생수로(Vegetated swale, VS), 식생여과대(Vegetative Filter Strip, VFS), 식생체류지(Bio-retention, BR) 및 투수블록(Permeable Pavement, PP)에서 현장 효율 평가 모니터링을 실시하였다. 모니터링 결과를 바탕으로 WQF와 WQV로 설계하는 시설의 용량 및 비점오염물질 저감 효율 차이를 분석하였으며, 설계 기준별 특성을 고려한 적정 면적 산정 방안을 검토하고자 한다.

# 2. 연구방법

## 2.1 연구 대상 LID 기술

본 연구의 연구 대상 LID 기술은 식생수로, 식생여과대, 식생체류지 및 투수블록을 선정하였다. 선정된 기술은 용량 설계 기준으로 식생수로와 식생여과대는 수질 처리 용량 그리고 식생체류지와 투수블록은 수질 처리용량을 적용하여 본 연구의 목적을 달성할 수 있는 기술을 선정하였다(환경부, 2016). 모니터링 대상 시설을 선정하기 위해 각 기술의 특징을 명확히 파악할 수 있으며 중앙정부에 의한 관리가 이루어지는 시설을 선정하였다. 선정된 시설은 경기도 용인시에 위치한 식생수로와

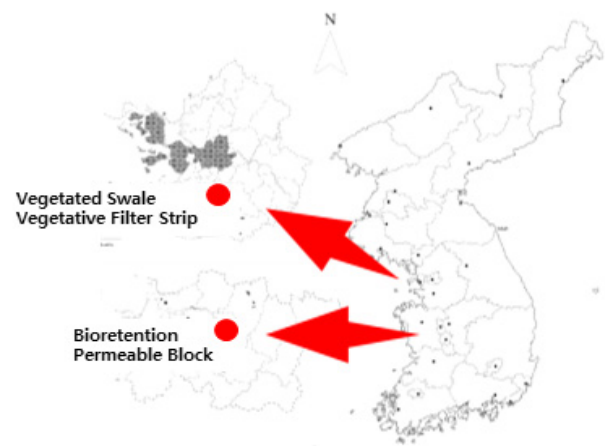


Fig. 1. Location of monitored LID facilities

Table 1. Characteristics of Monitored LID facilities

Contents	VS	VFS	BR	PP
Land use	Road	Forest land	Park	Park
Catchment Area (m <sup>2</sup> )	7,700	25,300	220	16
Surface Area (m <sup>2</sup> )	40	84	109	16
Length (m)	30	75	19	4
CA/SA	0.005	0.003	0.495	1.0
Design Factor	WQF	WQF	WQV	WQV

식생여과대 그리고 전라북도 전주시에 위치한 식생체류지와 투수블록 4개 시설이다. 각 기술의 공통적인 유량 및 오염물질 저감 기작은 침투 및 여과이며, 투수블록을 제외한 나머지 시설의 경우 식생에 의한 영향도 기대할 수 있다. Fig. 1과 Table 1에서는 연구 대상 시설의 위치와 재원을 정리하였다.

### 2.2 모니터링 강우 사상

Table 2는 본 연구를 위해 각 연구 대상 시설에서 실시한 모니터링 강우 사상을 보여주고 있다. 식생수로와 식생여과대는 실 강우를 대상으로 모니터링을 수행하였으며, 식생체류지와 투수블록은 인공강우 및 실 강우+인공강우를 통해 강우 모니터링을 수행하였다. 이와 같은 강우 모니터링 방법의 차이를 둔 것은 상대적으로 식생체류지와 투수블록의 유역면적이 작아 시설 내 유출이 발생할 수준의 강우 유출수를 확보할 수 없기에 인공강우를 대상으로 실험을 실시하였다. 강우 모니터링은 식생수로 8회, 식생여과대 8회, 침투저류지 12회, 투수블록 12회로 총 30회 수행하였다. 모니터링 강우 사상의 강우량의 범위는 식생수로 2 ~ 90mm, 식생여과대 2 ~ 120mm, 식생체류지 1.8 ~ 150mm 그리고 투수블록 47.5 ~ 227.7mm의 범위를 보였다. 또한 평균 강우강도는 1.0 ~ 7.5mm/hr, 식생여과대 0.7 ~ 23.5mm/hr, 식생체류지 2.9 ~ 77.6mm/hr 그리고 투수블록 2.0 ~ 32.9mm/hr의 범위로 다양한 강우 조건을 대표할 수 있도록 모니터링을 실시하였다.

### 2.3 모니터링 방법

본 연구의 모니터링 대상 시설은 식생수로, 식생여과대, 식생체류지 및 투수블록 총 4개소로 유역 특성, 설치 및 현장 상황 등을 고려하여 모니터링 방법을 도출하였다. 식생수로는 유입부 이후 30m 지점을 유출부로 하여 모니터링을 실시하였으며, 유역이 100% 도로인 특징을 반영하여, 유출 시작과 동시에 5분 간격으로 시료를 채취하고 1시간 이후 강우강도, 유입 유량 및 탁도를 기준으로 시료를 채취하였다. 식생여과대는 시설 유입부와 유출부에서 모니터링을 실시하였으며, 토지이용 형태가 대부분 임야 및 논인 형태로 이루어져 있어 현장에서 강우강도, 유입 유량 및 탁도를 기준으로 시료 채취 시기를 정하였다. 식생체류지는 지표면 유출, 투수블록은 시설 하부에 설치된 유공관을 통한 유출을 유출로 하여 샘플링을 실시하였다. 식생수로와 식생여과대의 경우 실 강우를 대상으로 모니터링을 실시하였으며, 식 체류지와 투수블록의 경우 인공강우를

대상으로 모니터링을 진행하였다. 식생체류지와 투수블록에서 인공강우로 실험을 진행한 이유는 식생체류지의 경우 유역면적이 인도이지만 100% 투수블록으로 구성되어있어 유역면적에서 강우 유출수의 유입이 이루어지지 않기 때문이다. 또한 투수블록의 경우에도 유역면적이 시설 자체 면적과 동일하기 때문에 인공강우를 통한 실험을 실시하였다. 즉, 유역면적의 차이로 시설의 효율 평가를 위한 충분한 강우 유출수의 유입이 불가능한 시설에서는 인공강우를 통한 효율 분석을 실시하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 LID 시설 유입 및 유출 오염부하량

Fig. 2에서는 본 연구 대상 LID 시설인 의 강우 모니터링 결과의 유입 및 유출 오염부하량(TSS, BOD, TN 및 TP)을 정리하였다. Fig. 2 (a) VS의 경우 TSS, TN, BOD 그리고 TP 순으로 유입 오염부하량이 높은 것으로 분석되었으며, 이는 VS 유역 토지 이용 현황이 도로로 건기에 차량 통행으로 인한 다량의 분진이 노면에 축적된 것에 영향을 받은 것으로 판단된다. Fig. 2 (b) VFS의 경우 BOD 오염부하량이 가장 높은 것으로 분석되었다. 이는 VFS 유역은 강우 시 다량의 유기물이 발생 가능성이 큰 논, 밭 및 산지로 이루어져 있기 때문으로 사료된다. (c) BR과 (d) PP의 경우 인위적으로 각각 2kg과 0.5kg의 도로 준설토를 실험 전 시설에 살포 후 인공강우 실험을 실시하였으며, TSS를 제외하고 BOD 부하량이 가장 높은 것으로 분석되었다. 시설별 유입부하량이 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 각 시설 유역의 토지 이용 현황의 영향을 받았을 것으로 판단된다. 이와 같은 분석 결과는 도로와 같이 인위적인 영향을 받는 지역에서 강우 시 다량의 비점오염물질이 유출된다는 것을 예측할 수 있다. 하지만 본 결과를 일반화시키기 위해서는 추가적인 자료 확보를 통한 분석이 필요하다.

### 3.2 LID 시설 별 저감 효율

Fig. 3은 연구 대상 LID 시설인 식생수로, 식생여과대, 식생체류지 및 투수블록의 유량 및 저감 효율 결과를 보여주고 있다. Fig. 3. (a) 유출 저감 효과의 경우 식생체류지(94.6%) > 투수블록(86.1%) > 식생수로(59.7%) > 식생여과대(51.6%) 순으로 나타났다. 최대 및 최소 효율을 보인 식생체류지와 식생여과대 효율 차이는 약 43%에 달하는 것으로 분석되었다. Fig. 3 (b) ~ (e)의 오염물질 저감 효과의 경우 SOL(Summation Of Load)을

Table 2. Statistical summary of monitored rainfall

Contents		Rainfall (mm)	Rainfall duration (hr)	Average Rainfall intensity (mm/hr)
VS	Median ± SD	30.5±26.1	7.5±7.3	3.26±2.2
	Min / Max	2 / 90	2 / 25	1 / 8
VFS	Median ± SD	30.5±30.4	8±5.5	3.7±5.0
	Min / Max	2 / 120	0.2 / 25	0.7 / 24
BR	Median ± SD	91.9±42.8	9.7±13.5	8.4±8.2
	Min / Max	2 / 150	1 / 46	2 / 33
PP	Median ± SD	191.3±71.5	12.1±13.2	8.9±32.1
	Min / Max	48 / 228	3 / 41	3 / 78

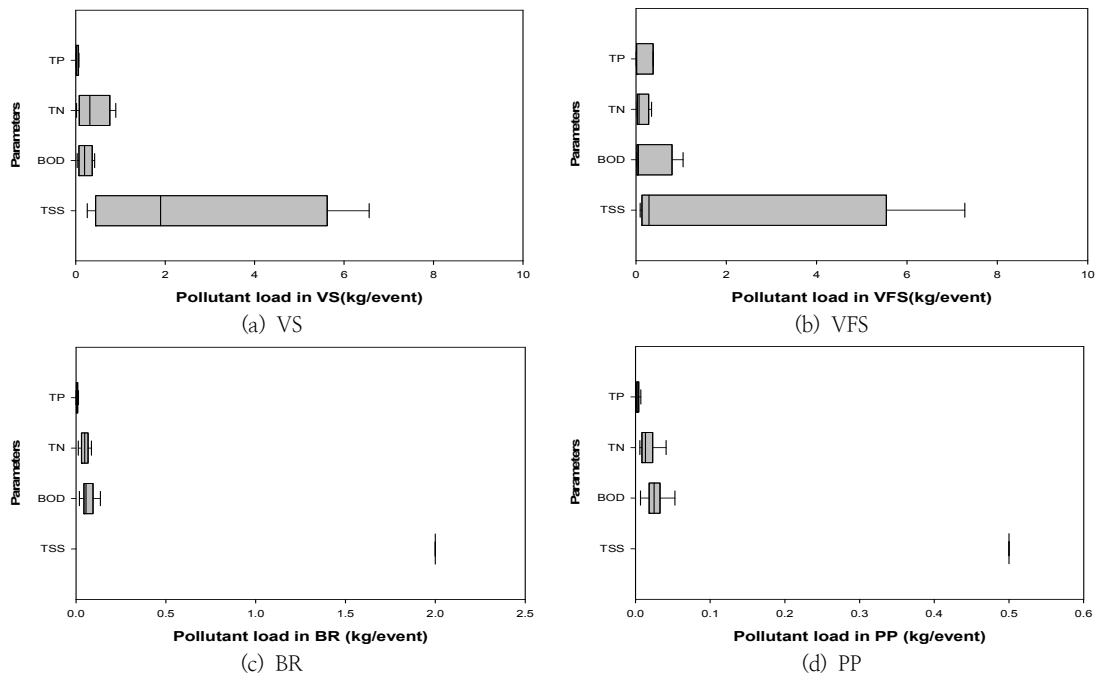


Fig. 2. Inflow pollutants load of monitored LID facilities

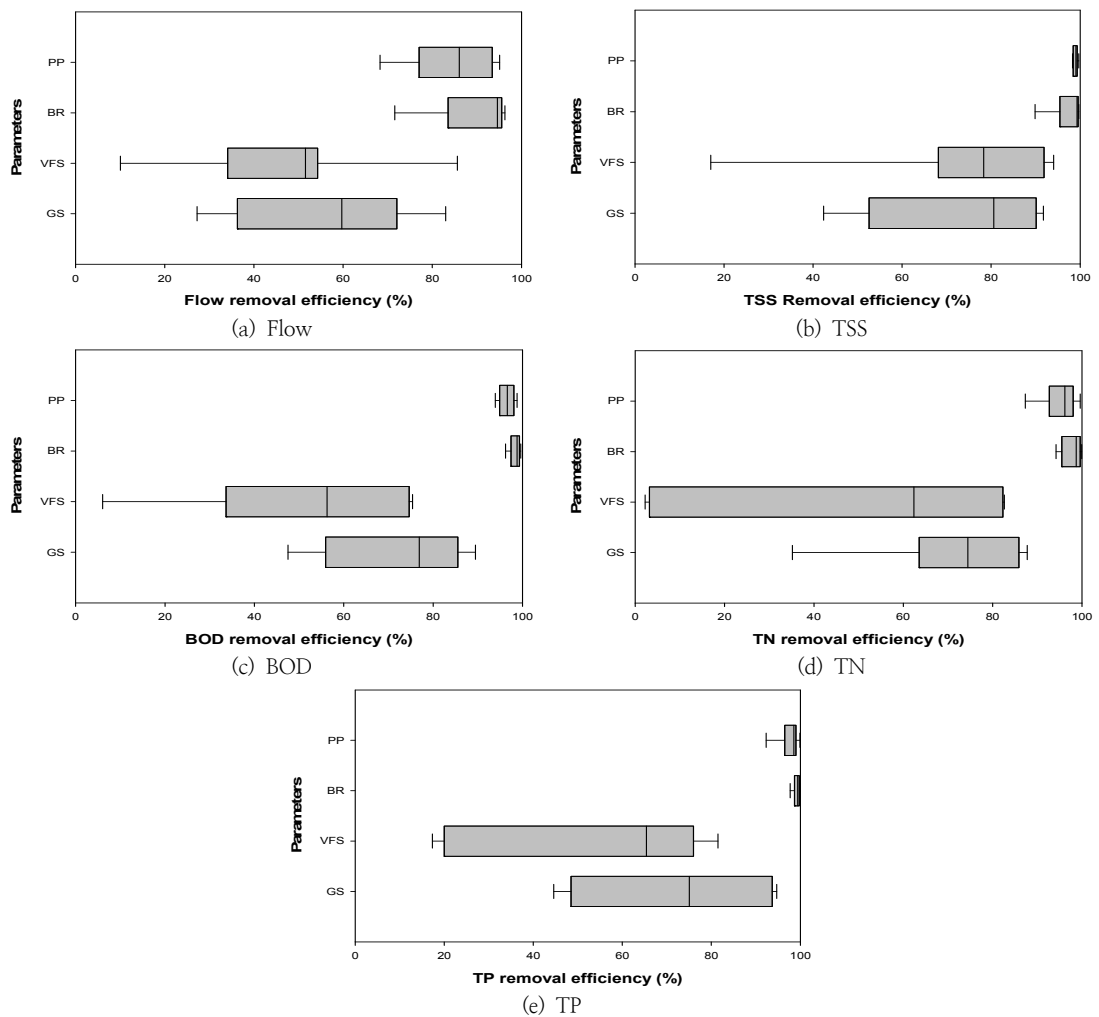


Fig. 3. Flow and pollutants removal efficiency of monitored LID facilities

활용하였기에 유출 저감 효율에 큰 영향을 받아 유출 저감 효율과 유사한 경향을 보인 것으로 나타났다. 현장 모니터링 결과 모니터링 대상 시설은 중앙값을 기준으로 TSS는 70% 이상, BOD 60% 이상, TN 60% 이상 그리고 TP 60% 이상의 저감 효율을 보였다. 식생체류지와 투수블록의 경우 오염물질 저감 효율에서 중앙값 기준으로 약 90% 이상의 저감 효율을 보인 것으로 분석되었다. 또한 식생수로와 식생여과대의 경우 유량 및 오염물질 저감 효율의 범위가 상대적으로 식생체류지와 투수블록에 비해 넓은 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 저감 효율의 차이를 보인 주요 원인은 첫째, SA/CA(LID facility Surface Area / Catchment Area)의 영향을 고려해 볼 수 있다. 상대적으로 낮은 저감 효율을 보인 식생수로와 식생여과대의 SA/CA는 0.006과 0.003으로 식생체류지와 투수블록의 SA/CA인 0.495와 1.0보다 낮은 값을 보였기 때문에 판단된다. 이를 시설 면적과 유역 면적으로 변환하여 설명하면 LID 시설 단위 면적당 저감해야 하는 유역 면적이 식생수로와 식생여과대가 각각 188.7 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>와 301.2 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>인 반면, 식생체류지와 투수블록은 각각 5.4 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>와 1m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>로 작기 때문에 저감 효율에서 큰 차이를 보인 것으로 판단된다. 둘째, 시설의 구조적 차이를 생각할 수 있다. 식생수로와 식생여과대는 흐름을 기반으로 강우 유출수를 저감시키는 시설인 반면, 침투저류지와 투수블록은 저류를 기반으로 하는 LID 시설이다. 이에, Table 1에서 밝힌 바와 같이 LID 시설 설계 시 사용하는 용량 산정 기준도 각각 WQF와 WQV의 다른 값을 적용한다(MOE, 2016). 그 외 모니터링 강우 조건의 차이 및 토지 이용 형태의 차이 등을 생각할 수 있으나, 다양한 강우 조건에서 다수의 모니터링을 실시하였기에 그 영향은 앞서 언급한 두 가지에 비해 상대적으로 영향은 미미할 것으로 판단된다.

### 3.3 WQF와 WQV 기반 시설의 저감 효율 비교

Fig. 4는 연구 대상 시설을 용량 산정 기준으로 그룹화(Fig. 4 (a) WQF, (b) WQV)하여 유량 및 오염물질 저감 효율 비교·분석 결과를 보여준다. Fig. 4를 통해서도 확인할 수 있듯이, 모든 항목에서 전반적으로 WQV를 용량 산정 기준으로 하는 그룹의 효율이 높은 것으로 나타났다. 중앙값을 기준으로 강우 유출수 저감 효율의 경우 37.4% 차이를 보였으며, 오염물질 저감 효율도 항목별 20 ~ 37.1%의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 현장 모니터링의 저감 효율 범위도 WQV를 기반으로 하는 LID 시설에서 적은 것으로 분석되었다. 이는 상대적으로 WQV를 기준으로 하는 LID 시설에서 더 안정적인 저감 효율을 기대할 수 있다는 것으로 해석할 수 있다. 이와 같은 효율의 차이를 보이는 이유로 현장 모니터링 강우 조건, 건기 일수 및 토지 이용 형태 등 다양한 원인이 있을 수 있으나 기본적으로 WQF와 WQV를 용량 산정 기준으로 하는 LID 시설의 구조적 차이를 들 수 있다. 일반적으로 WQF를 용량 산정 기준으로 하는 LID 시설은 식생수로와 식생여과대로 강우 유출수가 표면을 따라 흐르며 표면에 의한 여과 및 일부 침투를 기본 구조로 하고 있다. 반면, WQV를 용량 산정 기준으로 하는 LID 시설은 저류지, 침투도랑, 식물 재배화분, 식생체류지 및 투수성 포장 등은 일시적으로 강우

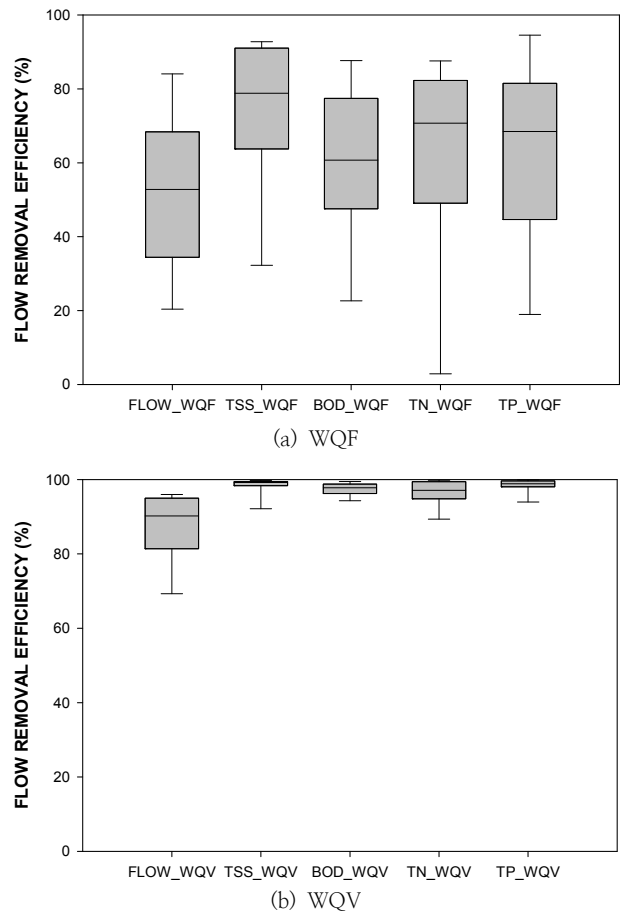


Fig. 4. Comparison of removal efficiency (Flow and pollutants) according to design Factor

유출수를 저류하였다가 하부토양으로 침투시키는 것이 기본 구조이다(환경부, 2016). 이처럼 WQF와 WQV를 용량 산정 기준으로 하는 LID 시설은 기본 구조적인 부분에서 명확한 차이를 보인다(MOE, 2016). 따라서 이와 같은 LID 시설의 기본 구조가 유량 및 오염물질 저감 효율 차이의 주요 원인으로 작용하였을 것으로 판단된다. 분석 모니터링 시설 및 모니터링 자료 개수의 부족과 실험 조건의 차이로 인해 WQF를 용량 산정 기준으로 하는 LID 시설보다 WQV를 용량 산정 기준으로 하는 LID 시설이 강우 유출수 및 오염 유출 억제에 효과적이라고 일반화하기에는 다소 무리가 있다. 하지만, 본 연구 결과를 통해 WQF와 WQV를 용량 산정 기준으로 적용하는 LID 시설의 효율에서 다소 차이가 있을 가능성을 확인할 수 있으며, 추가적인 조사·연구를 통해 이에 대한 검증이 이루어져야 할 것이다.

### 3.4 LID 시설의 적정 면적 산정 방안

본 절에서는 최근 적정 LID 시설의 용량 및 면적 산정을 위해 연구되고 있는 저감 효율과 시설면적/유역면적(SA/CA)의 상관성 분석을 본 연구 대상 시설의 모니터링 기반 저감 효율을 이용하여 분석한 결과를 분석하였다. SA/CA는 앞서 2장에서 제시한 연구 대상 시설의 설계 인자를 활용하였으며, LID 시설별 SA/CA는 식생수로 0.0053, 식생여과대 0.0033, 식생

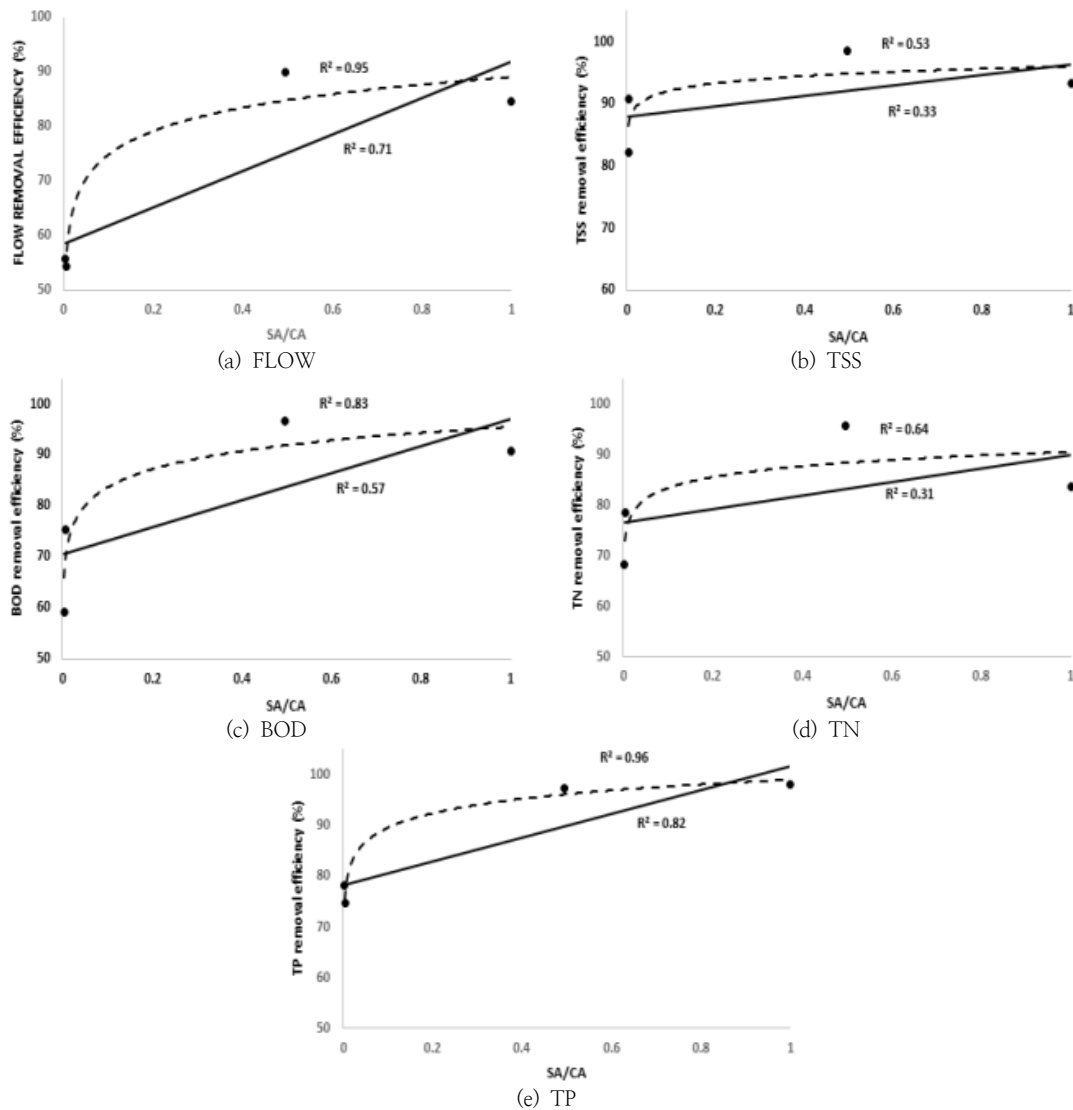


Fig. 5. Regression curve between SA/CA and removal efficiency

체류지 0.4955 그리고 투수블록 1.0을 적용하였다. 본 분석의 목적은 LID 시설 SA/CA와 저감 효율의 두 연속형 자료의 상관분석이기에 선형회귀모형과 비선형회귀모형(로지스틱회귀모형)을 이용한 단순회귀분석을 적용하였다. Fig. 5에서는 두 모형의 회귀곡선을 확인할 수 있다. 분석을 실시한 항목 모두에서 SA/CA 값이 증가할수록 저감 효율도 향상하는 양의 선형관계를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 각 항목 간 결정계수를 검토한 결과 선형회귀모형에서 유량 저감 효율(0.71)과 TP 저감 효율(0.82)에서 결정계수 0.7 이상의 강한 상관성을 보였다(Darcey and Reidy, 2011; Casella et al., 2013). 반면, 비선형회귀모형의 경우 전반적으로 선형회귀곡선에 비해 항목별 결정계수가 증가하는 경향을 보였으며, 특히, 유량 저감 효율(0.95), BOD 저감 효율(0.83) 그리고 TP 저감 효율(0.96)에서 높은 결정계수를 보이는 것으로 분석되었다. 그 외 항목에서도 비선형회귀모형의 결정계수가 선형회귀모형의 결정계수보다 높은 것으로 나타났다. 이는 SA/CA와 LID 시설 저감 효율 간의 관계는 비선형회귀모형을 통해 보다 강한 상관관계를 파악

할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.5 'SA/CA & L/CA'에 따른 LID 시설 효율 변화

3.2절 분석 결과 LID 시설의 경우 기본 구조에 따라 설계 용량 산정 기준에 따라 저감 효율이 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 하지만, 3.3절의 SA/CA의 경우 공통적으로 시설 면적을 변수로 활용하였기에 LID 시설의 구조적 차이를 고려하지 않은 분석이라 할 수 있다. 따라서 본 절에서는 LID 시설의 구조적 차이를 SA/CA 분석에 적용하고자 WQV를 설계 용량 산정 기준으로 하는 시설(식생체류지 및 투수블록)은 SA/CA 그리고 WQF를 설계 용량 산정 기준으로 하는 시설(식생수로 및 식생여과대)은 L/CA를 적용하여 저감 효율과의 상관성을 분석하였다. 식생체류지와 투수블록의 SA/CA는 3.3절과 동일하며, 식생수로와 식생여과대의 L/CA는 각각 0.0039와 0.0027을 적용하였다. Fig. 6은 'SA/CA & L/CA'와 저감 효율의 선형회귀곡선과 비선형회귀곡선을 보여주고 있으며, Table 3에서는 각 회귀곡선의 상관계수

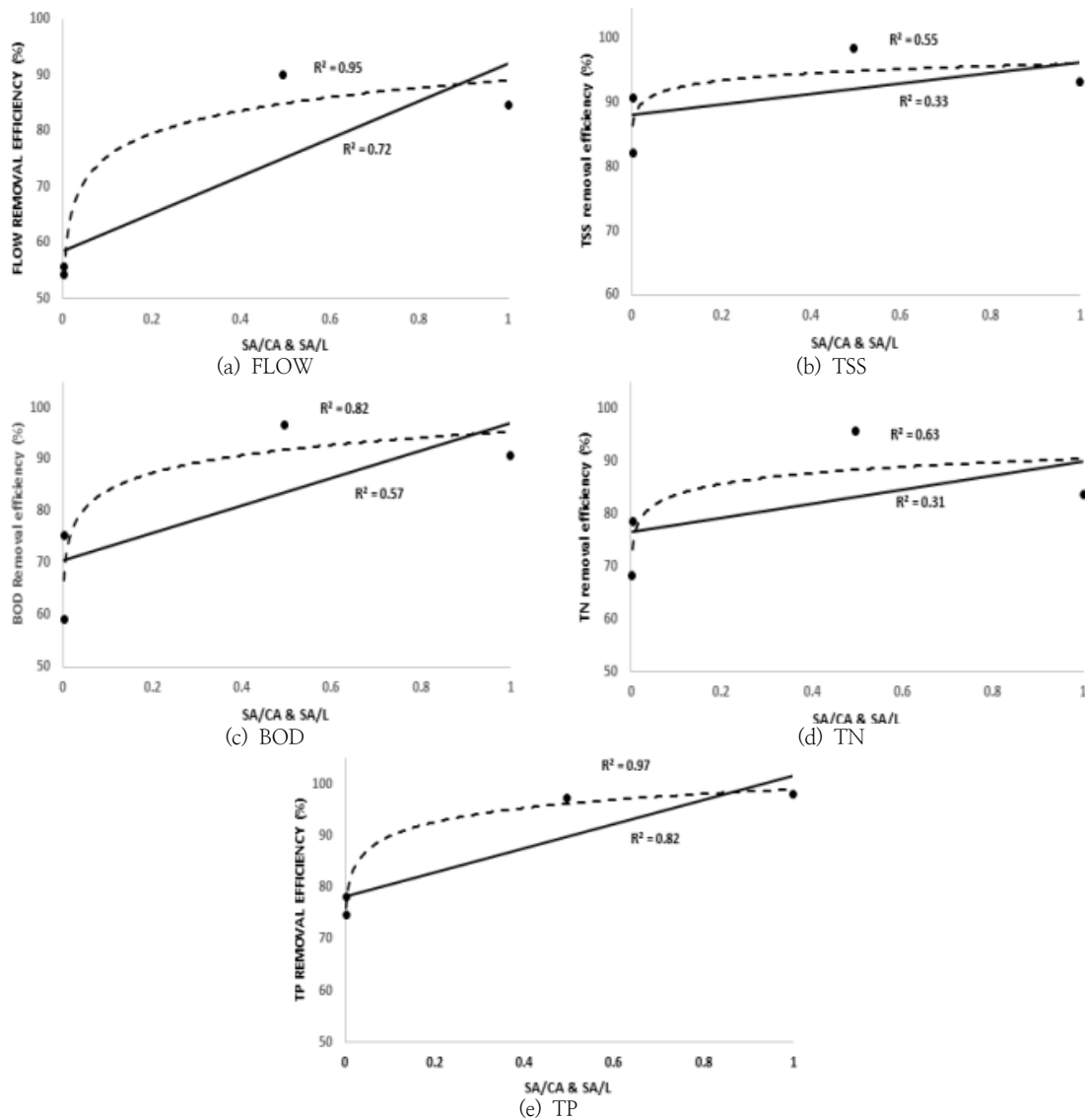


Fig. 6. Regression curve between 'SA/CA & L/CA' and removal efficiency

를 정리하였다. 분석 결과 SA/CA와 유사하게 'SA/CA & L/CA'와 저감 효율은 양의 선형관계를 보이며, 비선형회귀곡선의 결정계수가 선형회귀곡선에 비해 높은 것으로 나타났다. 선형회귀모형의 경우 유량 저감 효율(0.72) 및 TP 저감 효율(0.82), 비선형회귀모형의 경우 유량 저감 효율(0.95), BOD 저감 효율(0.82) 그리고 TP 저감 효율(0.97)에서 강한 상관관계를 보였다. 따라서, 'SA/CA & L/CA'를 적용할 때도 비선형회귀곡선을 적용하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

Table 3에서는 'SA/CA'와 저감 효율 상관성과 LID 시설의 구조적 차이를 반영하고자 본 논문에서 제시한 'SA/CA & L/CA'와 저감 효율 상관성을 개선 효과를 분석하고자 항목별 회귀곡선의 결정계수를 비교하였다. 'SA/CA & L/CA'를 SA/CA 대신 적용함에 따라 명확한 결정계수의 증가세가 보이지 않았으나, TSS에서 가장 큰 결정계수의 증가(0.03)를 보였고, TP에서 가장 높은 결정계수(0.97)를 보인 것을 확인할 수

있다. 본 분석 자료의 경우 앞서 언급한 대로 분석에 활용한 데이터의 개수가 상대적으로 많지 않아 일반화하여 적용하기에는 다소 무리가 있다. 하지만, Flow, TSS 및 TP에서 결정계수가 증가한 것을 근거로 WQF를 설계 기준으로 하는 시설에서는 기존의 SA/CA가 아닌 L/CA를 적정 면적 산정을 위한 설계 인자로 활용하는 것을 충분히 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Gap of Coefficient of determination between SA/CA and 'SA/CA & L/CA'

Parameters	Gap of coefficient of determination	
	Linear	Non-linear
Flow	-	0.01
TSS	-	0.03
BOD	-	-0.02
TN	-	-0.01
TP	-	0.01

## 4. 결 론

식생수로, 식생여과대, 식생체류지 및 투수블록에서 실시한 강우 모니터링 결과를 바탕으로 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 모니터링을 실시한 LID 시설별 강우 유출수 저감 효과 분석 결과, 식생체류지(95%), 투수블록(86%), 식생수로(60%) 그리고 식생여과대(52%) 순으로 나타났으며, 최대와 최소 효율 간 43%의 차이를 보였다. 오염물질 저감 효율의 경우, 모니터링을 수행한 4개 시설 모두 중앙값 기준 TSS 70%, BOD 60%, TN 60% 그리고 TP 60% 이상의 효율을 보였으며, 상대적으로 식생체류지와 투수블록 저감 효율이 높은 것으로 분석되었다. 이처럼 각 LID 시설별 강우 유출수 및 저감 효율이 차이를 보인 것은 SA/CA 및 구조적 차이에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 연구 대상 LID 시설을 용량 설계 기준인 WQV와 WQF로 그룹화하여 강우 유출수 및 오염부하량 저감 효율 분석 결과 상대적으로 WQV를 기반으로 설계되는 시설의 효율이 높은 것으로 나타났다. 두 그룹의 효율 차이는 강우 유출수의 경우 37.4% 그리고 오염물질 저감 효율의 경우 항목별 20.0~37.1%의 효율 차이를 보였다(중앙값 기준). 이와 같은 차이는 두 그룹의 구조적 차이에 영향을 받은 것으로 판단된다. 하지만 본 결과를 일반화시키기에는 다소 무리가 있지만, 용량 산정 기준에 따라 LID 시설의 효율에서 다소 차이가 있을 가능성을 확인할 수 있다. 향후 추가적인 연구를 통해 이에 대한 검증을 실시할 필요가 있다.
- 3) 연구 대상 LID 시설을 재원을 기반으로 적정 LID 시설 용량 및 면적 산정을 위한 SA/CA 분석 결과 강우 유출수, TSS, BOD, TN 및 TP 항목 모두 결정계수 0.5 이상(비선형 회귀모형 기준)을 보였으며, 특히, 강우 유출수 및 TP에서는 약 0.95의 결정계수를 보였다. 반면, 본 연구진에서 제안하는 WQV와 WQF 시설의 구조적 차이를 고려한 'SA/CA & L/CA' 분석 결과 강우 유출수, TSS 및 TP의 결정계수가 향상된 것을 확인하였다. 분석에 활용한 데이터개수가 적어 일반화에는 다소 무리가 있지만, LID 시설의 적정 용량 및 면적 산정을 위해 구조적 차이를 반영한 'SA/CA & L/CA' 분석 방법을 적용하는 것을 검토할 필요가 있다.

## 사 사

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2017R1D1A1B06035481, 자연에너지 및 자원 생산형 미래 하수처리시스템의 핵심 기술 개발)과 2021년도 한국습지학회의 지원(도심 그린인프라 회복을 위한 LID 도입 전략 및 성능 평가 연구)을 받아 수행된 연구임.

## References

Palla, A, and Gnecco, I (2015) Hydrologic modeling of Low

Impact Development systems at the urban catchment scale, *Journal of Hydrology*, 528, pp. 361–368. [<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>]

Casella, G, S, Fienberg, and I, Olkin (2013) *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*, Springer.

Choi, JH, Lee, OJ, Kim, and Kim, SD (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), pp. 569–578. [Korean Literature]

Eckart, K, McPhee, Z, and Bolisetti, T (2017) Performance and implementation of low impact development – A review, *Journal of Science of The Total Environment*, 607–608, pp. 413–432. [<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254>]

Hong, JS, and Kim, LH (2016) Assessment of Performances of Low Impact Development (LID) Facilities with Vegetation, Ecology and resilient infrastructure, 3(2), pp. 100–109. [Korean Literature]

Humann, M, Schuler, G, Muller, C, Schneider, R, Johst, M and Caspari, T (2011), Identification of Runoff Processes – The Impact of Different Forest Types and Soil Properties on Runoff Formation and Floods, *Journal of Hydrology*, 409 pp.637–649. [<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.067>]

Kim, SH (2014) A Study on the Stormwater Green Infrastructure Strategy for the Sound Hydrological Cycle Management in Urban Areas, Doctor's Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea. [Korean Literature]

Kang, JE, Hyun, KH, and Park, JB (2014a) Assessment of Low Impact Development (LID) Integrated in Local Comprehensive Plans for Improving Urban Water Cycle, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(5), pp. 1625–1638. [Korean Literature]

Kang, MJ, Rhew, DH, and Choi, JY (2014b) Policies and Research Trends on Non-point Source Pollution Management in Korea, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 22(4), pp. 141–167. [Korean Literature]

Kim, SH, and Zoh, KJ (2015) Green Infrastructure Plan and Design for Urban Hydrological Cycle Restoration – Focused on the Overseas Case Studies of Landscape Architecture Plan and Design, *Journal of the Urban Design Institute of Korea Urban Design*, 16(3), pp. 37–51 [Korean Literature]

Lee, S., Choi, J., Hong, J., Choi, H, and Kim, L (2016) Cost-effective Assessment of Filter Media for Treating Stormwater Runoff in LID Facilities, *Journal of Wetlands Research*, 18(2), pp. 194–200. [Korean Literature]

Jeon, JC, Jung, JH, Kim, YS, and Kim, LH (2018) A Review of Research Trend Related to NPS and Suggestion for Research Direction in the Future, *Journal of Wetlands*



- Research, 20(1), pp. 80–93. [Korean Literature]
- Lee, SW, and Kim RH (2016) Study of Benefit Characteristics for Low Impact Development (LID) Facilities demonstrated in Seoul Metropolitan, Journal of Korean Society of Environmental Engineering, 38(6), pp. 299–308. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE) (2009). Natural Management of Non-point Pollutant Source using LID Techniques. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE) (2013a). Application Manual of Low Impact Development Technique for Environmental Impact Assessment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE) (2013b). Guideline on Element Technology of Low Impact Development to Build Healthy Water Circulation System. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE) (2016), Manual of Non-point Pollutants Removal Facilities Installation and Operation. [Korean Literature]
- Park, SW, and Gil, KI (2018) Analysis of area-based optimal capacity design method in vegetation type LID, Journal of Wetlands Research, 20(4), pp. 383–389. [Korean Literature]
- Shin, J and Gil, K (2015) Determination of Removal Efficiency using Vegetative Filter Strips based on Various Efficiency Evaluation Method, Journal of Environmental Earth Science, 73, pp. 6437–6444.
- Valinski, N and Chandler, D (2015) Infiltration Performance of Engineered Surfaces Commonly Used for Distributed Stormwater Management, Journal of Environmental Management, 160, pp. 297–305. [<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.06.032>]
- Vogel, JR, Moore, TL, Coffman, RR, Rodie, SN, Hutchinson, SL, McDonough, KR, McLemore, AJ, and McMaine, JT (2015) Critical Review of Technical Questions Facing Low Impact Development and Green Infrastructure: A Perspective from the Great Plains, Journal of Water Environment Research, 87(9), pp. 849–862. [<https://doi.org/10.2175/106143015X14362865226392>]