

저영향개발기법이 도시 유출에 미치는 영향

김희수·정건희*[†]

호서대학교 재난안전시스템학과 석사과정

*호서대학교 건축토목공학부 부교수

The Effect of Low Impact Development Techniques on Urban Runoff

Heesoo Kim·Gunhui Chung*[†]

The master's course, Department of Disaster Safety Systems, Hoseo University, South Korea

**Associate Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University, South Korea*

(Received : 01 October 2021, Revised : 14 October 2021, Accepted : 14 October 2021)

요약

도시개발의 지나친 진행에 따라 불투수면의 증가로 인해 유출이 증가되어 도시 홍수에 대한 우려가 증가되고 있으며, 도시 유역의 물순환을 개발 이전과 같은 상태로 되돌리고자 하는 노력이 지속되고 있다. 이를 위한 노력으로 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기술이 저류, 침투, 증발산과 같은 기작을 통해 도시개발 전후의 수문 현상을 모사하기 위해 주목받기 시작했으며, LID를 실제 유역에 도입할 수 있는 기법에 대한 연구가 국·내외에서 활발하게 이루어지고 있다. 본 연구에서는 도시 소유역에 강우-유출 수문모형인 SWMM의 모의를 통해 LID를 적용하여 목표로 유출량 저감 효과를 시나리오 별로 분석 및 평가하였다. SWMM-LID 모형을 가산1빗물펌프장 유역을 대상으로 구축하였으며 옥상녹화와 투수성 블록 포장 기법을 기법별 정성평가를 통해 유역에 적용할 LID 기법으로 선정하였다. SWMM내에서 저류 및 침투를 통한 총 유출량 감소 효과를 위해 설정되어야 하는 각 인자들을 설계 하였으며, 6가지 시나리오를 선정하여 모의한 결과, 투수성 포장에 의한 저감 효과가 옥상녹화에 의한 저감 효과보다 더 크게 나타났다. 향후 유역의 특성에 맞는 LID 시설의 설계가 필요하며, 특히 서로 영향을 미치는 하천이나 지하수위 등 도시 수자원 요소들은 전체 시스템에서 고려할 수 있도록 고려되어야 한다.

핵심용어 : 옥상녹화, 불투수면적, SWMM, 저영향 개발, 투수성포장, 도시유출

Abstract

Due to rapidly increased urbanization, impervious area has been extended and concerns about urban flooding has been increased as well. A lot of effort has been made to restore the urban water circulation. Low Impact Development (LID) technology that consist of retention, infiltration, and evapotranspiration has begun to attract attention to simulate the hydrologic phenomenon before and after development. Many researches on the technique is being actively conducted. In this study, the effect on reducing runoff in urban catchment was analyzed and evaluated by applying LID techniques using SWMM and six scenarios. A SWMM-LID model was built for the Gasan 1 rainwater pumping station basin, and Green Roof and Permeable Pavement were selected as LID techniques to be applied. As a result, the reduction effect of the permeable pavement was larger than green roof. In the future, the results could be used to design a LID facility using the characteristics of the watershed, and other urban water resource factors such as river and groundwater levels that affect each other should be considered, so that the entire system can be considered.

Key words : Green roof, Impervious area, Low impact development, Permeable pavement, SWMM, Urban runoff

[†]To whom correspondence should be addressed.

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University, South Korea

E-mail: gunhuic@gmail.com

• Heesoo Kim #301 Arts and Technology Building, 20, Hoseo-ro 79th Road, Baebang-eup, Asan-si/The maser's course(gmltn2019@naver.com)

• Gunhui Chung #307 Arts and Technology Building, 20, Hoseo-ro 79th Road, Baebang-eup, Asan-si/Associate Professor(gunhuic@gmail.com)

1. 서론

20세기 이후 도시화와 산업화가 진행됨에 따라 도시로 인구가 집중되면서 급격한 토지개발과 토지이용패턴의 변화로 농지와 임지와 같은 투수면적은 감소하고 반면에 주거지와 상업지, 도로 및 주차장 등과 같은 불투수 면적은 지속적으로 증가되고 있다. 이로 인해 도시지역 내 기저유출은 감소되고 이로 인한 지하수위 감소로 건천화 및 불투수면적이 증가되고 유출이 증가됨에 따라 홍수 및 비점오염에 대한 문제가 제기되며 도시지역 내 물순환 체계를 심각하게 왜곡시켰다. 또한 불투수 면적은 비점오염에 의한 하천 수질에 대한 영향 역시 증대시키게 된다. 적은 양의 강우에도 유출을 발생시키는 불투수 면적의 특성으로 인해 도시 비점오염원의 발생빈도를 증가시킬 뿐 아니라, 초기세척효과(first flush effect)에 의해 고농도의 비점오염원을 하천으로 유출시키게 된다(Joo, 2012). 이로 인해 강우 시 비점오염원의 대부분을 차지하는 토지계 오염이 수질에 미치는 영향이 권역별로 30~35%를 차지하며 지속적인 관리에도 불구하고 하천 수질이 크게 향상되지 못하는 원인이 되고 있어 문제의 심각성을 더 하고 있다.(Department of Environmental resources, 1999).

이에 따라 미국과 다른 선진 외국의 경우를 보게 되면 과거에는 도시개발에 따라 유역의 수문학적 유출 특성의 변화되어 발생하는 문제들을 예방하기 위해 집중식 BMP(Best Management Practice)의 한 방법으로 배수 구역의 말단 출구점 또는 낮은 위치에 지대에 강우에 의해 발생하는 유출수가 저류될 수 있도록 저류지를 설치하였다(Baek, 2014). 그러나 이런 방법은 강우 유출수의 유속을 줄여서 대상지역에서는 개발 전의 침투유량과 비슷하게 나타냈지만, 저류지에 저류되어 있던 유출량이 이후에 유출되므로 유출량이 개발 전에 비해 증가하는 문제점을 보여 왔다. 따라서 이와 같은 문제점들의 해결책으로 현재에는 전 세계적으로 저영향개발(Low Impact Development; LID)이 강우유출수 관리의 주요 키워드가 되고 있다. LID는 집중식 BMP와 달리 유출 발생 후가 아닌 발생원 단계에 다양한 전략과 요소를 포함한 설계를 통해 유출수를 분산식으로 관리하는 접근방법으로 이는 유역의 수문학적 특성을 유지·보전시켜 투수 면적 비율을 최대한 확보함으로써 기존 도시개발과 달리 유역 내 침투면적을 증가시켜 침투유량 뿐만 아니라 도달시간, 더 나아가 직접 유출량까지도 도시 개발 이전 상태의 수문학적 특성과 같도록 하는 보다 더 자연 친화적인 도시 설계 디자인을 말한다(National Institute of Environmental Research, 2010).

현재 효과적인 LID 시설을 실제 유역단위에서 적용하기 위해 제안된 설계 방법이 부족해 LID에 대해 진행된 연구가 실제 적용으로써의 전환이 느리게 진행되고 있다. 이에 따라 효과적인 LID의 설계 및 적용과 정책의 수립을 위해 모형을 대상으로 한 모의 결과를 활용하는 것이 대안으로 제시되고 있다. 그러나 이 또한 실제 유역 내 LID의 복잡

한 유출 기작을 간단하게 평가 가능하도록 구현하는 방법에 대한 어려움이 남아있다(Elliott and Trowsdale, 2007). 따라서 늘어나는 비점오염원 관리의 필요성을 충족하기 위해서는 LID 시설에 효율적인 적용을 위해 모형 모의를 통해 최대한 실제와 유사한 저감효율의 모의를 위한 방안에 대한 연구가 요구된다.

본 연구의 목적은 LID 기법을 도시 소유역에 적용하여 강우-유출 수문모형인 SWMM의 모의를 통해 시나리오별 유출량 저감 효과를 분석하는 것이다. 이에 앞서 대상유역에서의 저감 목표 및 LID 기법을 설정하고 LID 장치의 제원을 설계함으로써 저감에 영향을 미치는 변수에 대해 고려하고자 하였다. 특히 LID 적용 면적을 소유역 별 불투수 면적 중에서 직접 산정을 하여 SWMM 5.0 버전부터 새로 도입된 LID control 모듈을 이용한 실강우를 통한 유출 모의를 실시한 다음 이에 따른 결과 분석을 통해 LID 기법의 효율성과 적용성을 검증 및 분석하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 연구방법

2.1 LID 정의

국내에서의 LID(Low Impact Development)기법의 정의는 명확하지 않으며, 지역과 기관 등에 따라 다르게 제시되고 있지만 개발로 인해 변화되는 유역의 수문특성을 개발 전과 유사하도록 회복하는 것을 공통된 목적으로 제시하고 있다. 국내의 사례를 보면 “자연에 미치는 영향을 최소화하여 개발하는 것”(National Institute of Environmental Research, 2012), “홍수 및 수질오염 저감을 위한 우수의 침투, 저류, 물순환 체계를 유지함으로써 강우 시 해당 지역이 받는 영향을 최소화하고자 하는 것”(Choi, et. al., 2010), “개발 이전 수문학적 체계의 유지와 향상을 위한 광범위한 토지 계획 및 공학적 설계를 고려하는 방식이며, 발생원에서 가까운 곳에서 빗물을 관리함으로써 지표 유출과 오염부하를 줄이기 위해 설계된 일련의 시설들과 그 관리 방법”(Hyun, et. al., 2010) 등으로 정의하고 있다. 국외 사례를 보면, 미국 환경청(EPA, 2007)의 경우 “도시화로 인해 변화되는 수문특성 때문에 발생하는 문제점들에 대해 지역 내의 수문학적 기능을 도시화 이전의 수문특성과 같게 보존하는 계획과 설계의 접근 방법”으로 정의하였으며, 미국 주택·도시개발청(U.S. Department of HUD, 2003)은 “다양한 전략설계와 더불어 우수 유출 발생 단계에서 고려할 수 있도록 토지이용계획에 기술요소들을 포함시킴으로써 강우유출수를 분산식으로 관리하는 접근방법”으로 정의하고 있다. 이를 종합하여 보았을 때 ‘LID’란 도시지역이 자연 상태와 유사한 물순환 체계를 갖출 수 있도록 하는 접근 방법으로, 기존의 최적관리기법의 적용뿐 아니라 도시지역 토지이용계획 수립 시 물순환을 고려한 강우유출수 관리체제로 정의할 수 있다(Ministry of Environment, 2013).

2.2 EPA SWMM

SWMM은 미국에서 1971년 EPA의 지원 아래 Metcalf & Eddy, Florida 대학과 Water Resources Engineers와의 공동 연구로 도시구역 하수시스템 내의 유량 및 수질을 모의할 수 있도록 개발되었으며(Park, et. al., 2008). 월류, 배수, 압력류(surcharge)등에 인한 수리학적 영향들을 고려할 수 있으며, 여러 수리 구조물 및 저류시설에 대한 영향 평가가 가능한 정교한 모형이다. 또한 도시구역의 유출과 오염원 배출 현상의 정량적 평가에도 이용될 수 있다.

SWMM모형의 구성은 RUNOFF, TRANSPORT, EXTRAN, STORAGE, EXECUTIVE 등의 5개의 실행 블록들과 5개의 보조 블록들로 구성되며, 126개의 부 프로그램들로 구분되어 계산을 수행한다(Han, 2014).

2.3 LID 모형 이론

SWMM 5.0 버전에서 새롭게 업데이트 된 LID 모듈은 세 개의 층으로 구성되어 있으며, 단위 면적 당 특성을 기반으로 한다(Lee, 2019). 이 특성은 제원이 같은 LID 장치를 토지피복 특성이 다른 소유역에 적용하는 것을 가능하게 하며, SWMM 모의 동안에 물수지 균형의 상태로 각 층별 내에 저류되고 순환되는 정도를 파악하는 것이 가능하다. Fig. 1는 LID 기법 중에 가장 널리 이용되는 식생저류장치의 구성 및 물순환 과정을 소개하고 있다.

SWMM 5 내에서 모의 가능한 LID 기법은 크게 5가지 카테고리로 분류되며, 이는 식생저류장치(Bio-Retention Cell), 공극성 포장(Porous Pavement), 침투트렌치(Infiltration Trench), 우수통(Rain Barrel), 그리고 식생도랑(Vegetative Swale)이 있다(Cho, 2012). 그러나 SWMM-LID 모형은

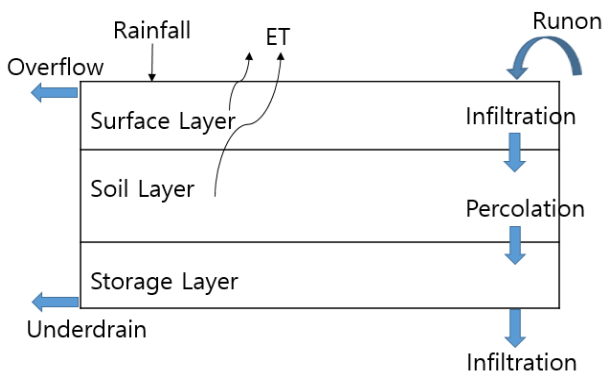


Fig. 1. Conceptual diagram of a bio-retention cell LID in SWMM model(SEMCOG, 2008)

수문·수리학적 특성을 결정하는 여러 가지 변수에 변화를 줌으로써 다섯 가지 분류 속에서 더 다양한 기법들을 모의할 수 있다. 예를 들어, 식생저류장치는 식생을 포함하여 유출 지체를 발생시키고 혼합토양층으로의 침투를 발생시키는 옥상녹화(Green Roof), 빗물정원(Rain Garden), 나무화분(Street planter)을 설계할 수 있다(Joo, 2012). Table 1은 SWMM에서 모의가 가능한 LID 기법을 구성하는 각 층의 조합을 나타내며 ‘○’는 설계 시 반드시 필요로 하는 층이며, 부가적인 것은 ‘△’로 나타난다.

표면층(Surface layer)은 우수통을 제외한 모든 타입에서 존재하는 층이며, 포장층(Pavement layer)은 오직 공극성 포장 기법에서만 적용되고, 토양층(Soil layer)은 나무화분, 옥상녹화와 같은 식생저류장치에서만 고려될 수 있는 층이며, 저류층(Storage layer)은 식생도랑을 제외한 모든 층에서 필요시 된다(Cho, 2012). 마지막으로 암거층(Underdrain layer)은 오직 우수통에서는 반드시 요구되나 식생저류장치, 공극성 포장, 침투트렌치 기법을 설계할 경우 부가적으로 필요하다.(Yoon, 2013).

SWMM을 통한 LID 적용은 “LID Control Editor”를 통해 층의 두께와 공극률, 소리전도도, 암거 특성과 같은 개별적인 각 층의 특성을 설계할 수 있다(Han, 2014). 각 변수는 특정 단위에 맞게 입력되어야 하며 inch와 mm 단위 중 하나로 설정한다. 각 매개변수에 대한 설명은 SWMM 매뉴얼을 통해 습득할 수 있으나, 용어 및 수문·수리학적 특성과 관련된 이론은 개별적인 학습이 요구된다(Han, 2014). 특히 본 연구에서의 식생저류장치와 투수성 포장에서의 토양층과 저류층 그리고 포장층에 대한 매개변수를 적용하는 것이 연구의 큰 부분을 차지한다. Table 2는 LID 기법의 특성을 결정하는 각 층에서 변수에 대한 요약이다.

2.4 대상구역 선정 및 특성

적용 대상인 가산1빗물펌프장은 서울특별시 금천구 가산동의 안양천 변에 위치하고 있으며, 유역면적은 약 48ha이며 유역의 전체가 약 70%가 공업지역으로 구성되어, 대부분의 유역이 불투수면적으로 구성되어 있고, 4,200㎡의 면적과 9,000㎡의 용량을 가진 우수지가 존재한다. 총 펌프의 토출량은 540m³/s이며, 100m³/s 용량 3대의 펌프와 170m³/s 용량 2대로 구성되어 있다.

Fig. 2와 Fig. 3는 가산1빗물펌프장의 유역도 및 우수관망도를 나타내며 펌프 가동률을 가산1빗물펌프장의 우수지의 수위 증가에 따라서 순차적으로 채택하고 있다.

Table 1. Layers used to different types of LID units in SWMM model (EPA, 2010)

LID Type	Surface	Pavement	Soil	Storage	Underdrain
Bio-Retention Cell	○		○	○	△
Porous Pavement	○	○		○	△
Infiltration Trench	○			○	△
Rain Barrel				○	○
Vegetative Swale	○				

Table 2. Variables considered in LID Controls (EPA, 2010)

Layers	Parameter	Unit
Surface layer	Storage depth	inch or mm
	Vegetation	volume ratio
	Surface roughness	Coefficient
	Surface slope	%
Soil layer	Thickness	inch or mm
	Porosity	volume ratio
	Field capacity	volume ratio
	Wilting point	volume ratio
	Conductivity	in./hr or mm/hr
	Conductivity slope	dimensionless
Pavement layer	Suction head	inch or mm
	Thickness	inch or mm
	Void ratio	void/Solid
	Impervious surface fraction	%
Storage layer	Permeability	in./hr or mm/hr
	Clogging factor	Coefficient
	Height	inch or mm
	Void ratio	void/solid
Under drain layer	Filtration rate	in./hr
	Clogging factor	in./hr or mm/hr
	Drain coefficient	coefficient
	Drain exponent	coefficient
	Drain offset height	inch or mm



Fig. 2. Gasan 1 Rainwater Pump Station Basin Diagram

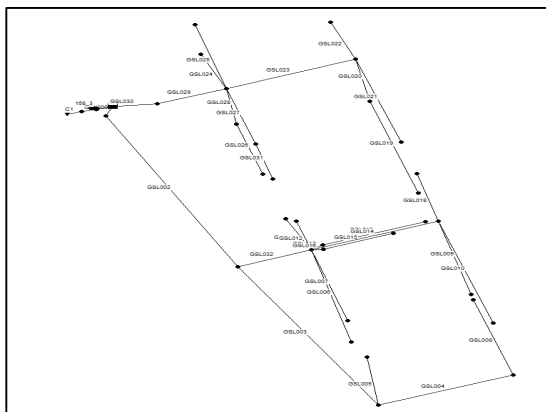


Fig. 3. Gasan 1 Rainwater Pump Station storm water Network Diagram

2.5 적정 LID 기법 선정

현재까지 소개된 국내·외 LID 기법의 수를 정의내리는 것이 어려울 정도로 많은 저영향개발에 관한 연구가 세계적인 관심 속에서 이루어지고 있는 실정이다. LID 기법은 특성에 따라 총 4가지 형태로 저류형, 인공습지, 침투형, 식생형 시설로 나뉠 수 있지만 매우 다양하고 하나의 기법이 복합적 다기능을 수행하는 경우가 많으므로 분류하기가 쉽지 않다.(Kim, 2020)

LID 기술은 (Lim, 2011)의 친환경적 도시개발을 위한 LID 기술 적용에 대한 연구에 의하여 10가지로 크게 분류할 수 있으며, 각 요소기술의 구성은 국내·외 널리 알려진 기법들로 되어있다. 이에 따라 빗물정원을 포함한 생태저류 시설과 옥상녹화, 완충 식생대 및 수목 보존지대, 강우저장소 및 빗물통, 지붕층 배수관, 통행로 저류 공간, 투수성 포장 토양개량, 불투수층 최소화, 주택 내 비점오염원 저감을 소개하였다. 하지만 이는 분류체계가 불명확하다는 한계점을 갖고 있다.

한편, 신개념 Green-Tech에서 Kim (2016)이 제안한 분류체계에 따르면, LID는 식생기술, 침투기술, 저류기술, 융합/전략기술로 기술 특성에 따라 분류되며 수문학적, 수질학적 관점과 설치비용 및 유지 관리 측면에서는 Brown et. al. (2007)이 제안한 9가지의 구조적 LID의 BMP(Best Management Practice)의 효율성을 대학 내 정원을 대상으로 평가·분석한 결과를 토대로 기법의 우선순위를 선정할 수 있으며, 이는 LID를 유역 내 실제 적용하는 경우 가장 적합한 LID 기법을 결정하는데 도움이 될 것으로 판단된다. 본 연구

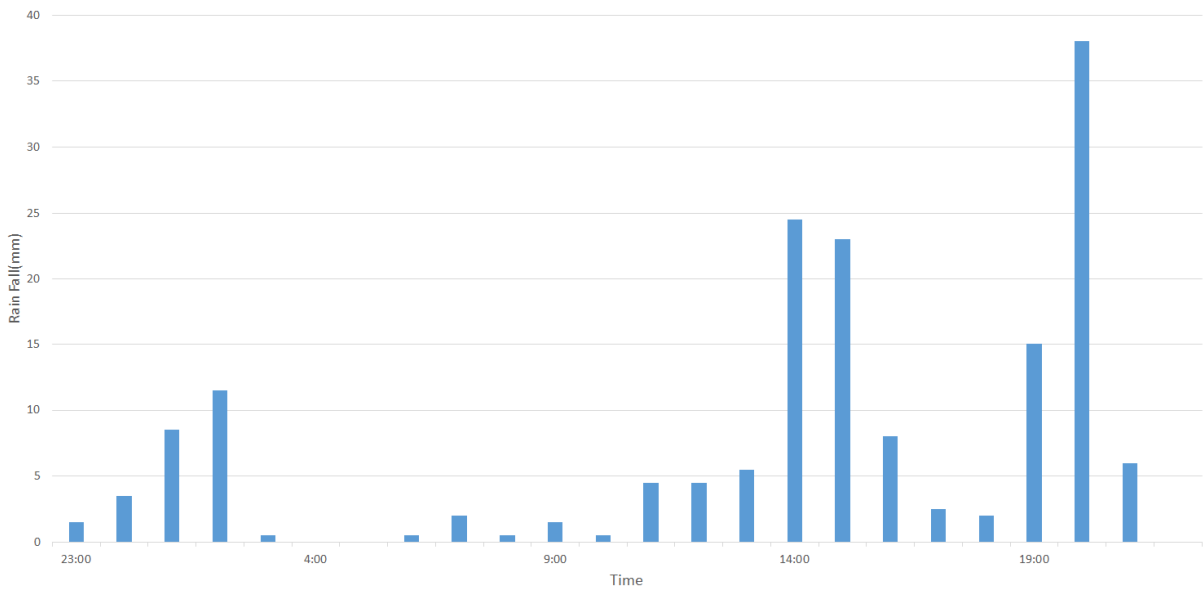


Fig. 4. Rainfall data in Geumcheon-gu

에서는 평가 결과를 고려하면서도, 한국 토지이용특성에 적합하며 기존 도시에 적용하는 Retrofit이 가능하고 실적이 바로 가능한 옥상녹화와 투수성포장 기법을 선정하였다.

옥상녹화는 지붕으로 떨어지는 강우를 옥상을 토양과 식물로 녹화하여 저장하고 증발 시키는 역할을 하여 효과적인 유출량 감소가 가능한 LID 기법이다. 이는 지붕 온도를 증발산에 의해 낮추기도 하고 유출량을 강우에 따른 침투 유출량을 지연시키며 낮춘다. 효과적인 강우유출수 관리가 중·소 규모의 강우에 대해서 LID 기법 중에서 가능하고 지 피류 녹화, 연못, 정원 등 다양하게 적용할 수 있다.

특히 건물의 미관적인 가치를 높이면서 서식지로서의 역할도 가능하며 지붕의 기대수명을 연장시키고 단열과 방음의 효과가 있으며, 녹색 도시설계 분야에서 크게 주목받고 있다. 식생기반인 토양과 식물의 무게를 지지 가능한 건물의 옥상에 적용가능하며 중점을 기후에 따른 식물종 선택, 옥상녹화의 위치(지면으로부터의 높이)에 두어야 한다.

식생저류장치(Bio-retention)의 일종의 옥상녹화는 식생을 통한 투수면적 증대와 토양층을 통한 유역의 침투를 증대, 자갈층을 통한 저류가 가능하여(Shin, et. al., 2013) 그 효율이 크나 구조물이 일반적으로 받는 하중에 식재 배지, 식생, 배수 시스템, 공극수 등의 옥상녹화로 인한 더해진 무게를 지탱이 가능한가 하는 부분이다.

또한, 옥상에 녹화로 조성된 정원은 일반적인 정원 유지 비용이 들지만 그 위치가 문제의 검사와 시정을 어렵게 만든다(Choi, 2009). 주기적으로 관리가 요구되나, 유지비를 다육성의 토착종을 사용함으로써 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

친환경적인 도시개발에 있어 택지개발지구 및 공동주택 단지 내 도로포장은 종전의 아스팔트 및 콘크리트 포장에서 기능성을 가진 배수성 및 투수성 아스팔트 콘크리트 포

장, 보도 및 보·차도용 블록포장 등이 다양하게 시공되고 있다(Shin, et. al., 2013). 이러한 기능성 포장은 기능에 따라 크게 배수, 투수, 보수, 저소음, 차열성 등으로 분류할 수 있으며 배수위치가 각 기법에 따라 다른 특징을 갖고 있다. 투수성 포장은 노상 및 노반에 우수를 침투시키고, 배수성 포장은 배수를 표층아래에서 시키며, 보수성 포장은 배수성 포장과 같으나 차이가 표층의 재료에 있다.

현재 국내에서는 친환경적인 포장에 대한 시공수요가 도시의 열섬현상을 저감하고 소음을 줄이며 우수의 이용 등을 위해 크게 증가하고 있으며 기능성 포장을 일반도로에 적용하기 위한 많은 연구가 미국, 유럽, 일본에서도 진행 중에 있다.

2.6 강우 입력 자료3

본 연구에서는 강우 입력 자료의 생성은 기상자료개방포털의 분간우 자료를 요청하여 구축하였으며, 대상 지역인 가산1빗물펌프장에서 가장 가까운 서울시 금천 지점의 강우관측소에서 측정된 데이터이다. 2009년 당시 1940년 이후 단기간 최대량의 비로 1~2주 동안 553mm의 비가 쏟아진 7월에 발생한 강우사상을 선택하였으며 시간은 13일 23:00부터 14일 22:00시의 강우사상이다. 강우자료의 총 강우량은 164mm이며 시간최대강우량은 38이다. Fig. 4은 해당기간동안의 강우량을 그래프로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SWMM-LID 매개변수 적용

본 연구에서는 SWMM 5 매뉴얼과 국내·외 8개의 문헌을 중심으로 LID 제원설계 분석을 실시하여 옥상녹화와 투

수성 포장 기법의 각 변수를 설정하였다. 국내 문헌으로 Ministry of Environment (2009) “LID기법을 활용한 자연형 비점오염원 관리방안 마련”을 참고 하였으며 SWMM 5 매뉴얼에서 제안하는 보편적인 값의 범위 내에서 가산1빗물펌프장 유역의 유출량 저감을 달성할 수 있도록 설계되었다.

3.2 옥상녹화 설계

SWMM-LID 모형에 옥상녹화(Green Roof) 설계(Fig. 5)를 위해 식생저류장치의 저류수심은 Fairfax county의 매뉴얼에서 제안한 24인치, 약 609.6 mm의 값을 도입하였으며, 식생체적은 90%를 갖도록 설계하였다. 또한 SWMM 매뉴얼에서 제안한 Manning의 조도계수 표를 참고하여 표면 조도계수를 값을 설정하였고, 지표경사는 거의 존재하지 않는다고 가정하여 0.01로 설정하였다.

본 연구에서는 토양층의 두께는 약 6인치, 약 152.4 mm로 SWMM 매뉴얼과 The Philadelphia Water Department (2011)를 토대로 설정하였으며, 선행연구에서 제시한 공극률 64%, 포장용수량과 위조점은 0.2~0.3과 0.05를 채택(Palla, et. al., 2008)하였으며, 수리전도 값 0.5 inch./hr 약 12.7 mm/hr를 선정하여 토양 내 수분함양 기능을 저류층으로 이동하는 침투된 강수의 속도를 빠르게 함으로써 높였다.

또한, 본 연구에서 SWMM 매뉴얼에 따르면 토양층이 모래일수록 수리전도도의 기울기는 5에 가깝고, 실트 점토질인 경우 15에 가깝게 적용해야 하므로 모래층의 기울기를 채택하였고 마지막으로 보통 토양층의 흡입양정의 변수는 Green-Ampt 침투식과 동일하게 사용되나, 본 연구에서는 Horton 침투를 적용하였으므로, Fairfax County (2018)에서 사용한 5 inch. 약 127 mm의 값을 문헌조사를 통해 적용하였다.

자갈층의 경우 저류층의 높이는 6~18inch.로 설정하기 때문에, 옥상녹화의 저류효과를 극대화하기 위하여 본 연구에서는 18 inch. 약 457.2 mm로 적용하였으며, 또한 SWMM 매뉴얼로부터 간극률(void rate)은 저류층을 자갈층으로 선정하는 경우 0.5~0.75 정도로 설정함에 따라 0.75를 적용하였다. 또한 여과율도 10 inch. 약 254 mm로 자갈층 기준으로 설정하였으며 저류층 내 막힘 현상이 발생되지 않도록 막힘계수(clogging factor)는 0으로 가정하였다.

암거층에서는 유출계수를 유출량 저감 목표에 준하는 값을 산정하기 위해 SWMM 모의를 실행하여 0.5 inch./hr 약 12.7 mm/hr로 적용하였으며, SWMM 매뉴얼의 권고에 따라 지수는 일반적으로 사용되는 0.5를 적용하였다. 암거단차(Underdrain offset height)는 저류층 바닥에서부터 암거 설치위치까지의 높이를 나타내며, 침투된 강우는 토양층 내 공극을 통해 이동하여 저류층에 도달한 뒤 암거층에서 설정한 단차높이에 저류수심이 도달하면 암거로 유출이 발생하게 된다(Joo, 2012). 이는 3 inch., 약 76.2 mm로 모형 모의를 통해 선정되었다.

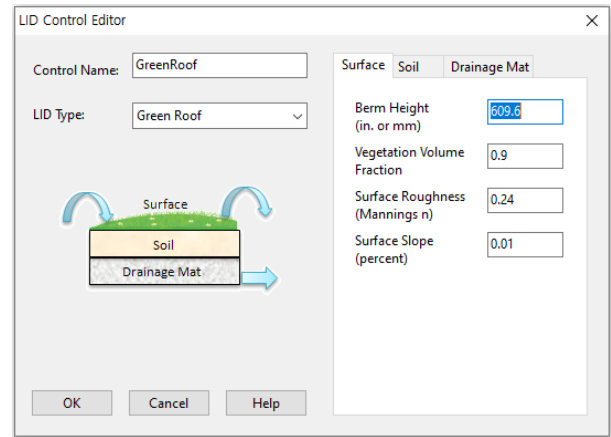


Fig. 5. LID Control Editor for Green Roof

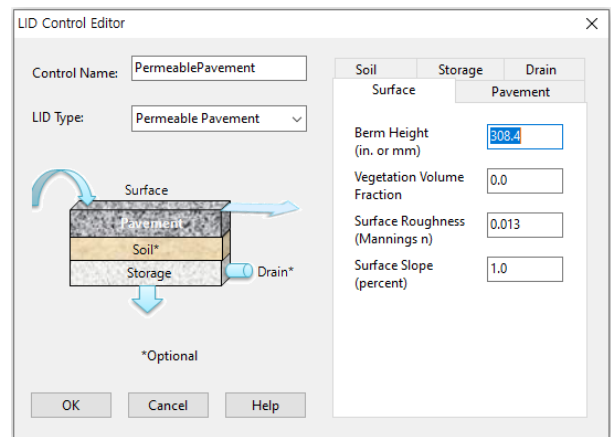


Fig. 6. LID Control Editor for Permeable Pavement

3.3 투수성 포장 설계

본 연구에 적용된 투수성 포장에 대한 변수들을 Tetra Tech의 Wright and Struck(2011)에 의한 LID 설계 및 시공에 대한 고려사항과 SWMM 매뉴얼을 토대로 산정하였다(Fig. 6). porous pavement에서 체원을 SWMM-LID 모형에서는 설계할 수 있으며, 이는 토양층 대신 포장층으로 표면층, 저류층, 암거층, 그리고 옥상녹화와 달리 구성되어 있다.

포면층의 저류수심은 Fairfax county에서 제안한 투수성 포장기법에 대해 제안한 수치로 12인치, 약 304.8mm를 적용하였으며, 식생효과는 투수성 포장에 없는 것으로 가정하여 온전히 유출량 저감 효과를 투수성포장 기법에 의해 산정하고자 하였다. 표면 조도계수의 경우 기본 콘크리트에 일반적으로 적용되는 Manning의 0.013으로 선정하였다.

포장층에서는 포장층의 두께를 투수성 인터락킹 콘크리트 포장 기법에 대한 Philadelphia LID Conference에서의 설계 기준을 준용하여 6인치, 약 101.6mm로 선정하였으며 간극률(Void rate)의 경우 0.12~0.21내의 SWMM 매뉴얼에서 권고하는 값 중에서 0.12로 입력하였다. 연속적인 투수성 포장인 것으로 간주하고 불투성 포면적의 비율은 0으

로 설정하였으며, 투수성의 정도는 투수성 콘크리트 및 아스팔트가 새로 시공된 경우 100 inch./hr 정도로 높으므로 본 연구에서는 50 inch./hr로 약 1,270 mm/hr로 SWMM에서 제안한 식에 의해 막힘 계수를 고려하면서 설정하여 유출량저감 목표에 근접하도록 설계하였다. 본 연구에서는 부가적으로 암거 제원을 고려하였으며 암거유출 발생량 식을 바탕으로 암거계수를 산정하였다.

3.4 소유역 LID 적용 효과 분석

먼저 모형을 시뮬레이션하기 위해서는 소유역의 면적, 경사, 폭, 불투수율 등의 매개변수를 산정하여야 한다(Lee, 2021). 본 연구에서는 옥상녹화와 투수성 포장 LID 기법을 가산1빗물펌프장 유역을 대상으로 적용하기 전에 Fig. 7과 같이 Google Earth Pro를 통해 건물 옥상 면적과 도로면적을 측정하였다. 옥상 면적은 총 127개의 옥상 건물을 Google Earth Pro의 측정 기능을 사용하여 234883.6㎡로 산정하였고 또한 도로면적은 7개의 연장길이를 측정하여



Fig. 7. Area measurement using Google Earth Pro

도로별 차선 수와 도로구조규칙에 따라 3~3.25m의 폭과 함께 계산하여 면적 138726.3㎡이 산정되었다.

옥상녹화와 투수성 포장 LID 기법을 가산1빗물펌프장 유역을 대상으로 적용함에 있어 그 효율성을 검증하고자 시나리오를 선정하였다. 이와 같은 시나리오 설정은 적용 전의 기존 수문학적 조건과 LID 기법의 적용에 따른 영향을 비교 분석하기 적합하며, 면적 대비 두 기법의 효과와 두 기법 간의 시너지에 대하여 고찰이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서 아래와 같이 6개의 시나리오를 선정하였다.

- 시나리오 A(Conventional) : 기존의 도시화 상태
- 시나리오 B(GR75) : 옥상면적의 75% 옥상녹화 적용
- 시나리오 C(PP75) : 도로면적의 75% 투수성포장 적용
- 시나리오 D(L50) : 옥상과 도로면적 각 50% 옥상녹화와 투수성포장 적용
- 시나리오 E(L75) : 옥상과 도로면적 각 75% 옥상녹화와 투수성포장 적용
- 시나리오 F(L100) : 옥상과 도로면적의 100% 옥상녹화와 투수성포장 적용

SWMM-LID 모형을 위 6가지 시나리오에 대해 각각 구축하여 시나리오 A를 Conventional, 시나리오 B를 Green Roof 75%(GR75), 시나리오 C를 Permeable Pavement 75%(PP75), 시나리오 D를 LID(Green Roof+Permeable Pavement) 50%(L50), 시나리오 E와 F는 LID 75%(L75), LID 100%(L100)으로 명명하여 시나리오에 따른 유출량 변화에 대한 결과를 도출하였다.

SWMM-LID 모형으로 모의를 실시한 결과를 Fig. 8는 시나리오 A, D, E, F로 LID기법의 면적별 유출량 감소를 나타

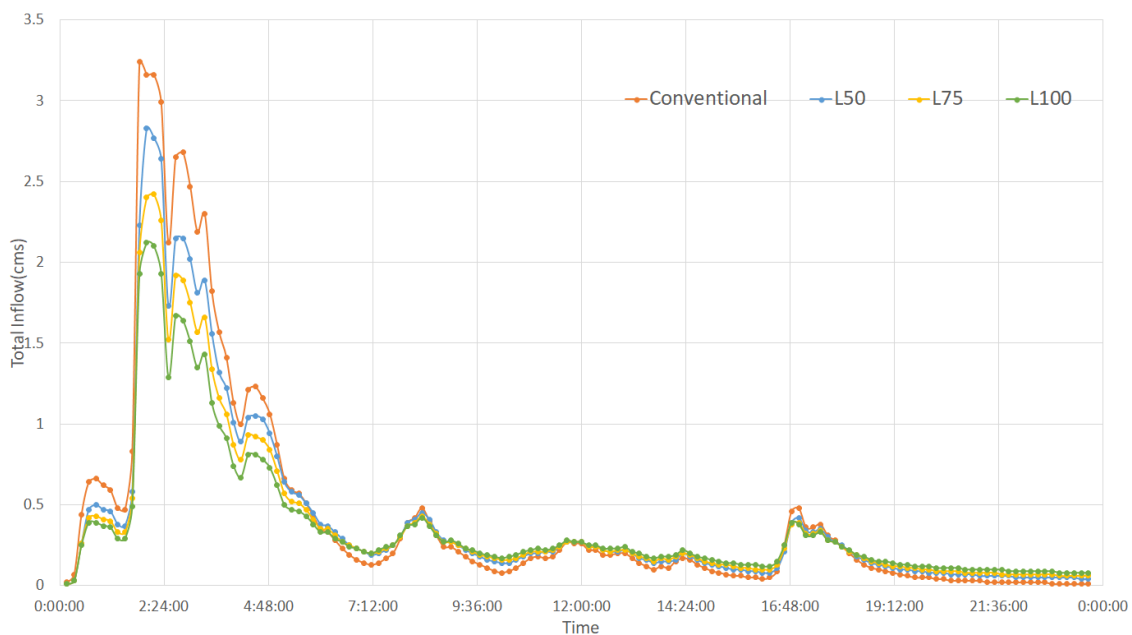


Fig. 8. Inflow Results by Area

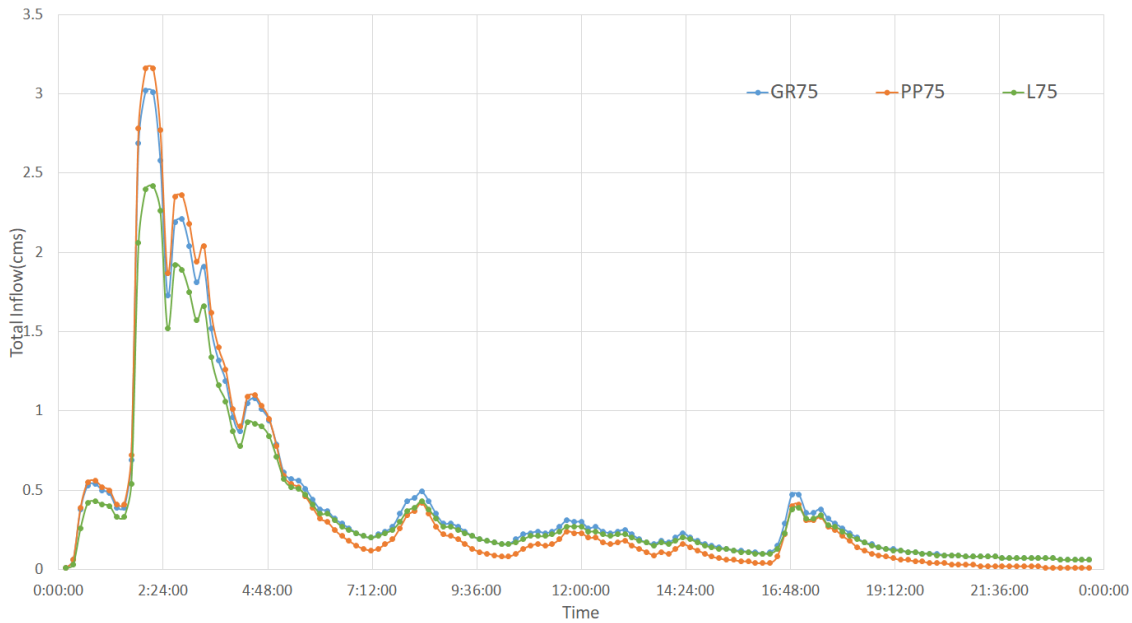


Fig. 9. Inflow Results by Technique

Table 3. Inflow Changes in volume by scenarios

Scenario	LID technique	Inflow before LID applied(m ³ /s)	Inflow after LID applied(m ³ /s)	Inflow change(%)
GR75	Green Roof	63.180	62.08	-1.73
PP75	Permeable Pavement		56.83	-10.04
L50	Green Roof + Permeable Pavement		58.56	-7.30
L75			54.48	-13.76
L100			51.31	-18.77

내었고, Fig. 9은 시나리오 B, C, E로 기법별 유출량 감소를 그래프로 나타내었다. Table 3에 시나리오 A, B, C, D, E, F로 나타내어 LID기법 적용 결과를 표로 제시하였다.

본 연구에서는 유역으로부터 저수지로의 유입량(inoutflow)을 통해 유출량(inflow)을 분석하였다. 분석 결과, 현재 도시 상태에 비해 LID시설(옥상녹화+투수성포장)을 적용 가능 면적의 50%를 실시할 경우, 전체 유역면적 484620m²의 옥상녹화는 약 24.2% 투수성포장은 14.3% 정도 실시하였음에도 불구하고, 전체 유출량의 약 7.30%를 감소시킬 수 있었다. LID 시설은 설치가 가능한 면적이 제한되어 있으므로 모든 소유역에 같은 비율로 설치할 수는 없으나, 그 효과가 설치면적에 비해 큰 것을 알 수 있었다. 또한 옥상 녹화(GR)도 설치면적에 비해 큰 효과를 보여주었지만, 투수성 포장(PP)의 경우에는 보다 적은 면적으로도 더 높은 유출량의 저감 효과를 보여주었다. 도로와 주차장 등 공업 지역인 유역의 특성 상 불투수면적의 비율이 높고, 이로 인해 투수성 포장을 적용할 수 있는 면적이 증가하는 유역 특성에 투수성포장 기법 적용이 유용할 것으로 사료된다.

마지막으로 옥상녹화와 투수성 포장을 동시에 적용한 경우에는 당연히 한 개만 적용한 경우보다 그 효과가 커지는

것을 알 수 있으나, 옥상녹화만을 설치한 경우의 저감률 1.73%와 투수성 포장만을 적용한 경우의 저감률 10.04%를 더한 값보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 그러므로 적용을 위해 초기 투자비용이 높은 LID 시설을 설치할 경우, 다양한 시설을 무분별하게 설치하는 것보다는 유역의 특성과 기법 간의 시너지를 고려하여 보다 효율적으로 시설을 선택하여 설치하는 것이 경제적이라는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

최근 도시화로 인한 토지이용 패턴 변화로 불 투수 면적이 증가되면서 홍수에 대한 문제가 제기되었으나 도시 유역의 물순환은 개발 이전과 달리 다른 양상을 갖게 되었다. 이에 따라 LID(저영향개발, Low Impact Development) 기술을 통해 도시개발 이전의 수문 현상을 모사하기 위해 주목받기 시작했다. 본 연구에서는 도시 소유역에 강우-유출 수문모형인 SWMM의 모의를 통해 LID를 적용하여 목표로 유출량 저감 효과를 시나리오 별로 분석 및 평가하는 것으로 두었다. SWMM-LID 모형을 가산1빗물펌프장 유역을 대상으로 구축하였으며 옥상녹화와 투수성 블록 포장

기법을 기법별 정성평가를 통해 유역에 적용할 LID 기법으로 선정하였다. SWMM내에서 저류 및 침투를 통한 총 유출량 감소 효과를 위해 설정되어야 하는 각 인자들을 설계하였으며, SWMM-LID 모형에서 LID 모듈의 구성은 표면층, 토양층, 포장층, 저류층, 암거층으로 되어 있으며, 선정된 옥상녹화는 식생저류장치로, 투수성 블록 포장 기법 또한 각 인자에 따라 설계될 수 있다. 홍수 저감 효과를 LID 기법을 통해 분석하기 위하여 모의를 실시하고 6가지 시나리오를 선정하여 분석을 실시한 결과 유출량 그래프를 각 시나리오별로 나타내었다. 본 연구에 적용한 지역은 공업지역으로 불투수면적의 비율이 매우 높은 지역이었으므로, 적용가능면적의 비율과 무관하게 투수성 포장에 의한 저감 효과가 옥상녹화에 의한 저감 효과보다 더 크게 나타났으며, 동시에 적용한 경우에는 보다 효율적인 유출량의 저감을 볼 수 있었다. 적용가능면적의 100%를 복합적용한 경우 총 유출량 $51.31m^3/s$ 로 적용하지 않은 경우의 총 유출량 $63.18m^3/s$ 보다 $11.87m^3/s$ 의 최대 저감량을 나타내었다. 적용가능면적의 75%의 복합적용의 경우 총유출량 13.76% 저감, 옥상녹화의 경우 1.73% 저감, 투수성포장의 경우 10.04%의 저감량을 나타내었다. 옥상녹화와 투수성 포장 그리고 두 기법을 복합적으로 적용한 경우 모두 적용면적이 증가함에 따라 유출 저감량이 증가하는 양상을 나타내었으며, 한 기법을 적용하는 것보다 두 기법을 복합적용하는 경우가 더 높은 저감효율을 나타내었다. 그러나 도시의 불투수면적이 큰 유역의 특성에 그 유출량 저감 효과가 크게 좌우되는 것을 알 수 있었다. 그러므로 향후 유역의 특성에 맞게 시공성 및 경제성 등을 고려하여 LID 시설을 설계할 필요가 있으며, LID 기술 적용에 대한 합리적인 면적과 위치 선정에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 특히 서로 영향을 미치는 하천이나 지하수위 등 도시 수자원 요소들은 전체 시스템에서 고려할 수 있도록 고려되어야 한다. 따라서 불투수 면적을 최소화 하고 개발 전 자연 수문상태로 돌아가려는 LID 기법의 개념을 바탕으로 향후 가산1빛물펌프장 유역에 대한 통합적인 적용 방안과 다른 기법 적용에 대한 연구를 기대해 볼 수 있다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리 사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (2019002950002)

References

- Back, JS (2015). A study on adaptive LID region selection based on urban Hydro-Geomorphological properties. Master's thesis Pusan National University, Busan, pp. 63-65. [Korean Literature]
- Baek, JR (2014). Improvement of SWMM-LID module for water quality modeling of bioretention. Master's thesis Korea University, Seoul, pp. 1,16. [Korean Literature]
- Brown, T., Turner, D., Soukup, L., and Wall, N. (2007). Low impact stormwater management approaches for college gardens.. ASCE-EWRI 2nd National Low Impact Development Conference in Wilmington, North Carolina, USA [[https://doi.org/10.1061/41007\(331\)30](https://doi.org/10.1061/41007(331)30)]
- Cho, EY (2012). The analysis of LID adaptation efficiency on urban basin based on SWMM-LID model. Master's thesis Pusan National University, Busan, pp. 17-28, 60. [Korean Literature]
- Choi, JY (2009). Development project for total contamination management and research on optimal management methods for non-point sources of contamination in the workplace. Korea Environment Institute, KEI. [Korean Literature]
- Choi, hs, Kim, DH, and Cho, SY (2010) Application and effects of low Impact development in urban regeneration of waterfront areas. research report 1-187. [Korean Literature]
- Department of Environmental resources. (1999). Low-impact development: an integrated desing approach. Department of Environmental Resources, Prince George's County, Maryland, USA.
- Elliott, A.H., and Trowsdale, S.A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. Environmental Modelling and Software.22, 394- 405. [<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.005>]
- EPA. (2007). Fact sheet: Reducing stormwater costs through low impact development(LID) strategies and practices. EPA publication number 841-F-07-006.
- EPA. (2010). Storm water management model application manual Version 5.0. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH 45268. EPA/600/R-09/000.
- Fairfax County. (2018). Public facilities manual. 6-1309.
- Han, Y.H. (2014). Research for management in urban small stream using automatic flow-quality monitoring system. Master's thesis Chungnam National University, Daejeon, pp. 13-21. [Korean Literature]
- Hyun, KH, Kim, JK, Lee, JM, Jung, JS, Kim, JN, and Lee, YJ . (2010). Development plan for water-cycle green city in Asan new town.1. Land & Housing Institute ; LHI. [Korean Literature]
- Joo, JS (2012). Analysis of the characteristics of non-point pollutant runoff and effects of SWMM-LID in industrial area. Master's thesis Pusan National University, Busan, pp. 65-68. [Korean Literature]
- Kim, RH (2016). Low impact development and green infrastructure in SouthKorea: Trends and Future Directions. Korea Institute of Civil Engineering and

- Building Technology, pp. 84–88. [Korean Literature]
- Kim, YM (2020). A study on the effective urban runoff reduction using SWMM–LID model. Master's thesis Kyungpook National University, Daegu, pp. 4–7. [Korean Literature]
- Lee, HM (2019). Cost-effective application of pipelines and LID techniques for reduction of urban flooding and environmental load. Master's thesis Kongju National University, Chungcheongnam-do, pp. 14–15. [Korean Literature]
- Lee, MJ (2021). An analysis of runoff reduction Effect by using SWMM–LID model in university campus. Master's thesis Jeonbuk National University, Jeollabuk-do, pp. 39–48. [Korean Literature]
- Lim, YK (2011). A study of LID technologies for friendly environmental urban development. Master's thesis Pusan National University, Busan, pp. 79–85. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research. (2012). Guideline for non-point sources management in TMDL.
- Ministry of Environment. (2009). Preparation of management plan for natural boiling point pollution sources using LID method.
- Ministry of Environment. (2013). Guidelines for low impact development (LID) technology elements.
- Palla, A., Berretta, C., Lanza, L.G., and Barbera, P.La. (2008). Modelling storm water control operated by green roofs at the urban catchment scale. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.
- Park, JH, Yoo, YG, Park, YK, Yoon, HT, Kim, JG, Park, YS, Jeon, JH, and Lim, KJ (2008). Analysis of runoff reduction with LID adoption using the SWMM. *J. of Korean Society on Water Environment* 24.6: 806–816. [Korean Literature]
- SEMCOG. (2008). Low impact development manual for Michigan: A Design Guide for Implementors and Reviewer.
- Shin, DS, Park, JB, Kang, DK, and Jo, DJ (2013). An analysis of runoff mitigation effect using SWMM–LID model for frequently inundated basin. *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(4), 303–309. [Korean Literature]
- The Philadelphia Water Department. (2009). Amended green city, clean waters–The city of Philadelphia's program for combined sewer overflow control program summary, PWD.
- U.S. Department of HUD. (2003). The practice of low impact development. HUD's Office of Polict Development and Research.
- Wright, J., and Struck, S. (2011). LID types, selection, design and construction considerations. 2011 Philadelphia Low Impact Development Symposium workshop in Philadelphia, PA, USA [[https://doi.org/10.1061/41173\(414\)64](https://doi.org/10.1061/41173(414)64)]
- Yoon, JB (2013). Urban design mitigation tools for heavy rainfall hazard : Focusing on the flooding hazard area in Gamjeon-1 Dong, Busan. Master's thesis Dong-A University, Busan, pp. 82–85. [Korean Literature]