

RCP 기후변화 시나리오에 따른 우수 유출량 저감을 위한 저영향개발 시설의 적용 방안

김민지* · 김지은** · 박경운*** · 김태웅****

Kim, Min ji*, Kim, Ji Eun**, Park, Kyung Woon***, Kim, Tae-Woong****

Application of LID to Reduce Storm Runoff according to the RCP Climate Change Scenarios

ABSTRACT

Due to climate change, increased heavy rainfalls result in flood damage every year. To investigate the storm-runoff reduction effects of Low Impact Development (LID), this study performed runoff analyses using the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Storm Water Management Model (SWMM) for past and future representative storm events of the Yongdu Rainwater Pumping Station basin. As a result, the infiltration loss for representative future rainfalls increased by 3.17 %, and the surface runoff and peak runoff rate increased significantly by 32.50 %, and 128.77 %, respectively. To reduce the increased surface runoff and peak runoff rates, this study investigated the applicability of LID approaches, including a permeable pavement, green roof, and rain garden, by adjusting the LID parameters and the ratio of installation area. We identified the ranges of LID parameters that decreased peak runoff rate and surface runoff, and increased infiltration. In addition, when the application ratio of permeable pavement, green roof, and rain garden was 2:1:3, best performance was attained, leading to a reduction of peak runoff of 26.85 %, infiltration loss 12.01 %, surface runoff 15.11 %, and storage 509.47 %. Based on analyzing the effect of storm runoff reductions for various return periods, it was found that as the return period increased, the proportion of peak runoff and surface runoff increased and the proportion of infiltration loss and storage decreased.

Key words : Climate change, SWMM (Storm Water Management Model), LID (Low Impact Development), Storm-runoff reduction

초록

기후변화의 영향으로 집중호우가 증가하고 있으며, 이로 인한 침수피해가 매년 발생하고 있다. 본 연구는 저영향개발(LID) 시설의 우수 유출저감 효과를 분석하기 위하여, 용두빗물펌프장 유역을 대상으로, 미국 환경보호청(EPA)의 우수유출관리모형(SWMM)을 이용하여, 과거와 미래의 대표 강우사상에 대한 유출분석을 수행하였다. 그 결과 과거 강우사상과 비교하여 미래 대표 강우사상에 대한 침투량은 3.17 % 증가하였지만, 지표면 유출량 및 침투유량은 각각 32.50 % 및 128.77 % 증가하였다. 이러한 지표면 유출량과 침투유량의 증가를 감소시키기 위하여 투수성 포장, 옥상녹화 및 빗물정원을 선정하였다. 세 가지 LID 시설의 매개변수와 설치 면적 비율을 조정하여 LID 시설의 적용성을 평가하였다. 그 결과 침투유량과 지표 유출량을 감소시키고 침투량과 저류량을 증가시키는 투수성 포장, 옥상 정원 그리고 빗물 정원의 적정 매개변수를 찾을 수 있었다. 또한 투수성 포장, 옥상녹화, 빗물정원의 적용 비율이 2:1:3일 때, 침투유량 26.85 %, 침투량 12.10 %, 지표면 유출량 15.11 %, 저류량

* 정희원 · 한양대학교 대학원 스마트시티공학과 석박사과정 (Hanyang University · stylus97@hanyang.ac.kr)

** 정희원 · 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석박사과정 (Hanyang University · helloje2@hanyang.ac.kr)

*** 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석박사과정 (Hanyang University · sienger@daum.net)

**** 중신희원 · 교신저자 · 한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수, 공학박사

(Corresponding Author · Hanyang University (ERICA) · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received June 15, 2021/ revised July 26, 2021/ accepted February 15, 2022

509.47 %의 저감효과가 나타났다. 재현기간별 우수 유출저감 효과를 분석한 결과, 재현기간이 증가할수록 침투유량과 지표면 유출량의 비중은 늘어나고 침투량과 저류량의 비중은 줄어드는 것으로 나타났다.

검색어 : 기후변화, SWMM, LID 시설, 우수유출저감

1. 서론

최근 우리나라는 기후변화에 의한 이상강우의 증가와 도시화에 의한 홍수량의 증가로 인하여 많은 홍수피해가 발생하고 있다. 기후변화로 인한 강우변동성의 증가는 과거 관측치를 초과하는 호우를 발생시키며, 이는 극한홍수와 같은 자연재난의 발생 가능성 또한 증가시킨다(Kim et al., 2020). 2020년의 경우, 중부 지방은 54일(6월 25일~8월 16일) 동안 장마가 계속되어, 1973년 이후 역대 가장 긴 장마철을 기록하였으며, 여름철 자연재난 대책 기간인 5월 15일~10월 15일 동안 집중호우로 46명 사망 실종 및 1조 371억 원의 재산피해가 발생하였다(Korea Meteorological Administration, 2021).

기후변화와 더불어 급격한 경제성장과 함께 광범위한 도시개발로 인한 홍수문제도 발생하고 있다. 도시개발로 인한 녹지 감소와 포장율 증가 등으로 인하여 불투수 면적이 증가하는 것이 도시화로 인해 발생하는 대표적인 현상이다. 불투수 면적의 증가는 증발산량 및 토양 침투량의 감소와 집중 호우 시 지표 유출량 및 침투 유출량의 급격한 증가를 야기하여 홍수 피해를 유발한다(Park, 2018).

이러한 홍수 피해의 대책으로 분산형 유출저감 시설인 저영향개발(Low Impact Development, LID)이 해결방안으로 제시되고 다양한 방향으로 연구가 진행되고 있다. 특히 Lee et al.(2014)는 아산탕정 물순환 시범도시 유역을 대상으로 계획된 LID 시설 설치에 따른 개발 전·후 물순환 개선효과를 분석하였다. 도시개발에 따라 지표 유출량이 약 38 % 감소하였으나, LID 시설 설치 후 지표 유출량은 18 % 감소하고 지하수 유출량은 10 % 증가하는 것으로 분석되었다. Kim et al.(2014)은 옥상녹화와 투수성 포장 면적을 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 % 등으로 적용하는 여러가지 시나리오에 대해 유출 분석을 수행하였다. 분석 결과 옥상녹화와 투수성 포장을 복합적으로 적용했을 경우, 총 유출량 및 침투 유출량이 가장 크게 저감되는 것으로 나타났다. LID 요소기술 적용의 경우 설치면적대비 총 유출량의 저감 효율은 지속적으로 감소하는 양상을 보이나, 침투 유출량의 분석결과에서는 설치면적비가 증가할수록 저감 효율이 증가하다 감소하는 결과를 제시하였다. 또한 Kim and Joo(2017)는 7가지(식생체류지, 식물재배화분, 나무여과상자, 투수블럭, 침투도랑, 침투통, 침투형 빗물받이) LID 시설별 장기 우수유출저감 성능에 대해 강우강도와 총 강수량에 따른 유출 저감률과 침투량을 비교 연구하였다. 대다수의 LID 시설들의

우수 유출 저감률이 비교적 작을수록 연강수량이 증가하는 반비례적인 경향을 보였으며, 나무여과상자가 73.0 %로 저감률이 가장 크고 침투통이 11.5 %로 가장 작게 분석되었다. Bae et al.(2019)은 2년, 5년, 10년, 20년, 30년 등 5개 재현기간에 대한 설계 강우와 7종류(투수성 포장, 나무여과상자, 식물재배화분, 식생체류지, 침투도랑, 침투통, 침투형 빗물받이) LID 시설 설치에 따른 침투 유출량 변화와 기존 우수관망의 통수능 개선 효과를 분석하였다. LID 시설 설치에 따른 유역별 평균 침투유량 저감율은 9.07 %로 나타났으며, 근소하지만 재현기간 5년에 대한 효과가 가장 크게 나타났다.

이와 같이, 선행연구는 실제 대상 유역에서 LID 시설별 우수 유출 저감 효과를 측정하거나 강우빈도와 LID 시설 설치를 다양한 비율로 적용하여 지표 유출량과 침투량 등을 분석하는 경우가 많았다. 그러나 장기적인 측면에서 기후변화로 인한 강우 패턴의 변화를 고려하여 LID 시설의 효율을 높이는 방안에 관한 연구가 필요한 상황이다. 따라서 본 연구는 LID 시설의 효율을 높이기 위하여 매개변수 및 LID 시설의 설치 면적 비율에 대한 비교분석을 수행하였다. 또한 기후변화에 따른 강수량 변화를 고려하기 위하여 10, 30, 50, 100년 빈도의 미래 강수량을 적용 후 결과를 분석하였다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역

본 연구는 서울시 동대문구에 위치한 용두빛물펌프장 유역을 연구지역으로 선정하였다. 서울특별시의 불투수면적율은 54.37 %로 우리나라에서 두 번째로 높으며, 연구지역이 포함된 청계천 유역의 불투수면적율은 71.49 %로 가장 높다(MOE and KECO, 2013b). 청계천 유역은 여름철 집중호우로 침수피해가 빈번하게 발생한다. 특히, 2010년 9월 21일 하수가 역류하여 주택 침수피해 28건과 상가 및 공장 침수피해가 15건 발생하였다. 이러한 피해 원인 중의 하나는 펌프장의 배수 능력 부족이었기 때문에 2013년에 용두3빛물펌프장을 증설하였다. 추가로 저지대 침수방지를 위하여 물막이 판, 수중펌프, 옥내역지면을 2017년부터 매년 지원하였지만 2018년 8월에도 집중호우로 인하여 이파트가 침수되는 등 피해가 지속적으로 발생하는 상습침수 지역이다.

용두빛물펌프장 유역은 동대문구의 용두동에 위치하며 용두빛물펌프장 유역의 우측에는 정릉천, 좌측에는 성북천, 아래에는 청계천이 흐르고 있다. 유역 면적은 31.52 ha, 평균 불투수면적율은

71.5 %, 평균경사는 1.19 %이며, 주로 주거지역으로 사용되고 있다. 5층 미만의 일반주택지가 60.36 %로 대부분을 차지하며, 도로 21.18 %, 고층주택지 6.55 %, 교육시설 5.73 %, 상업 및 업무지 2.64 %, 기타 3.54 %로 이루어져 있다. Fig. 1은 해당 유역을 나타낸 CAD 도면이며, 하늘색 선은 D900 이상의 관로, 노란색 선은 D900 이하의 관로, 주황색 선은 소유역의 흐름, 갈색 선은 중유역의 경계선, 회색 선은 소유역의 경계선, 빨간색 선은 용두빗물 펌프장을 의미한다.

2.2 기후변화 시나리오

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 5차 평가보고서에서 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP) 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5로 알려진 4개의 기후변화 시나리오를 발표하였다(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). 시나리오에 포함된 숫자는 2100년에 기록되는 복사 강제력을 의미한다. 예를 들어 RCP 4.5 시나리오는 2100년에 접근할 때 복사 강제력이 4.5 W/m²로 고정될 것이라고 가정하는 것이다.

RCP 2.6은 전 세계 연간 온실가스 배출량이 2010~2020년

440 ppm까지 정점을 찍은 뒤 크게 감소하는 가장 낙관적인 완화 시나리오다. 안정화 시나리오인 RCP 4.5에서는 2040년경에 배출량이 최고조에 달한 후 2100년까지 총 복사력이 540 ppm에 도달한 후 평형을 유지한다. RCP 8.5는 21세기에 걸쳐 배출량이 꾸준히 증가해 2100년까지 940 ppm에 달하고, 100년 동안 계속 증가하는 비관적 시나리오다(Doulabian et al., 2020).

RCP 4.5 및 8.5에 따른 21세기 말(2070~2099년) 전 지구와 우리나라의 평균적 기후변화 전망을 요약하면 Table 1과 같다(Kang et al., 2012). 우리나라의 경우 기후변화를 완화하기 위한 노력없이 현재 추세대로 온실가스를 계속 배출한다면(RCP 8.5), 21세기 말에 평균기온은 6.0 °C 상승, 강수량은 20.4 % 증가할 것으로 예상되고, 어느 정도 저감 노력이 실현된다면(RCP 4.5) 평균기온 3.4 °C 상승과 강수량 17.3 % 증가가 전망된다.

2.3 저영향개발

LID는 개발지역에서 강우 유출수의 저류, 체류, 방지 및 처리기술을 발생원 단계에서 적용하여 유출시간 유지, 추가 유출량 감소 및 오염방지에 초점을 맞추어 계획하는 분산형 유출저감시설이다(Kim et al., 2014; Park, 2018). 대표적인 LID 시설에는 식생

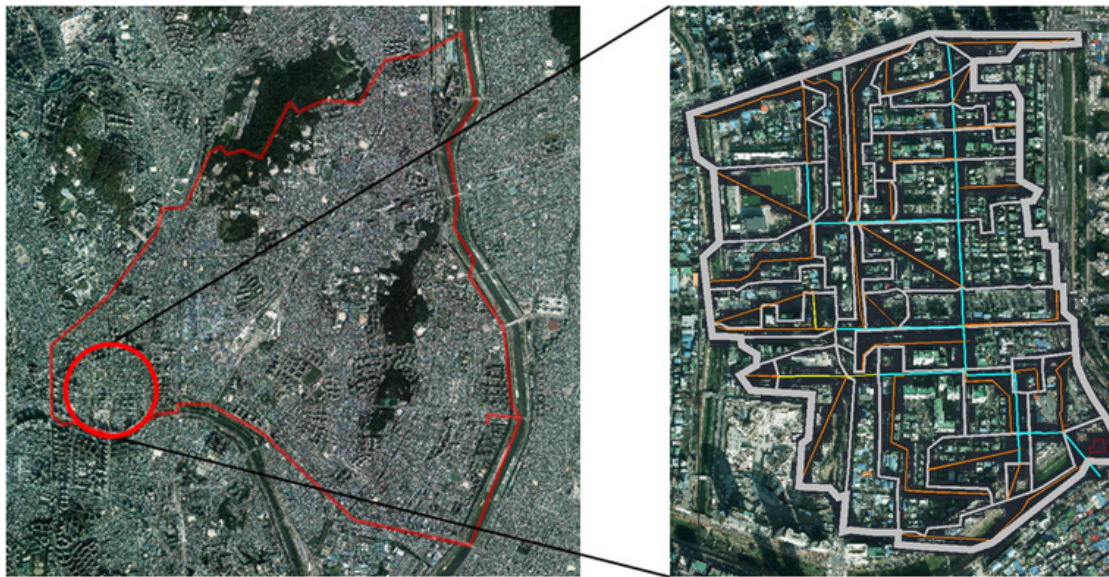


Fig. 1. Sewer Pipe Network Diagram of Yongdu Rainwater Pumping Station Basin

Table 1. Summary of Climate Projections from Global and Regional Climate Change Scenarios (Kang et al., 2012)

RCP scenario		RCP 4.5	RCP 8.5
Global average	Temperature (°C)	+ 2.8	+ 4.8
	Precipitation (%)	+ 4.5	+ 6.0
Regional average (Korea)	Temperature (°C)	+ 3.4	+ 6.0
	Precipitation (%)	+ 17.3	+ 20.4

Table 2. Types and Characteristics of Technology Elements for LID (MOE and KECO, 2013a)

Category	Undercurrent	Percolation	Permeation	Evapotranspiration	Ecological habitat	Ground water recharge	Aesthetic	Application	
								Estate	Road
Bio retention	√	√	√	√	√	√	√	●	●
Green roof	√	√		√	√		√	●	-
Treebox filter		√	√			√	√	●	●
Planter box		√	√	√	√	√	√	●	○
Bioswale	√	√	√	√	√	√	√	●	●
Bioslope		√	√	√	√		√	○	●
Infiltration trench	√	√	√	√		√	√	●	●
Dry well	√	√	√			√		●	○
Permeable pavement		√	√	√		√		●	○
Sand filter		√	√			√		○	△
Rain barrel	√							●	-

체류지(bio retention), 옥상녹화(green roof), 나무여과상자(treebox filter), 식물재배화분(planter box), 식생수로(bioswale), 식생여과대(bioslope), 침투도랑(infiltration trench), 침투통(dry well), 투수성 포장(permeable pavement), 모래여과장치(sand filter), 빗물통(rain barrel), 빗물정원(Rain garden) 등이 있다. 「저영향 개발 기술요소 가이드라인」에 총 11가지의 LID 기술요소의 종류 및 특성이 Table 2와 같이 정리되어 있으며, 적용성에 대한 기호는 ● 매우 좋음, ○ 좋음, △ 보통, - 어려움을 의미한다(MOE and KECO, 2013a).

본 연구에서는 단지와 도로에 적용성이 높고, 저류기능, 여과기능, 증발산 등 다양한 기술요소를 포함하고 있으며, 선행 연구에 많이 적용되었고(Bae et al., 2019; Kim and Joo, 2017; Park, 2018; Yoon et al., 2020), 도시유역에 적합하다고 판단되는 투수성 포장과 옥상녹화, 빗물정원을 적용하였다.

2.4 SWMM

우수유출관리모형(Storm Water Management Model, SWMM)은 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발하였으며, 도시유역의 우수 유출, 하수구 및 배수 시설과 관련된 계획, 분석 및 설계 등을 위해 사용되고 있다. SWMM을 구축하기 위해서는 대표적으로 세 가지 유형의 기초 자료가 요구된다. (1) 지표면 유출모의를 위한 배수구역의 소유역별 지형 및 배수관련 특성 자료, (2) 관거 내의 유량 추적 및 통수능 검토를 위한 관거 및 맨홀 자료, 그리고 (3) 지역 강우특성을 고려한 강우 관련 자료이다(Bae et al., 2019).

본 연구에서는 LID 기능이 추가되어 유출 관리의 효과를 판단할 수 있는 SWMM (ver. 5.1)을 사용하였다. SWMM에서 제공되는

Table 3. Parameter Ranges of Permeable Pavement (Kim et al., 2017; Kim, 2020; Park, 2018; EPA, 2015)

Layer	Parameter	Range*
Surface layer	Berm Height (mm)	0 (0)
	Vegetation Volume Fraction	0 (0)
	Surface Roughness (n)	0.011-0.1 (0.1)
	Surface Slope (%)	0-3 (1)
Pavement	Thickness (mm)	100-250 (100)
	Void Ratio	0.12-0.21 (0.15)
	Impervious Surface Fraction	0-100 (0)
	Permeability (mm/hr)	6.5-25400 (100)
Storage	Clogging Factor	0 (0)
	Thickness (mm)	150-450 (150)
	Void Ratio	0.5-0.75 (0.75)
	Seepage Rate (mm/hr)	10-10800 (0.5)
Drain	Clogging Factor	0 (0)
	Flow Coefficient	0-28.28 (0)
	Flow Exponent	0.5 (0.5)
	Offset (mm)	0-200 (6)

* (): default value

LID 시설은 식생체류지, 빗물정원(Rain garden), 옥상녹화, 투수성 포장, 침투도랑, 빗물통, 지붕흡통분리(Rooftop disconnection), 식생수로 등 총 8개이다. SWMM에서 LID는 Surface, Pavement, Soil, Storage, Drain, Drainage Mat 등 총 6개 층의 조합으로 표현하며, 각 층 사이에 얼마나 많은 물이 이동 및 저장되는지 추적한다.

Tables 3 and 4는 투수성 포장(Permeable pavement)과 옥상녹화(Green roof) 그리고 빗물정원(Rain garden)의 입력 구성 층과

Table 4. Parameter Ranges of Green Roof and Rain Garden (Kim et al., 2017; Kim, 2020; Park, 2018; EPA, 2015)

Layer	Parameter	Range*	
		Green roof	Rain garden
Surface layer	Berm Height (mm)	0-25 (0)	0-300 (0)
	Vegetation Volume Fraction	0-1 (0)	0-1 (0)
	Surface Roughness (n)	0.1-0.8 (0.1)	0.1-0.41 (0.1)
	Surface Slope (%)	0-5 (1)	0-5 (1)
Soil	Thickness (mm)	50-150 (50)	100-900 (100)
	Porosity	0.4-0.78 (0.5)	0.4-0.78 (0.5)
	Field Capacity	0.2-0.3 (0.2)	0.2-0.3 (0.2)
	Wilting Point	0.05-0.01 (0.1)	0.05-0.01 (0.1)
	Conductivity (mm/hr)	0.5-203.2 (0.5)	0.5-36 (0.5)
	Conductivity Slope	5-15 (10)	5-15 (10)
	Suction Head (mm)	3.5 (3.5)	3.5 (3.5)
Drainage mat	Thickness (mm)	25.4-50 (3)	-
	Void Fraction	0.5-0.6 (0.5)	
	Roughness (n)	0.1-0.4 (0.1)	

* (): default value

매개변수를 정리한 것이다. 매개변수의 범위는 국내외 문헌을 참고하여 추정 및 적용하였으며, 매개변수의 기본값은 SWMM의 초기 값을 이용하였다.

3. 연구결과 및 분석

3.1 SWMM의 구축

용두빗물펌프장 유역에 대한 SWMM을 구축하기 위해 30개의 소유역으로 나누고 58개의 맨홀(Node)과 57개의 관로(Link)에 대하여 면적, 폭, 평균경사, 불투수면적을 등을 산정하였다.

SWMM에서는 여러 가지 침투량 산정법을 제공하고 있지만, 본 연구에서는 실무에서 가장 많이 사용되며, 토양의 종류와 토지 이용도를 고려한 유출곡선법(Curve Number (CN) Method)를 채택하였다. Yeo and Jung(2013)은 Arcview 3.2의 map calculator를 통해 토양도와 토지 피복도를 이용하여 CN값을 84로 산정하였으며, 본 연구에서는 이 값을 이용하였다.

「2030 서울도시기본계획」에 따르면 서울은 이미 개발이 완료된 지역으로 도시 내부까지 크고 작은 녹지를 연계하여 열섬현상을 완화하고 바람 길을 유도하여 쾌적한 환경이 되도록 조성할 예정이다(Seoul Metropolitan Government, 2014). 이를 바탕으로, 미래의 불투수면적은 증가하지 않는다고 가정하였고, 미래의 CN값을 과거의 CN값과 동일한 84를 사용하였다.

용두빗물펌프장 유역은 도시유역이지만, 호우시 수위 또는 유량에 대한 측정자료가 거의 존재하지 않는다. 따라서, 연구에서는

구축한 모형의 적절성 검토를 위하여, 2011년 7월 집중호우를 대상으로 SWMM의 침수모의결과를 실제 침수흔적과 비교하였다. SWMM 모의 결과 최대침수심은 0.37 m이었으며, 이는 실제 최대침수심 0.35 m와 비교한 결과 적절한 수준인 것으로 판단하였다.

3.2 기후자료 구축

본 연구에서는 기상청의 종관기상관측(Automated Synoptic Observing System, ASOS)으로 관측된 일강수량 자료를 티센망에 적용하여 동대문구의 강수량을 산정하여 과거 강우사상을 추출하였다. 미래 강우사상을 모의하기 위하여, 현재 기후를 잘 반영하는 해상도 1.875×1.250의 HadGEM2-AO 모델과 Spatial Disaggregation Quantile Delta Mapping 방법으로 산정한 60개 ASOS 관측지점에 대한 일단위 RCP 8.5 시나리오를 티센망에 적용하여 동대문구의 강수량을 산정하였다.

과거와 미래의 대표 강우사상을 결정하기 위해 강우 빈도해석을 수행하여 방재성능목표에 해당하는 재현기간 30년 빈도의 지속시간 24시간에 해당하는 강우량을 각각 산정하였다. 과거 강우 관측자료가 45년(1976~2019년)이므로 시간적 범위를 동일 조건으로 맞추기 위하여 2020~2064년의 강우자료를 이용하여 강우사상을 추출하였다. Kolmogorov-Smirnov (KS) 검정을 시행한 결과, 여러 확률분포(Exponential, Gaussian, Gamma, Log-Normal, Poisson, Weibull, Generalized Extreme value, Generalized Pareto, Extreme Value) 중 과거와 미래 강우자료 모두 대수정규분포를

따르는 것을 확인하였다. 재현기간 30년과 지속시간 24시간인 확률강우량을 각각 산정한 결과, 과거 308.27 mm와 미래 400.31 mm로 나왔으며 Huff 3분위 시간분포곡선을 반영하여 강우를 분포시켰다.

과거와 미래의 대표 강우사상의 유출 분석 결과, 과거와 비교하여 저류량은 일정하였으며, 침투량은 소폭 상승하였다(3.17%). 강우량 증가 대비 저류량과 침투량의 미비한 증가로 인해 지표 유출량이 32.5%로 크게 증가하였으며, 침투유량 또한 미래에 128.77%로 큰 폭으로 증가하였다(Table 5).

3.3 LID 시설의 매개변수 민감도 분석

본 연구에서는 침투유량과 지표 유출량은 감소시키고, 침투량과 저류량은 증가시키는 LID 시설의 매개변수 값을 도출하기 위하여

미래 대표 강우사상을 대상으로 민감도 분석을 수행하였다. 투수성 포장은 도로 및 주차장, 옥상녹화는 건물 옥상, 빗물정원은 주택지와 학교에 설치 가능하므로, LID 시설을 전체 유역의 30%에 적용하여 유출 특성의 변화를 비교분석하였다. 또한, LID 시설의 적용 면적이 좁아서 효과가 미미하거나 면적이 넓어서 LID 시설의 저류량 및 침투량이 매우 크게 산정되어 지표 유출량이 발생하지 않는 상황을 방지할 수 있도록 LID 시설의 적용 비율을 30%로 정하였다. 민감도 분석을 위하여 기본 매개변수 값을 적용한 하나의 LID 시설을 전체 유역의 30%에 적용하였다. 다음으로 매개변수의 값을 하나씩 변경하여 우수 유출 결과를 비교하여 최적의 매개변수의 값을 도출하였다.

먼저, 투수성 포장의 경우, 시설의 특성상 침투유량과 침투량의 값은 일정하였으며, 지표 유출량과 저류량의 경우, 총 16개의 매개

Table 5. Changes of Precipitation, Peak Runoff, Infiltration Loss, Surface Runoff, and Storage Volume

	Precipitation (mm)	Peak runoff (cms)	Infiltration loss (mm)	Surface runoff (mm)	Storage (mm)
Past	308.27	7.96	12.62	285.35	12.25
Future	400.31	18.21	13.02	378.10	12.25
Rate of change (%)	29.86	128.77	3.17	32.50	0.00

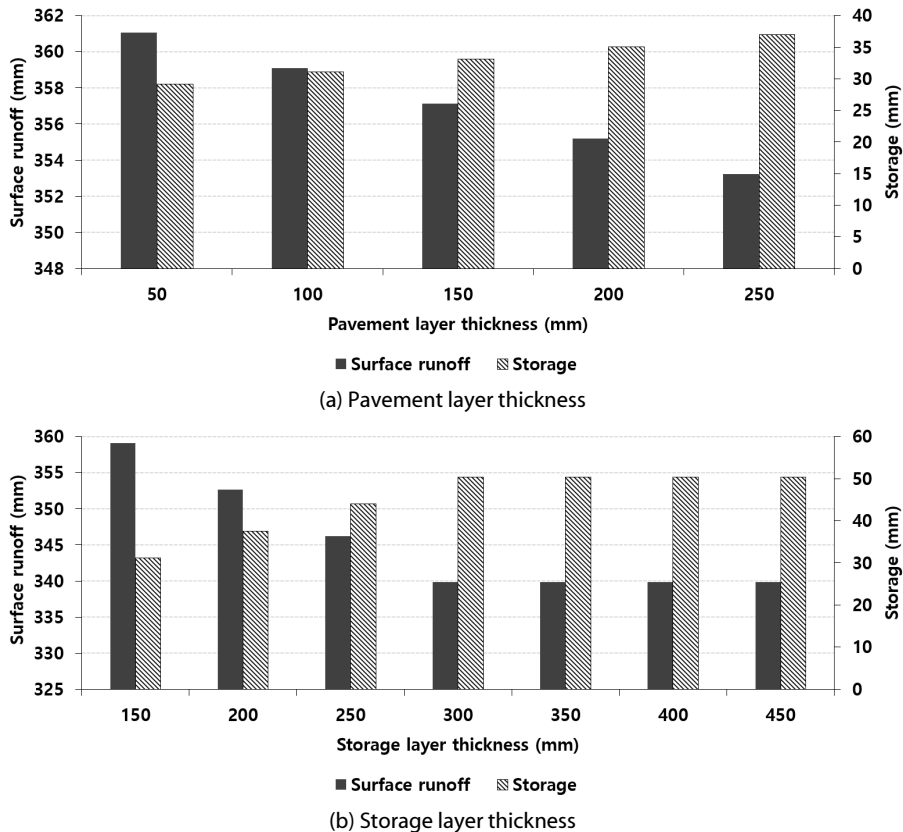


Fig. 2. Parameter Sensitivity of Permeable Pavement

변수 중 Pavement 층의 Thickness와 Storage 층의 Thickness가 민감하게 반응하였다(Fig. 2).

Pavement 층의 Thickness는 두께가 증가할수록 지표 유출량과 저류량이 1.957 mm 씩 일정한 비율로 각각 감소하고 증가하는 것으로 나타났다. 그렇기 때문에 효율은 동일하지만, 지표 유출량의 값은 작고 저류량의 값은 큰 250 mm를 최적의 매개변수의 값으로 선정하였다. Storage 층의 Thickness는 두께가 300 mm까지 증가할수록 지표 유출량과 저류량이 6.428 mm씩 일정한 비율로 각각 증감하다가 변화가 없는 것으로 나타났다. 그렇기 때문에 Storage 층의 Thickness의 최적의 매개변수 값은 300 mm로 선정하였다.

두 번째로 옥상녹화의 14개의 매개변수 중 민감하게 반응한 Surface 층의 Berm Height와 Soil 층의 Porosity가 변화하는 것을 Fig. 3에 나타내었다. 투수성 포장과 마찬가지로 침투유량과 침투량의 값은 일정하며 지표 유출량과 저류량의 변화가 발생하였다(Fig. 3).

Surface 층의 Berm Height의 경우 5 mm일 때 저류량의 변화가 10.606 mm에서 16.752 mm로 변화의 폭이 가장 크고 지표 유출량은 385.219 mm에서 379.073 mm로 감소하여 효율이 가장 높은 5 mm를 최적의 매개변수로 선정하였다. Soil 층의 Porosity의

경우, 지표 유출량은 385.278 mm에서 385.219 mm, 저류량은 10.546 mm에서 10.606 mm로 모두 0.5일 때 큰 폭으로 개선된 후 효율이 미미해지는 것을 확인하였으므로, 0.5를 최적의 매개변수로 하였다.

마지막으로 빗물정원의 경우 11개의 매개변수 중 Surface 층의 Berm Height와 Soil 층의 Porosity와 Conductivity가 민감하게 반응하였다(Fig. 4).

Berm Height의 값이 증가할수록 침투유량과 지표 유출량은 감소하는 경향을 보이며, 그 중 침투유량이 가장 큰 폭으로 감소한 300 mm를 최적의 매개변수로 선정하였다. Porosity의 경우 옥상녹화와 마찬가지로 0.5일 때 가장 크게 완화되었으므로, 최적의 매개변수로 판단하였다. Conductivity는 값이 증가할수록 침투유량, 지표 유출량 및 저류량이 개선되었으나 개선 효율이 줄어드는 것으로 나타났다. 침투유량이 가장 큰 폭으로 감소한 Conductivity의 최적의 값을 1.0으로 적용하였다.

3.4 LID 시설의 설치 면적 비율

대상 LID 시설의 설치 비율 중 우수 유출 저감에 가장 효율적인 비율을 산정하기 위하여 LID 시설에 시설별 설치 면적에 대한

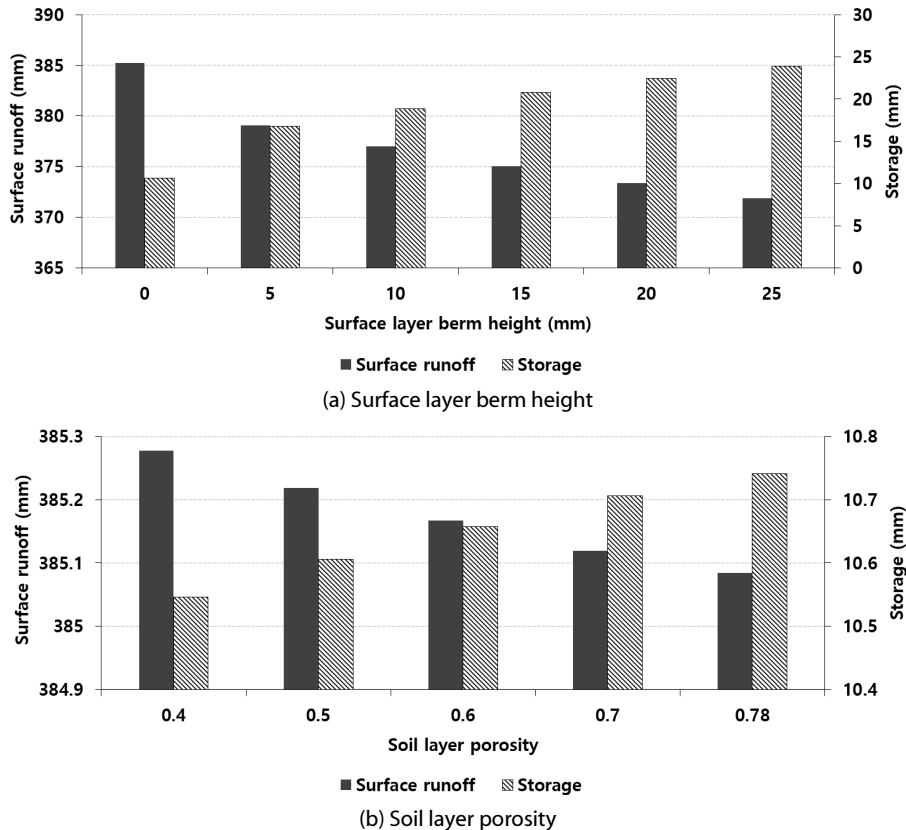


Fig. 3. Parameter Sensitivity of Green Roof

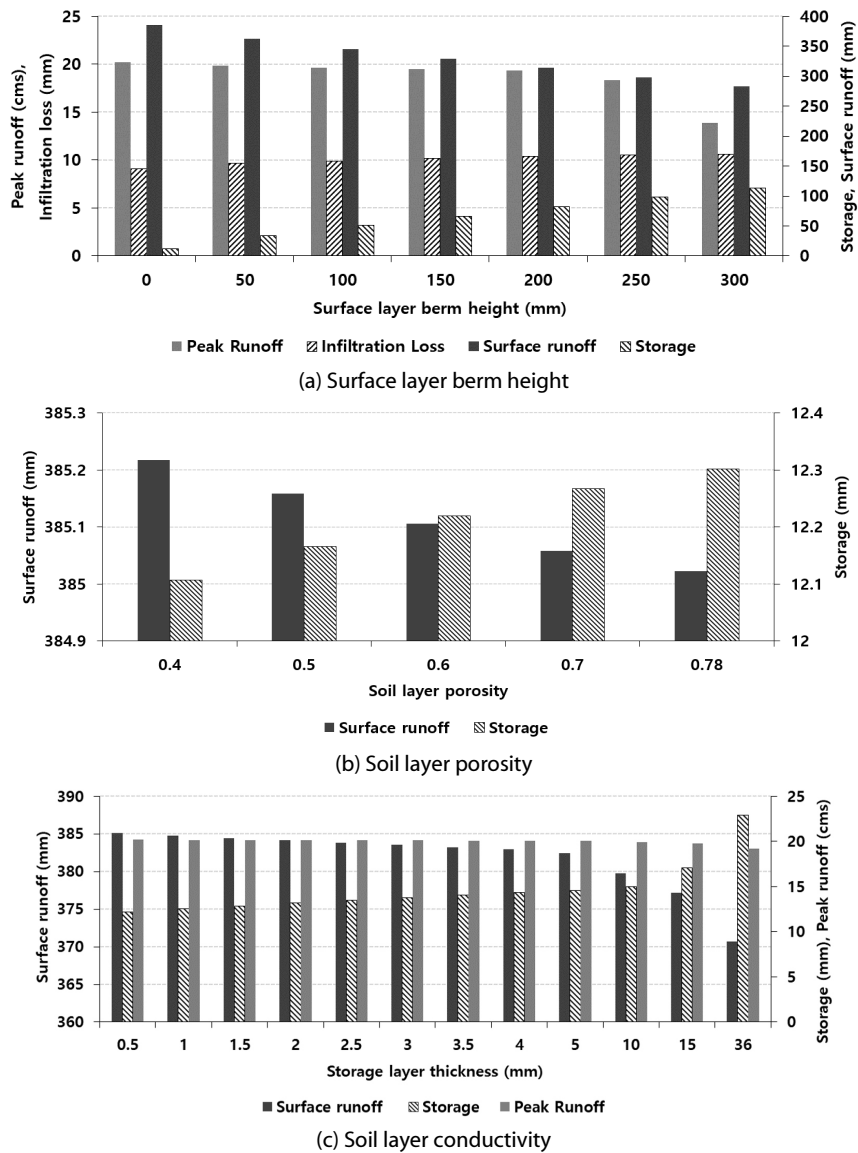


Fig. 4. Parameter Sensitivity of Rain Garden

가중치를 부여한 후 결과를 도출하였다. 투수성 포장(PP) : 옥상 녹화(GR) : 빗물 정원(RG)의 조합을 다양하게 구성하였으며, LID 시설의 총 설치 비율은 적용 면적이 좁아 효과가 미미하거나 면적이 넓어 모두 침투되는 상황을 방지하기 위하여 30 %로 적용하여 결과를 도출하였다(Table 6).

분석 결과 투수성 포장과 옥상녹화는 침투유량에 대한 영향력이 크지 않고, 빗물정원의 비율이 높은 조합이 침투유량 감소에 효과적인 것으로 나타났다. 빗물정원이 4가지 우수 유출 결과값들에 모두 효과적이기 때문에 전반적으로 빗물정원의 설치 비율이 높은 조합이 효율적인 것으로 나타났다. 옥상정원보다 투수성 포장이 침투량이 더 크기 때문에 투수성 포장의 비율이 더 큰 조합이 효과적이었고,

결과적으로 침투유량이 가장 효율적으로 개선된 2:1:3의 비율을 최적의 LID 시설의 설치 면적 비율로 선택하였다.

3.5 재현기간에 따른 LID 시설의 효과 분석

본 연구에서 도출한 최적의 매개변수의 값과 LID 시설 면적비를 이용하여, 위와 동일하게 연구지역의 30 %에 해당하는 LID 시설을 적용한 후, 재현기간 5년, 10년, 50년, 100년에 대하여 유출 분석을 수행하였다. 그 결과를 Table 7에 정리하였으며, 팔호 안의 값은 강우량 대비 우수 유출 특성의 값으로 강우량 증가에 따른 변화를 보기 쉽도록 제시하였다(Table 7).

분석 결과, 재현기간 10년에 해당하는 강우량은 과거 30년 빈도

Table 6. Runoff Analysis according to the Ratio of Installation Area of LID

PP : GR : RG	Peak runoff (%)	Infiltration loss (%)	Surface runoff (%)	Storage (%)
1:1:1	14.77	15.29	10.83	381.75
2:1:1	8.35	12.72	9.95	353.22
1:2:1	8.46	18.98	8.06	300.21
1:1:2	26.30	14.14	14.35	487.67
1:2:3	26.85	16.27	13.86	474.12
1:3:2	14.83	19.46	9.58	346.40
2:1:3	26.85	12.10	15.11	509.47
2:3:1	2.31	18.49	6.55	254.02
3:1:2	14.77	13.76	12.00	417.09
3:2:1	2.31	14.32	7.81	289.36

Table 7. Runoff Analysis by Applying the LID for Each Return Period

Return period (yr)	Precipitation (mm)	Peak runoff (cms)	Infiltration loss (mm)	Surface runoff (mm)	Storage (mm)
5	258.33	5.59 (0.02)	10.72 (0.04)	191.12 (0.74)	61.58 (0.24)
10	313.69	10.01 (0.03)	11.15 (0.04)	238.39 (0.76)	69.83 (0.22)
30	400.31	13.32 (0.03)	11.45 (0.03)	320.96 (0.80)	74.66 (0.19)
50	441.10	18.07 (0.04)	11.57 (0.03)	362.19 (0.82)	74.66 (0.17)
100	497.50	24.15 (0.05)	11.79 (0.02)	419.21 (0.84)	74.66 (0.15)

에 해당하는 강우량에 해당할 정도로 미래 강우량이 증가하였다. 모든 재현기간에서 저류량이 크게 증가하여 침투량의 값은 과거 우수 유출 결과와 비교하여 미세하게 감소하였다. 재현기간이 증가할수록 침투유량과 지표면 유출량의 비율은 증가하고, 침투량과 저류량의 비율은 감소하는 것으로 나타났다.

재현기간 5년의 결과는 강수량 증가 대비 지표면 유출량과 침투유량의 증가량이 적은 것을 보아 LID 시설의 효과를 확인할 수 있었다. 반면에 다른 재현기간인 10년, 30년, 50년, 100년의 경우, 저류량과 침투량은 이미 한계에 도달하여 강수량의 증가로 침투유량과 지표면 유출량이 크게 상승하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 동대문구 용두빗물펌프장 유역을 대상으로 과거 관측 강우량과 기후변화 RCP 8.5에 따른 강우량을 기반으로 우수 유출량을 비교분석하였다. 기후변화로 인하여 강수량이 증가하게 되었으며, 지표면 유출이 큰 폭으로 증가하고 침투유출량도 증가하였다. 도시 침수 대책 중 하나인 LID 시설 중, 설치가 용이한

투수성 포장, 옥상녹화 및 빗물정원을 대상으로 우수 유출저감 효과를 분석하였다. LID 시설의 효율적인 설치를 위하여 각 LID 시설의 매개변수 최적값과 설치 면적 비율 최적값에 대한 분석을 수행하고, 침투량, 지표면 유출량, 저류량 및 침투 유출량의 변화를 분석하였다.

LID 시설의 매개변수에 대한 분석 결과, 투수성 포장의 경우 Pavement 층의 Thickness는 250 mm, Storage 층의 Thickness는 300 mm일 경우 가장 효율적인 것으로 나타났다. 옥상녹화와 빗물정원의 경우 Surface 층의 Berm Height의 경우 각각 5 mm 및 300 mm, Soil 층의 Porosity는 0.5, 빗물 정원의 Soil 층의 Conductivity의 값은 1이 최적의 매개변수로 선정되었다. 또한 투수성 포장, 옥상녹화, 빗물정원의 조합이 2:1:3 일 경우, 침투유량과 지표면 유출량의 저감 효율이 가장 우수한 것으로 나타났다.

재현기간 5년, 10년, 50년, 100년에 대하여 우수 유출 결과를 비교 분석한 결과, 재현기간이 작을 경우(5년) LID 시설의 효과가 크게 나타났으며, 재현기간이 커지면 우수 유출 저감의 효과가 미미한 것으로 나타났다.

미래 기후변화의 영향으로 나타나는 강수량의 증가로 인한 침수

피해를 줄이기 위하여 우수 유출 저감 대책인 LID 시설의 적용이 필요하다. 하지만, LID 시설의 경우 재현기간이 낮은 호우사상에 효과가 크기 때문에, 재현기간이 큰 홍수에 대해서는 별도의 홍수피해 저감대책이 필요하다. 본 연구 결과는 향후 LID 시설의 설계적인 측면에서 활용될 수 있을 것으로 예측되며, 지역의 우수 유출 저감 효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Bae, K. H., Ahn, J. W., Choi, Y. J. and Yi, J. U. (2019). "Analysis of the improved drainage capacity of urban basins at an LID facility." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 1, pp. 311-322 (in Korean).
- Doulabian, S., Golian, S., Toosi, S. and Murphy, C. (2020). "Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios." *Journal of Water and Climate Change, Iwa Publishing*, Vol. 12, No. 1, pp. 166-184, DOI: 10.2166/wcc.2020.114.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*, Geneva, Switzerland, pp. 151.
- Kang, H. S., Baek, H. J., Boo, G. O. and Jo, C. H. (2012). "According to representative concentration path (RCP) new national climate change scenarios." *Water for Future*, Vol. 45, No. 3, pp. 73-79 (in Korean).
- Kim, E. S. (2020). "Analysis of runoff according to application of SWMM-LID element technology (I): Parameter sensitivity analysis." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 6, pp. 437-444 (in Korean).
- Kim, E. S., Yeon, J. S., Shin, H. S., Lee, J. S. and Choi, H. I. (2014). "Study on stormwater runoff reduction effects by LID application areas." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 2, pp. 309-316 (in Korean).
- Kim, J. H. and Joo, J. G. (2017). "A study on the performance comparison of the low impact development facilities for long-term stormwater reduction." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 5, pp. 337-344 (in Korean).
- Kim, J. H., Choi, S. W. and Joo, J. G. (2017). "EPA SWMM-LID modeling for low impact development." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 2, pp. 415-424 (in Korean).
- Kim, Y. J., Yu, J. E., Lee, K. I., Sung, H. C. and Jeon, S. W. (2020). "Application of the HEC-HMS model for prediction of future rainfall runoff in the Daecheong Dam basin of the Geum River." *Journal of Climate*, Vol. 11, No. 6-1, pp. 609-619 (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2021). *Abnormal climate reports for 2020*, Publication No. 11-1360000-001109-10, pp. 6-37 (in Korean).
- Lee, J. M., Lee, Y. S. and Choi, J. S. (2014). "Analysis of water cycle effect according to application of LID techniques." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 411-421 (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE), Korea Environment Corporation (KECO) (2013a). *Low impact development (LID) technical element guidelines*, pp. 1-117 (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE), Korea Environment Corporation (KECO) (2013b). *A study on the national impermeable area rate survey and improvement plan*, pp. 1-369 (in Korean).
- Park, J. O. (2018). *Analysis of influence of LID technique on runoff reduction in urban stream watershed using SWMM model*, Master's Thesis, University of Seoul National, pp. 1-77 (in Korean).
- Seoul Metropolitan Government (2014). *2030 Seoul metropolitan city master plan*, pp. 1-214 (in Korean).
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2015). *Storm water management model user's manual version 5.1*, pp. 1-352.
- Yeo, K. D. and Jung, Y. H. (2013). "An analysis of effect of green roofs in urbanized areas on runoff alleviation and cost estimation." *Seoul Urban Studies*, Vol. 14, No. 2, pp. 161-177 (in Korean).
- Yoon, E. H., Jang, C. L. and Lee, K. S. (2020). "Runoff analysis according to LID facilities in climate change scenario-focusing on Cheonggyecheon basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 53, No. 8, pp. 583-595 (in Korean).