



Analysis of runoff reduction performance of permeable pavement and rain barrel in Mokgam stream basin and determination of installation priorities

Chae, Seung-Tak^a · Chung, Eun-Sung^b · Park, Inhwon^{c*}

^aPhD Student, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

^bProfessor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

^cAssistant Professor, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

Paper number: 23-092

Received: 7 November 2023; Revised: 24 November 2023; Accepted: 29 November 2023

Abstract

This study aimed to assess runoff reduction performance and determine installation priorities for Permeable Pavement (PP) and Rain Barrel (RB) within the Mokgam Stream basin. Optimal design parameters were determined to maximize the effectiveness of PP and RB in reducing runoff. Furthermore, the optimal parameters were incorporated to compare the runoff reduction performance of PP and RB. Analysis of the runoff curve at the basin outlet indicated that PP demonstrated superior performance in reducing runoff during the rising limb of the curve. At the same time, RB excelled within the falling limb. Comparisons of total runoff and peak runoff reduction by sub-catchment revealed that in larger sub-catchment areas, PP outperformed RB in runoff reduction. In contrast, RB exhibited higher performance in areas with a higher impervious ratio. Based on the evaluation of runoff reduction performance for PP and RB, installation priorities were determined within the Mokgam Stream basin. The results showed that PP and RB installations were prioritized for sub-catchments with larger areas and a higher impervious ratio. Furthermore, the correlation between the ranking of runoff reduction performance and sub-catchment characteristics showed a high correlation with both the impervious area ratio and sub-catchment geometrical properties in sub-watersheds exhibiting the top 25% runoff reduction performance. These results emphasize that when determining the priority for installing LID facilities in developed urban areas, it is necessary to consider not only the impervious area ratio but also the geometrical properties of the sub-catchment.

Keywords: Urban flood, Low Impact Development (LID), Permeable pavement, Rain barrel, Runoff reduction, Installation priority

목감천 유역 내 투수성포장과 빗물저류조의 유출량 저감 성능 분석 및 설치 우선 순위 결정

채승택^a · 정은성^b · 박인환^{c*}

^a서울과학기술대학교 건설시스템공학과 박사과정, ^b서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수, ^c서울과학기술대학교 건설시스템공학과 조교수

요지

본 연구에서는 목감천 유역에서 투수성포장(PP)과 빗물저류조(RB)의 설치에 의한 유출량 저감 성능 분석 및 유역 내 설치 우선순위를 결정했다. PP와 RB의 설치를 통한 최대 유출 저감 성능 도출을 위해 최적 설계인자를 결정했고, 최적 설계인자를 반영한 PP와 RB의 우수 유출 저감 성능을 비교했다. 유출량의 시계열 변화로부터 첨두유출량 발생 전에는 PP가, 첨두유출량 발생 후에는 RB가 유출량 저감에 더 우수한 성능을 나타냈다. PP와 RB의 설치에 따른 소유역 별 총 유출량, 첨두유출량 저감 성능을 비교한 결과, PP의 경우 유역면적이 큰 소유역에서 RB보다 더 높은 우수 유출 저감 성능을 나타냈고 RB는 불투수면적 비율이 높은 지역에서 더 높은 성능을 나타냈다. PP와 RB의 우수 유출 저감 성능 평가 결과를 통해 목감천 유역 내 두 시설의 설치 우선 순위를 결정했다. 그 결과, PP와 RB 모두 유역면적, 불투수면적 비율이 높은 소유역에서 높은 우선 순위가 나타났다. 또한 우수 유출 저감 성능 평가 순위와 유역특성 간 상관관계를 비교한 결과, 상위 25%의 우수 유출 저감 성능을 나타낸 소유역에서는 불투수면적 외에도 유역의 형상 인자와 높은 상관관계를 보였다. 이를 통해 기존 도심 지역에 우수유출저감시설 설치 우선 순위 결정 시 불투수면적 비율과 함께 유역의 형상 인자를 함께 고려해야 함을 알 수 있다.

핵심용어: 도심 홍수, Low Impact Development (LID), 투수성 포장, 빗물저류조, 유출량 저감, 설치 우선순위

*Corresponding Author. Tel: +82-2-970-6507

E-mail: ihpark@seoultech.ac.kr (Park, Inhwon)

1. 서 론

최근 집중 강우의 발생으로 인한 도심지 침수 피해 사례가 빈번히 발생함에 따라 내수 침수 피해 관리의 중요성이 증가하고 있다. 내수 침수 피해 저감을 위해서는 불투수층의 우수 유출량 감소가 필요하며, 이를 위해 여러 나라에서 저영향개발(Low Impact Development, LID) 시설의 적용에 기반한 도시침수 저감 대책을 마련하고 있다. LID 시설은 도심지의 우수 침투량과 저수량을 증가시켜 개발 이전의 상태와 같은 홍수 대응능력을 갖출 수 있게 하는 시설이다(Zahmatkesh et al., 2015). 미국의 Green Infrastructure (GI), 뉴질랜드의 Low Impact Urban Design and Development (LIUDD), 중국의 Sponge City, 영국의 Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) 등은 LID 기술에 기반한 표면 유출량 저감 대책 사례이다(Wang et al., 2023). 국내에서는 자연재해대책법 제19조 2(우수유출저감시설 사업계획의 수립)에 따라 신규 개발 지역에 대해 우수유출저감시설 설치를 의무화하고 있으며, 도시개발에 따른 침수 위험도 저감을 위한 정책을 수행하고 있다. 하지만 기존 도심지의 경우 예산 투입 및 신규 부지 확보 등의 어려움으로 인해 우수유출저감시설의 도입 및 증설에 어려움이 있다. 따라서 기존 도심지에 대해 우수유출저감시설 설치에 따른 홍수 피해 저감 효율이 높은 지역을 선별할 필요가 있다.

LID 시설을 이용한 도심지 내 우수유출 저감 효과를 검증하기 위해 많은 연구에서 Storm Water Management Model (SWMM)을 이용해왔다. SWMM의 LID 모형은 생태저류지(Bioretention Cell), 투수성포장(Permeable Pavement, PP), 옥상녹화(Green Roof), 투수성트렌치(Infiltration Trench), 빗물저류조(Rain Barrel, RB), 빗물정원(Rain Garden, RG), 옥상분기시설(Rooftop Disconnection, RD), 식생수로(Vegetation Swale, VS)의 8개 시설에 대한 모의 기능을 갖고 있다. Kim and Joo (2017)는 SWMM의 LID 모의 기능을 활용하여 LID 시설 유형 별 장기 우수유출저감 성능을 분석했다. Arjennaki et al. (2021)은 이란의 Shahrekord 시에 대해 LID 시설 적용에 따른 홍수 저감 성능 분석 연구를 수행하였으며, 옥상 녹화, 투수성포장, 빗물저류조 중 옥상녹화의 총 유출량 저감 성능이 가장 우수함을 보였다. Yuan et al. (2022)은 도심 내 산악지형에 대해 LID 시설 중 소형 저류지를 적용하였으며, 최대 유출량과 총 유출량 저감효과를 분석했다. 개별 LID 시설의 평가에서 나아가 LID 시설 간 최적 조합에 대한 연구 또한 이뤄졌다. Nazari et al. (2023)은 우수 유출 저감을 위한 LID 시설의 최적 조합을 결정하기 위해 Multi Criteria Decision

Making (MCDM) 모델과 SWMM을 적용하였으며, 빗물저류조, 투수성 포장, 식생수로의 조합이 최적 성능을 나타낸 것으로 보고한 바 있다. Zhou et al. (2023)은 생태저류지, 투수성 포장, 옥상녹화 시설을 함께 적용하여 첨두침수량 지연 효과를 확인했다.

기존 연구에서는 SWMM 매뉴얼 또는 기존 연구결과에서 제시한 설계 인자를 적용하여 LID 시설을 설계한 바 있다(Shin et al., 2013; Yang and Chui, 2018; Gao et al., 2021). LID 시설은 시설 유형에 따라 다양한 설계인자를 포함하고 있기 때문에 설계 인자의 선택이 우수유출 저감 효율에 영향을 미친다. 따라서 SWMM의 LID 모형에 포함된 다양한 설계 인자 (design parameter)의 최적 설계를 위해 머신러닝을 활용한 연구가 수행되어 왔다. Wadhwa et al. (2023)은 미래 기후변화 시나리오를 고려한 강우에 대해 LID 시설 유형 별 유출 저감 성능을 비교하였으며, Genetic Algorithm (GA)을 이용하여 설계 인자 최적 설계를 수행하였다. LID 시설의 설치 위치와 규모 또한 우수유출저감을 위한 주요 설계 사항이다. Jang et al. (2008)은 부산 수영강 유역에 대한 우수유출저감시설의 최적설치 규모 결정을 위해 우수유출저감시설 설치 규모 변화에 따른 첨두홍수량과 저감률을 분석했다. Yang and Chui (2018)은 생태저류지의 최적 규모 결정을 위한 연구를 수행하였으며, 첨두홍수량 감소를 위한 최적 규모를 결정했다. Chae et al. (2022)은 목감천 유역에서 기후변화 영향을 고려한 PP의 설치 우선순위를 검토한 바 있으며, 광명동에 우선 설치할 필요가 있다고 발표한 바 있다. Seo et al. (2023)은 LID 성능에 영향을 미치는 토지이용의 최적 배치를 위해 GA를 이용하였으며, 이에 따라 LID 시설의 홍수 저감 성능이 향상됨을 보였다. 이러한 기존 연구들은 해당 연구대상영역에 최적화된 LID 시설 설계에 집중하여, LID 설계인자 및 위치를 다른 지역에 적용하는데 한계를 갖고 있다. 따라서 타 영역에 적용하기 위해 LID 설계 결과가 유역의 특성과 어떤 관계를 갖는지 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 목감천 유역의 2022년 8월 홍수와 같은 극한 강우 상황에 대해 우수유출저감시설 중 저류 및 침투시설의 설치 효과를 분석하기 위해 SWMM-LID 모형 중 투수성포장(PP)과 빗물저류조(RB)를 이용하여 우수유출량 저감효과를 분석했다. 이를 위해 다음의 분석을 수행했다. (1) 소유역 별 표면 유출량 최소화를 위한 SWMM-LID 모형의 design parameter 최적화, (2) 침투 및 저류시설 설치에 따른 표면 유출량 저감 효과 비교, (3) 목감천 유역 우수유출저감시설 설치 우선 순위 결정, (4) 침투 및 저류시설 설치에 따른 표면유출량 저감 효과와 소유역 특성 간 상관관계 분석. 본 연구의 결과를 통해

기존 도심지의 도시침수 피해 저감을 위한 LID 시설 도입 효과 및 설치 필요 지역의 특징을 분석했다.

이 있는 기존 도심의 한계를 고려하여 건설 및 유지관리 비용이 상대적으로 낮은 시설을 선정했다. Liu et al. (2021)의 연구 결과에 의하면 빗물저류조(RB)는 단위 설치 면적 당 건설비

2. 연구방법

2.1 대상 영역 개요 및 분석 방법

본 연구에서는 목감천 유역(Fig. 1(a))에 대해 LID 시설 설치에 따른 우수유출량 저감효과 및 LID 시설 설치 우선순위 선정을 위한 연구를 수행했다. 목감천 유역 내 광명시에서는 2022년 8월 8일~9일 간 발생한 홍수로 인해 주택 1,044개, 상가 923개소 등 침수피해가 발생하여 우수유출량 저감을 위한 대응 방안수립의 필요성을 보여준 바 있다(Gwangmyeong-si, 2023). 목감천 유역의 중·하류부에는 상업지구와 주거지가 형성되어 있어 불투수면적 비중이 크기 때문에 홍수에 취약하며, 목감천 유역 내 내수침수 저감을 위한 6개의 배수펌프장은 10년 빈도 홍수 대응을 위해 설계되어 최근 발생하고 있는 집중 강우 대응에 한계가 있다. 따라서 LID 시설의 설치를 통한 내수침수 피해 저감 대응 방안의 마련이 필요하며, 제한된 예산과 부지를 고려하여 LID 시설 설치 최적화 및 설치 우선순위의 결정이 필요하다. 목감천 유역 내 토지 피복 특성은 Fig. 1(b)와 같다.

Fig. 2는 우수유출저감시설 성능평가 및 설치 우선순위 결정을 위한 연구 흐름도를 보여준다. 우수유출저감시설의 분류 기준에 따라 연구대상 LID 시설은 저류 및 침투 시설 유형 중 각 하나의 시설로 결정하였으며, 예산 및 부지 확보에 제한

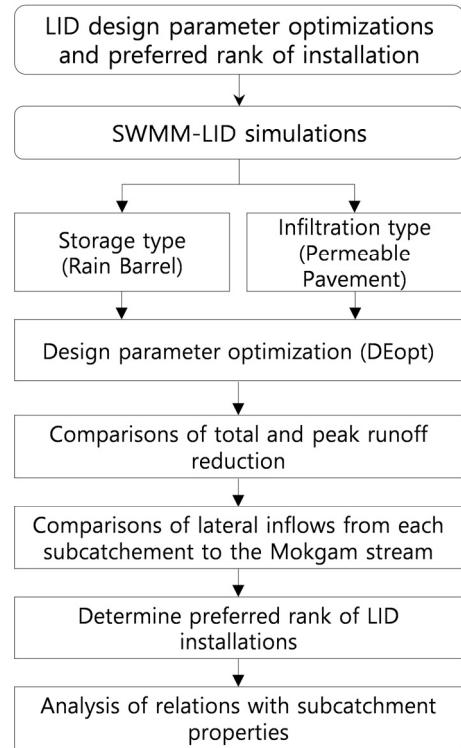


Fig. 2. Flowchart for study on the stormwater mitigation performance of LID facilities

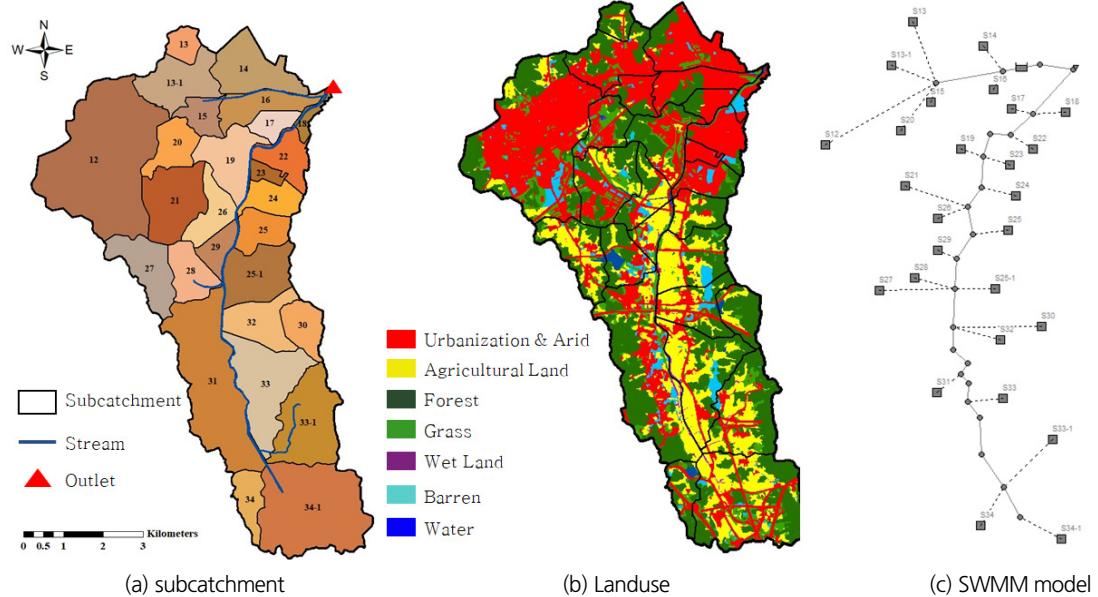


Fig. 1. Sub-catchment property and SWMM Model for the Mokgam Stream watershed

용이 1.91 USD/m²로 저류시설 유형 중 건설비용이 가장 낮았으며, 투수성포장(PP)은 53~81 USD/m²로 침투시설 유형 중 건설비용이 가장 낮은 것으로 조사되었다. 따라서 저류시설 유형으로 RB, 침투시설 유형으로 PP를 대상 시설로 결정했다. 각 소유역 별 총 유출량을 최소화할 수 있는 PP와 RB의 설계인자들을 heuristic evolutionary 방법인 Differential Evolution 알고리즘을 이용하여 결정했다. 최적화된 설계인자들을 활용하여 총 유출량, 침투유출량, 하도 유출량의 저감률을 비교하여 각 시설의 우수 유출량 저감 성능을 비교했다. 그리고 우수유출저감시설 설치 우선순위 결정을 위해 각 소유역 별 우수 유출량 저감효과를 비교했다. 소유역 별 우수 유출량 저감효과는 5가지 평가지표(총 유출량 저감량, 침투유출량 저감량, 총 유출량 저감률, 침투유출량 저감률, 유량계수 저감률)에 대한 가중 점수의 합계를 계산하여 결정했다. 본 연구에서는 선정된 5개 지표들의 다양한 가중치를 고려한 최종 우선순위 도출을 위해 Table 1과 같이 11개 가중치 Case를 생성했다. 각 소유역 별로 5가지 평가지표에 대해 값이 높은 순으로 27점~1점(소유역의 수)의 점수를 부여한 후 11개 가중치 Case에 따라 각 평가지표의 가중 점수를 산정한 후 합산한 결과를 각 소유역의 최종 평가 점수로 결정했다. Eq. (1)은 가중치를 고려한 각 소유역의 우수 유출량 저감 성능 평가 점수 계산식을 보여준다.

$$P_k = \sum_{i=1}^{11} w_{ij} p_j \quad (1 \leq p_j \leq 27, 1 \leq j \leq 5) \quad (1)$$

여기서 P_k 는 평가지표 별 가중점수를 고려한 k 번째 소유역의

우수 유출량 저감 성능 평가 점수, p_j 는 1~27점 사이의 값을 갖는 k 번째 소유역에 대한 j 번째 평가지표의 점수, w_{ij} 는 Table 1에서 정의된 Case 별 가중치 값을 의미하며 j 번째 평가지표에 대한 i 번째 가중치 값을 나타낸다. Eq. (1)에 의해 각 소유역 별 LID 시설 설치에 따른 우수유출 저감 성능에 대한 최종 점수를 결정하였으며, 점수가 높은 순서로 각 소유역의 설치 우선순위를 결정했다. 마지막으로 소유역 특성(유역면적, 폭, 유역경사, 불투수면적 비율)과 우수 유출량 저감 효과의 상관관계를 분석하여, 우선적으로 고려해야 할 유역 특성을 도출했다.

2.2 SWMM 모형 개요

2.2.1 SWMM 모형 구축

본 연구에서는 목감천 유역의 강우-유출 분석을 위해 미국 환경청(United States Environmental Protection Agency, USEPA)에서 개발한 EPA SWMM을 사용했다. SWMM 모형 구축을 위해 Lee et al. (2007)에서 제시한 바와 같이 하수관망도 및 행정구역도를 기준으로 27개 소유역으로 분할했다. 각 소유역의 유역 면적, 유역 경사 등과 같은 지형학적 요소들은 ArcGIS 프로그램을 사용하여 결정했다. 유역 내 하수관망의 용량초과 및 빗물펌프장의 운영 제한을 가정하여, 하도 유출만을 고려하여 SWMM 모형을 구성했다. 목감천 유역을 대상으로 구축된 SWMM 모형은 Fig. 1(c)와 같이 27개 소유역, 24개 conduits, 23개 junctions으로 구성되어 있다. SWMM 강우-유출 모의를 위해 Dynamic wave 모델을 이용하여 10분 간격으로 모의를 수행했으며, 침투모델로는 Green-Ampt 모델을 사용했다.

Table 1. Weighting factors for evaluating prioritization of LID facility installation

| | Weighting factor Case | | | | | Sum |
|----|---|--|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|-----|
| | Peak runoff reduction (m ³ /s) | Total runoff reduction (m ³) | Peak runoff reduction rate (%) | Total runoff reduction rate (%) | Runoff coefficient | |
| 1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 1 |
| 2 | 0.4 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 1 |
| 3 | 0.6 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 1 |
| 4 | 0.15 | 0.4 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 1 |
| 5 | 0.1 | 0.6 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 1 |
| 6 | 0.15 | 0.15 | 0.4 | 0.15 | 0.15 | 1 |
| 7 | 0.1 | 0.1 | 0.6 | 0.1 | 0.1 | 1 |
| 8 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.4 | 0.15 | 1 |
| 9 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.6 | 0.1 | 1 |
| 10 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.4 | 1 |
| 11 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.6 | 1 |

2.2.2 SWMM 모형의 표면 유출 계산 지배방정식

SWMM은 소유역 내 강우에 따른 표면 유출 추정을 위해 비선형 저수지 모델을 사용하며, 소유역을 균일한 경사 S 및 폭 W 를 갖고 단일 배출구로 배수되는 직사각형 표면으로 개념화한다(USEPA, 2016a). SWMM은 소유역 내 표면 유출을 고려하기 위해 강수, 표면 증발량, 침투율, 유출률을 고려하며 관계식은 Eq. (2)와 같다. Eq. (2)는 d 가 d_s 보다 클 때만 적용 가능하며, 반대의 경우 q 는 무시된다.

$$\frac{\partial d_x}{\partial t} = i - e - f - q, \quad \text{where, } d_x = d - d_s \quad (2)$$

여기서 d_x 는 표면 유출 깊이, d_s 는 depression storage depth, d 는, $d_x + d_s$, i 는 강수 및 눈에 의해 발생하는 단위 면적 당 유량, e 는 단위 면적 당 표면 증발량, f 는 단위 면적 당 침투율, q 는 단위 면적 당 유출량이다.

SWMM은 유출량 산정을 위해 Manning 공식을 사용하며, 균일한 경사 S 및 폭 W 를 갖는 직사각형 형태의 소유역을 가정하여 Eq. (3)과 같이 계산한다.

$$Q = \frac{1}{n} WS^{1/2} (d - d_s)^{5/3} \quad (3)$$

여기서 n 은 Manning의 조도계수, S 는 소유역 내 평균 경사, A 는 표면유출 흐름에 의한 면적이다. Eq. (3)을 면적 A 로 나누면 Eq. (2)의 q 는 Eq. (4)와 같이 변환된다.

$$\frac{\partial d_x}{\partial t} = i - e - f - \alpha (d - d_s)^{\frac{5}{3}}, \quad \text{where, } \alpha = \frac{ws^{1/2}}{An} \quad (4)$$

2.2.3 SWMM-LID 모형 개요

EPA SWMM5.1 부터는 LID 시설을 추가한 유출 분석이 가능해졌으며, 가장 최근 배포된 SWMM5.2.4에는 Bioretention Cells, Continuous Permeable Pavement Systems, Green Roofs, Infiltration Trenches, Rain Barrels or Cisterns (Rainwater Harvesting), Rain Gardens, Rooftop (Downspout) Dis-

connection, Vegetative Swales까지 총 8개의 LID 시설들의 모델링이 가능하다. SWMM-LID에서 LID 시설로의 유입량은 LID 시설이 소유역의 일부분만 차지하는지 아니면 전체 소유역을 차지하는지에 따라 달라지며, 전자의 경우 Eq. (5)를 통해 산정할 수 있다(USEPA, 2016b).

$$q_0 = q_{inp} F_{out} R_{LID} \quad (5)$$

여기서 q_0 는 LID 시설로의 유입량, q_{inp} 는 총 불투수면적에서의 유출률, F_{out} 은 소유역 배출구로 유입되는 불투수면적에서의 유출량 일부, R_{LID} 는 LID 시설 유입률이다. 각각의 LID 시설들은 수직 층의 설계인자(design parameter)들을 조정하여 모델링이 가능하며 본 연구에서 고려한 PP와 RB에서 고려되어야 하는 수직 층 매개 변수는 Table 2와 같다.

2.3 LID 시설 설계인자 최적화

본 연구에서는 LID 시설의 설계인자 최적화를 위해 heuristic evolutionary 방법인 differential evolution 알고리즘을 사용했다. Differential evolution 알고리즘은 진화 기술로 세대마다 매개변수 벡터의 집합을 다른 매개변수 벡터의 집합으로 변환시키며 목적함수의 값을 화률적으로 최소화하도록 한다. 새로운 매개변수 벡터를 생성하기 위해 이전 세대의 매개변수 벡터를 무작위로 선택하며, 선택된 두 매개변수 벡터의 차이를 이용하여 생성한다(Mullen et al., 2011). Differential evolution 알고리즘에서 시험 돌연변이 매개변수는 Eq. (6)과 같이 무작위로 선택된 세개의 매개변수 벡터 $x_{r0,g}$, $x_{r1,g}$, $x_{r2,g}$ 에 의해 생성된다.

$$v_{i,g} = x_{r0,g} + F \cdot (x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (6)$$

여기서 F 는 양의 스케일 요소이며 1보다 작은 값이다. Mullen et al. (2011)은 R 프로그램 언어에서 differential evolution 최적화 알고리즘을 쉽게 적용할 수 있도록 ‘DEoptim’ 패키지를 구현했으며, 본 연구에서는 이 ‘DEoptim’ 패키지를 사용하여 소유역 내 총 유출량을 최소화 하는 PP와 RB의 설계인자를

Table 2. Layers used to model different types of LID units (USEPA, 2016b)

| LID Type | Vertical Layer | | | | | |
|--------------------|----------------|----------|------|---------|-------|--------------|
| | Surface | Pavement | Soil | Storage | Drain | Drainage Mat |
| Permeable Pavement | O | O | × | O | × | |
| Rain Barrel | | | | O | O | |

O: required, ×: optional

Table 3. Parameter optimization range for permeable pavement

| Layer | Parameter | Min | Reference (Kim et al., 2022) | Max |
|----------|--------------------|----------|------------------------------|----------|
| surface | Berm Height | 1.35 | 1.5 | 1.65 |
| | Vegetation Volume | 0 | 0 | 0 |
| | Surface Roughness | 0.0135 | 0.015 | 0.0165 |
| | Surface Slope | 0.9 | 1 | 1.1 |
| Soil | Thickness | 162 | 180 | 198 |
| | Porosity | 0.36 | 0.4 | 0.44 |
| | Field Capacity | 0.0558 | 0.062 | 0.0682 |
| | Wilting Point | 0.0216 | 0.024 | 0.0264 |
| | Conductivity | 2286 | 2540 | 2794 |
| | Conductivity Slope | 43.2 | 48 | 52.8 |
| | Suction Head | 45 | 50 | 55 |
| Storage | Thickness | 405 | 450 | 495 |
| | Void Ratio | 0.567 | 0.63 | 0.693 |
| | Seepage Rate | 3.6 | 4 | 4.4 |
| Drain | Flow Coefficient | 0.207846 | 0.23094 | 0.254034 |
| | Flow Exponent | 0.45 | 0.5 | 0.55 |
| | Offset | 270 | 300 | 330 |
| Pavement | Thickness | 180 | 200 | 220 |
| | Void Ratio | 0.144 | 0.16 | 0.176 |
| | Permeability | 54 | 60 | 66 |

Table 4. Parameter optimization range for rain barrel (USEPA, 2016b)

| Layer | Parameter | Min | Default | Max |
|---------|---------------|-----|---------|-----|
| Storage | Barrel Height | 0 | 450 | 900 |

도출했다. DEoptim 패키지 사용 시 differential evolution 전략은 local-to-best 전략을 사용했으며, F 값 및 crossover probability 값은 각각 0.7, 0.9를 사용했다. Number of population member 값은 고려되는 매개변수 수의 10배로 정했으며, 최대 반복 횟수는 100회로 설정했다.

PP의 설계인자 최적화를 위한 변화 범위는 Kim et al. (2022)에서 사용된 최적 설계인자 값의 $\pm 10\%$ 를 고려했다. RB의 경우에는 SWMM 매뉴얼에서 제시한 설계 인자 최대 값의 50%를 기준으로 하여 최소, 최대 범위를 고려하여 최적화를 수행했다(USEPA, 2016b). PP의 설계인자 최적화를 위해 Kim et al. (2022)에서 제시한 설계인자들만을 고려했다. RB의 경우에는 drain layer의 설계인자가 유출 및 침투에 영향을 주지 않는다는 선행 연구 결과(Kim and Kang, 2022)에 따라 storage layer에 해당하는 설계인자만을 고려했다. 설계인자 변화 범위는 Tables 3 and 4와 같다. 설계인자 최적화 수행 시 PP 및 RB의 설치 면적을 소유역 면적의 20%로 설정했고 불투수면

적 유출 처리 비율을 20%로 고정했다. PP의 경우에는 설치 폭을 1.2 m로 고려했다.

3. 결과 및 토의

3.1 모형 구성 검증 결과

SWMM을 이용한 흐름모의 결과의 검증을 위해 2022년 8월 8일~8월 9일 강우 관측결과를 이용한 흐름모의를 수행했다. SWMM 모의에 활용한 강우자료는 구로구청 강우관측소의 10분 단위 관측결과를 이용했다. SWMM을 이용하여 계산된 하도 수위 모의결과 검증을 위해 너부대교 수위관측소의 관측결과와 비교했다. Fig. 3은 모의에 적용한 강우자료와 함께 너부대교 지점 수위 모의결과 비교 결과를 보여준다. 수위 모의결과에 대한 Mean Absolute Percentage Error (MAPE)는 5.99%로 나타났다. 본 연구에서는 기존 내수배제시설의 용량을 초과하는 강우로 인해 유역 내 강우가 모두 지표를 따라 흐르는 상황을 가정했다. 따라서 모의결과가 8월 8일 21:10의 최대 수위를 과대 산정하였으나 대체로 측정 결과와 유사한 수위 변화를 보여주고 있다.

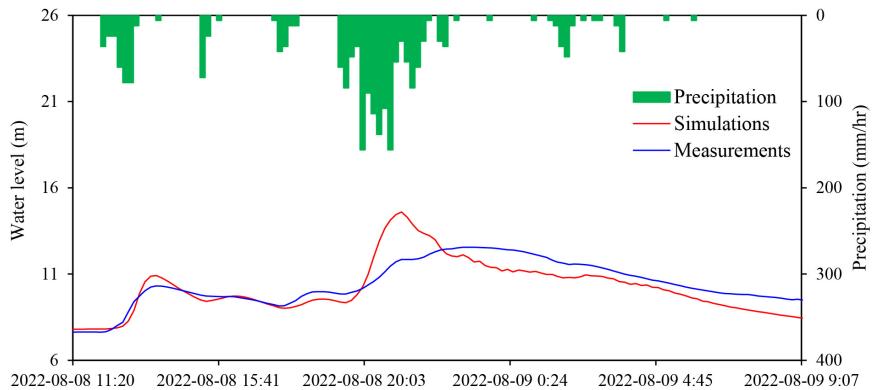


Fig. 3. Comparisons of water level simulation results with measurements at the Neobu Bridge

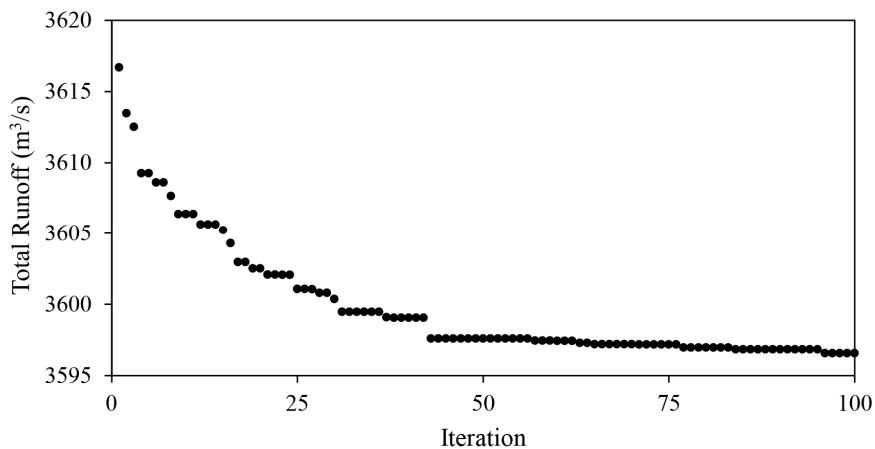


Fig. 4. Optimization of PP parameters to minimize total runoff in S12

3.2 LID 시설 설계인자 최적화 결과

Differential evolution 알고리즘을 이용하여 27개 소유역에 대한 PP 및 RB의 설계인자 최적화를 수행했다. Fig. 4는 differential evolution 알고리즘에 따라 S12 소유역에 대한 PP의 설계인자 최적화 과정을 나타낸다. Fig. 4에서 반복횟수 30번 까지는 총유출량이 유의미한 감소를 보여주었지만 반복횟수가 30번이 넘어감에 따라 미미한 감소를 보였다. 최종 반복횟수 100번에 따른 총유출량 산정 결과는 기존 참고문헌(Kim et al., 2022)의 최적 설계인자 값을 사용했을 때보다 상대적으로 낮은 총유출 감소량을 나타냈다. PP의 최적 설계인자 적용 전에는 S12 소유역의 총유출량이 $4,942 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 계산되었으며, Kim et al. (2022)의 최적 설계인자 적용 후에는 $3,658 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 감소됐다. 본 연구에서 도출한 최적 설계인자 적용 시에는 Kim et al. (2022)의 설계 인자 적용 결과보다 감소된 $3,597 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 나타났다. 따라서 설계인자 최적화 알고리즘 적용에 따라 소유역 별 LID 시설 설치에 따른 총 유출량의 최소값을 결정할 수 있다.

소유역 별 LID 시설 설치 전 대비 PP 및 RB의 최적 설계인자 적용에 의한 총 유출량, 첨두유출량, 유출 계수 값의 감소율을 각각 Fig. 5과 Fig. 6에 나타냈다. 그림 내 숫자는 소유역의 번호를 나타낸다. PP의 경우 S22 소유역(광명5동)에서 총 유출량, 유출 계수의 감소율이 각각 30.8%, 30.75%로 가장 크게 감소했으며, 첨두유출량은 S23 소유역(광명2동)에서 31.96%로 가장 높은 감소율을 나타냈다. RB의 경우 총 유출량, 첨두유출량, 유출 계수 모두 동일하게 S23 소유역(광명2동)에서 최대 감소율을 나타냈고, 각각 35.24%, 34.34%, 35.27% 감소했다. 최대 감소율을 보인 소유역은 PP 및 RB에 대해 일부 차이가 있었으나 대체로 불투수면적 비율이 높은 소유역에서 나타났다.

3.3 LID 시설 설치면적 변화에 따른 유출량 저감 효과

소유역 내 PP와 RB의 설치면적 변화에 따른 우수 유출량 저감효과 분석을 위해 목감천 유역 출구에서 총 유출량과 첨두유출량 저감효과를 비교했다. 유출량 계산 시 3.2절에서 결

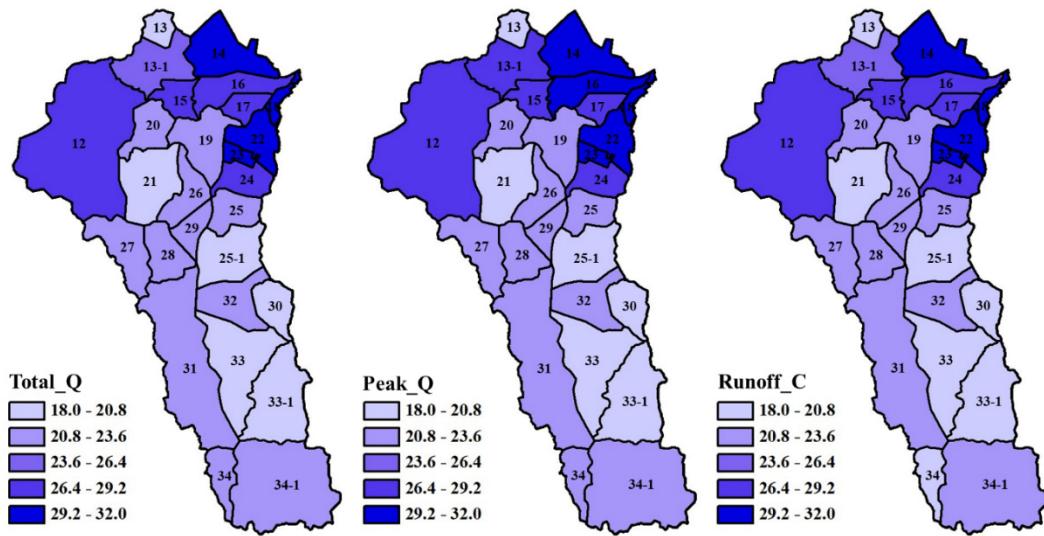


Fig. 5. The reduction impact of optimal PP design parameter application on sub-catchment water cycle improvement (Total runoff reduction rate (%): Total_Q; Peak runoff reduction rate (%): Peak_Q; Runoff coefficient reduction rate (%): Runoff_C)

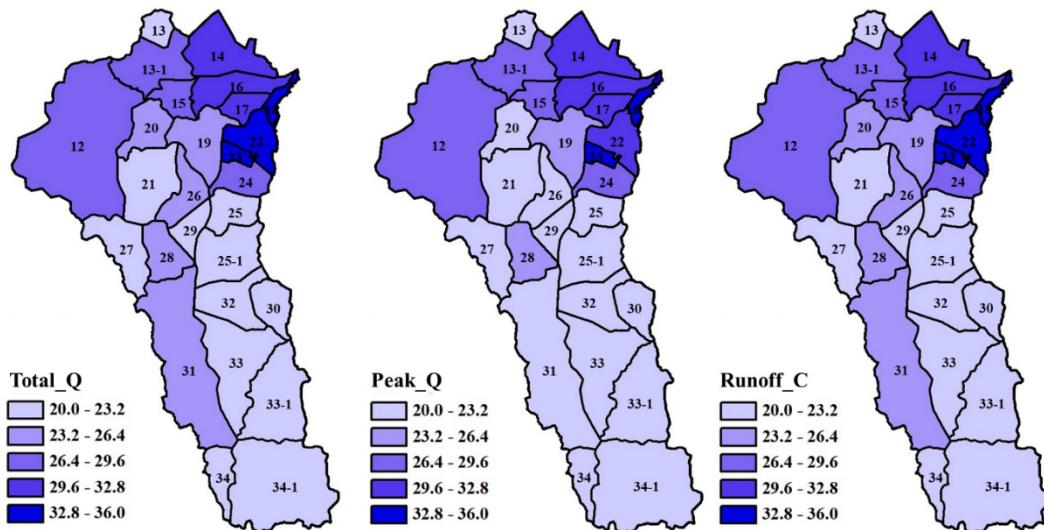


Fig. 6. The reduction impact of optimal RB design parameter application on sub-catchment water cycle improvement (Total runoff reduction rate (%): Total_Q; Peak runoff reduction rate (%): Peak_Q; Runoff coefficient reduction rate (%): Runoff_C)

정된 PP와 RB의 최적 설계인자를 적용했다. Fig. 7은 PP와 RB의 설치 면적을 1%~20%로 변화시키며 총 유출량 저감량 (m^3)과 첨두유출량 저감률(%)의 변화를 비교한 그래프이다. Fig. 7(a)는 PP와 RB의 설치면적 변화에 따른 총 유출량 감소량을 비교한 결과이다. LID 시설 설치 면적이 11% 이하일 때는 PP의 우수 유출량 저감 성능이 RB보다 우수한 것으로 나타났으나, 13% 이상일 때는 RB의 성능이 더 우수한 것으로 나타났다. 반면, 첨두유출량 저감률은 모든 시나리오에 대해 PP가 RB보다 우수한 성능을 나타냈다. Liu et al. (2021)에 따르면 PP의 건설비용은 53~81 USD/ m^2 , RB의 건설비용은 1.91

USD/ m^2 로 보고된 바 있다. 따라서 유출량 저감효율이 유사한 11% 설치면적 시나리오 고려 시 PP가 RB보다 27.7~42배 많은 예산을 필요로 하기 때문에 예산을 고려할 경우 RB의 설치 효율이 PP 보다 높다고 판단할 수 있다.

PP와 RB의 설치에 따른 유출량 저감 효과를 비교하기 위해 목감천 유역 출구에서 유출량 시계열 변화를 비교했다. 유출량 비교를 위해 Fig. 7(a)에서 나타난 바와 같이 총 유출량 저감량이 유사하게 나타나는 LID 설치면적 11% 시나리오의 결과를 활용했다. Fig. 8은 첨두유출량이 발생하는 2022년 8월 8일 19:40~8월 9일 00:28 기간의 유출량 시계열 변화 그래프와

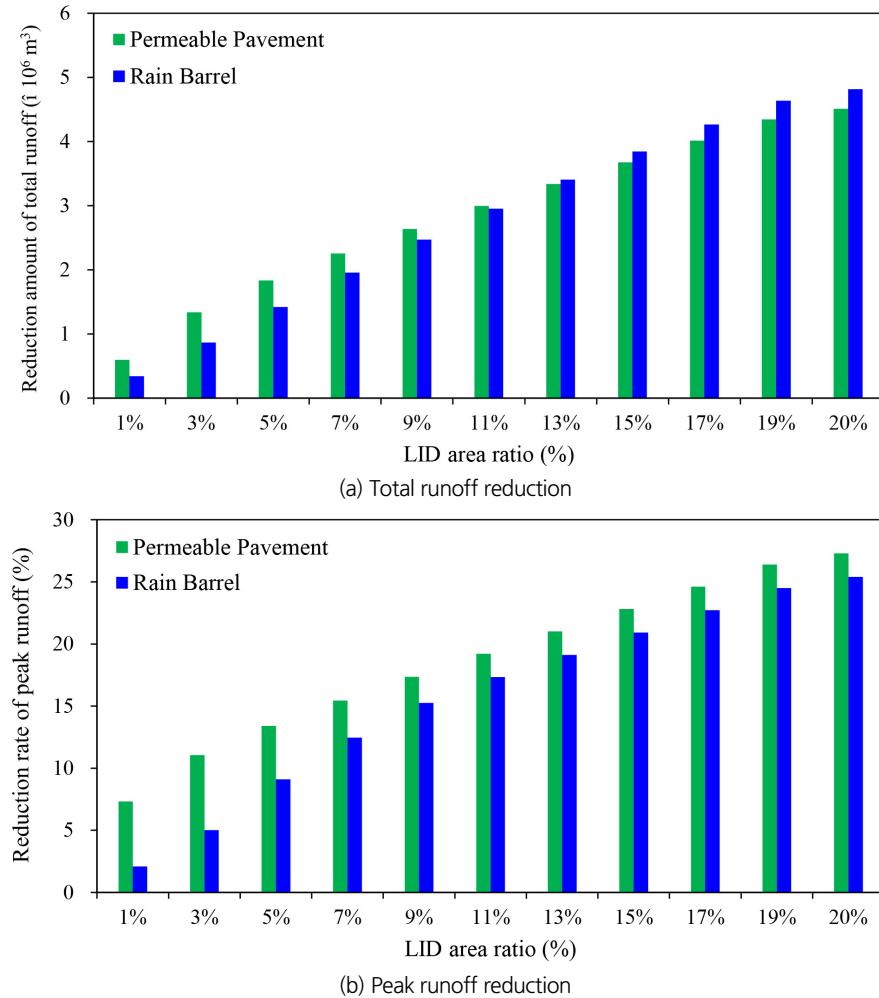


Fig. 7. Comparisons of runoff reduction performance between rain barrel (RB) and permeable pavement (PP) at the basin outlet

(Fig. 8(a)) 동일 기간 동안 누적 유출 감소량 변화 그래프(Fig. 8(b))를 보여준다. PP와 RB의 유출량 변화 특성을 비교한 결과, PP의 경우에는 유출량 곡선의 상승부에서 RB에 비해 유출량 저감 성능이 우수한 것으로 나타났다. 반면, 유출량 하강부에서는 RB의 유출량 저감 성능이 PP보다 더 우수한 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 8(b)와 같이 PP의 누적 유출 감소량은 첨두 유출 발생 전에 급격히 상승한 후 첨두유출 발생 이후 완만히 증가하는 추세를 보였다. RB의 경우에는 첨두유출 발생 전, 후 모두 일정한 증가 추세를 보였으며, PP와 유사한 누적 유출 감소량을 나타냈다. 이러한 결과로부터 목감천 유역의 경우 초기 유출량 저감에는 PP가 더 효과적임을 확인할 수 있다.

3.4 LID 시설 적용에 따른 소유역 별 유출량 저감 효과

최적 설계인자를 적용한 PP와 RB의 설치에 따른 소유역 별 총 유출량과 첨두유출량 변화를 비교했다. PP와 RB의 적

용 결과는 두 시설의 유출량 저감 효과가 유사하게 나타나는 11% 설치 시나리오를 활용했다. Fig. 9와 Fig. 10은 LID 시설 설치 전과 PP 및 RB를 적용한 소유역에 대한 총 유출량과 첨두 유출량의 감소율을 나타낸 결과이다. 총 유출량의 경우 PP 및 RB 모두 S22 소유역(광명5동)에서 설치 전과 비교하여 감소율이 가장 높게 나타났다. S22 소유역에서 RB의 총 유출량 감소율이 24.7%로 나타나, PP의 감소율(22.1%)보다 다소 높은 결과를 보였다. 첨두유출량의 경우 PP는 총 유출량 결과와 동일한 S22 소유역에서 설치 전과 비교하여 23.9% 감소하여 최대 감소율을 나타냈다. 반면, RB의 경우에는 S23 소유역(광명2동)에서 27.4%로 최대 감소율을 보였으며, S22 소유역에서는 25.4% 감소되어 PP보다 우수한 성능을 나타냈다.

소유역을 통해 유출된 우수는 하도록 유입되기 때문에 하도 흥수위에 미치는 영향 분석을 위해 감소율 외에도 감소량에 대한 검토 또한 중요하다. 총 유출량 및 첨두유출량 감소량

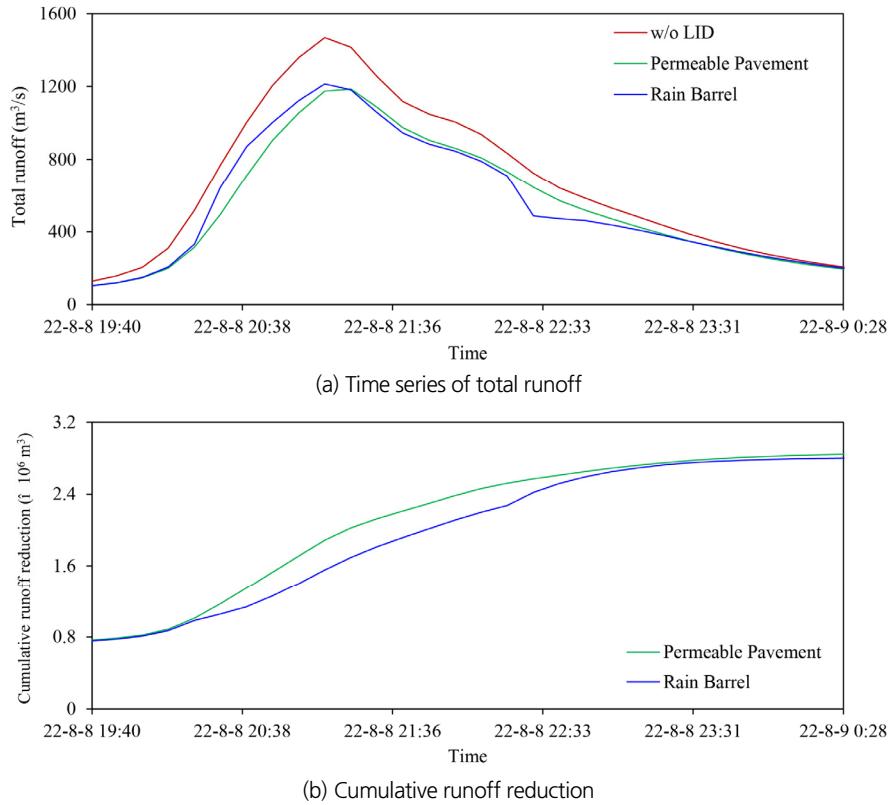


Fig. 8. Comparisons of total runoff reduction at the basin outlet with 11% of the area covered by LID installations

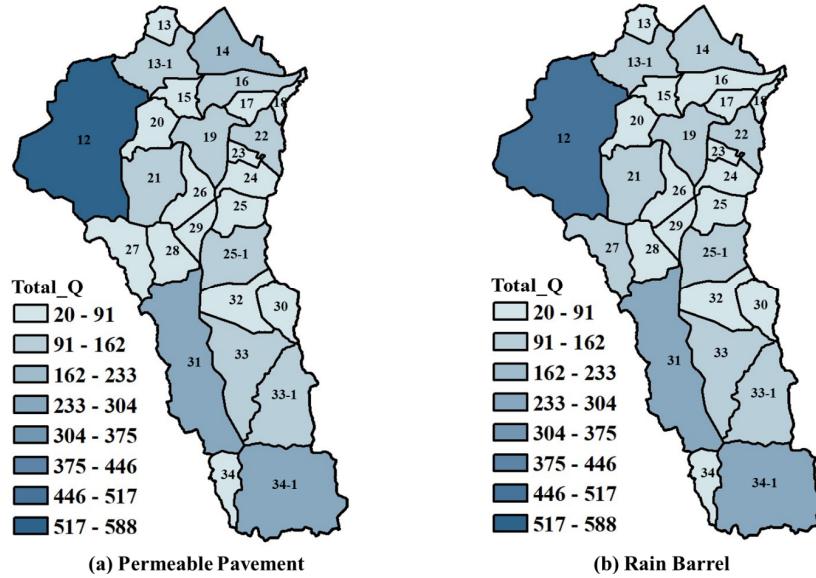


Fig. 9. Comparisons of total runoff reduction by sub-catchment according to LID facility installation

은 PP와 RB 모두 S12 소유역(부천시)에서 가장 높게 나타났다. PP 설치 시 S12 소유역에서 총 유출량은 586.1 m^3 감소되어 RB의 감소량(503.7 m^3)보다 더 많은 양이 감소됐다. 첨두

유출량의 경우에도 PP는 $66.4 \text{ m}^3/\text{s}$, RB는 $65.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 감소되어 PP가 다소 우수한 성능을 나타냈다. S22와 S23 소유역은 광명동에 해당하는 불투수면적 비율이 높은 지역이고, S12 소유역

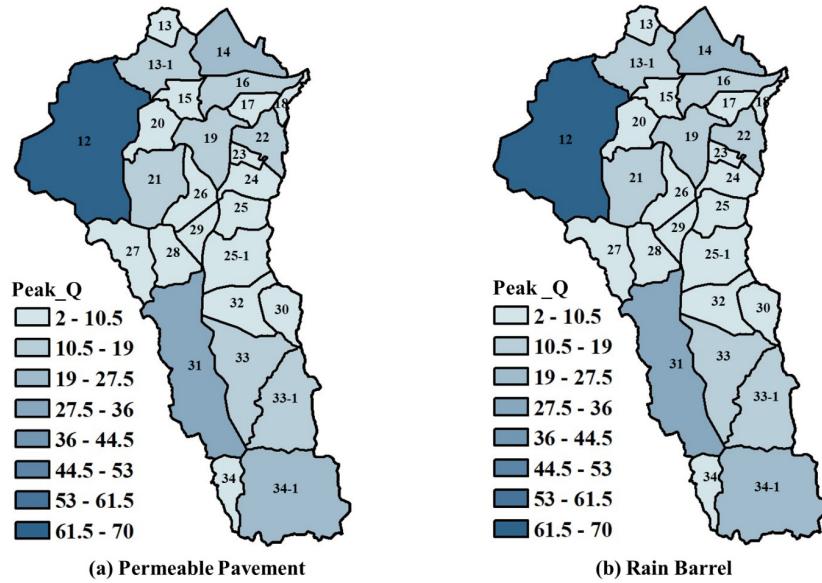


Fig. 10. Comparisons of peak runoff reduction by sub-catchment according to LID facility installation

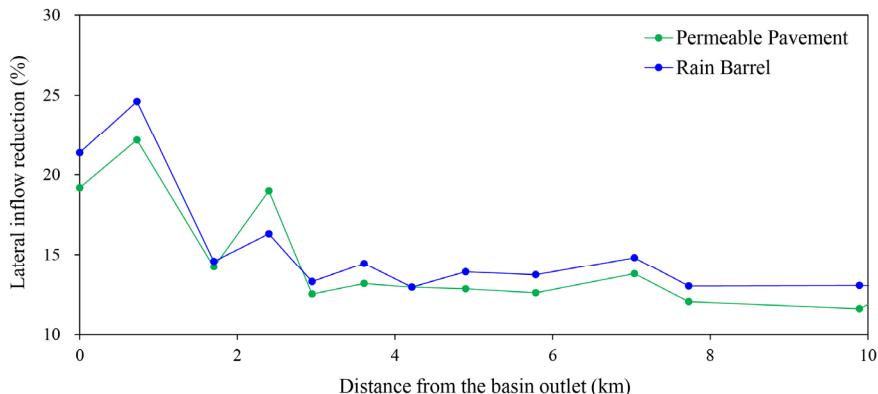


Fig. 11. Reduction of lateral inflow to the Mokgam stream using infiltration and storage facilities according to distance

은 가장 넓은 유역 면적을 갖는 지역이다. 불투수면적 비율이 높은 지역에서는 RB가 PP에 비해 다소 우수한 성능을 나타낸 반면, 유역면적이 큰 소유역에서는 PP가 RB보다 우수한 성능을 나타냈다. 이러한 결과로부터 LID 시설의 성능 평가 지표와 유역 특성이 성능평가 결과에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

RB와 PP의 설치에 따른 우수의 하도 유입량 감소효과를 비교했다. Fig. 11은 목감천 유역출구로부터 거리에 따른 우수의 하도 유입량 감소율을 비교한 그래프이다. 하도 유입량 감소율은 유역 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보인다. 이는 목감천 유역 하류에 위치한 도심지의 불투수 면적 비율이 크기 때문에 RB와 PP의 설치에 따른 우수 유출량 저감 효과가 높게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 유역 출구로부터 약 2.5 km

상류 구간에 위치한 광명시 광명동의 우수 유출량 유입 지점에서는 PP의 우수 유입량 저감효과가 RB 보다 더 높게 나타났다. 하지만 전체 구간에서 RB의 하도 유입량 감소율은 평균 15.3%로 나타나, PP의 감소율 14.6%에 비해 높게 나타났다. 이 결과로부터 동일 설치 면적에 대해 흥수시 RB가 PP에 비해 하도 흥수 유입량을 감소하는데 더 효과적일 것으로 판단할 수 있다.

3.5 LID시설의 설치 우선순위 및 유역특성과의 상관 관계

목감천 유역에서 PP와 RB의 설치를 통해 도출한 우수 유출량 저감 효과 및 Table 1의 가중치 Case를 적용하여 우선순위 도출을 위한 평가 점수를 계산했으며, 최종 소유역 별 LID 시

설 설치 우선순위는 Eq. (1)에 따라 계산된 최종 평가점수를 통해 결정했다. Fig. 12는 PP와 RB 설치면적 11% 시나리오에 대한 우선순위 결정 결과를 보여주며, 그림 내 숫자는 순위를 나타낸다. PP의 경우 1~3순위는 S14(구로구), S12(부천시), S22(광명5동) 소유역 순으로 나타났고, RB는 S22, S14, S12 순으로 나타나 1~3순위 소유역이 유사하게 나타났다. S14 소유역은 유역면적이 전체 소유역 중 7번째로 큰 소유역이며, 불투수면적 비율은 4번째로 높은 지역이다. S22 소유역은 유역면적이 15번째로 큰 소유역으로서 S14 소유역 보다 작은 유역면적을 갖고 있고, 불투수면적 비율은 3번째로서 S14 소유역 보다 높은 비율을 갖고 있다. 따라서 Fig. 9와 Fig. 10에서 확인한 바와 같이 총 유출량 및 첨두유출량 감소량에 효과적인 PP에서는 유역 면적의 영향이 순위 결정에 더 큰 요인으로 작용한 것으로 판단할 수 있다. RB는 총 유출량 및 첨두유출량 저감률에 더 높은 효과를 보였으며, 이에 따라 유역면적보다 불투수면적 비율이 우선순위 결정에 더 큰 요인으로 작용했다.

유역 특성과 LID 시설 설치 우선순위와의 상관관계 분석을 위해 5가지 유역 특성(유역면적, 불투수면적 비율, 유역 폭, 유역경사, 유역 형상계수)의 순위와 LID 시설 설치 우선순위와의 상관계수(correlation coefficient)를 Table 5에 나타냈다. 유역 특성 순위는 각 유역 특성 값이 높은 순서로 순위를 정하였으며, 상관계수는 평가점수 상위 25%에 해당하는 소유역(25%) 그룹과 전체 소유역(100%)에 대해 계산했다. 유역의 형상 계수(F)는 유역면적과 폭을 이용하여 $F = A/L^2$ ($L = A/W$)으로 계산했다. RB의 경우 상위 25% 그룹과 전체 소유역 그룹 모두에서 불투수면적 비율이 가장 높은 상관관계를 나타냈다. 반면 PP는 상위 25% 그룹에서 유역 형상계수(F)와 가장 높은 음의 상관관계를 갖는 것으로 나타났고, 전체 그룹에서는 불투수면적 비율이 가장 높은 상관관계를 나타냈다. 불투수면적 비율은 Eq. (5)의 q_{inp} 계산에 영향을 미치므로 LID 시설의 우수 유출 저감 성능에 직접적 영향을 미쳐 높은 상관계수를 나타내게 된다. 반면 유역 특성은 Eq. (4)의 표면

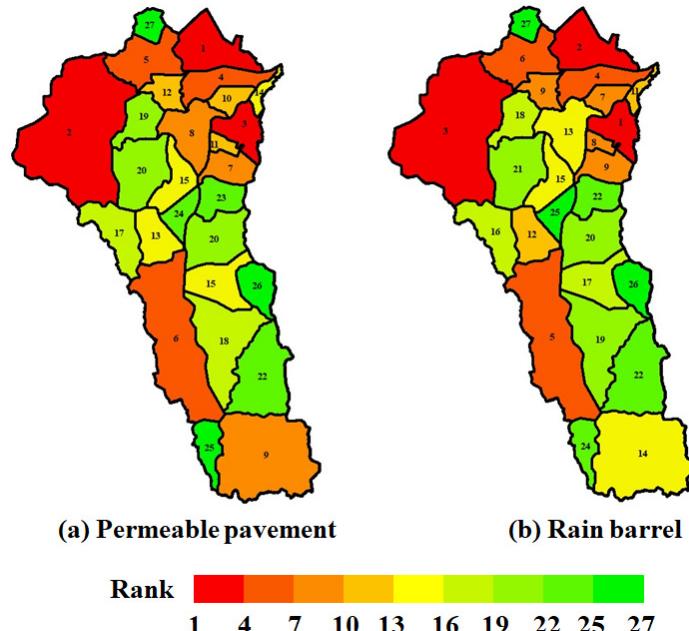


Fig. 12. Installation priority of LID facilities

Table 5. Relations between sub-catchment characteristics and runoff mitigation performance

| LID | Quantile | Correlation with runoff mitigation performance | | | | |
|--------------------|----------|--|-----------------------|---------------|---------------|-----------------------------|
| | | Area (A) | Impervious area ratio | Width (W) | Surface slope | Form factor ($F = A/L^2$) |
| Permeable Pavement | 25% | -0.06 | 0.68 | -0.46 | -0.35 | -0.87 |
| | 100% | 0.32 | 0.78 | 0.40 | -0.24 | 0.25 |
| Rain Barrel | 25% | -0.33 | 0.79 | -0.69 | -0.71 | -0.59 |
| | 100% | 0.18 | 0.86 | 0.30 | -0.31 | 0.28 |

유출량 계산 결과에 영향을 미치므로 LID 시설 성능에 간접적 영향을 주는 요인이라 할 수 있다. 따라서 전체 소유역을 대상으로 상관계수를 계산한 결과 유역의 특성이 우수 유출 저감 성능에 미치는 영향이 크지 않았으나 상위 25%에 해당하는 소유역만을 대상으로 계산한 결과 유역 형상계수(F)와 평가 점수 간 상관계수는 PP의 경우 -0.87, RB의 경우 -0.59로 계산되어 유의미한 음의 상관관계를 나타냈다. 이 결과는 넓고 짧은 형상을 갖는 유역에서 PP와 RB의 우수 유출 저감 성능이 감소함을 뜻한다. 특히 RB의 경우 상위 25% 그룹에서 유역 경사와 높은 음의 상관관계(-0.71)를 나타내어, PP에 비해 유역의 경사가 우수 유출 저감 성능에 미치는 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 12의 우선순위 평가 결과에서도 나타난 바와 같이 PP와 RB 설치 1순위 지역으로 평가된 S14와 S22의 불투수면적비율이 전체 소유역 중 각각 네번째, 세번째로 높은 지역이므로 불투수면적 비율이 절대적 평가 기준이 될 수 없으며, 표면 유출량 계산 결과에 영향을 미치는 유역의 형상(면적과 폭)을 함께 고려할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 목감천 유역에서 우수 유출 저감 시설 중 투수성포장(PP)과 빗물저류조(RB)의 설치에 의한 유출량 저감 성능을 분석하였으며, 성능 분석 결과로부터 목감천 유역 내 설치 우선순위를 결정했다. PP와 RB의 설치를 통한 최대 유출량 저감 성능을 도출하기 위해 differential evolution 알고리즘을 적용한 최적 설계인자를 도출했다. 또한 설치 면적 변화가 우수 유출 저감 성능에 미치는 영향 분석을 위해 설치면적을 1~20%로 변화시키며 목감천 유역 출구에서 우수 유출 저감 성능을 비교했다. 그 결과, 설치 면적이 13% 이상일 때 RB의 우수 유출 저감 성능이 PP 보다 더 높게 나타났다. 하지만 RB의 건설비용이 PP보다 27.7~42배 낮기 때문에 동일 예산을 고려했을 때 RB의 효율이 더 높은 것으로 판단할 수 있다. 종합적 우수 유출 저감 성능 비교를 위해 5가지 평가 지표를 고려한 종합 평가 점수를 산정하였으며, 소유역 별 평가 점수가 높은 순으로 PP와 RB의 설치 우선순위를 결정했다. 그 결과, PP와 RB 모두 구로구, 광명5동, 부천시를 1~3순위로 포함하는 결과를 나타냈다. 설치 순위 결정 결과로부터 PP의 경우 유역 면적이 순위 결정에 주로 영향을 미쳤으며, RB는 불투수면적 비율이 순위 결정에 더 큰 영향을 미쳤다.

기존 연구에서는 특정 유역에서 LID 시설 유형 별 최적 설계인자 도출 및 시설 성능 유형 별 우수 유출 저감 성능 평가에

집중된 연구 결과를 도출했다. 하지만 LID 시설의 우수 유출 저감 성능 평가 결과는 적용 대상 지역에 따라 변화하기 때문에 적용 대상 유역이 변화하면 성능 평가 결과 또한 변화할 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 우수 유출 저감 성능 평가에 영향을 미치는 외부 요인을 최소화하기 위해 각 소유역 별 최적 성능을 나타낼 수 있는 PP와 RB의 최적 설계인자를 적용했으며, PP와 RB의 성능이 유사하게 나타나는 설치면적을 우수 유출 저감 성능 분석에 이용했다. 이후 모든 유역에 대해 공통적으로 도출할 수 있는 5가지의 유역 특성 인자를 이용하여 유역 특성이 우수 유출 저감 성능에 미치는 영향을 분석했다. 그 결과, 유역 전체에 대해서는 불투수면적 비율이 우수 유출 저감 성능과 가장 높은 상관관계를 나타냈으나, 우수 유출 저감 성능이 우수하게 나타나는 상위 25% 소유역에 대해서는 유역의 형상 인자가 높은 상관관계를 나타냈다. 이에 따라 PP의 경우에는 유역 형상계수, RB의 경우에는 유역 경사가 높은 음의 상관관계를 나타냈다. 이러한 결과로부터 LID 시설 성능에 직접적 영향을 미치는 소유역의 도시화율(불투수면적 비율) 외에도 LID 시설로 유입되는 표면 유출량 계산에 영향을 미치는 유역의 형상 인자를 함께 고려해야 함을 알 수 있었다.

본 연구 결과를 통해 침투 시설 유형에 해당하는 PP와 저류 시설 유형에 해당하는 RB의 유출량 저감 특성 및 유역 특성과 유출량 저감 성능과의 관계에 대해 분석할 수 있었다. PP와 RB의 성능 평가 결과로부터 제한적이나마 유역의 형상 인자를 RB 및 PP의 설치 우선순위 결정의 판단 근거로 이용할 수 있다는 결과를 도출하였다. 하지만 더 명확한 상관관계 평가를 위해 다양한 유역에 대한 상관관계 분석이 필요하다. 또한 이번 연구에서는 두 시설의 우수 유출 저감 성능 평가를 위해 동일한 설치면적을 가정한 비교가 이뤄졌으나, 각 LID 시설의 설치 및 유지관리 비용을 고려하지 않은 한계가 있다. 예산과 공간 활용에 제약이 있는 기존 도심지에 LID 시설의 도입 효과 검증 및 증설을 위한 의사 결정을 위해서는 경제성을 고려한 최적 규모 설계, 이에 따른 우수 유출 저감 성능의 분석이 함께 이뤄질 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원(KEITI)의 R&D 과제 “기후위기 대응 홍수방어 능력 혁신기술 개발사업(RS-2023-00218873)”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Arjenaki, M.O., Sanaye, H.R.Z., Heidarzadeh, H., and Mahabadi, N.A. (2021). "Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City)." *Modeling Earth Systems and Environment*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-16.
- Chae, S.T., Song, Y.H., Lee, J., and Chung, E.S. (2022). "Prioritizing the target watersheds for permeable pavement to reduce flood damage in urban watersheds considering future climate scenarios." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 55, No. 2, pp. 159-170.
- Gao, J., Li, J., Li, Y., Xia, J., and Peng, L. (2021). "A distribution optimization method of typical LID facilities for sponge city construction." *Ecohydrology & Hydrobiolgy*, Vol. 21, No. 1, pp. 13-22.
- Gwangmyeong-si (2023). Republic of Korea, accessed 1 September 2023, <<https://news.gm.go.kr>>.
- Jang, S.H., Lee, J., Yoo, C., Han, S., and Kim, S. (2008). "Optimal location of best management practices for storm water runoff reduction." *Journal of Korean Society on Water Quality*, Vol. 24, No. 2, pp. 180-184.
- Kim, J., and Joo, J. (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.
- Kim, J., and Kang, J. (2022). "Analysis of stormwater management and runoff reduction effect of LID facilities using SWMM model in Sangdo-dong." *Journal of the Korea Academia-Industrial*, Vol. 23, No. 8, 337.
- Kim, J., Lee, J., Hwang, S., and Kang, J. (2022). "Urban flood adaptation and optimization for net-zero: Case study of Dongjak-gu, Seoul." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 41, 101110.
- Lee, K.S., Hong, W.P., Chung, E.S., and Kim, K.T. (2007). "Hydrologic cycle simulation of Mokgam watershed including CSOs." *Proceedings of the Korea Water Resources Association (KWRA) Conference*, KWRA, pp. 1459-1463.
- Liu, T., Lawluyv, Y., Shi, Y., and Yap, P.S. (2021). "Low impact development (LID) practices: A review on recent developments, challenges and prospects." *Water, Air & Soil Pollution*, Vol. 232, 344.
- Mullen, K.M., Ardia, D., Gil, D.L., Windover, D., and Cline, J. (2011). "DEoptim: An R package for global optimization by differential evolution." *Journal of Statistical Software*, Vol. 40, No. 6, pp. 1-26.
- Nazari, A., Roobahani, A., Shahdany, S.M.H. (2023). "Integrated SUSTAIN-SWMM-MCDM approach for optimal selection of LID practices in urban stormwater systems." *Water Resources Management*, Vol. 37, pp. 3769-3793.
- Seo, K.W., Seo, S.B., Kim, K.M., Park, C., Park, H., and Yoo, J. (2023). "Genetic algorithm-based allocation of LID practices to mitigate urban flooding." *Natural Hazards*, doi: 10.1007/s11069-023-06226-0
- Shin, H.S., Kim, M.E., Kim, J.M., and Jang, J.K. (2013). "Study on analysis of the proper ratio and the effects of low impact development application to sewage treatment district." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 12, pp. 1193-1207.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2016a). *Storm Water Management Model Reference Manual, Vol. 1 (Hydrology)*. Washington, D.C., U.S., pp. 1-233.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) (2016b). *Storm Water Management Model Reference Manual, Vol. 3 (Water Quality)*. Washington, D.C., U.S., pp. 1-161.
- Wadhwa, A., Budamala, V., Kummamuru, P.K., Kasiviswanathan, K.S., and Srimuruganandam, B. (2023). "Low-impact development (LID) control feasibility in a small-scale urban catchment for altered climate change scenarios." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 68, No. 13, pp. 1-14.
- Wang, M., Feng, S., Ikram, R.M.A., Chen, T., Sun, C., Chen, B., Rao, Q., Jin, H., Li, J. (2023). "Assessing the performance and challenges of low-impact development under climate change: A bibliometric review." *Sustainability*, Vol. 15, No. 18, 13616.
- Yang, Y., and Chui, T.F.M. (2018). "Optimizing surface and contributing areas of bioretention cells for stormwater runoff quality and quantity management." *Journal of Environmental Management*, Vol. 206, No. 15, pp. 1090-1103.
- Yuan, Y., Gan, Y., Xu, Y., Xie, Q., Shen, Y., and Yin, Y. (2022). "SWMM-based assessment of urban mountain stormwater management effects under different LID scenarios." *Water*, Vol. 14, No. 78, w14010078.
- Zahmatkesh, Z., Burian, S.J., Karamouz, M., Tavakol-Davani, H., and Goharian, E. (2015). "Low-impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: case study of New York City." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 141, No. 1, 04014043.
- Zhou, Z., Li, Q., He, P., Du, Y., Zou, Z., Xu, S., Han, X., and Zeng, T. (2023). "Impacts of rainstorm characteristics on flood inundation mitigation performance of LID measures throughout an urban catchment." *Journal of Hydrology*, Vol. 624, 129841.