

SWMM 모델을 활용한 상도동 지역의 우수유출관리 및 저영향개발의 유출저감효과 분석 연구

김재경¹, 강준석^{2*}

¹서울대학교 대학원 협동과정 조경학, ²서울대학교 조경·지역시스템공학부

Analysis of Stormwater Management and Runoff Reduction Effect of LID Facilities using SWMM Model in Sangdo-dong

Jaekyoung Kim¹, Junsuk Kang^{2*}

¹Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University

²Department of Landscape Architecture and Rural Systems, Seoul National University

요약 본 연구는 저영향개발(Low Impact Development; LID)을 물순환 개선 기술로 선정하고, SWMM(Storm Water Management Model)을 활용하여 상도동 지역의 유출 저감을 분석하였다. 또한, 상도동 지역의 유출량을 15% 이상 저감 할 수 있는 LID 기술의 도입 규모를 분석하는 것을 연구의 목표로 하였다. 본 연구는 환경부에서 발간한「저영향개발(LID) 기법 조정·경관 가이드라인」을 기반으로 새로운 형태의 빗물통(Rain barrel) 기술을 제안했다. 우수유출 저감 시나리오 구성을 위해 새로운 형태의 빗물통과 기존 형태의 식생체류지를 기술로 선정하고, LID Parameter 최적화 과정을 통해 유출량을 최소화 할 수 있는 매개변수를 모의하였다. 강우 시나리오로 기후변화 시나리오(RCP 8.5)를 선정하고, 발생 가능한 유출량과 LID 기술의 가용면적별 유출 저감량을 평가하였다. SWMM 모형적용 결과, LID 기술을 설치하지 않았을 때 총 유출량은 258.1 m³ 이며, 시나리오로 구성된 모든 LID 기술을 적용하였을 때 총 유출량을 40.3% 저감할 수 있었으며, 첨두 유출량은 39.6%까지 개선할 수 있는 것으로 나타났다. 목표로 한 15%의 유출 저감을 위해서는 LID 가용면적 40% 이상에 LID 시설을 설치해야 할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, low-impact development (LID) was selected as a water circulation improvement technology, and runoff reduction in Sangdo-dong was analyzed using a Storm Water Management Model (SWMM). The aim of this study was to analyze the scale of an LID installation that can reduce the amount of runoff in Sangdo-dong by more than 15%. Based on the「Development of Landscape Guidelines for LID Techniques」published by the Ministry of Environment, a new type of rain-barrel technology was developed. A rain barrel and bio-retention cell were selected as technologies, and the LID parameter optimization was analyzed. A climate change scenario (RCP 8.5) was selected as the precipitation scenario, and the amount of runoff and runoff reduction were evaluated. As a result of the simulation, the total runoff the total runoff was 258.1 m³ when the LID technology was not installed, but when all LID technologies were applied, the total runoff was reduced by 40.3%, and the peak runoff was improved by 39.6%. In order to reduce the runoff by 15%, more than 40% of the LID should be installed in the usable area.

Keywords : Low Impact Development(LID), Landscape Guideline, Water Circulation System, Rain-barrel, Bio-retention Cell

본 연구는 환경부의 지원을 지원받아 한국환경산업기술원의 환경서비스 전문인력 양성사업과 생태계 건강성 증진사업(2020002770002), 신기후 체제 대응 환경기술개발사업(2022003570004)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Junsuk Kang(Seoul National Univ.)

email: junkang@snu.ac.kr

Received June 3, 2022

Revised July 15, 2022

Accepted August 3, 2022

Published August 31, 2022

1. 서론

지나친 산업화와 도시화로 인해서 최근 기후변화에 대한 피해가 심화되고 있다[1]. 최근 도심 내에서 발생하고 있는 기후변화의 피해 중 하나로 물순환의 불균형, 돌발 홍수 피해 증가 등을 꼽을 수 있다[2]. 이에 대응할 수 있는 글로벌 전략 중 하나로 자연기반해법(NbS; Nature-based Solution)이 주목받고 있다. NbS는 자연적인 요소를 활용하여 생태계의 회복탄력성을 향상하고, 파괴되었던 도심 내의 환경을 복원 및 보호하는데 그 목표가 있다.

NbS의 대표적인 방법으로 그린인프라스트럭처(Green Infrastructure)가 있는데, 내수 침수에 대응하기 위한 저영향개발(LID; Low Impact Development)도 이의 일환이다. 저영향개발은 강우유출 발생지에서부터 침투, 저류 등의 기능을 활용해 강우 유출량 저감, 홍수 조절, 비점오염원 관리, 정화 기능을 담당하고 있다. 저영향개발은 미래에 발생할 수 있는 기후변화에 적극적으로 대응하는 방안 중 하나로, 최근 기후변화 예측 모델의 발전과 함께 그 중요성이 더욱 부각되고 있다.

기후변화 예측 모델 중 전 지구적으로 사용되는 시나리오는 RCP (Representative Concentration Pathways)가 있으며, RCP 시나리오에서는 미래에 더욱 많은 집중호우와 극지성 강수가 빈번할 것으로 예측한다. RCP 시나리오는 Table 1과 같은 정의를 가지며, 그중에서도 RCP 8.5 시나리오는 가장 위험하다고 평가받고 있다[3,4]. 최근 기후변화시나리오를 활용한 연구가 늘어나고 있음에도 불구하고, 미래 강수 데이터를 활용한 연구는 미진한 상태이다. Kim and Kang (2021)은 RCP 4.5 시나리오와 RCP 8.5 시나리오를 활용하여, 서울시 전역의 홍수 가능성을 분석하였다[3]. 하지만, 하수 관망의 대표 노드만을 모델링하여, 내수 침수 전반을 상세하게 분석하지 못했다는 한계점을 가진다.

LID 시설의 유출 저감과 물순환 능력 개선을 평가하는 대표적인 방법론으로는 SWMM (Storm Water Management Model)이 있다. SWMM은 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서 개발된 모델로서, 파이프 및 우수 배수관과 같은 Grey Infrastructure의 우수 제어 전략과 우수 관리 목표를 평가하기 위한 수단으로 많이 사용된다[5]. 가장 최신의 프로그램인 EPA SWMM 5.2에서는 그린인프라 및 LID를 활용한 유출관리의 효율성을 평가할 수 있다. 지원기술로는 Rain Garden, Bioretention Cells, Vegetative Swale, Rain Barrel 등 8가지이다[6]. SWMM을 활용한 해외 연구사례로 Bae and Lee (2019)는 LID 시설의 유출 저감량, 침투유량, 녹지공간의 연결성 등을 평가하였다[7]. Frassman-Beck and Saleh (2021)은 식생수로의 홍수 조절 능력에 대한 불확실성을 줄일 수 있는 방법론을 개발하였다[8].

국내의 선행 연구사례로 Bae et al. (2019)은 7개의 시설을 활용하여 유역별 평균 침투유량, 전체 연구 대상 유역의 유출 저감효과를 밝혔다[9]. Kim et al (2014)은 LID 시나리오를 수립하고 적용 면적별로 변화하는 우수 유출 저감량을 평가하였다[10]. Shin and Chang (2020)은 행정중심복합도시 1-5 생활권의 주상복합 대지에 지어질 건물들을 계획하는데 저영향개발 기법을 적용하기 위한 방법론과 결과를 제시한 바 있다[11]. Yeon et al (2014)은 부산 벡스코 지역을 5개의 소유역으로 구성하고, 2개의 LID 시나리오를 활용하여 대상지의 유출 특성을 분석하였다[12]. Oh et al (2010)은 금강 수계 갑천 유역의 SWMM 모델을 구축하고 소유역의 불투수면적 증가에 따른 유황 변화를 분석하였다[13].

앞서 언급한 선행연구들은 대표 하수 관망만 활용하여 그 유출저감 효과를 분석하였다. 이에 국내의 내수침수 위험 지역을 선정하고, 상세단위의 관망도를 모델링하여

Table 1. Definition of RCP Scenario

| Climate Change Scenario | Description | CO2 Concentration (The Year 2100) |
|-------------------------|--|-----------------------------------|
| RCP 2.6 | Instantaneous greenhouse gas reduction | 420 ppm |
| RCP 4.5 | Substantial achievement of greenhouse gas reduction policy | 540 ppm |
| RCP 6.0 | Fair achievement of greenhouse gas reduction policy | 670 ppm |
| RCP 8.5 | Greenhouse gas emission as current trend | 940 ppm |

미래의 유출 저감량을 평가하는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 기존 선행연구와는 달리 상세단위의 관망도를 기반으로 SWMM 모델을 구축하였다. 서울시 상도동 지역의 LID 최적화 기술을 설계하고 15% 이상의 침투 유출량 및 총 유출량을 저감할 수 있는 계획안을 도출하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1 연구 대상지역 선정

본 연구에서는 상도동 전체 지역을 연구의 대상으로 선정하고, SWMM 모델을 제작하였다. 상도동 지역은 2016년 서울시에서 발간한 풍수해저감종합계획에서 지정한 내수 재해 위험지구 후보지이다. 내수재해 위험지구는 재해이력, 관리지구, 관련계획, 취약지역, 시설능력 및 관련기관 의견을 고려하여 선정된다. 대상지는 10년간 침수피해 발생비율이 높고, 도달시간이 짧은 고지대 우수가 도로 및 저지대로 집중되어 관거 통수능이 부족하다는 판정을 받고 있다. 즉, 대상지인 상도동 일대는 관거 통수능 개선 및 우수유출 저감 시설의 도입이 시급한 상태이다. 상도동 지역의 일반사항으로 면적은 3.83 km², 2020년 인구밀도는 33,783 명/km²으로 침수가 발생하였을 때 예상되는 인적·사회적 피해도 크다고 할 수 있다[14]. 이에 SWMM을 활용하여 상도동 전체 지역

에 대해서 모델링하고 LID 기술을 활용하였을 때 얻을 수 있는 유출 저감량을 평가하였다. LID 기술의 적용 면적 산출을 위해서 대상지 내 빌딩의 용도별 분류와 소유역을 분석하였으며, 이는 Fig. 1 같다.

2.2 적용 LID 기술의 개발

2.2.1 LID 기법 조경·경관 가이드라인을 활용한 LID 요소기술의 개발

2018년 환경부와 행정중심복합도시건설청에서는 우수이용수 부족, 비점오염 물질 증가 등 물순환 왜곡현상 개선 및 회복을 위한 「저영향개발(LID) 기법 조경·경관 가이드라인」을 발간하였다[15]. 본 가이드라인에서는 LID 기법을 계획하거나 설계할 때 조경·경관적 측면에서 고려하여야 할 사항을 제시하고, 사용에 있어 효용성 있는 개발 지침을 제시하고 있다. 본 연구에서는 위의 가이드라인을 활용하여 2.2.2와 같은 새로운 형태의 빗물통을 개발하고, 이를 SWMM모델 내의 LID 시나리오 중 하나로 선정하여 그 유출 저감량을 분석하였다.

2.2.2 빗물통 (Rain-barrel)

빗물통은 지붕 등에서 흘러나온 빗물을 모아 이용하며, 필요에 따라 다양한 크기로 시설물을 제작 또는 구입 가능한 기술요소이다[16]. 서울특별시 2007년 이후 지자체별로 소형 빗물시설 설치비를 최대 90%까지 지원하

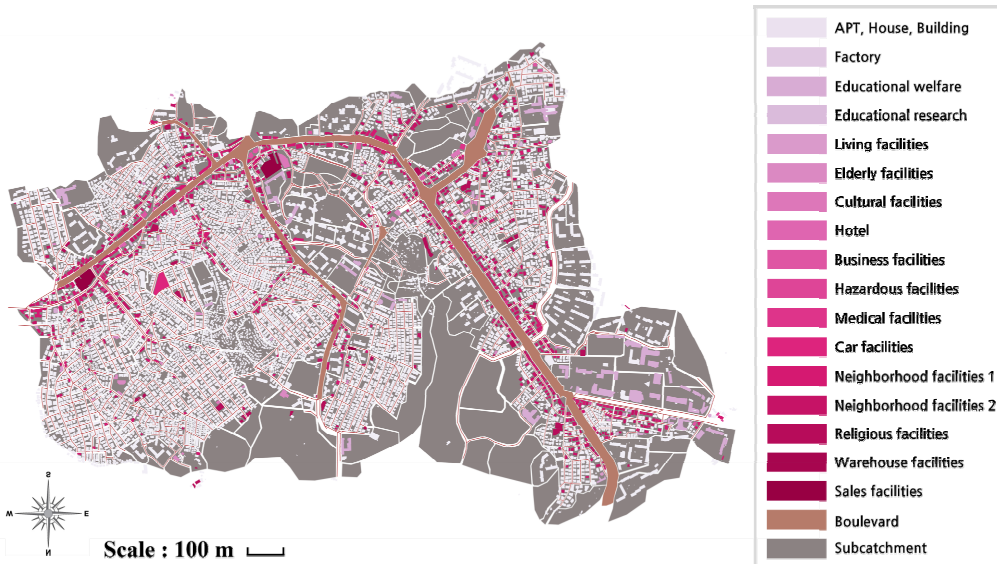


Fig. 1. Site Analysis: Sangdo-dong

고 있어, 지자체 등 의사결정자 뿐만 아니라 시민들의 참여가 활발히 이루어지는 기술요소이다.

하지만, 환경부에서 발간된 「빗물이용시설 설치관리 가이드북」에 따르면, 이용 빗물의 80% 이상은 조경용, 청소용, 화장실 용수로 사용되고 있으며, 빗물의 수집 규모도 낮다. 이는 빗물이용시설과 집수 및 저류시설의 물리적 거리가 멀기 때문에 발생하는 현상으로, 빗물이용시설을 더 유용하게 활용할 수 있는 형태의 기술개발이 필요하다.

이에 대한 방안으로 최근 “화단경계석 형태의 빗물저류조(출원번호 : 1020210119164)”가 개발되었다. 이 기술은 기존의 빗물통의 기능을 유지하고 이용시설과 저류시설의 물리적 거리를 좁힘으로써, 우수의 사용 빈도를 높이고 있다. 또한, 기존의 저류시설과 다르게 압거 형태의 저류통을 마련함으로써 「저영향개발(LID) 기법 조경·경관 가이드라인」에서 달성하고자 하는 “경관을 고려한 저영향개발”이라는 목표를 달성하였다. 개발된 발명의 도안은 Fig. 2 (a)와 같다. 개발된 빗물 저류조는 압거 형태로, 낙엽 등 비점오염원의 유입에 기능을 상실할 수 있다. 이를 방지하기 위한 여과 필터가 Fig. 2 (b)와 같이 함께 개발되었으며, 플딩 형태로서 그 사용성을 높

였다.

SWMM 모델 내 빗물통 기능의 경우, 실험 및 선행연구를 통해 저류와 배수에 대한 수문학적 특성이 증명되었다[6,7]. 주된 기능은 저류의 기능으로, 본 연구에서는 빗물통의 적절한 높이 산정을 위해서 2.3.2와 같은 매개변수 산정 과정을 거쳤다. 개발된 빗물통에서 배수의 기능은 밸브를 통해 사용되는 기능으로서, 강우가 종료된 시점에 사용되므로 유출 및 수문학적 특성은 영향을 주지 않는다.

2.2.3 식생체류지 (Bio-retention Cell)

환경부의 「저영향개발(LID) 기법 조경·경관 가이드라인」에서 정의하는 식생체류지는 빗물정원이라는 용어와도 혼재되어 사용하며, 우수유출수를 침투 및 여과시켜 비점오염원을 저감시키는 시설이다. 식물이 식재된 토양층과 모래층 및 자갈층 등으로 구분되며, 가장 일반적으로 도입되는 기술 요소로 조경·경관적 측면에서 고려할 사항이 많다. 하지만, 서울시와 같이 인구밀도가 높고 건축물의 비율이 높은 지역에는 설치하기가 어렵다는 단점이 있어, 적용 방법과 계획에 대한 명확한 기준 마련이 필요하다. 식생체류지의 도안은 Fig. 2 (c)와 같다.

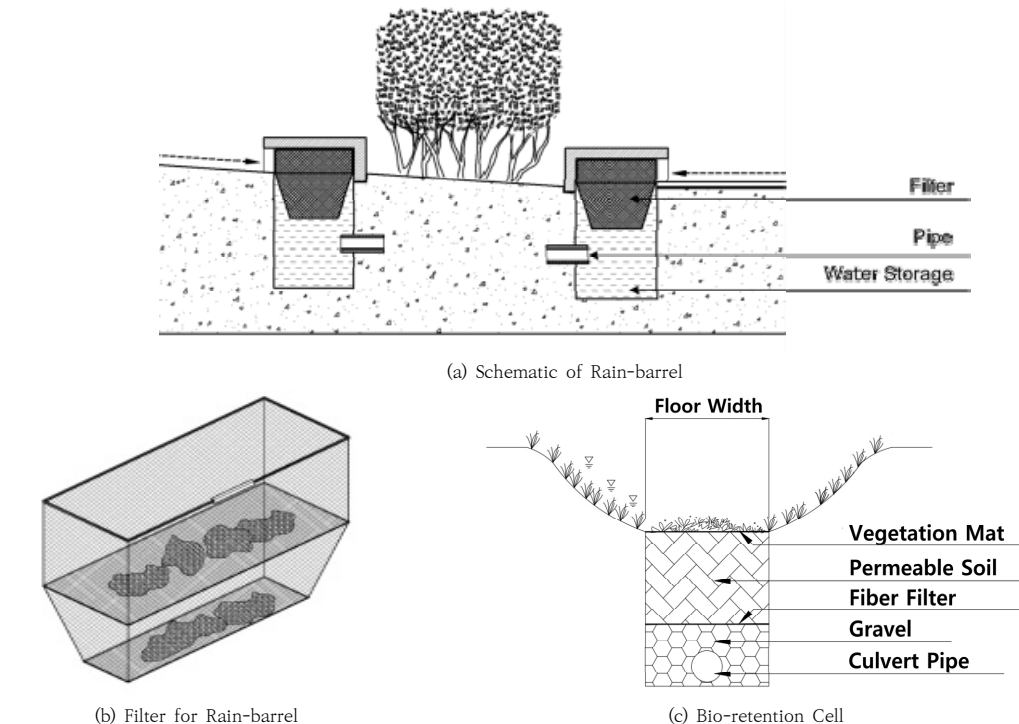


Fig. 2. Field Survey

2.3 SWMM 모형 구축

2.3.1 SWMM 모형구축

SWMM 모형은 크게 세 가지 유형의 기초자료가 필요 한데, 배수구역의 소유역별 지형 및 배수 특성자료, 관거 및 맨홀 자료, 강우관련 자료 등이 필수적이다 (Bae et al., 2019).

기존의 선행연구들을 살펴봤을 때, SWMM 모델은 DEM 생성을 통해 노드와 소유역 자료를 연결하거나 AutoCAD 등을 활용하는 방법을 사용한다. 하지만, 기존의 모델들은 대표 하수관거에 의해 분석되는 경우가 많아, 본 연구대상지인 상도동과 같이 맨홀이 많은 구도 심에는 적용하기 어렵다는 단점을 가진다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 서울특별시로부터 상도동 전체 하수관거 자료를 제공받았으며, 이를 R과 ArcGIS를 활용하여 가공하였다. R과 ArcGIS를 활용한 SWMM 모델의 과정은 Fig. 3와 같다.

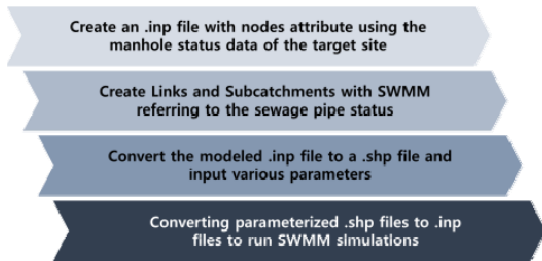


Fig. 3. SWMM model creation using R and ArcGIS

Fig. 3의 과정을 거쳐서 총 3.83 km²의 면적을 대상으로 870개의 소유역을 구축하였다. 2,866개의 Junction을 연결하고, 3,027개의 Conduit, 2개의 유출 Outlet을 구축하였다. 도심지의 수문 및 유출 프로그램인 SWMM 특성상, 하수 관망을 기준으로 소유역이 제작되므로 총 870개의 소유역이 구성되었다. 제공된 하수도 관의 형상을 참고하여, 원형 및 직사각형 모양의 하수도를 모델링하였다. 대상지의 평균 경사도는 6.9%, 불투수면적 비율은 73.7%로 비교적 불투수 면적이 높은 수준으로 모델링되었다.

2.3.2 SWMM LID Parameter 선정

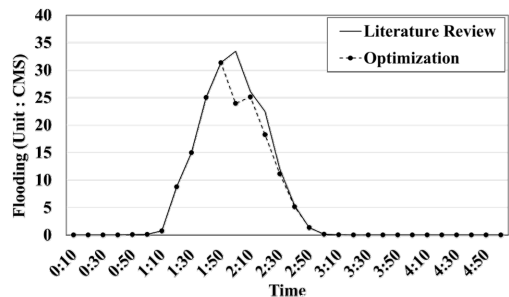
본 연구는 LID Parameter에 대한 최적화를 통해 각 요소기술의 값들을 선정하였다. LID Parameter 최적화는 가장 최소한의 비용 및 매개변수 값으로 유출량과 홍수량을 최소화할 수 있는 값을 뜻한다. 이를 위해 적용 기술인 Rain-barrel과 Bio-retention Cell의 기능별

Parameter를 10, 1, 또는 0.1 단위로 변경하여 최적화 값을 찾았다. 본 연구에서 제시한 Parameter 최적화 과정은 LID 시설의 각 매개변수를 결정할 수 있는 표준화 방안으로 사용될 수 있다.

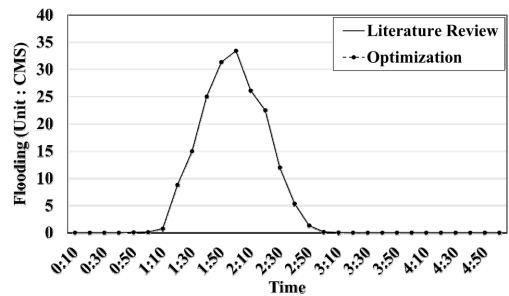
적용한 LID 시설의 매개변수는 Table 2와 같다. SWMM 내에서 유출 및 침수량에 영향을 주지 않는 값들은 선행연구의 값을 참고하였다. 빗물통의 경우 유출 및 침수량에 영향을 주지 않는 매개변수로 Drain 항목이 있으며, 식생체류지의 경우 Storage와 Drain 항목이 있다.

Fig. 4의 LID Parameter 최적화 결과를 살펴봤을 때, Bio-retention Cell의 경우 선행연구보다 다소 경제적인 설계를 하였음에도 불구하고, 선행연구보다 침투 유출과 총 유출량이 감소하였음을 알 수 있다. 즉, 본 연구는 Bio-retention Cell을 설계할 때 유출을 최소화할 수 있는 최소 식생 표면 높이와 토양층의 두께를 도출했다. 식생의 높이나 토양층의 두께가 일정 깊이 이상이 될 경우, 강우유출 저감에 미치는 영향은 동일한 것으로 나타났다.

Rain barrel의 경우 Bern Height 항목을 80 mm 정도의 값만 설정하더라도, Yeon et al. (2015) 및 EPA (2016)의 선행연구에서 제시한 Parameter 값 2,000 mm와 동일한 값을 보였다. Rain barrel 기술은 LID Controls 내에서 구성하는 Storage-Thickness Parameter에 대해서만 영향을 받았고, Drain 계수에 대해서는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.



(a) Parameter Optimization for Bio-retention Cell



(b) Parameter Optimization for Rain-barrel

Fig. 4. LID Parameter Optimization

Table 2. Design Criteria of Drain Facility

| Devison | Parameter | Bio-retention Cell | | Rain Barrel | |
|---------|--------------------|--------------------|------------------------|----------------|------------------------|
| | | Reference [7] | Parameter Optimization | Reference [17] | Parameter Optimization |
| Surface | Bern Height | 609.6 | 80 | - | - |
| | Vegetation Volume | 0.9 | 0.9 | - | - |
| | Surface Roughness | 0.239 | 0.239 | - | - |
| | Surface Slope | 0.01 | 0.01 | - | - |
| Soil | Thickness | 200 | 110 | - | - |
| | Porosity | 0.64 | 0.66 | - | - |
| | Field Capacity | 0.2 | 0.2 | - | - |
| | Wilting Point | 0.05 | 0.03 | - | - |
| | Conductivity | 12.7 | 12.7 | - | - |
| | Conductivity Slope | 5 | 5 | - | - |
| | Suction Head | 127 | 100 | - | - |
| Storage | Thickness | 457.2 | 457.2 | 2,000 | 80 |
| | Void Ratio | 0.75 | 0.75 | - | - |
| | Seepage Rate | 254 | 254 | - | - |
| | Clogging Factor | 0 | 0 | - | - |
| Drain | Flow Coefficient | 12.7 | 12.7 | 0 | 0 |
| | Flow Exponent | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | Offset | 76.2 | 76.2 | 6 | 6 |
| | Drain Delay | - | - | 72 | 72 |
| | Open Level | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Closed Level | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Control Curve | 0 | 0 | 0 | 0 |

2.3.3 LID 요소기술 적용 시나리오

본 연구에서 산정한 LID 요소기술의 공간분석을 위해서 LID 기술의 적용 기준을 수립하고 적용 면적별로 그 유출 저감량을 분석하였다. Bio-retention Cell의 경우 대표적인 LID 기술로 적용되고 있지만, 서울시 등 도시 고밀화 지역에는 적용하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점을 해소하기 위해서 Fig. 1과 같이 왕복 8차선 이상의 대로 지역을 분석하였고, 도로 양안에 Bio-retention Cell을 설치하는 계획을 수립하였다. 「빗물이용시설 설

치관리 가이드북」등을 참고했을 때 Rain-barrel의 경우, 건축물 및 집수면적의 0.05 m를 곱하는 형식으로 산정된다. 하지만, 본 연구에서는 2.2.2 SWMM LID Parameter 산정에 따라, 집수면적에 0.08 m를 곱하여 용량이 산정되었다. 위 기준에 따라서 주택 지역, 별도로 용도가 지정되지 않은 건물 지역에 면적을 산정하였다. 적용 기술의 면적과 적용 비율에 따른 LID 시나리오는 Table 3과 같다.

Table 3. Concerning Landslides status in Domestic and Overseas

| Condition | LID Scenario | Scenario No. | LID Area (Ratio) | | | | | Apply Position |
|------------------|---|--------------|------------------|------------|------------|------------|-----------|---------------------|
| | | | 100% | 80% | 60% | 40% | 20% | |
| w/o LID | As is now | 1 | - | - | - | - | - | - |
| LID Applications | Application of Bio-retention Cell | 2 | 1,166,582.5 | 933,266.00 | 559,959.60 | 223,983.84 | 44,796.77 | Building (housing) |
| | Application of Bioretention Cell | 3 | 19,781.47 | 15,825.18 | 9,495.11 | 3,798.04 | 759.61 | Side road |
| | Simultaneous applications of scenario 2 and 3 | 4 | 1,181,418.6 | 945,134.88 | 567,080.93 | 226,832.37 | 45,366.47 | Side road, Building |

Table 4. Rainfall Scenario Analysis

| Division | Cumulative distribution | | | | Sectional distribution | | | | Maximum Precipitation in 2068 | | | |
|----------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1st Quartile | 2nd Quartile | 3rd Quartile | 4th Quartile | 1st Quartile | 2nd Quartile | 3rd Quartile | 4th Quartile | 1st Quartile | 2nd Quartile | 3rd Quartile | 4th Quartile |
| 10 | 1.09 | 2.44 | 0.14 | 2.63 | 1.09 | 2.44 | 0.14 | 2.63 | 3.59 | 8.04 | 0.47 | 8.66 |
| 20 | 13.79 | 2.57 | 2.28 | 3.20 | 12.70 | 0.13 | 2.14 | 0.57 | 45.45 | 8.46 | 7.52 | 10.54 |
| 30 | 29.78 | 4.74 | 4.75 | 3.58 | 15.99 | 2.17 | 2.47 | 0.38 | 98.16 | 15.62 | 15.66 | 11.80 |
| 40 | 44.53 | 10.75 | 7.15 | 3.63 | 14.75 | 6.01 | 2.40 | 0.05 | 146.78 | 35.44 | 23.56 | 11.97 |
| 50 | 56.04 | 20.59 | 9.81 | 6.47 | 11.51 | 9.84 | 2.66 | 2.84 | 184.73 | 67.87 | 32.34 | 21.34 |
| 60 | 64.02 | 33.15 | 13.41 | 10.61 | 7.98 | 12.56 | 3.60 | 4.13 | 211.04 | 109.28 | 44.20 | 34.97 |
| 70 | 69.19 | 46.84 | 18.63 | 15.22 | 5.17 | 13.68 | 5.22 | 4.61 | 228.08 | 154.38 | 61.41 | 50.16 |
| 80 | 72.70 | 60.00 | 25.94 | 19.62 | 3.51 | 13.16 | 7.30 | 4.40 | 239.64 | 197.76 | 85.49 | 64.67 |
| 90 | 75.69 | 71.30 | 35.41 | 23.53 | 2.99 | 11.31 | 9.47 | 3.91 | 249.50 | 235.03 | 116.72 | 77.56 |
| 100 | 79.01 | 79.95 | 46.69 | 27.18 | 3.31 | 8.65 | 11.28 | 3.65 | 260.42 | 263.55 | 153.91 | 89.59 |
| 110 | 82.99 | 85.78 | 59.00 | 31.30 | 3.99 | 5.83 | 12.30 | 4.12 | 273.56 | 282.75 | 194.46 | 103.19 |
| 120 | 87.48 | 89.23 | 71.19 | 36.97 | 4.49 | 3.44 | 12.19 | 5.67 | 288.35 | 294.11 | 234.66 | 121.87 |
| 130 | 91.87 | 91.20 | 82.00 | 45.29 | 4.38 | 1.97 | 10.81 | 8.32 | 302.81 | 300.60 | 270.28 | 149.28 |
| 140 | 95.34 | 92.81 | 90.25 | 56.96 | 3.47 | 1.61 | 8.25 | 11.67 | 314.24 | 305.91 | 297.49 | 187.74 |
| 150 | 97.22 | 94.98 | 95.24 | 71.69 | 1.89 | 2.18 | 4.99 | 14.73 | 320.46 | 313.08 | 313.93 | 236.29 |
| 160 | 97.39 | 97.96 | 97.15 | 87.48 | 0.17 | 2.98 | 1.91 | 15.79 | 321.02 | 322.89 | 320.22 | 288.34 |
| 170 | 97.50 | 99.89 | 97.56 | 99.75 | 0.11 | 1.93 | 0.41 | 12.27 | 321.37 | 329.26 | 321.58 | 328.78 |
| 180 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 2.50 | 0.11 | 2.44 | 0.25 | 329.62 | 329.62 | 329.62 | 329.62 |

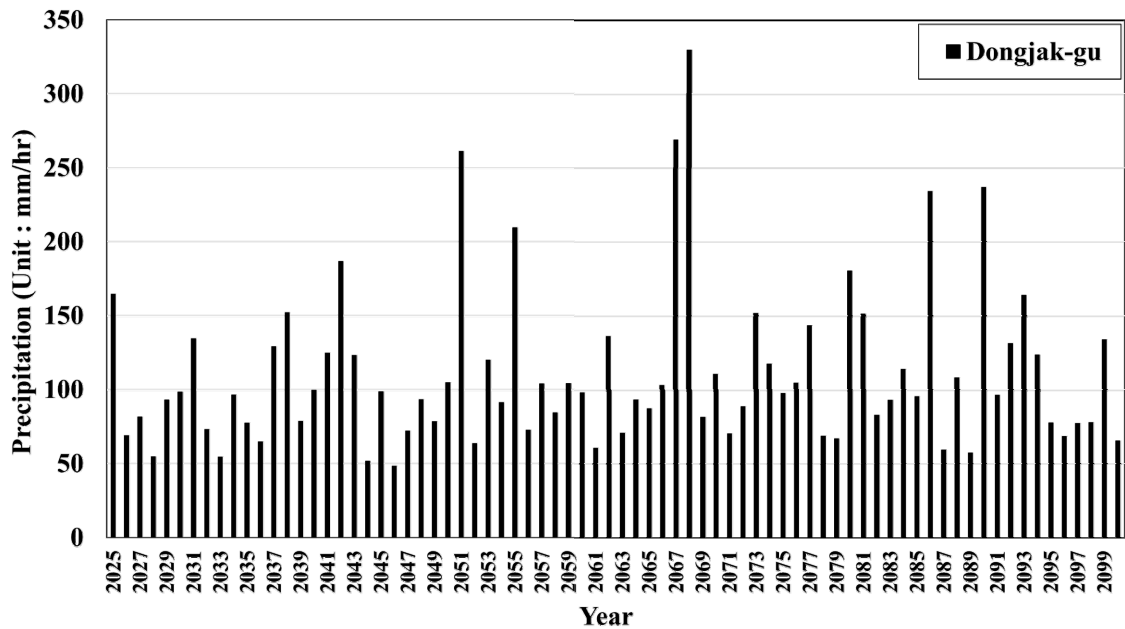


Fig. 5. Predicted Precipitation per day (RCP 8.5)

2.3.4 기후변화시나리오 강수 데이터 분석

본 연구에서는 미래에 발생 가능한 강수의 수문학적 피해를 분석하기 위해, 남한상세 RCP 8.5 시나리오를 강수 데이터로 선정하였다. 남한상세 RCP 시나리오는 IPCC 5차 평가보고서에서 분석한 기후전망을 토대로, 1km 격자 단위의 남한 기후전망을 예측한 데이터이다. RCP 시나리오는 기상청의 기후정보포털에서 제공되고 있으며 동 단위로 최소 1일까지 강수 데이터를 예측한다. RCP 8.5 시나리오는 1년 단위로 일 강수량이 가장 높은 날을 선정하여 연도별로 비교하였으며, 이는 Fig. 5와 같다. RCP 8.5 시나리오를 살펴봤을 때, 2068년도에 일 최고 강수량은 약 300 mm 이상으로 나타났다.

2068년의 일 최고 강수량 329 mm의 데이터 분석을 위해 누가 곡선 형태로 개발된 Huff 방법을 적용하였다. Huff 방법은 환경부와 국토부의 기준에 따라 3분위 식을 채택하였다 (Table 4). 강우시간 분포의 계수는 2019년에 발간된 「홍수량산정 표준지침」를 참고하였다. 강우지

속시간은 3시간 (180분)으로 설정하였는데, 이는 자연재해대책법 규정에 의거한 「서울특별시 하수도정비기본계획(변경) 보고서」를 참고하여 적용하였다.

3. 연구결과

SWMM을 활용한 유출 해석 결과는 Fig. 6 및 Table 5와 같이 살펴볼 수 있다. 강수 시나리오의 지속시간은 180분으로 10분 간격씩 유출량을 분석하였으며, 유출이 종료되는 시간을 살펴보기 위해서 5시간까지 결과를 시뮬레이션 하였다. 모든 시나리오의 유출은 3시간 50분 이후에 종료되는 것으로 나타났다.

3.1 침투 유출량 분석

위와 같은 연구방법론으로 상도동 지역을 분석하였을 때, 현재 상태의 상도동 지역은 약 32.72 m³의 유출량

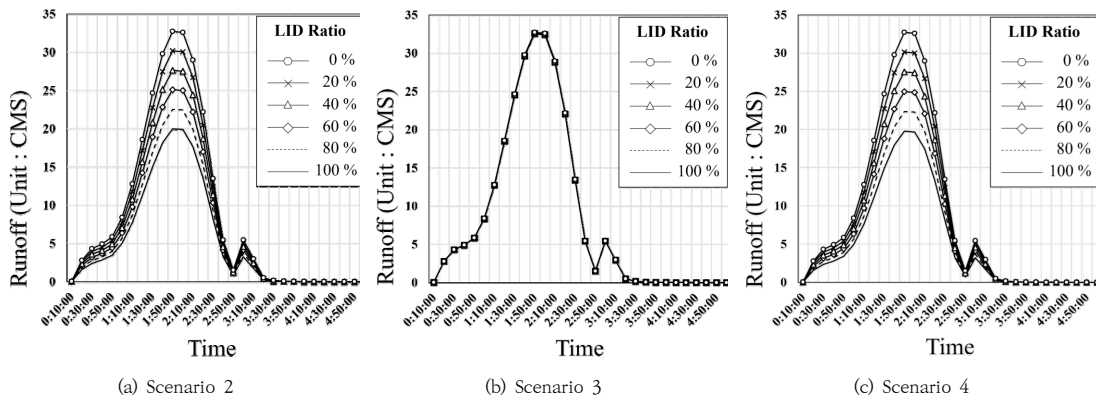


Fig. 6. Comparison of Runoff for each LID Application Scenarios

Table 5. Runoff Results from LID Application Scenarios

| LID Scenario | LID Application Scenarios | | | | | |
|--------------|---------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------|-------|
| | 100% | 80% | 60% | 40% | 20% | 0% |
| Scenario 2 | 155.96 (39.6%) | 176.39 (31.7%) | 196.82 (23.74%) | 217.27 (15.8%) | 237.69 (7.9%) | 258.1 |
| | 19.96 (39.0%) | 22.52 (31.17%) | 25.07 (23.4%) | 27.62 (15.6%) | 30.18 (7.8%) | 32.72 |
| Scenario 3 | 256.42 (0.7%) | 256.74 (0.5%) | 257.08 (0.4%) | 257.43 (0.3%) | 257.76 (0.1%) | 258.1 |
| | 32.51 (0.6%) | 32.55 (0.5%) | 32.59 (0.4%) | 32.64 (0.2%) | 32.68 (0.1%) | 32.72 |
| Scenario 4 | 154.18 (40.3%) | 174.98 (32.2%) | 195.77 (24.1%) | 216.56 (16.1%) | 237.38 (8.0%) | 258.1 |
| | 19.75 (39.6%) | 22.35 (31.7%) | 24.94 (23.8%) | 27.54 (15.8%) | 30.13 (7.9%) | 32.72 |

을 보였다. 첨두 유출 시각은 모두 120분이 되는 시점으로, LID를 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때 첨두 유출 시각이 동일했다. 두 가지의 LID 기술을 모두 반영한 Scenario 4에서 가장 큰 유출저감 효과를 얻을 수 있었다. 두 가지의 LID 기술을 가용 면적 전체에 적용하였을 때 첨두 유출량은 19.75 m³/s로 약 39.6% 저감된 값으로 나타났다. 가용면적을 20%씩 변경하였을 때는 약 8%씩 첨두 유출량이 감소되는 추세를 볼 수 있었는데, 20% 정도만 LID 시설을 적용하였을 때는 첨두 유출량이 30.13 m³/s (7.9%)로 나타났다.

Scenario 2의 경우 약 39.6% LID 적용 가능 면적이 Scenario 3에 비해 약 59배 더 큰 것으로 시뮬레이션 되었는데, 이때의 유출량 저감은 약 39.0%로, Scenario 4의 전체 유출 저감량은 대부분 Scenario 2의 LID 기술에서 기인한 것이다. LID 적용 면적이 약 20% 저감될 때마다, 약 7.8%씩 유출량이 증가하였다.

Scenario 3의 경우 전체 면적에 0.52% 정도로 Scenario 2에 대비해 LID 적용 면적이 상당히 적은 모습을 보였다. Scenario 3을 100% 적용하였을 때 저감할 수 있는 첨두 유출량은 0.6% 정도였으며, 대략 적용 면적 20% 변화에 따라서 유출량 0.1%씩 변화하는 모습을 볼 수 있었다. 본 연구에서 목표한 15% 이상의 첨두 유출량의 저감을 위해서는 Scenario 2 혹은 Scenario 4의 기술이 최소 40% 이상 적용되어야 할 것으로 판단된다. Scenario 3과 같이 Bio-retention Cell을 단일기술로 적용한 경우, 본 연구에서 목표로 한 15%의 첨두 유출량을 저감할 수 없는 것으로 분석됐다.

3.2 총 유출량 분석

LID 시설을 적용하지 않았을 때 총 유출량은 258.1 m³이다. 이는 전체 강수량이 329 mm 임 것을 고려하면 도시 전체를 구성하는 구역의 유출량이 높은 수치임을 알 수 있다. 전체 LID 시설을 적용하였을 때 총 유출량은 154.2 m³으로 40% 가 넘는 총 유출량을 저감할 수 있었다. 적용 면적이 20%씩 감소함에 따라서 약 8.1%의 유출 변화를 볼 수 있었고, 적용 면적이 20%일 때는 총 유출량을 8% 정도 저감할 수 있는 것으로 판단되었다.

Rain Barrel이 적용된 Scenario 2의 경우, LID 가용 면적을 100% 모두 적용했을 때, 약 39.6%의 총 유출량을 감소할 수 있었다. 20%씩 적용면적이 감소 되었을 때는 7.9%씩 유출량이 감소하는 모습을 볼 수 있었다. 적용 면적이 20%일 때, Scenario 2의 총 유출량은 237.5 m³으로 약 7.9%의 유출량을 저감할 수 있다. 첨두 유출

량과 마찬가지로 총 유출량에서도 Scenario 2가 유출저감에 큰 영향을 미치는 것으로 판단됐다.

반면 Scenario 3의 경우, 최대 가용치의 LID 면적에 시설을 적용하더라도 유출량은 256.42 m³ 정도로 약 0.7% 정도의 유출만 저감할 수 있는 것으로 판단됐다. 총 유출량은 적용 면적이 20%씩 감소함에 따라서, 0.1%씩 감소하였다. 연구에서 목표한 15%의 총 유출량 저감을 위해서는 Scenario 2 혹은 Scenario 4의 LID 기술을 40% 이상 적용해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 서울시에서 선정한 내수재해 위험지구 후보인 상도동 지역을 대상으로 RCP 8.5 시나리오의 강수 시나리오를 적용해보고 예상되는 유출량을 분석하였다. 더불어, 15%의 내수재해 저감을 목표로 적절한 LID 기술을 선정하기 위한 유출저감효과를 분석하였다. LID 기술의 효율성과 사용성을 높이기 위해서 「저영향개발(LID) 기법 조정·경관 가이드라인」에 기반한 새로운 형태의 LID 기술을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구에서는 LID Parameter 최적화 과정을 통해서 각 기술의 최적화된 매개변수를 산정하였다. 특히, 새롭게 개발된 “화단경계식 형태의 빗물저류조”는 집수면적에 단 0.08 m를 곱하여 용량을 산출하더라도, 효율적인 유출 저감효과를 얻을 수 있었다.
- 2) 첨두 유출량과 총 유출량 모두에서 15%의 유출량을 저감하기 위해서는 Scenario 2 혹은 Scenario 4의 기술을 가용면적의 40% 이상 적용해야할 것으로 판단된다. Bio-retention Cell 단일기술로 구성된 Scenario 3만으로는 15% 이상의 유출량을 저감할 수 없는 것으로 나타났으며, 이는 상도동 내에 식생체류지를 가용할 수 있는 면적이 작기에 발생한 결과이다. 첨두 유출량의 경우 최대 39.6%까지 유출을 저감할 수 있었으며, 대부분은 빗물 저류조에 의해 기인하였다.
- 3) 총 유출량은 최대 40.3% 이상 유출량을 저감할 수 있었으며, 총 유출 시간은 3시간 50분 이후인 것으로 나타났다. Scenario 3의 경우, 총 유출량측면에서도 1% 미만의 유출저감 효과만 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 새롭게 개발한 빗물통을 적용하여 유출 저감 효과를 분석하였다는데 그 의의가 있지만, 두 가지 형태의 LID 기술만을 활용하여 시나리오를 구성하였다는데 한계점이 있다. 추후 연구에서는 이러한 한계점이 보완되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] J. Kim, J. Kang, "Evaluating the efficiency of fog cooling for climate change adaptation in vulnerable groups: A case study of Daegu Metropolitan City", *Building and Environment*, Vol.217, No.109120, June 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/i.buildenv.2022.109120>
- [2] Y. Choi, J. Kang, J. Kim, "Urban flood adaptation planning for local governments: Hydrology analysis and optimization", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol.59, No.102213, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/i.ijdrr.2021.102213>
- [3] J. Kim, J. Kang, "Analysis of flood damage in the Seoul Metropolitan government using climate change scenarios and mitigation technologies", *Sustainability*, Vol.13(1) No.105, Dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13010105>
- [4] J. Kim, J. Lee, S. Hwang, J. Kang, "Urban flood adaptation and optimization for net-zero: Case study of Dongjak-gu, Seoul." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol.41, No.101110, June 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/i.ejrh.2022.101110>
- [5] J. Gironás, L. A. Roesner, L. A. Rossman, J. Davis, "A new applications manual for the Storm Water Management Model(SWMM)" *Environmental Modelling & Software*, Vol.25, No.6, pp.813-814, Dec. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/i.envsoft.2009.11.009>
- [6] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). SWMM Reference Manual Volume III-Water Quality. 2016.
- [7] C. Bae, D. K. Lee, "Effects of low-impact development practices for flood events at the catchment scale in a highly developed urban area." *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol.44, No.101412, April 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/i.ijdrr.2019.101412>
- [8] E. Fassman-Beck, F. Saleh, "Sources and Impacts of Uncertainty in Uncalibrated Bioretention Models Using SWMM 5.1. 012" *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, Vol.7(3), No.04021006, Aug. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000944>
- [9] K. Bae, J. Ahn, Y. Choi, B. Kim, J. Yi, "Analysis of the improved drainage capacity of urban basins at an LID facility." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.19 No.(1), pp.311-322, Feb. 2019. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.1.311>
- [10] E. S. Kim, J. S. Yeon, H. S. Shin, J. S. Lee, H. I. Choi, "Study on stormwater runoff reduction effects by LID application areas" *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.14 No.2, pp.309-316, April 2014. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2014.14.2.309>
- [11] H. Shin, C. K. Chang, "Application of LID to the District Unit Plan and Mixed-Use Buildings: Focusing on the Case of the 1-5 Living Area in MAC" *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.20, No.4, pp.273-280, May 2020. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2020.20.4.273>
- [12] J. S. Yeon, Y. S. Jang, J. H. Lee, H. S. Shin, E. S. Kim, "Analysis of stormwater runoff characteristics for spatial distribution of LID element techniques using SWMM", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.15 No.6, pp.3983-3989, June 2014. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.6.3983>
- [13] D. G. Oh, S. W. Chung, I. G. Ryu, M. S. Kang, "Analysis of rainfall-runoff characteristics on impervious cover changes using SWMM in an urbanized watershed", *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 26, No. 1, pp. 61-70, Jan. 2010.
- [14] Seoul Open Data Portal, Seoul Population Density Data, Available From: <https://data.seoul.go.kr/dataList/10584/S/2/datasetView.do> (accessed May 4, 2022).
- [15] Ministry of Environment. National Agency for Administrative City Construction. Korea Land & Housing Corporation. Korea Environment Corporation, Development of the Landscape Guidelines for LID Techniques, 2018.
- [16] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), SWMM 5.2 User's Manual, 2022.
- [17] J. S. Yeon, S. Kim, H. I. Choi, H. S. Shin, E. S. Kim, "Rainfall runoff reduction analysis for the construction and maintenance costs of LID facilities", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.15, No.4, pp.281-287, Aug. 2015. DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.4.281>

김재경(Jaekyoung kim)

[준회원]



- 2019년 2월 : 전남대학교 조경학과 (농학사)
- 2019년 3월 : 서울대학교 생태조경지역시스템공학부 석사과정 재학
- 2021년 3월 : 서울대학교 대학원 협동과정 조경학 박사과정 재학

<관심분야>

그린인프라공학, 조경학, 환경공학, 수문학, 구조공학

강 준 석(Junsuk Kang)

[정회원]



- 1998년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 2000년 2월 : 고려대학교 토목공학 석사 (공학석사)
- 2000년 1월 ~ 2002년 7월 : 현대건설, 해외토목사업본부

- 2007년 5월 : Auburn Univ. Civil Engineering, Structures (공학박사)
- 2011년 8월 ~ 2017년 1월 : Georgia Southern Univ., Civil Eng. & Construction Mgt. (USA), 조교수
- 2017년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 조경·지역시스템공학부 부교수

〈관심분야〉

그린인프라공학, 구조공학, 환경공학, 수문학, 조경학