

비용-편익을 고려한 홍수 대응 정책의 유출 저감 효과 분석

지희원^{ID*} · 김현주^{ID**} · 서승범^{ID***}

Jee, Hee Won^{ID*}, Kim, Hyeonju^{ID**}, Seo, Seung Beom^{ID***}

Analysis of Runoff Reduction Effect of Flood Mitigation Policies based on Cost-Benefit Perspective

ABSTRACT

As the frequency of extreme rainfall events increase due to climate change, climate change adaptation measures have been proposed by the central and local governments. In order to reduce flood damage in urban areas, various flood response policies, such as low impact development techniques and enhancement of the capacity of rainwater drainage networks, have been proposed. When these policies are established, regional characteristics and policy-effectiveness from the cost-benefit perspective must be considered for the flood mitigation measures. In this study, capacity enhancement of rainwater pipe networks and low impact development techniques including green roof and permeable pavement techniques are selected. And the flood reduction effect of the target watershed, Gwanak campus of Seoul National University, was analyzed using SWMM model which is an urban runoff simulation model. In addition, along with the quantified urban flooding reduction outputs, construction and operation costs for various policy scenarios were calculated so that cost-benefit analyses were conducted to analyze the effectiveness of the applied policy scenarios. As a result of cost-benefit analysis, a policy that adopts both permeable pavement and rainwater pipe expansion was selected as the best cost-effective scenario for flood mitigation. The research methodology, proposed in this study, is expected to be utilized for decision-making in the planning stage for flood mitigation measures for each region.

Keywords : Flood mitigation, Rainwater drainage, Low impact development, SWMM, Cost-Benefit analysis

초 록

기후변화로 인하여 도시에서 발생하는 집중호우가 증가함에 따라 정부와 지자체는 기후변화 적응대책을 통해 홍수로 인한 피해를 저감시키고자 노력하고 있다. 도시 유역 침수 피해의 감소를 위해 우수관거 용량 증대와 물순환 개선을 통한 지속가능한 치수 정책인 저영향 개발 기법 등 다양한 홍수 대응 정책들이 제시되고 있다. 이러한 정책들을 이행하는데 있어 지역별 특성을 고려한 대책 수립이 필요하며, 이를 위해선 홍수 저감 효과와 비용-편익 측면에서 분석하여 국가 예산을 효율적으로 사용하여야 한다. 본 연구에서는 침수 피해 위험이 있는 도시 소구역에 적용할 수 있는 대응 정책으로 우수관거의 용량 증대와 저영향개발 기법 중 옥상녹화와 투수성 포장 기법을 선정하고 서울대학교 관악캠퍼스 유역의 홍수 저감 효과를 도시유출해석모형인 SWMM 모형으로 분석하였다. 또한, 정책별 공사 및 운영 비용을 계산하고 월류량 감소를 편익으로 고려한 비용-편익 분석을 수행하였다. 분석 결과, 투수성 포장과 우수관거 용량 확대 정책을 100% 반영하는 정책 시나리오가 유출 저감 측면에서 비용 대비 효과가 가장 우수한 시나리오로 분석되었다. 본 연구를 통해 제안된 방법론은 지역별 맞춤형 치수 계획 수립 단계에서 의사 결정을 위한 자료로 높은 활용성을 보일 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 홍수 저감, 우수배제, 저영향개발, SWMM, 비용-편익 분석

* 정희원 · 서울시립대학교 도시과학연구원 연구원 (University of Seoul · heewon.jee@uos.ac.kr)

** 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Seoul National University · rtguswn@snu.ac.kr)

*** 종신회원 · 교신저자 · 서울시립대학교 국제도시과학대학원 조교수 (Corresponding Author · University of Seoul · sbseo7@uos.ac.kr)

Received July 14, 2023/ revised September 8, 2023/ accepted September 18, 2023

1. 서론

기후변화로 인한 극한 강우 빈도의 증가와 도시화로 인한 지표 유출량의 증가에 따른 홍수 피해는 지속적으로 증가하고 있다. 이에 정부와 지자체는 기후변화 적응대책과 「국가물관리기본계획」을 수립하여 정책 방향을 제안하고 있다. 「제3차 국가 기후변화 적응대책(2021-2025)」(Government of Korea, 2020a)에서는 물관리 대응력 강화를 목표로 기후변화에 대비한 지속가능한 홍수관리를 첫 번째 기본 정책 방향으로 설정하였으며, 침수예방사업은 지역별 여건과 유역 특성에 따라 다양한 형태의 세부시행계획으로 제안되고 있다. 2020년에 발표된 「제1차 국가물관리기본계획(2021-2030)」(Government of Korea, 2020a)에서는 이수 및 치수를 포함한 다양한 물관리 정책과 함께 홍수나 가뭄으로 인하여 발생하는 재해의 경감 및 예방에 관한 사항을 포함하고 있다(Government of Korea, 2020a).

기후변화로 인한 홍수 리스크 연구는 취약성 평가 위주로 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 지역 또는 유역별 홍수 리스크 또는 취약성 지수를 산정하고 홍수 위험이 높은 지역과 대응계획 마련의 우선순위를 선정하는 방식으로 진행되고 있다(Lee and Choi, 2016; Joo et al., 2018; Kim et al., 2020). 이러한 리스크 및 취약성 평가 연구는 지역별 특성을 고려한 홍수 저감대응 정책의 선정 연구로 연계되어야 한다(Ryu and Kang, 2020). 앞서 언급한 「제3차 국가 기후변화 적응대책(2021-2025)」(Government of Korea, 2020b)의 지역 맞춤형 홍수 대응력 강화 정책으로는 저류 및 펌프시설, 빗물저류터널 설치 및 확충, 홍수터 확대 등의 사업과 노후 물관리 시설의 치수 기능 개선, 하수관로 및 댐하천 설계기준 강화 사업 등이 제안되어 있으며, 건전한 물환경 조성을 위한 지역별 물순환목표관리제, 저영향개발 기법 확대 적용 및 도시 물순환 구조 개선, 물순환 모니터링 시스템 구축 등이 있다(Chae et al., 2021). 건전한 물순환은 「제1차 국가물관리기본계획(2021-2030)」(Government of Korea, 2020a)의 기본원칙에 주요하게 언급되고 있으며, 인간 활동과 생태계를 동시에 유지하기 위한 지속가능한 물관리 체계 구축에 필수적으로 고려해야 하는 방향이다. 또한, 홍수 정책의 경우 새롭게 계획되는 도시에서 시행되는 경우가 아니라면, 다양한 물리적, 사회학적 측면의 제약으로 인해 즉각적인 정책 이행에 한계가 존재함을 인식해야 한다. 따라서, 실행 가능 여부 및 중요도에 따른 정책의 우선순위 선정을 위해 다양한 정책들의 홍수 대응 효과를 정량적으로 분석하는 과정이 필요하다.

집중호우로 인하여 발생하는 도시 홍수에 대응하기 위한 주요 시설 중 하나인 우수관거 시스템은 우수배제를 원활하게 하여 도심지 내수 침수를 예방하고 피해를 경감시키는 목적을 가진다

(National assembly research service, 2020; Lee et al., 2021; Park et al., 2019). 그러나 기후변화로 인한 강우 패턴의 변화와 집중호우의 발생빈도 증가로 인해(Sobieraj et al., 2020), 기존에 설치된 우수관거의 설계기준은 최근 집중호우에 대한 우수배제 기능을 제대로 못 하고 있는 실정이다. 2022년 8월 서울 강남 일대에 내린 기왕최대값을 경신한 기록적인 폭우는 약 3,155억원에 달하는 재산피해를 발생시켰고, 피해 복구비용 7,905억원이 투입되었다. 서울지역의 도심지 상가 및 주택지역에 집중된 침수피해는 기존의 시설기준에 따라 설치된 우수관거의 배수용량이 부족하였기 때문이라고 보도되었다(Ministry of the Interior and Safety, 2022). 또한, 새롭게 개정된 하수도설계기준은 하수도설계 계획수량을 산정함에 있어 기후변화로 인한 강우특성의 변화를 강조하고 설계빈도를 기존의 최소 설계빈도보다 20년 이상 상향할 수 있음을 고지하고 있다(Ministry of Environment, 2022). 이로써, 우수관거의 설계기준의 강화 및 우수관거 용량 확대의 필요성은 더욱 강조되고 있다. 우수관거 신설 및 교체 등의 우수관거 용량 확대 사업은 지형 조건의 영향을 받고 설치를 위한 비용과 긴 시간이 소요되는 제약이 있지만 집중호우에 대응하기 위한 필수적인 수자원 시설이므로(Han et al., 2012; Mei et al., 2018), 다른 홍수 대응 정책들 간의 홍수 저감 효과와 더불어 경제적 편익에 대한 비교 분석을 통해 적절한 규모의 사업으로 이행될 필요가 있다.

홍수 대응 정책 중 하나인 건전한 물환경 조성은 저영향 개발기법(Low Impact Development, LID)을 활용한 분산형 유역관리기술을 포함한다(Bae et al., 2019; Shin et al., 2013). LID 기법은 식생형시설, 침투시설, 빗물이용시설 등으로 나눌 수 있고(Ministry of Environment, 2016), 기존 도시의 경우 지역별 여건에 따라 적용 가능한 기법의 범위가 달라질 수 있다. LID 기법의 홍수 피해 저감 효과를 분석한 국내 연구 사례를 살펴보면, Shin et al.(2013)은 상업지역인 수영강 하류유역을 대상으로 옥상녹화, 투수성 포장 기법을 단일 적용하는 시나리오를 분석하여 유출량 저감 효과를 계산한 결과, LID 적용 전 대비 옥상녹화는 15.62%, 투수성 포장은 13.01%의 저감 효과를 보여주었다. Yoon et al.(2020)는 LID 기법으로 투수성 포장, 침투도랑, 옥상녹화 정책을 선정하여 9가지 가중치 조합을 적용한 후, 청계천 효자배수분구를 대상으로 유출량 변화를 연구하여, 해당 연구에서 투수성 포장 정책이 가장 효과적인 것으로 분석하였다. Kim and Kim(2021)은 LID 기법 중 투수성 포장, 옥상녹화, 3가지의 식생저류시설(Bioswale, Rainwater Garden, Planter Box) 기법들을 적용하여 확률 강우별 유출 저감 효과를 연구하여, 식생저류시설이 단위면적당 가장 효과적임을 분석하였다. 국외 사례로 Hu et al.(2017)는 중국 난징시의 도시화된 Hexi 유역을 대상으로 빗물이용시설,

투수성 포장 정책 이행에 의한 침수심 변화를 분석하여, 두 가지 LID 정책을 실시하였을 때 침수 완화 효과가 9%이고, 단일 시도에서는 빗물이용시설은 0~1%, 투수성 포장 도로는 5~8%의 침수 완화 효과를 보여주었다. Sui and van de Ven(2022)는 미국 텍사스주 San Antonio 지역을 대상으로 식생체류지, 식생수로, 옥상녹화, 투수성 포장 기법을 적용하여, 4가지 LID 기법을 모두 조합한 시나리오에서는 7.9%, 단독 시행일 경우 투수성 포장 도로에서 2.5%으로 가장 많은 유출 저감효과를 가져옴을 보여주었다.

이러한 선행 연구들은 다양한 LID 기법을 사용하여 유출량, 침수심 등의 변화량으로 홍수 피해 저감 효과를 정량화하였다. 연구 지역이나 LID 기법 적용 면적에 따라 상이한 결과가 도출되었지만 LID 기법 중 투수성 포장 도로의 홍수 저감 효과가 뛰어나다는 결과가 다수였다. 선행 연구들은 각 대상 유역별 특성에 맞는 LID 정책들을 선정하고 홍수 저감 효과를 분석하였지만, LID 기법의 장점인 물순환 개선에 대한 연구가 부족하였다. 또한 LID의 효과를 분석한 연구들은 홍수 저감효과가 뛰어난 다른 정책들을 함께 분석하지 않았으며, 정책 의사결정 과정에 있어 중요한 요소인 경제적 비용에 대한 분석이 부족하였다.

우리나라 재해위험지역 정비사업의 예산 규모는 1998년부터 2022년 8월까지 국비가 대략 15조 4천만원에 이른다(Ministry of the Interior and Safety, 2022). 특히, 대부분의 재해 예방사업의 예산은 치수 분야에서 방대한 규모를 차지하고 있으나, 체계적이고 효율적으로 사용되지는 않고 있다(Joo et al., 2018). 환경부의 「한국 기후변화 평가보고서 2020」에서는 기후변화 적응대책의 효과와 실효성을 검토하기 위하여 기후변화 적응 경제성 평가 및 정책 우선순위 등을 발전방향으로 검토하였다. 이는 불확실한 기후 및 사회경제 여건 변화에 대비하기 위해서는 적응 정책의 비용과 효과를 정량적으로 평가할 필요성이 존재함을 의미한다(Chae et al., 2020; Chae et al., 2021).

따라서 본 연구에서는 극한 호우로 피해가 발생한 도시 유역을 선정하여 이미 시행된 정책과 더불어 계획 중인 기후변화 적응

정책을 추가로 이행할 때 저감되는 홍수 피해를 정량적으로 분석하여 정책의 효용성을 확인하고자 한다. 추가로 적용하는 정책들은 선행 연구를 기반으로 내수 배제 시설인 우수관거 용량 확대와 지속가능한 물순환 개선을 위한 LID기법을 선정하였다. 더불어 정책의 타당성 평가에 중요한 요소인 비용-편익 분석을 통해 홍수 대응 정책간 비교·분석을 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 대상 지역 및 강우 시나리오

본 연구의 대상 지역은 도림천 상류 유역의 서울대학교 관악캠퍼스로 지리적 위치는 Fig. 1(a)와 같이 서울특별시 관악구에 위치한다. 관악캠퍼스는 1970년대 건설되었으며, 도림천과 봉천천 유역의 상류인 관악산 중턱에 위치하여 집중호우로 인한 피해 발생 가능성이 크며, 실제로 2011년 7월과 2022년 8월에 내린 집중호우로 인하여 건물 및 도로가 파손되는 등 많은 경제적 피해가 발생하였다. Fig. 1(b)의 관악캠퍼스 지도를 살펴보면, 지도의 서쪽으로는 도림천 상류가 지나며 학교는 A부터 K까지 총 11개의 구역으로 나눌 수 있다. 이 중 기숙사 건물을 포함하고 있는 J와 K 구역은 봉천천으로 향하는 유역이고, 이를 제외한 A부터 I까지 9개의 생활권 구역은 도림천으로 향하는 유역이다(Park, 2015). 본 연구는 관악캠퍼스 내 강우시 도림천으로 흐르는 유역인 관악산 일부와 교내 생활권(A부터 I 구역) 구역과 관악구에 위치한 관악산 유역을 대상 지역으로 선정하여 총 265.5 ha 면적에 대하여 연구를 진행하였다. Fig. 1(c)는 최종 연구 유역에 해당하는 지역에 대한 토양도를 나타낸다.

연구에 사용된 강우 사상(event)은 관악[509] 방재기상관측소의 1997년부터 2021년까지의 시계열 자료 중 최대 일강우량인 2011년 7월 27일 강우(348.5 mm)를 포함하는 2011년 7월 26일부터 2011년 7월 29일까지 총 4일의 강우 사상으로 설정하였다. 해당 기간에는 총 501 mm 호우가 내렸고, 연구에 사용한 96시간의 시강우량과 기온 시계열 자료를 Fig. 2에 나타냈다.

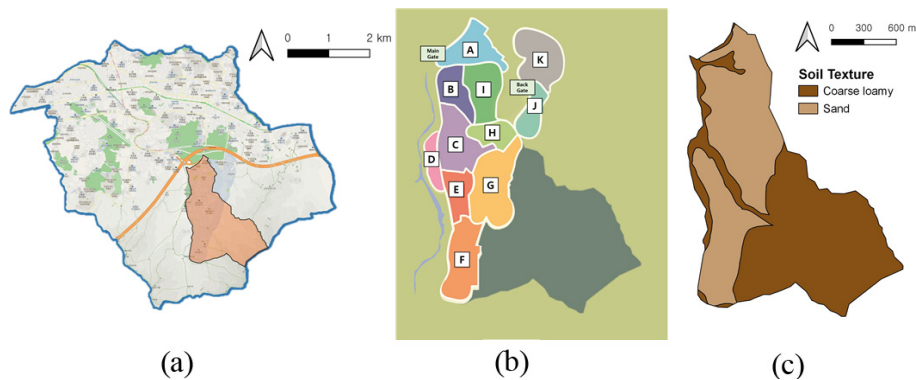


Fig. 1. Maps of Study Area: (a) Gwanak-Gu, (b) Seoul National University Gwanak Campus, (c) Soil Texture

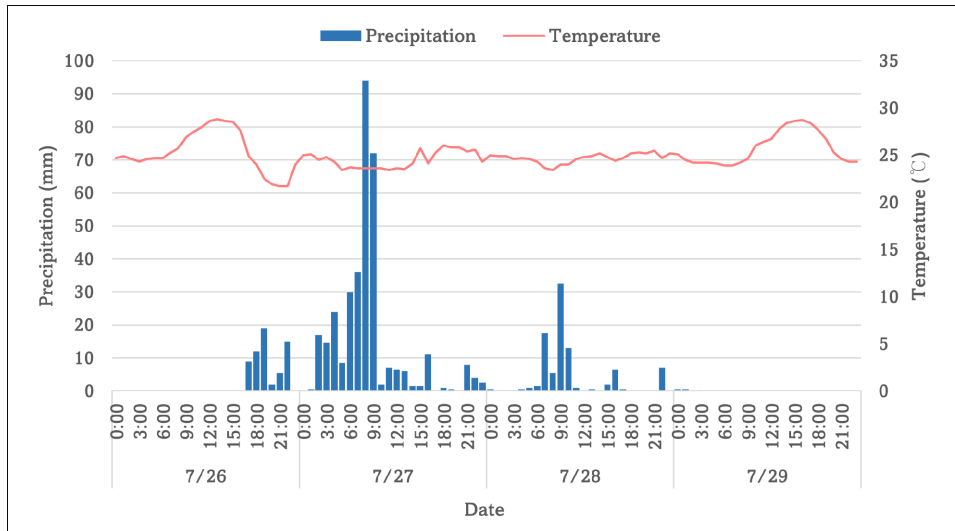


Fig. 2. Precipitation and Temperature Time Series Data of Gwanak Automatic Weather Station (2011/07/26-29)

2.2 SWMM 모형

본 연구에서는 Storm Water Management Model (SWMM) 을 사용하여 우수관거 용량 증대와 LID 기법 적용에 따른 유출량 변화를 모의하였다. SWMM은 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)에서 개발한 도시유출해석모형으로, 도시유역에 적용하기 적합하며 강우 사상에 따른 유출, 우수 및 하수관거, 배제 시설에 대한 계획, 분석 및 설계를 위하여 광범위하게 사용된다(Lewis and Michelle, 2022).

SWMM 모형은 강수, 기온 등과 같은 기상학적 인자와 유역의 물리적, 수문학적 특성 인자를 입력변수로 사용하며, 유역 정보는 관망 입력을 위한 우수관망도(1:2500), 고도 및 유역 경사 입력을 위한 수치지형도(1:5000), 불투수를 입력에 필요한 세분류 토지피복지도 등의 자료를 사용하여 얻을 수 있다(Kim and Kim, 2022).

SWMM 모형을 통해 구축한 대상지역의 유역도를 Fig. 3에 나타내었다. 모형 내 소유역은 총 193개로 구성되었고 우수관거 교체와 옥상녹화 설치에 따른 결과 분석에 용이하도록 분할하였다.

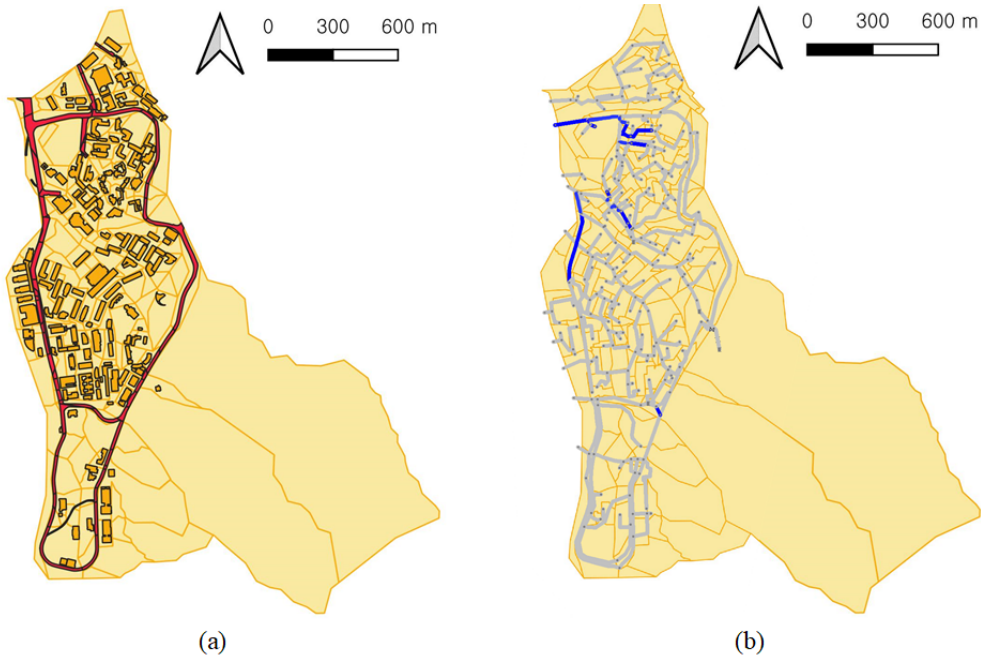


Fig. 3. Study Watershed Delineated in the SWMM Model: (a) Building and Road, (b) Sewer Enlargement System

Table 1. SWMM Model Set-up Characteristics and Input Parameter

Name	Number	Parameter	Units	Value
Sub-catchment	193	Area	ha	0
		%imprev	%	50
Node	246	N-Imprev	s/m ^{1/3}	0.05
		N-Perv	s/m ^{1/3}	0.08
Conduit	256	Dstore-Imprev	mm	1.9
		Dstore-Prev	mm	3.81-7.62
Weir	2	Suction Head	mm	60.96-110
Storage	4	Conductivity	mm/hr	10.92-29.97
		Initial Deficit	-	0.25

관망은 서울대학교에서 제공받은 우수관망도에 연결되어 있는 모든 관망들을 반영하였다. 서울대 내 설치되어 있는 4개의 저류조 중 두 개의 저류조(버플골 20,000 m³, 공대폭포 5,000 m³)는 2011년 8월 서울대학교에 발생한 집중호우로 인한 침수 피해 이후에 추가 설치된 시설이며, 제공받은 우수관망도면 상에는 존재하지 않으나 관련 보고서와 담당자의 정보에 기반하여 모형에 반영하였다. 모형의 매개변수들은 동일한 유역을 44개의 소유역으로 분류하고, Park(2015) 모의 결과를 참조하여 표면유출량, 침투량을 확인

하고 모형을 검증한 Kim and Kim(2022)의 연구를 통해 선정된 SWMM 모형 매개변수를 활용하였다. 본 연구의 SWMM 모형 구성과 매개변수를 Table 1에 정리하였다.

2.3 홍수 대응 정책 선정

홍수 피해 저감을 위한 대응 정책에는 홍수 예·경보 인프라 확충, 침수예방 수자원시설 설치, 댐 하천 설계기준 강화 등 다양한 방안들이 있다. 이러한 정책 중 연구 지역인 관악캠퍼스 유역의

Table 2. Green Roof and Permeable Pavement Parameters (Adapted by Kourtis et al., 2020)

Layer	Parameter	Units	Permeable Pavement Value	Green Roof Value
Surface	Berm height	mm	0	100
	Vegetation volume fraction	-	0	0.2
	Surface roughness	s/m ^{1/3}	0.015	0.25
	Surface slope	%	1	1
Soil	Thickness	mm	-	200
	Porosity	-	-	0.5
	Field capacity	-	-	0.4
	Wilting point	-	-	0.1
	Conductivity	mm/h	-	1000
	Conductivity slope	-	-	10
	Suction head	mm	-	50
Drainage met	Thickness	mm	-	100
	Void fraction	-	-	0.3
	Roughness	m/s ^{1/3}	-	0.015
Pavement	Thickness	mm	150	-
	Void ratio	Void/Solids	0.15	-
	Permeability	mm/h	500	-
Storage	Thickness	mm	400	-
	Void ratio	Void/Solids	0.3	-
	Seepage fate	mm/h	750	-

특성과 과거 홍수 피해 형태를 고려하여 연구에 적용할 정책들을 선정하였다. 관악캠퍼스 중 관악산을 제외한 토지는 학교 건물과 도로가 대다수를 차지하고 있어 불투수율이 높다. 또한, 유역 내 대용량 저류조 시설이 이미 존재하고 있어 추가적인 수자원 시설을 설치하는 계획을 수립하기 어렵다. 다음으로, 산 중턱에 위치하고 있는 대상 유역의 피해 형태를 살펴보면 강이 범람하는 외수 침수가 아닌 우수관거 배수능 부족에 의한 내수 침수가 주로 발생하였다. 따라서, 본 연구에 적용할 홍수 대응 정책은 LID 기법으로 불투수율을 낮추기 위한 투수성 포장과 옥상 면적이 큰 교육시설에 적용하기 적합한 옥상녹화 설치 방안을 선정하고, 내수 침수를 해결하기 위한 우수관거 용량 확대 방안을 포함한 총 3가지 정책을 선정하였다.

3가지 정책의 적용 시나리오의 반영은 해당 유역 내 설치 가능 면적대비 적용 비율을 임의로 가정하여 LID 기법의 경우 투수성 포장은 전체 도로 면적의 50%와 100% 적용, 그리고 옥상녹화는 건물 면적의 50%, 100% 적용을 가정하였다. LID 기법의 파라미터는 Table 2로 정리하였으며, 선행연구를 참고하여 설정하였다 (Kourtis et al., 2020). 우수관거 용량 확대 방안은 정책 미반영인 기준 시나리오(S1)의 시뮬레이션 결과를 분석한 후 우수관거 용량이 초과된 관거를 선정 후 관거 지름을 증량하는 방안을 선정하여

정책을 이행한 경우를 100%로 가정하였다. 정책 미반영인 S1 시나리오를 포함하여 3가지 정책에 대한 경우의 수를 조합한 총 18가지의 시나리오들의 정책 이행 비율은 Table 3로 정리하였다. 각 대응 정책들의 효과를 분석하기 위해, LID 기법(투수성 포장 도로, 옥상녹화)을 조합한 정책 시나리오(S1~S9)는 유역의 물순환 변화(증발량, 침투량 및 지표면 유출량 변화)와 침투유량 결과를 비교하고, LID 기법과 우수관거 확대 정책을 추가로 적용한 정책 시나리오(S10~S18)는 유역 밖으로 흐르는 유출량 변화를 비교하였다. 마지막으로, 모든 정책의 월류량 결과와 비용을 확인하였다.

2.4 정책 비용 계산

본 연구에서 홍수 대응 정책으로 선정한 LID 기법(투수성 포장 도로와 옥상 녹화 방안)과 우수관거 교체에 대한 비용은 선행 연구와 문헌들을 참고하였다. 선행연구들을 참고하여 각 정책별 비용이 산정되기 때문에, 대등한 비교를 위하여 동일한 연도의 가치로 변환하여야 한다. 이를 위해 소비자 물가 지수(Consumer Price Index, CPI)를 사용한 Eq. (1)을 이용하여(Alves et al., 2019; Kourtis et al., 2020) 현재가치로 변환하였다.

$$Value_{year A} = Value_{year B} \times (CPI_{year A} \div CPI_{year B}) \quad (1)$$

정책 비용 중 유지관리비용의 경우, 미래 시점에서 비용이 발생하게 된다. 미래 시점의 가치를 현재 시점의 가치로 비용을 환산하기 위한 방법으로 현재가치환산법을 적용하였다. 현재가치환산법은 미래의 특정 시점에서 발생하는 비용의 경우 Eq. (2)로 계산하는 현재가치환산계수(Present Worth Factor; PWF)를 해당 비용에 곱하고, 매년 동일하게 발생하는 비용의 경우 Eq. (3)으로 계산하는 연등가액현재가치환산계수(Present Worth of Annuity Factor; PWAF)를 해당 비용에 곱하여 현재가치로 환산하는 방법이다 (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2008).

$$PWF = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (2)$$

$$PWAF = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (3)$$

여기서 i 는 할인율, Eq. (2)의 n 은 현재 시점으로부터 미래의 비용 발생 시점까지의 기간, 그리고 Eq. (3)의 n 은 적용 년수를 나타낸다.

투수성 포장 도로 기법의 비용은 Jung et al.(2014)와 Baek et al.(2018)의 연구를 참고하였다. Jung et al.(2014)는 단지 내 투수성포장, 블록 포장 등 도로 포장별 선정기준을 제안하기

Table 3. Flood Mitigation Measures Application Scenarios: Application Ratio Per Scenarios (%)

Scenario	Permeable Pavement	Green Roof	Sewer Enlargement
1	0	0	0
2	0	50	0
3	0	100	0
4	50	0	0
5	50	50	0
6	50	100	0
7	100	0	0
8	100	50	0
9	100	100	0
10	0	0	100
11	0	50	100
12	0	100	100
13	50	0	100
14	50	50	100
15	50	100	100
16	100	0	100
17	100	50	100
18	100	100	100

위하여 포장방법별 생애주기비용 분석을 실시하였다. 포장 도로의 분석기간은 30년, 교체주기는 5년 혹은 10년으로 설정하였고, LH의 설계 및 견적팀에서 제시한 재료비 및 시공비를 바탕으로 투수 아스콘 포장의 설계비를 포함한 직접비 비용을 계산하여 초기공사비(7,091,972원/100 m²), 덧씌우기(건설공사비의 70%인 4,964,380원/100 m²), 유지관리비(건설공사비의 2%인 141,893원/100 m²)로 분석하였다. Baek et al.(2018)은 송산그린시티 동측 주거단지 친환경시범마을을 대상으로 투수성 포장 도로를 포함한 LID 기법 적용에 비용편익 분석을 실시하여, 도로면적 6000 m²에 적용할 투수성 포장 도로의 비용을 교체 주기 10년, 비용편익 분석 기간 40년을 설정하고 초기 공사비용(70,912원/m²), 덧씌우기(62,671원/m²), 유지관리비용(2,672원/m²)으로 산정하였다.

옥상 녹화 기법의 비용은 Yeo and Jung(2013) 연구를 참고하여 비교적 넓은 지역을 대상으로 한 옥상녹화 비용을 계산하였다. Yeo and Jung(2013)은 성북천, 정릉천 전체, 월곡천을 포함한 청계천 전체 면적을 대상으로 옥상녹화 조성을 위한 비용 산정 연구를 실시하여, 64건의 시공사례로 옥상녹화 조경면적과 사업비 관계에 대한 회귀식을 Eq. (4)와 같이 제안하였다.

$$C_{GR} = 560,546.40A_{GR}^{0.87105} \quad (4)$$

여기서 C_{GR} (원)는 설계비와 시공비를 포함한 옥상녹화 총사업비(공사비)이고, A_{GR} (m²)은 옥상녹화 면적을 의미한다. 식재관리와 구조물 안전을 위한 옥상녹화 유지관리비용은 설치비용 대비 2.727%으로 설정하였다.

마지막으로 우수관거 확대 비용은 환경부 자료를 참고하였다. 공사비와 설계비를 포함한 사업비는 Ministry of Environment(2018a)의 하수도 분야 보조금 편성 및 집행관리 실무요령에서 제시하고 있는 하수관로정비사업을 참고하였다. 하수관로 공사비는 m당 표준하수관로 시설비를 적용한 자료를 참고하여 콘크리트 관 경별 포장구간 비용으로 선정하였고, 설계비를 포함하기 위하여 시설부대비용을 더하였다. 유지관리비용의 경우, Ministry of Environment(2018b)의 하수도 계획 시 소규모하수처리시설 설치 적정성(경제성 평가 중심)평가에 관한 연구(제2차)를 참고하여, 13-15년도에 진행된 5개 지자체의 하수관로정비 임대형 민자사업의 운영비용 자료 중 유지관리비를 관로길이에 나누어 적용하였다.

3. 적용 결과

본 연구는 LID 기법과 우수 관거 교체 정책으로 시나리오를 조합하고 과거 홍수 사상을 적용하여 대상 유역에서의 물순환

개선과 홍수 피해 저감 효과를 분석하였다. LID 기법 정책 시나리오를 반영하여 증발량(Evaporation), 침투량(Infiltration) 및 지표면 유출량(Surface Runoff)의 변화로 물순환 개선 정도를 분석하고, 침투유출량(Peak Runoff)의 변화로 홍수 피해 저감 효과를 확인하였다. 관거 교체 정책을 추가 시행한 정책 시나리오 결과로는 유역 밖으로 흐르는 유출량(External Outflow)의 변화를 비교하였다. 최종적으로, LID 기법과 관거 교체 정책을 조합한 시나리오별 홍수 피해 저감 효과를 월류량(Flooding Loss)으로 확인하고, 비용 대비 저감 효과를 분석하였다.

3.1 LID 기법 정책에 따른 물순환 특성 변동

LID 기법 정책에 따른 연구 결과는 Fig. 4로 나타났다. 첫 번째로 증발량과 침투량의 결과를 살펴보면, 증발량은 옥상 녹화 정책을 100% 실시한 S3 시나리오에서 기준 시나리오 대비 10.64% 증가하여 가장 큰 증가폭이 나타났으며, 투수성 포장 정책을 실시한 S4와 S7 시나리오에서는 각각 0.37%와 0.85% 감소하였다. 옥상 녹화 정책의 경우, 지표면유출량의 일부가 관거로 유입되기 전 옥상녹화 면적 위에서 머무르는 지체 시간이 증가하게 되어 증발량이 증가하였다. 침투량의 경우, 증발량과 반대로 S7 시나리오에서 가장 많이 증가하여 기준 시나리오 대비 11.01% 증가하였고, S3 시나리오에서는 0.02% 감소하였다. 증발량은 옥상녹화의 영향에 따른 변화량이 가장 컸던 반면에, 침투량은 투수성 포장 도로 정책에 따른 가장 크게 나타났다. 투수성 포장 도로는 불투수율을 낮춰 침투량을 높이는 목적의 LID 정책이므로 침투량 변화에 가장 큰 영향을 주었으나, 옥상녹화의 경우 식생을 위한 저류량이 필요하여 정책을 반영할 시 침투량이 오히려 감소함을 확인하였다. 또한, 연구 유역에서 증발량에 비해 침투량 변화가 더욱 크게 나타났다. 이는 유역의 토양도인 Fig. 1(c)에서 확인할 수 있듯이, 유역의 토성이 입자크기가 크고 침투율이 커 배수가 원활한 수문학적 토양 특성을 가지고 있기 때문에 불투수율 변화가 큰 효과를 나타내는 것으로 사료된다.

지표면유출량의 경우, 두 가지 LID 정책이 모두 100% 반영된 S9에서 23.88%로 가장 많이 감소하였고, 이후 침투유출량과 동일한 순서로 S6, S8 시나리오에서 각각 21.17%와 16.67% 만큼 감소하였다. LID 정책을 모두 50% 적용한 S5 시나리오와 비교해보면, 지표면유출량은 투수성 포장 정책을 100% 시행으로 증가시킨 S8 시나리오의 경우 S5 대비 2.94% 감소하였고, 옥상 녹화 정책 비율을 100% 시행으로 증가시킨 S6 시나리오의 경우 S5 대비 7.45% 감소하였다. LID 정책을 모두 시행할 경우, 하나의 정책의 적용 비율을 50%에서 100%으로 증가시키는 경우의 지표면유출량 저감 효과는 침투유출량과 동일하게 옥상 녹화에서 더욱 크게 나타남을 보여준다. 이를 통해, LID 정책 미시행 기준 시나리오에서

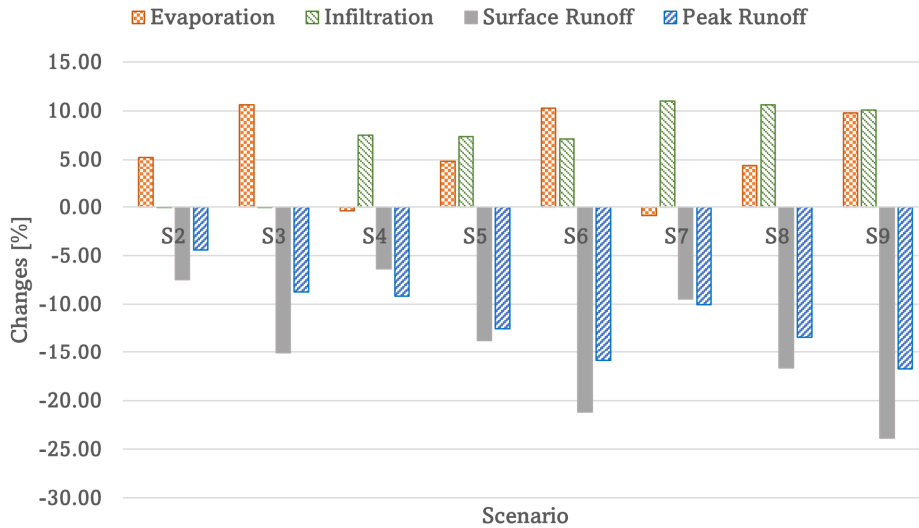


Fig. 4. Percent Changes in Evaporation, Infiltration, Surface Runoff and Peak Runoff for LID Measures

하나의 LID 기법을 적용하는 경우의 효과와 LID 정책 중 하나가 이미 시행된 시나리오에서 추가로 정책 적용 면적을 증가시키는 경우의 효과가 상이하게 나타남을 확인하였다.

침투유출량은 투수성 포장과 옥상 녹화 정책 모두 100% 반영된 S9 시나리오에서 기준 시나리오 대비 가장 많은 비율인 16.76% 감소하였다. 다음으로는 S9 시나리오에서 투수성 포장 정책을 50%로 감소시킨 S6과, 옥상녹화 정책을 50%로 감소시킨 S8이 순서대로 15.89%와 13.41% 만큼 침투유출량이 감소하였다. 침투유출량이 가장 적게 변화한 시나리오는 옥상 녹화 정책이 50% 반영된 S2 시나리오로 침투유출량이 기준 시나리오 대비 4.38% 감소하였다. 두 가지의 LID 정책 중 하나를 단독으로 시행한 경우, 정책 적용 비율에 관계없이 투수성 포장 도로가 옥상녹화 정책에 비해 침투유출량을 더 높은 비율로 저감시켰다. 투수성 포장 도로의 경우, 강우량 일부가 즉시 침투되어 유입량이 옥상녹화보다 적다. 또한, 옥상녹화는 저장 시설의 용량에 한계가 있어 저장할 수 있는 양을 넘는 강우가 지속될 때, 저장 시설 내 유량이 유출되는 경우가 발생하게 되어 투수성 포장 도로보다 침투유출량이 크게 된다. 다음으로, 두 가지 정책이 동시에 적용하여 시행 비율을 증가시킬 때의 결과를 비교하였다. LID 기법 정책을 모두 50% 적용한 S5 시나리오에서 각 정책을 100%로 증가한 경우를 살펴보면, 옥상녹화 정책을 100% 증가시킨 S6 시나리오가 투수성 포장 정책을 100%로 증가시킨 S8 시나리오에 비해 2.48% 더 높은 저감 효과가 나타났다. 정책 비율을 50%에서 100%로 증가시키는 경우, 옥상녹화가 투수성 포장 도로보다 더 큰 효과를 나타낸다. 투수성 포장 정책은 침투량을 증가시키고 유입량을 줄어든다 하여 침투유출량이 줄어드는 효과가 나타나고, 옥상녹화 정책은 옥상녹화 시설에

Table 4. Flooding Loss Total Volume and Percentage Compared to Existing Condition (S1)

Scenario	Flooding Loss	
	Total Volume (10 ⁶ ltr)	Percentage (%)
S1	70.98	-
S2	68.08	-4.09
S3	65.06	-8.34
S4	69.27	-2.41
S5	67.32	-5.16
S6	62.21	-12.36
S7	67.12	-5.45
S8	65.14	-8.23
S9	59.97	-15.52

설치된 저장 시설에서 유량이 머무르는 지체시간이 증가하게 되기 때문에 침투유출량이 줄어들게 된다.

도시 침수의 큰 피해 원인인 맨홀에서 역류하는 월류량의 저감 정도를 Table 4에 정리하였다. 월류량은 지표면 유출량과 침투유출량과 동일하게 두 가지의 LID 기법 정책이 모두 100% 반영된 시나리오에서 기준 시나리오 대비 15.52%로 가장 많이 감소하였다. 두 가지 정책 중 하나를 단독으로 시행한다면, 침투유출량과 반대로 옥상녹화가 투수성 포장 도로보다 더 많은 양의 월류량을 저감시켰다. 관거 사이에서 역류하게 되는 월류량은 관거로 유입되는 양에 따라 변하게 되는데, 옥상녹화 정책은 저류 시설을 통해 유량을 지체시킴으로써 시간당 유입량을 줄어든다.

Table 5. External Outflow Total Volume and Change Compared to Pre-Implementation of Sewer Enlargement Measure

Scenario	External Outflow (10 ⁶ ltr)	
	Total Volume	Change
S10	636.02	+9.00
S11	632.07	+8.93
S12	622.80	+9.04
S13	593.04	+9.17
S14	587.76	+9.29
S15	579.55	+9.74
S16	573.20	+8.79
S17	570.34	+8.90
S18	564.95	+9.07

3.2 관거 확대 정책에 따른 물순환 특성 변동

SWMM 모델에서 강우가 내린 유역의 유출량은 유역에 설치된 LID 시설을 모두 통과한 이후 관거로 유입된다. 침투유출량, 지표면 유출량, 증발량과 침투량은 모두 관거로 유입되기 이전의 단계에서 발생하는 수문학적 변화로 관거 확대 정책 여부에 관계없이, LID 시설 정용에 의해서 영향을 받는다. 이에 반해, 관거 확대 정책에 따른 효과는 유량이 관거에 유입된 이후 단계에서 나타남으로, 유역 밖으로 배수되는 유출량 결과로 분석하였다. 유역 밖으로 흐른 유출량 결과는 Table 5와 Fig. 5로 정리하였고, 관거 확대 정책 이행 여부에 따른 차이(관거 확대 정책 이외의 정책 조합은 동일한 시나리오간 비교를 의미함, 예를 들어, S10행의 3번째 열은 S1과 S10 결과값의 차이, S18 행의 3번째 열은 S9와 S18

결과값의 차이)를 Table 5에 함께 정리하였다.

유역 외부로 흐른 유출량은 2가지 시나리오에서만 증가하는 결과를 나타냈다(Fig. 5). 우수 관거 확대 정책을 단독으로 시행한 S10에서 1.44% 증가하였고, S10 시나리오에 옥상 녹화를 50% 반영한 S11에서 0.81% 증가하였다. 관거의 직경을 확장한 경우에는 관거를 통해 흐르는 유량이 증가하고 유역 내 배수 시스템의 흐름이 원활하기 때문에 유역 밖으로 흐르는 유출량이 증가하게 된다. 옥상 녹화 시설을 설치한 경우에는 증발량이 증가하지만 전체 유량에 비해 매우 적은 양이며, 초기 토양 포화도로 인한 초기 저장량이 강우량과 더해져 유입량을 증가시키게 되어 유역 밖으로 흐르는 유출량이 증가하게 된다. 유역 외부로 흐른 유출량은 투수성 포장 도로 정책이 적용된 모든 시나리오에서 감소하였고, 가장 많이 감소한 시나리오는 옥상 녹화와 투수성 포장 도로가 모두 100% 시행된 S9 시나리오로 11.34% 감소하였다. 이는 투수성 포장 도로 정책에 의해 유역 내 침투량이 증가하고, 이로 인해 배수 시스템으로 흐르는 유출량이 줄어들어 유역 외부로 흐르는 유출량 또한 줄어들게 되기 때문이다.

우수관거 확대 정책을 적용한 홍수 저감 효과로 맨홀에서의 저장된 월류량을 Fig. 5에 나타냈다. 월류량이 가장 많이 저감된 시나리오는 모든 정책을 최대로 적용한 S18로 기준 시나리오 대비 28.45% 감소하였다. 감소된 비율은 S15, S12, S17의 순서로 관거 교체 정책을 포함한 시나리오들에서 월류량 저감 효과가 높게 나타났다. LID 기법 효과와 비교하면, 옥상녹화와 투수성 포장 도로 정책을 모두 100% 반영한 S9 시나리오를 제외한 나머지 시나리오들은 모두 우수관거 확대 정책 반영 시나리오보다 월류량이 많이 발생하였다. 우수관거 확대 정책 전후의 월류량과 유역

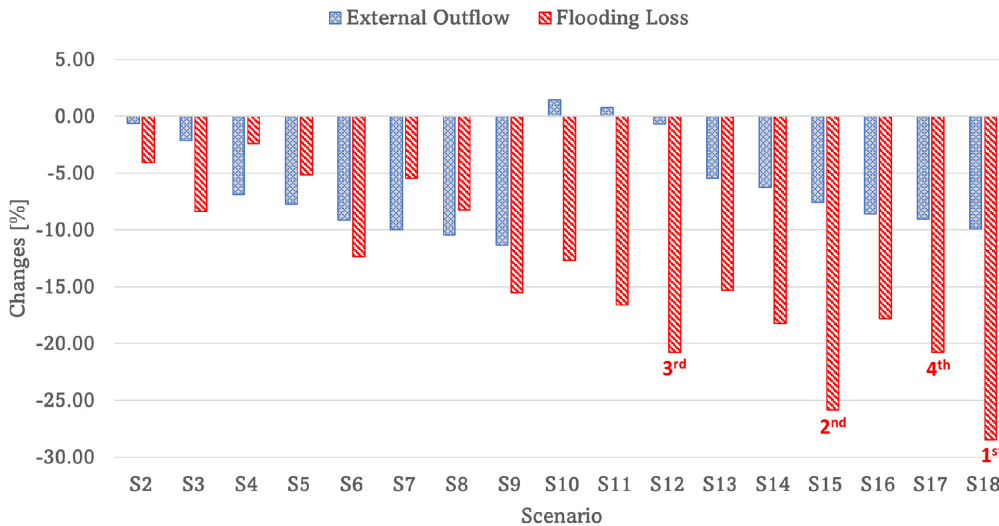


Fig. 5. Percent Changes in External Outflow and Flooding Loss at Node of the System

외부로 흐른 유출량이 거의 동일하였다. 이는 LID 기법만 적용하였을 때 맨홀에서 월류했던 월류량이 우수관거 확대 정책을 시행하며 유역 외부로 배수된 결과를 보여 준 것이다. 이는 우수관거 확대 정책이 유역 내 도시 침수 저감에 효과적임을 보여주는 동시에 유역 밖으로 흐른 유출량은 하류 하천의 범람 위험을 증가시킬 수도 있다는 점을 시사하며, 홍수 대응 정책을 단일화하여 적용할 때 발생할 수 있는 문제점을 보여준다.

3.3 홍수 대응 정책 경제적 분석

3.3.1 비용 분석

홍수 대응 정책의 비용을 비교하기 위한 기준 연도는 2022년으로 설정하였다. 선행연구의 특정 연도 기준으로 계산된 모든 비용들은 통계청에서 제공하는 소비자 물가 지수를 Eq. (1)에 넣어 2022년 가치로 변환하였다. 덧씌우기와 유지관리 비용은 공사시점이 아닌 미래시점에 발생하게 되므로, 해당하는 미래 가치를 현재가치로 환산하는 과정에서 필요하여 덧씌우기 비용은 Eq. (2), 유지관리 비용은 Eq. (3)을 적용하였다. 수자원부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정 보완 연구(제4판)와 선행연구를 참고하여 식에 필요한 매개변수인 할인율과 유지관리 기간은 각각 5.5%과 30년으로 설정하였다(Korea Development Institute, 2008; Chui et al., 2016; Kourtis et al., 2020).

투수성 포장 도로 정책에 필요한 비용은 초기공사비, 덧씌우기(10년 교체주기, 총 2회 진행), 유지관리비(초기공사비의 2%)를 합산하여 계산하였다. 옥상녹화 정책의 비용은 시공비와 설계비를 포함한 공사비와 유지관리비(2.727%)를 더하였다. 마지막으로 우수관거 확대 정책은 기준 시나리오 S1의 SWMM 모델 시뮬레이션 결과를 바탕으로 월류량이 발생한 관거를 대상으로 교체하였다. 관거 내 유출이 관거용량을 초과하는 관거를 우선 선정하였지만, 1차 교체 대상 관거만 확대하고 유출 방향으로 연결된 후속 관거들의 용량을 적절히 확대하지 않는다면 출구까지 원활한 흐름을 유지할 수 없는 경우가 존재할 수 있다. 따라서, 1차 교체 대상

관거 다음에 연결된 관거들 중 1차 교체 대상 관거보다 직경이 작은 관거들을 2차 교체 대상 관거로 선정하였다. 관거의 관경에 따른 설치 비용은 100 m 간격으로 구분되어 있어, 이를 반영하여 교체 대상 관거의 관경은 기존 450 mm은 500 mm로, 기존 500 mm와 600 mm은 각각 600 mm와 700 mm로 확대하였다. 정책별 비용 분석을 위한 정보와 설치 비용에 대한 분석 결과는 Table 6으로 정리하였다.

3.3.2 비용 대비 월류량 저감 분석

홍수 대응 정책의 비용 대비 월류량 저감 효과를 Fig. 6으로 살펴보면, S18 시나리오는 홍수 피해 저감 효과는 가장 좋으나, 모든 정책이 100% 시행된 만큼 비용 또한 가장 크게 나타났다. 우수관거 확대 정책만을 시행한 S10 시나리오는 비용 대비 홍수 피해 저감에 가장 좋은 효과를 보였다. LID 기법은 정책을 적용할 때 도로와 건물 면적의 50%, 100% 비율로 인입로 설정하였으나, 우수관거 확대의 경우 시뮬레이션을 통해 기존 관거 중 용량이 초과하는 일부 관거만을 교체하였기 때문에, 효율적인 적용을 이행한 효과로 인해 LID 기법에 비해 비용이 적게 산정된 측면이 있다.

그래프의 세로축 아래 방향으로 적용 비용이 적어지고, 가로축 오른쪽 방향으로 갈수록 홍수 저감 효과가 크므로, 그래프의 오른쪽 하단에 가까울수록 홍수 대응 정책의 이상적인 대안으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 6의 빨간 점선 안에 있는 4가지 정책 시나리오들이 두 가지 측면을 모두 고려한 측면에서 상대적으로 우수한 결과를 보여주었다. 이 중에서 오른쪽 하단에 가장 가까운 시나리오는 S16으로 투수성 포장 도로 100%와 우수관거 확대 정책 100%가 시행된 경우이다. S16 시나리오는 비용 대비 월류량 저감 효과는 우수하나, 침투유출량 및 지표면유출량의 저감 정도가 낮으며, 증발량을 감소시킨다. S16 시나리오 뿐만 아니라, 우수관거 교체 정책만을 시행하는 시나리오(S10)는 가장 적은 비용으로 홍수 저감 효과가 존재하여 비용 대비 효과가 가장 좋은 정책으로

Table 6. Information for Cost Analysis of Flood Mitigation Policies

Classification	Units	Permeable Pavement	Green Roof	Sewer Enlargement
Area	m ²	107,146	252,925	-
Length	m	-	-	971
Discount rate	%	5.5	5.5	5.5
Project lifetime	year	30	30	30
Initial installation cost	10 ⁶ won	7,599	32,043	1,147
Overlay cost	10 ⁶ won	4,937	-	-
Management cost	10 ⁶ won	261	12,700	1,053
Total	10 ⁶ won	12,786	44,743	2,200

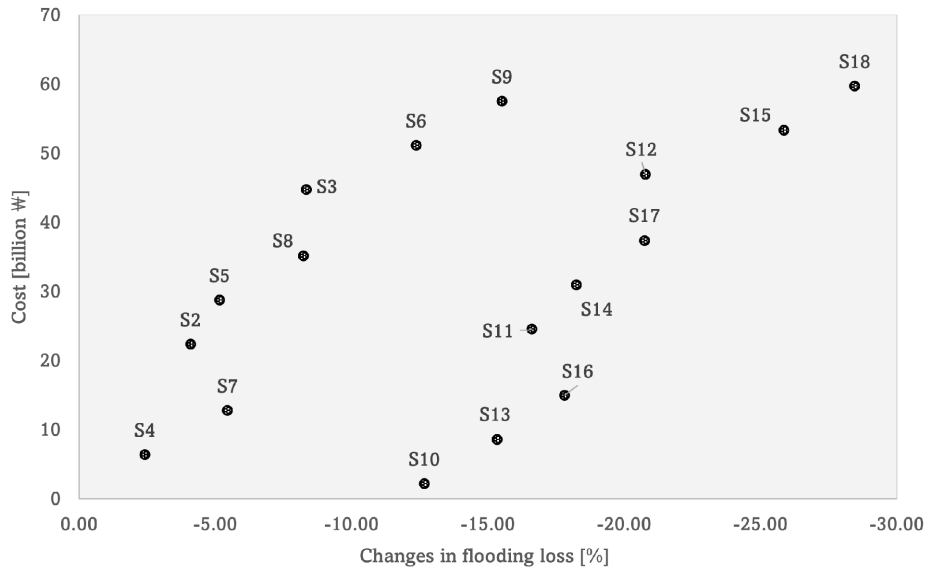


Fig. 6. Changes in Flooding Loss versus Cost across All Flood Mitigation Scenarios

보여질 수 있다. 그러나, 유역 외부로 흐른 유출량이 증가하여 하류에 하천 범람을 야기시킬 수 있으며, 증발량과 침투량에는 아무런 변화가 없어 건전한 물순환에 효과가 없다.

4. 결론

홍수 대응 정책은 지역 맞춤형으로 지속가능한 방향으로 수립되어야 하며, 이를 효율적으로 적용하기 위해서는 유역별 특성과 비용을 함께 고려하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 과거 극한 호우로 인해 홍수 피해가 발생한 도시 유역을 대상으로 선정하고 유역 특성을 고려하여 적용 가능한 홍수 대응 정책을 선정한 후 SWMM 모형 구축을 통해 각 정책 시나리오별 홍수 저감 효과와 비용-편익 분석을 통해 정책별 효용성을 비교·분석하였다. 대상 유역에서는 주로 내수 침수 형태로 홍수 피해가 발생하였으므로, 노드(맨홀)에서의 월류량 저감 효과를 통하여 정책을 비교하였다. 또한, 유역 외부로의 유출량, 증발량, 침투량, 표면유출량 변화를 분석하여 홍수 정책들이 유역에 미치는 영향을 확인하였다. 정책별 경제적 비용은 공사비용과 30년 운영기간에 따른 운영비용으로 계산하였다. 홍수 대응 정책 시나리오들의 홍수 저감 효과와 경제적 비용을 분석한 결과, 우수 관거 용량 확대 정책이 소요 비용 대비 높은 저감 효과를 보였다. LID 정책 중에는 투수성 포장 보다 옥상 녹화 정책 시행이 상대적으로 높은 비용이 산정되었지만 우수한 저감 효과를 보였다.

비용 대비 홍수 저감 효과를 고려하여 가장 이상적인 대안으로 선정될지라도, 물순환 개선에 부정적인 영향을 가지는 정책 시나리

오들도 존재한다. 연구 결과를 토대로 최적의 정책을 선정할 때, 월류량 저감 효과만을 정량적으로 비교하는 분석에는 주의가 필요하다. 또한, 홍수 저감 효과 대비 비용이 가장 적은 경우에도 유역의 물순환 회복에 긍정적인 영향을 미치지 못하는 경우가 존재하며, 이와 더불어 유역 하류로 전이되는 유출량의 증가와 같은 하류에 미치는 영향을 고려해야 한다.

본 연구는 도시 유역의 지형학적 특성을 반영한 도시유출 모형 구축을 통해 홍수 대응 정책에 따른 피해 저감 효과 뿐만 아니라 비용적인 측면을 고려하여 정책을 비교 분석하는 연구 방법론을 제안하였다. 경제적 비용 대비 피해 저감 효과의 분석은 효율적인 홍수 대응 정책을 선정하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다. 대응 정책 별 피해 저감 효과를 분석할 때 유역 내 물수지 변화량을 분석함으로써, 홍수 피해 저감 효과 뿐만 아니라 물순환 개선이라는 지속가능 측면의 물관리 정책을 고려하였다.

건전한 물환경 조성은 국가 기후변화 적응대책의 물관리 계획수립 방향 중 하나로 홍수 대응의 측면에서 함께 고려해야 할 정책이다. 추가적으로, 연구 유역의 지리적 위치는 관악산을 포함한 도립천 상류에 위치하고 있어 유역의 유출량 증가가 도립천 하류 하천까지 이어질 수 있음을 유의해야 한다. 앞서 서술한 바와 같이, 외부로 흐른 유출량의 증가는 유역 내 월류량을 감소시켜 내수 침수 피해를 수치적으로 줄인다고 판단할 수 있으나, 외부로 흐른 유출량이 최종적으로 하류로 흘러 지역의 홍수 피해를 증가시킬 수 있다. 또한 LID 정책은 강우시 침투유출량을 저감시킬 수 있으며 유출지역의 효과가 있으므로 다른 홍수관리 정책과 함께 적용한다면 해당 유역 뿐 아니라 하류에서 발생할 수 있는 홍수 피해 또한

함께 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 상류 유역에서 시행되는 홍수 대응 정책은 하류 하천에서의 범람 위험이 존재함을 발견하여 정책 계획에 있어 유역 내 물순환 변화와 함께 하류(외부) 유출량을 분석해야 함을 시사하였다. 다양하게 제시되는 정책들을 유역 특성에 맞게 선정하고, 비용-편익 측면에서 적절히 조합된 정책 시나리오를 선정함으로써 각 정책에 내재된 위험요소를 상쇄할 수 있음을 확인하였다.




본 연구 결과는 홍수 대응 정책의 효과를 정량적으로 분석하는 의의를 가지나, 실제 정책을 적용하는데 있어 현장의 다양한 조건을 아주 상세하게 반영하기 위해서는 좀 더 방대한 현장 조사 자료가 필요하다. 또한, 식생체류지, 침투트렌치 등 다양한 LID 기법의 적용이 가능하지만, 주요 기법인 투수성 포장 도로와 옥상 녹화 두 가지 대표 기법만을 시범 적용했다는 아쉬움이 있다. 강우 시나리오의 경우 과거 자료를 사용하여 다양한 미래 기후변화 시나리오 기반의 강우 전망 결과를 반영하지 못했다.

앞으로 향후 연구에서는 미래 기후변화 시나리오 기반 빈도분석을 실시하여 미래 기후 변동성을 고려한 정책의 효과 분석이 필요할 것으로 생각된다. 그리고 정책의 시행에 있어 우수 관거 용량의 적정 설계, LID 기법의 매개변수 최적화 및 적용 비용 확대 등 세부적으로 고려해야 할 조건 및 현장 여건, 다양한 법·제도 등 제약사항 들을 반영하여 보다 구체화된 정책 대안을 제시하고, 의사결정 기법을 연계하여 유역의 지속가능한 홍수 대응정책을 제안할 수 있는 연구가 필요할 것이다.

Acknowledgements

This work was supported by the 2022 Research Fund of the University of Seoul.

ORCID

Hee Won Jee  <https://orcid.org/0009-0000-1116-7234>
 Hyeonju Kim  <https://orcid.org/0009-0003-7595-4255>
 Seung Beom Seo  <https://orcid.org/0000-0001-9819-6555>

References

Alves, A., Gersonius, B., Kapelan, Z., Vojinovic, Z. and Sanchez, A. (2019). "Assessing the Co-Benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management." *Journal of Environmental Management*, Elsevier, Vol. 239, pp. 244-254, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.036>.

Bae, K., Ahn, J., Choi, Y., Kim, B. and Yi, K. (2019). "Analysis of the improved drainage capacity of urban basins at an LID

facility." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 19, No. 1, pp. 311-322, <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.1.311> (in Korean).

Baek, J., Lee, S., Shin, H. and Kim, H. (2018). "Analysis of effectiveness for water cycle and cost-benefit according to LID application method in environmentally-friendly village." *Journal of Korean Society on Water Environment*, KSWE, Vol. 34, No. 1, pp. 57-66, <https://doi.org/10.15681/KSWE.2017.34.1.57> (in Korean).

Chae, Y., Park, J., Choi, Y., Kim, D., Yang, Y., Kim, H., Seo, S. and Seong, J. (2020). *Building and assessing adaptive capacity to climate change for the national risk management: Economic analysis of the extreme climate risks*, Korea Environment Institute (in Korean).

Chae, Y., Park, J., Choi, Y., Yang, Y., Kim, H., Seo, S., Seong, J. and Cho, J. (2021). *Building and assessing adaptive capacity to climate change for the national risk management: Economic analysis of the extreme climate risks*, Korea Environment Institute (in Korean).

Chui, T. F. M., Liu, X. and Zhan, W. (2016). "Assessing cost-effectiveness of specific LID practice designs in response to large storm events." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 533, pp. 353-364, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.011>.

Government of Korea (2020a). *The 1st master plan for national water management (2021-2030)* (in Korean).

Government of Korea (2020b). *The 3rd national climate change adaptation plan (2021-2025)* (in Korean).

Han, M. Y., Kum, S. Y., Mun, J. S. and Kwak, D. G. (2012). "The effect of decentralized rainwater tank system on the reduction of peak runoff-A case study at M village." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 1, pp. 65-73, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2012.45.1.65> (in Korean).

Hu, M., Sayama, T., Zhang, X., Tanaka, K., Takara, K. and Yang, H. (2017). "Evaluation of low impact development approach for mitigating flood inundation at a watershed scale in China." *Journal of Environmental Management*, Elsevier, Vol. 193, pp. 430-438, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.020>.

Joo, H. J., Kim, S. J., Lee, M. J. and Kim, H. S. (2018). "A study on determination of investment priority of flood control considering flood vulnerability." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 18, No. 2, pp. 417-429, <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.2.417> (in Korean).

Jung, J.-S., Park, Y.-B. and Sohn, J.-R. (2014). "A case study of life cycle cost analysis on pavements in apartment complex." *LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs*, LHRI, Vol. 5, No. 4, pp. 297-303, <https://doi.org/10.5804/LHIJ.2014.5.4.297> (in Korean).

Kim, H. and Kim, G. (2021). "An effectiveness study on the use of different types of LID for water cycle recovery in a small catchment." *Land*, MDPI, Vol. 10, No. 10, 1055, <https://doi.org/10.3390/land10101055>.

Kim, H. and Kim, Y.-O. (2022). "A study on changes in water cycle characteristics of university campus catchment:

- focusing on potential evapotranspiration improvement in Mt. Gwanak catchment.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 55, No. 12, pp. 1077-1089, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2022.55.12.1077> (in Korean).
- Kim, D., Kim, Y.-O., Jee, H. W. and Kang, T. H. (2020). “Development of index for flood risk assessment on national scale and future outlook.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 53, No. 5, pp. 323-336, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2020.53.5.323> (in Korean).
- Korea Development Institute (2008). *A study on modifications of preliminary feasibility analysis standard guideline (4th Edition)* (in Korean).
- Kourtis, I. M., Tsihrintzis, V. A. and Baltas, E. (2020). “A robust approach for comparing conventional and sustainable flood mitigation measures in urban basins.” *Journal of Environmental Management*, Elsevier, Vol. 269, 110822, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110822>.
- Lee, J. S. and Choi, H. I. (2016). “Flood vulnerability index estimated by comparing analysis methods of flood damage data.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 16, No. 2, pp. 427-435, <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2016.16.2.427> (in Korean).
- Lee, S. H., Kim, J. S. and Kim, S. J. (2021). “Analysis of applicability of the detention in trunk sewer for reducing urban inundation.” *Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering*, KSEIE, Vol. 8, No. 1, pp. 44-53, <https://doi.org/10.17820/eri.2021.8.1.44> (in Korean).
- Lewis, A. R. and Michelle, A. S. (2022). *Storm Water Management Model user's manual version 5.2*, U.S. Environmental Protection Agency, Ohio, USA.
- Mei, C., Liu, J., Wang, H., Yang, Z., Ding, X. and Shao, W. (2018). “Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed.” *Science of the Total Environment*, Elsevier, Vol. 639, pp. 1394-1407, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.199>.
- Ministry of Environment (2016). *Guideline of design of low impact development* (in Korean).
- Ministry of Environment (2018a). *Operational guidelines for grant allocation and execution management in the sewerage sector* (in Korean).
- Ministry of Environment (2018b). *A study on evaluation of the adequacy (focused on the economic evaluation) in small-scale sewage treatment plants planning (2nd edition)* (in Korean).
- Ministry of Environment (2022). *Sewerage design standard* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008). *Life Cycle Cost (LCC) analysis and evaluation guidelines* (in Korean).
- Ministry of the Interior and Safety (2022). *Allocation of 790.5 billion won for recovery funds for August rainfall-induced flooding damage in Seoul and Gyeonggi*, Ministry of Culture, Sports and Tourism, Available at: <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148905747> (Accessed: September 19, 2023) (in Korean).
- National Assembly Research Service (2020). *Urban flood management strategies for response to climate change*, Nars Brief, Vol. 62 (in Korean).
- Park, J. (2015). *Hydro circulation design proposal considering water cycle soundness on uppermost stream basin - Focused on Seoul National University in Gwanak district, South Korea*, Msc. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea (in Korean).
- Park, J. H., Kim, S. H. and Bae, D. H. (2019). “Evaluating appropriateness of the design methodology for urban sewer system.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 52, No. 6, pp. 411-420, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2019.52.6.411> (in Korean).
- Ryu, J. and Kang, H. S. (2020). *Policy research roadmap for desirable integrated water management*, Korea Environment Institute, Research Reports 2023-03-01 (in Korean).
- Shin, D. S., Park, J. B., Kang, D. K. and Jo, D. J. (2013). “An analysis of runoff mitigation effect Using SWMM-LID model for frequently inundated basin.” *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 13, No. 4, pp. 303-309 (in Korean).
- Sobieraj, J., Bryx, M. and Metelski, D. (2020). “Stormwater management in the city of Warsaw: A review and evaluation of technical solutions and strategies to improve the capacity of the combined sewer system.” *Water*, MDPI, Vol. 14, No. 13, <https://doi.org/10.3390/w14132109>.
- Sui, X. and van de Ven, F. (2022). “The influence of Low Impact Development (LID) on basin runoff in a half-urbanized catchment: A case study in San Antonio, Texas.” *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 616, 128793, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128793>.
- Yeo, K. and Jung, Y. (2013). “An analysis of effect of green roofs in urbanized areas on runoff alleviation and cost estimation.” *Seoul Studies*, The Seoul Institute, Vol. 14, No. 2, pp. 161-177, <https://doi.org/10.23129/seouls.14.2.201306.161> (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, <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2020.53.8.583> (in Korean).