



Prioritizing the target watersheds for permeable pavement to reduce flood damage in urban watersheds considering future climate scenarios

Chae, Seung Taek^a · Song, Young Hoon^b · Lee, Joowon^c · Chung, Eun-Sung^{d*}

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

^bPh.D. Student, Department Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

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

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

Paper number: 21-119

Received: 2 December 2021; Revised: 4 January 2022; Accepted: 5 January 2022

Abstract

As the severity of water-related disasters increases in urban watersheds due to climate change, reducing flood damage in urban watersheds is one of the important issues. This study focuses on prioritizing the optimal site for permeable pavement to maximize the efficiency of reducing flood damage in urban watersheds in the future climate environment using multi-criteria decision making techniques. The Mokgamcheon watershed which is considerably urbanized than in the past was selected for the study area and its 27 sub-watersheds were considered as candidate sites. Six General Circulation Model (GCM) of Coupled Model Intercomparison Project 6(CMIP6) according to two Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios were used to estimate future monthly precipitation for the study area. The Driving force-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) framework was used to select the water quantity evaluation criteria for prioritizing permeable pavement, and the study area was modeled using ArcGIS and Storm Water Management Model (SWMM). For the values corresponding to the evaluation criteria based on the DPSIR framework, data from national statistics and long-term runoff simulation value of SWMM according to future monthly precipitation were used. Finally, the priority for permeable pavement was determined using the Fuzzy TOPSIS and Minimax regret method. The high priorities were concentrated in the downstream sub-watersheds where urbanization was more progressed and densely populated than the upstream watersheds.

Keywords: DPSIR, Fuzzy TOPSIS, General circulation model, Minimax regret, Permeable pavement

미래 기후 시나리오를 고려한 도시 유역 홍수 피해 저감을 위한 투수성 포장 시설 대상 유역 우선순위 선정

채승택^a · 송영훈^b · 이주원^c · 정은성^{d*}

^a서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정, ^b서울과학기술대학교 건설시스템공학과 박사과정,

^c서울과학기술대학교 건설시스템공학과 학사과정, ^d서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수

요 지

기후변화로 인한 도시유역의 물 관련 재해의 심각성이 증가함에 따라 미래 기후 환경에서 도시 유역의 홍수피해를 줄이는 것은 중요한 문제 중 하나이다. 본 연구는 다기준의사결정기법을 이용하여 미래 기후 환경에서 도시 유역의 홍수 피해 저감 효율을 극대화하기 위해 투수성 포장 시설을 설치하기 위한 지역의 우선순위를 선정한다. 과거에 비해 도시화가 많이 진행된 목감천 유역을 대상유역으로 선정하였으며, 목감천 유역의 27개 소유역을 투수성 포장 시설의 설치 가능지역으로 하였다. 2개의 Shared Socioeconomic Pathway (SSP) 시나리오에 따른 Coupled Model Intercomparison Project 6(CMIP6)의 6개 전지구모형(General Circulation Model, GCM)을 사용하여 연구대상지의 미래 월 강수 자료를 추정했다. 투수성 포장의 우선순위를 결정하기 위한 수량 평가 기준은 Driving force-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) 체계를 토대로 선정하였으며, 평가 기준별 투수성 포장 시설의 평가값은 국가통계자료와 Storm Water Management Model의 모의 값을 사용했다. 최종적으로 Fuzzy TOPSIS 및 Minimax regret 방법을 사용하여 투수성 시설을 설치하기 위한 지역의 우선순위를 선정했다. 결국 우선순위가 높은 지역은 목감천 유역의 상류 유역에 비해 도시화가 많이 진행되었고 인구밀도가 높은 하류유역에 집중되었다.

핵심용어: DPSIR, Fuzzy TOPSIS, 전지구모형, Minimax regret, 투수성 포장

*Corresponding Author. Tel: +82-2-970-9017

E-mail: eschung@seoultech.ac.kr (E.-S. Chung)

1. 서론

기후 변화로 인한 홍수와 같은 물 관련 재해의 피해는 전 세계가 직면한 문제가 되고 있다(Lee *et al.*, 2020; Ionita and Nagavciuc, 2021). 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)는 2015~2019년의 평균 기온이 산업화 이전과 비교했을 때 1.1°C 상승했다고 발표 했으며, 기후 변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 전 지구적으로 평균 기온이 1.5°C 상승할 경우 집중호우 및 홍수의 강도와 빈도는 아프리카 및 아시아(높은 신뢰도), 북미(중간에서 높은 신뢰도), 유럽(중간 신뢰도)의 대부분의 지역에서 더욱 증가할 것으로 예측했다(IPCC, 2021).

기후 변화에 대한 관심이 높아짐에 따라 온실가스 배출 증가로 인한 기후 변화와 미래 기후를 예측하기 위해 대기와 해양의 물리적 과정을 포함하는 수학적 모델인 General Circulation Model (GCM)이 여러 국가 기관에서 개발되었으며, 많은 연구에서 기후 변수의 미래 변화를 정량화하기 위해 사용되었다(Shiru *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2020). GCM을 이용하여 미래 기후 모의 시나리오가 함께 고려되며, 현재 CMIP6의 미래 시나리오인 Shared Socioeconomic Pathway (SSP)가 새롭게 제시되었다. SSP 시나리오는 CMIP5의 미래 시나리오인 Representative Concentration Pathway (RCP) 시나리오의 복사강제력을 기반으로 미래 기후변화 적응대책을 함께 고려할 수 있어서, 현재 많은 연구에서 더 나은 미래 기후 변수 예측을 위해 사용되고 있다(Scoccimarro and Gualdi, 2020; Iqbal *et al.*, 2021).

전지구적 온도 상승에 따른 극한 강수의 빈도 증가 및 강수 패턴의 변화 등은 전 세계적으로 급속한 도시화에 따른 불투수면적 증가와 함께 물 순환에 악영향을 유발하여 도시 유역 내 홍수 피해의 규모와 빈도를 증가시키고 있는 추세이다. 특히, 한국의 경우 과거 대비 급격히 진행된 도시화로 인해 불투수면적이 증가함에 따라 도달 시간이 줄어들고 지표면을 통해 침투되는 강수량이 감소했다. 이러한 현상은 장마철 도시 유역 내 침수 및 하천 범람과 같은 문제를 유발한다. 다양한 연구에서 미래 기후 변화에 따른 한국의 강수량 증가를 예측하고 있으며(Hong and Ahn, 2015; Song *et al.*, 2021), 이에 따른 홍수 피해는 도시화의 영향을 함께 고려하면 홍수피해의 정도가 더 심각해 질 수 있으므로(Chung *et al.*, 2011) 도시 유역 내 홍수 피해 저감을 위한 연구는 더 중요해졌다. 선진국들에서는 수십 년 동안 물 순환 개선을 위한 우수 관리 제어 전략들을 개발해 왔다. 여러 우수 관리 제어 전략들 중 저영향개발

(Low Impact Development, LID) 개념은 도시 유역 내 분명한 물 순환 개선 및 홍수 피해 저감 효과로 인해 여러 연구에 사용되었으며(Li *et al.*, 2019; Movahedinia *et al.*, 2019), LID 시설의 최적 공간의 우선 순위 체계가 수량 및 수질 개선 효과를 극대화시킬 수 있다(Hou *et al.*, 2020). 그러나 LID 시설의 최적 공간 우선순위 결정은 수문학적 영향뿐만 아니라 사회 및 경제 요소들과 같이 여러 평가 기준들을 함께 고려해야 하는 어려운 문제이다. 대부분의 연구에서는 LID 시설의 수문학적 영향에 초점을 맞추어 연구를 진행하였으며(Yao *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2021), 다기준의사결정 기법을 이용한 저영향개발 시설의 최적 공간 우선순위를 결정하는 연구들은 상대적으로 부족한 상황이다(Song and Chung, 2017; Foomani and Malekmohammadi, 2020).

평가 기준들은 의사결정자에 의해 주관적으로 선정될 수 있지만 LID 시설의 최적 공간 우선순위 결정의 경우 사회 및 환경적 요소들이 함께 고려되어 객관적으로 선정되어야 한다. 객관적 평가 기준 선정을 위해 많은 연구들이 진행되어져 왔으며, 최근 몇 년 동안 사회와 환경간의 주요관계를 포착할 수 있는 Driving force-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) 체계가 여러 연구에서 객관적인 평가 지표 선정을 위해 사용되어졌다(Yu *et al.*, 2020; Loizia *et al.*, 2021).

GCM 및 SSP 시나리오를 이용하여 전망된 미래 기후 환경에서 LID의 최적 공간 우선순위 결정 시 의사결정자는 최종 결정에 영향을 미치는 여러 불확실성을 고려해야 한다. 본 연구에서 고려되는 대표적인 불확실성은 GCM 별 상이한 기후 모의 프로세스에 의한 불확실성 및 연간 기후 특성 변동에 따라 달라지는 수문학적 영향에 의한 불확실성이 있다. 이러한 이유로 다수의 GCM을 고려한 강건한(robust) 의사 결정 프레임워크에 대한 많은 연구가 이루어졌다(Chung and Kim, 2014; Kim and Chung, 2015).

본 연구에서는 미래 기후 환경에서 도시 유역 내 홍수 피해 저감을 목적으로 투수성 포장 시설을 설치하기 위한 지역의 우선순위를 결정할 수 있는 강건한 의사 결정 프레임워크를 제시한다. 미래 기후 환경에는 홍수 피해에 가장 직접적인 영향을 줄 수 있는 강수량을 고려했으며, 6개의 CMIP6 GCM과 2개의 SSP 시나리오를 사용하여 가까운 미래 (2021년~2060년)와 먼 미래 (2061년~2100년) 기간의 월 강수량을 예측했다. 투수성 포장 시설을 위한 대상 유역의 우선순위 결정을 위한 평가 기준들은 DPSIR 체계를 기반으로 선정되었으며, 평가 기준별 투수성 포장 시설의 평가 값은 국가통계자료와 Storm Water Management Model (SWMM)의 모의 값을 사용했다. 최종 우선순위 결정 시 연간 강수량 변화에 따라 상이한 투수

성 포장 시설 적용에 따른 홍수 피해 저감 효과를 고려하기 위하여 Fuzzy TOPSIS 방법을 사용했으며, GCM별 상이한 기후 모의 프로세스에서 발생하는 불확실성을 고려한 최종 우선 순위 결정을 위해 Minimax regret 방법을 사용했다.

2. 연구 자료

2.1 연구대상지

목감천은 경기도 시흥시 논곡동에서 발원하여 서울특별시 구로구와 경기도 광명시를 지나 안양천에 합류하는 하천이다. 유역 길이는 15.5 km 이며 유역 면적은 약 56 km² 이다. 유역 내 총 인구는 대략 470,000명이며, 인구 밀도는 8,366명/km² 이다. 환경공간정보서비스(EGIS)의 토지피복지도에 따르면 목감천 유역의 불투수면적은 1980년대부터 2020년대 까지 23%에서 40%로 증가하였으며, 투수면적은 점진적으로 감소하고 있다. 목감천 유역은 상대적으로 도시화가 많이 진행된 하류 유역과 농경지가 많은 중상류 유역에서 미래 강수량 증가에 따른 홍수 피해를 입을 수 있기에 연구 대상 유역으로 선정했다. 본 연구에서는 목감천 유역의 수계 시스템과 하수도 시스템을 기반으로 나뉜 27개의 소유역을 대상으로 하였으며, 나뉜 소유역의 결과는 Fig. 1과 같고 소유역 별 특성은 Table 1과 같다. 도시화에 따른 불투수면적비가 높아

홍수 피해를 입기 쉬운 유역은 S18, S22, S23 소유역이며, 인구가 많아 홍수 발생 시 가장 많은 인원이 피해를 입을 수 있는 유역은 S12 소유역이다.

2.2 General Circulation Model (GCM)

GCM은 미래 기후 예측을 위해 널리 사용되고 있으며, 각각의 GCM은 독립된 물리적 기후 모의 프로세스를 기반으로 개발되기 때문에 다양한 기후 예측을 제공할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 기후 환경에서 연구를 진행하기 위해 Table 2에 제시된 6개의 CMIP6 GCM을 사용하였다. CMIP6의 미래 시나리오인 SSP 시나리오는 기후 변화에 대한 미래 사회의 완화 및 적응에 대한 5가지 시나리오(SSP1, SSP2, SSP3, SSP4,

Table 1. Information of 27 sub-watersheds in the Mokgamcheon watershed

Sub-watershed	Population (Person)	Population density (Person/km ²)	Area (km ²)	Slope (%)	Impervious area ratio (%)
12	174,017	20,155.8	8.63	7.12	0.56
13	5	8.91	0.60	8.81	0.09
13-1	16,445	7,670.9	2.14	7.24	0.49
14	47,839	21,217.2	2.25	5.37	0.75
15	13,531	15,517.2	0.87	7.23	0.58
16	42,275	28,540.5	1.48	6.81	0.70
17	20,434	30,095.3	0.68	6.68	0.66
18	11,582	32,127.9	0.36	4.98	0.90
19	4,895	2,501.8	1.96	6.96	0.26
20	7,009	5,546.5	1.26	7.71	0.21
21	1,581	625.0	2.53	6.90	0.11
22	41,766	32,536.4	1.28	5.43	0.84
23	15,646	44,489.7	0.35	2.76	0.96
24	31,793	29,522.4	1.08	10.49	0.59
25	7,956	6,821.2	1.17	9.04	0.18
25-1	481	213.8	2.25	4.94	0.13
26	677	532.4	1.27	5.66	0.21
27	435	223.7	1.95	6.48	0.19
28	512	375.1	1.36	7.48	0.28
29	293	375.9	0.78	2.06	0.19
30	16	14.11	1.14	15.76	0.08
31	927	160.2	5.79	5.99	0.23
32	394	226.2	1.74	5.20	0.20
33	930	274.8	3.38	5.57	0.11
33-1	474	150.9	3.14	11.73	0.08
34	83	85.5	0.97	7.99	0.16
34-1	2,287	414.2	5.52	7.90	0.18

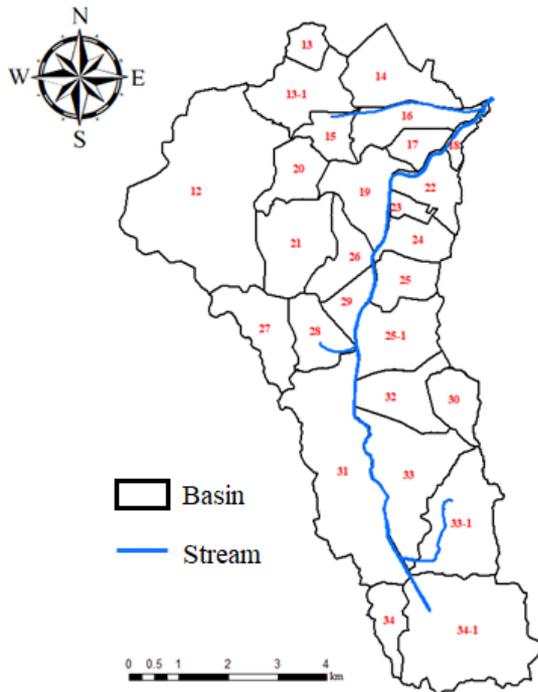


Fig. 1. Description of sub-watersheds in the Mokgamcheon watershed

Table 2. Information of CMIP6 GCMs used in this study

No	Institution	GCM	Resolution (lon × lat)
1	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	ACCESS-ESM-1-5	1.9°×1.2°
2	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	GFDL-ESM4	1.3°×1°
3	Institute for Numerical Mathematics	INM-CM4-8	2.0°×1.5°
4	Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL-CM6A-LR	2.5°×1.3°
5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute and National Institute for Environmental Studies	MIROC6	1.4°×1.4°
6	Norwegian Climate Centre	NorESM2-MM	1.25°×1°

SSP5)로 구성되며, 2010년부터 여러 공동체에서 SSP 시나리오 및 RCP 시나리오와 관련된 기후 변화 결과인 SSP-RCP 프레임워크 개발에 협력해왔다(O'Neill *et al.*, 2020). 본 연구에서는 여러 SSP-RCP 프레임워크 중 다양한 기후 변화 연구에서 현재 가장 보편적으로 사용되는 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오를 미래 기후 예측에 사용했다.

3. 연구 방법

3.1 연구 절차

본 연구의 목적은 미래 기후 시나리오를 고려한 도시 유역 내 홍수 피해 저감을 위한 투수성 포장 시설의 우선순위 선정에 있으며, 이를 위해 총 9단계로 구성된다. 첫 단계는 GCM 격자 형식의 기후 자료에 대해 역거리 가중치법과 분위사상법을 사용하여 공간 보간 및 편이보정을 수행하여 연구 대상 유역의 GCM 과거 기후 모의 값을 생성한다. 두 번째 단계는 본 연구에서 사용한 GCM의 편이보정 전후의 모의 성능을 Taylor diagram을 통해 비교한다. 세 번째 단계는 SSP 시나리오에 따른 CMIP6 GCM을 사용하여 연구 대상 유역의 미래 월 강수량 자료를 생성한다. 네 번째 단계는 DPSIR 체계 기반 투수성 포장 시설의 최적 부지 우선순위 산정을 위한 수량 평가 기준을 선정한다. 다섯 번째 단계는 SWMM-LID를 통해 투수성 포장의 매개 변수를 입력하고 각 소유역에 할당한다. 여섯 번째는 각 소유역 별 수량 평가 기준에 상응하는 값들을 SSP 시나리오에 따른 GCM에 의해 예측된 미래 기후 환경에서의 SWMM 장기 유출 분석을 통해 얻는다. 일곱 번째로는 각 평가 기준들의 객관적 가중치를 엔트로피 방법을 통해 산정한다. 여덟 번째로는 GCM 별 수량 평가 기준에 따른 이상적 대안에 대한 각 대안의 개별 상대적 근접도 값을 Fuzzy TOPSIS를 사용하여 산정한다. 마지막으로 Fuzzy TOPSIS 기반 산정된 상대적 근접도 값에 대해 minimax regret 방법을 사용하여 최종 집계된 투수성 포장 시설의 최적 부지 우선순위를 선정한다.

3.2 GCM 공간 보간 및 편이보정

GCM의 경우 넓은 격자 형식으로 기후 데이터를 저장하기 때문에 GCM 자료를 이용한 지역적 기후 모의 시 공간 보간이 필요하다. 본 연구에서는 상대적으로 가까운 거리의 값이 먼 거리에 있는 값보다 더 관련성이 있다는 Tobler의 첫 번째 법칙(Tobler, 1970)의 개념을 이용한 보간법인 역거리 가중치법을 사용했다. GCM 격자 데이터를 사용하여 미세측 지점의 강수량 산정에는 Eqs. (1) and (2)를 사용했다.

$$P_i = \sum_{i=1}^N \frac{w_s(x_i)}{\sum_{i=1}^N w_s(x_i)} P_i(x_s) \quad (1)$$

$$w_s(x_i) = \frac{1}{D_{(x_i, x_s)}^c} \quad (2)$$

여기서, x_i 는 i 번째 GCM 격자 좌표, x_s 는 미세측 지점의 좌표, N 은 고려된 GCM 총 격자 수, P_i 는 미세측 지점의 강수량, $w_s(x)$ 는 보간가중치, c 는 거리가중 계수, $D_{(x_i, x_s)}$ 는 미세측 지점으로부터 GCM 격자 지점까지 거리, $P_i(x_s)$ 는 미세측 지점 주변 GCM 모의 강수량이다.

GCM을 이용하여 지역적 규모의 기후 요소 모의 시 주요 물리적 과정에 대한 부적절한 지식과 넓은 격자 형식으로 저장되는 기후 자료로 인해 관측값과 모의 값 사이에 오차가 발생한다(Li *et al.*, 2010). 이에 따라 GCM을 이용하여 지역적 기후 요소 모의를 위해 여러 편이보정 방법들이 제안됐다(Cannon *et al.*, 2015; Nashwan *et al.*, 2020). 본 연구에서는 공간적 보간 후에도 존재하는 관측값과 모의 값 사이의 오차를 보정하기 위하여 편이보정을 추가적으로 수행하였다. 편이보정에는 가장 보편적인 방법인 분위사상법을 사용하였는데 분위사상법은 관측값과 모의 값의 경험적 누적확률분포를 사용하여 오차를 보정하며(Hashino *et al.*, 2007), 편이보정된 자료는 Eq. (3)을 사용하여 얻어진다.

$$P_b = F_0^{-1}(F_s(P_s)) \quad (3)$$

여기서, P_b 는 편이보정 된 값, P_s 는 모의 값, F_s 는 모의 값의 누적 분포 함수, F_0^{-1} 는 관측 값의 누적 분포 역함수이다. 본 연구에서는 분위 사상법의 비모수 변환법인 평활 스플라인(smoothing spline) 방법을 사용했다.

3.3 DPSIR 체계

European Environment Agency (EEA)에서 개발한 DPSIR 체계는 환경 문제의 원인과 결과 간의 관계를 묘사하기에 매우 유용하다. DPSIR 체계를 기반으로 평가 기준을 선정할 때, 각 요소들간의 인과관계를 이해하는 것은 중요하다. 추진력(Driving force) 요소는 자원 착취 및 오염 배출과 같은 다양한 유형의 환경적 압력(Pressure)을 유발한다. 이러한 압력은 환경 자원의 품질과 같은 상태(State)에 영향을 미치며, 상태의 변화는 인간 사회와 환경에 영향(Impact)을 미친다. 마지막으로 이러한 영향과 관련하여 식별된 문제를 해결하기 위한 사회의 대응(Response)이 고려된다(Chung and Lee, 2009). 본 연구에서는 이러한 DPSIR 요소들 간의 인과관계를 고려해 도시 유역 내 홍수 피해 저감을 위한 투수성 포장 시설의 유역 우선순위 선정을 위한 수량 평가 기준을 선정했다. 수량 평가 기준에는 인구 수, 인구밀도 등과 같은 사회적 요소와, 도시 유역 내 홍수 피해에 직접적 영향을 줄 수 있는 소유역 별 유출량, 침투량 및 투수성 포장 적용에 따른 물 순환 개선 효과 등과 같은 환경적 요소, 투수성 포장 설치비용과 같은 경제적 요소를 함께 고려했다.

3.4 엔트로피 가중치

Shannon and Weaver (1949)에 의해 개발된 엔트로피(Entropy) 방법은 대표적인 객관적 가중치 산정법 중 하나이다. 엔트로피는 각 정보 속성의 분포 밀도에 따라 결정되며, 각 대안의 정보 집합 정도가 높을수록 엔트로피 값이 높아진다. 본 연구에서는 DPSIR 체계를 기반으로 선정된 평가 지표에 해당하는 값에 대해 Eq. (4)를 사용하여 표준화를 수행했다.

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

여기서, x_{ij} 는 j 번째 평가 지표에 따른 i 번째 대안의 값, P_{ij} 는 표준화 된 값을 나타낸다. 표준화된 값을 기반으로한 엔트로피 값은 Eq. (5)를 이용하여 산정한다.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}, \left(k = \frac{1}{\ln m}; j = 1, 2, \dots, n \right) \quad (5)$$

최종적으로, 평가 지표에 상응 하는 값의 다양성을 나타내는 d_j 를 이용하여 각 평가 지표들의 가중치를 산정한다.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, (d_j = 1 - E_j; j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

3.5 SWMM-LID

United States Environmental Protection Agency (USEPA)는 도시 유역의 수문 순환 사이의 흐름 및 수질 개선 프로세스를 모의하기 위해 동적 강우 유출 시뮬레이션 모델인 SWMM을 개발했다. SWMM은 Subcatchment, Junction node, Outfall node, Storage node, Conduit link 등의 기능을 통해 도시 유역의 특성을 모델링 할 수 있으며, Rain gage 및 Climatology 기능을 통해 기후 데이터 적용에 따른 단기 및 장기 유출 모의가 가능하다. SWMM을 활용한 도시 유역 수량 및 수질 모의 시 시간 매개 변수(Dates, Time Steps 등), 흐름 매개 변수(General, Dynamic Wave 등), 수질 매개 변수(Pollutants, Land Use 등) 등 여러 매개 변수들을 설정해야 한다. 최근 SWMM5.1의 SWMM-LID 기능을 통해 LID 시설 적용에 따른 수문학적 영향 분석이 가능해졌다. SWMM5.1의 LID control은 단위 영역 별로 정의된 수직 레이어 특성의 조합으로 표시된다. 현재 SWMM-LID 기능의 LID Control Editor를 통해 모델링 가능한 LID 시설은 식생 저류지(Bio-Retention Cell), 빗물 정원(Rain Garden), 옥상 녹화(Green Roof), 침투 트렌치(Infiltration Trench), 투수성 포장(Permeable Pavement), 빗물 통(Rain Barrel), 지붕 수로(Rooftop Disconnection), 식생 수로(Vegetative Swale)가 있으며, 각 LID 시설의 특성에 따라 매개변수 조정이 가능하다. 본 연구에서는 여러 LID 시설 중 이전 Song and Chung (2019)의 연구에서 목감천 유역을 대상으로 분명한 물 순환 개선 효과를 보였던 투수성 포장을 사용했으며, 연구에 사용된 투수성 포장의 매개변수를 사용하여 목감천 소유역 별 투수성 포장 적용에 따른 수문학적 영향을 분석했다.

3.6 Fuzzy TOPSIS

Hwang and Yoon (1981)에 의해 개발된 Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) 방법은 양의 이상해(Positive Ideal Solution, PIS)에 가깝고 음의 이상해(Negative Ideal Solution, NIS)에 멀리 떨어진 대안을 우선적으로 선택하여 의사결정자로 하여금 합리적인 선

택을 돕는다. Chen (2000)은 기존 TOPSIS 개념에 Triangular Fuzzy Number (TFN)을 적용하여 개념을 확장했다. TFN을 TOPSIS에 적용하기 위해서는 TFN의 특성을 유지하면서 비교할 수 있도록 서로 다른 TFN 척도를 표준화해야 한다. 표준화된 퍼지 행렬 \tilde{R} 은 Eq. (7)로 표현된다.

$$\tilde{R}_{ij} = [\tilde{r}_{ij}], \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

여기서, \tilde{r}_{ij} 은 표준화된 TFN, i 는 대안, j 는 평가 지표이다. 또한 Eqs. (8)-(11)에서의 B와 C는 각각 편익 기준(값이 클수록 선호)과 비용 기준(값이 작을수록 선호)의 집합을 의미한다.

$$c_j^* = \max_i c_{ij}, \text{ if } j \in B \quad (8)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), \text{ if } j \in B \quad (9)$$

$$a_j^* = \min_i a_{ij}, \text{ if } j \in C \quad (10)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^*}{c_{ij}}, \frac{a_j^*}{b_{ij}}, \frac{a_j^*}{a_{ij}} \right), \text{ if } j \in C \quad (11)$$

여기서, a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} 는 TFN 형식으로 변환된 행렬의 최소값, 최빈값, 최대값이다. $\tilde{r}_{ij} = (\alpha_{ij}, \beta_{ij}, \gamma_{ij})$ 일 때, 퍼지 양의 이상해 (Fuzzy Positive Ideal Solution, FPIS)와 퍼지 음의 이상해 (Fuzzy Negative Ideal Solution, FNIS)는 표준화된 퍼지 행렬 \tilde{R} 로부터 Eq. (12)와 같이 정의된다.

$$A^+ = (\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_n^+); A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-) \quad (12)$$

여기서, $\tilde{v}_j^+ = (v_{ij}^+, v_{ij}^+, v_{ij}^+)$, $\tilde{v}_j^- = (v_{ij}^-, v_{ij}^-, v_{ij}^-)$, $v_j^+ = \max_i r_{ij}$, $v_j^- = \min_i a_{ij}$ 이다. 또한 두 TFN $\tilde{m} = (m_1, m_2, m_3)$ 과 $\tilde{n} = (n_1, n_2, n_3)$ 사이의 거리는 Eq. (13)을 이용해 계산된다. 이에 따라, A+(FPIS) & A-(FNIS)와 각 대안 (i) 사이의 거리는 Eqs. (14) and (15)를 통해 각각 산정된다. 최종적으로 각 대안의 상대적 근접도 (C_i^*)는 Eq. (16)에 의해 산정된다.

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]} \quad (13)$$

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{v}_j^+) \quad (14)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{r}_{ij}, \tilde{v}_j^-) \quad (15)$$

$$C_i^* = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)} \quad (16)$$

3.7 Minimax regret 방법

의사결정자들은 종종 여러 불확실성이 존재하는 상황에서 의사 결정을 내려야 하는 상황에 처해진다. 이러한 의사 결정은 대안의 수가 많을수록 결정을 내리기 어려워지며, 의사결정자는 어느 대안이 최적 대안인지 알 수 없는 상태에서 후회를 최소화하기 위해 합리적 선택을 해야 한다. Minimax regret 방법은 의사결정자가 선택한 대안에 의해 발생하는 최대 후회를 최소화할 수 있는 의사 결정 방법이다. 만약, m 개의 대안과 n 개의 기준으로 이루어진 편익 기준 행렬 X 가 Eq. (17)과 같이 존재할 시, 대안 (i) 선택에 따른 후회 R 은 Eq. (18)과 같이 나타낼 수 있다. 최종적으로 후회 R 을 고려한 최대 후회 ($\max(R_i)$)의 최소는 Eq. (19)를 통해 계산한다. 의사결정자는 최대 후회 값이 최소가 되는 최적의 대안 하나를 선정할 수도 있고, 최대 후회가 낮은 대안 순으로 각 대안들의 우선순위를 결정할 수도 있다.

$$X = x_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

$$R_{ij} = \max_j (x_{ij}) - x_{ij} \quad (18)$$

$$MMR = \min_i (\max_j (R_{ij})) \quad (19)$$

4. 결과

4.1 공간적 상세화 및 편이보정 결과

본 연구에서는 GCM 기후 모의 값에 대해 역거리 가중치법을 사용하여 공간적 상세화 후에도 존재하는 관측 값과 모의 값의 오차를 줄이기 위해 연구대상지의 과거 기간(1970년~2014년) 동안 관측된 월 강수량 및 분위사상법을 사용하여 편이보정을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 편이보정 방법의 성능을 확인하기 위하여 편이보정 전 후의 모의 값과 관측 값을 비교한 결과를 Fig. 2와 같이 Taylor diagram을 사용하여 나타냈다. Taylor dia-

gram은 RMSE (Root Mean Square Error), 표준편차(Standard deviation, STDEV), Pearson 상관계수(Pearson correlation coefficient, Pearson r)를 이용하여 모의 값과 관측 값 간의 일치 정도를 간결하게 요약하여 보여준다. RMSE 값은 편이보정 전에서 모든 CMIP6 GCM이 100 이상의 값을 보였으며, 편이보정 후에서 50 이하로 줄었다. 표준편차 값의 경우 편이보정 후의 범위 값(150~175)이 편이보정 전의 범위 값(60~113)보다 관측 값의 표준편차 값(151.21)에 가까웠다. Pearson r 값의 경우 모든 CMIP6 GCM이 편이보정 전에서 0.6 이하의 값을 보였으나, 편이보정 후에서 0.98 이상의 값으로 증가했다. Taylor diagram의 결과를 통해 모든 CMIP6 GCM의 모의 성

능이 편이보정 전(Raw)보다 편이보정 후(Bias corrected)에서 향상됨을 확인했다.

4.2 미래 월 강수량

미래 기간(2021년~2100년) 월 강수량 모의 값은 6개의 CMIP6 GCM 및 2개의 SSP 시나리오(SSP2-4.5, SSP5-8.5)를 사용하여 각각 산정되었으며, 각 GCM에 동일한 가중치를 주어 MME를 생성하여 Fig. 3과 같이 SSP 시나리오 별 연간 총 강수량 및 월 평균 강수량으로 간단히 나타냈다. SSP2-4.5와 SSP5-8.5 시나리오 모두 가까운 미래 기간에서 먼 미래 기간으로 갈수록 강수량이 증가하는 추세를 보였으며, SSP5-8.5 시나리오의 경우 SSP2-4.5 시나리오보다 가파른 상승 추세를 확인했다. 연간 총 강수량의 결과를 통해 미래 기간 목감천 유역에 발생하는 강수량이 지속적으로 증가할 것이며, 이에 따른 홍수 피해가 발생할 수 있음을 확인했다. 월 평균 강수량의 경우 SSP 시나리오에 따른 6개의 CMIP6 GCM 및 MME 결과 모두 겨울철(12월~1월)에 강수량이 적었으며, 여름철(6월~8월)에 가장 많은 강수량을 보였다. 따라서, 본 연구에서는 월 평균 강수량의 결과를 통해 수량 평가 기준 중 향후 목감천 유역의 홍수 피해에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 우기(rainy season) 시 유출량에 여름철 월 강수량을 고려했다.

4.3 평가 지표 선정 및 가중치 산정

도시 유역 내 홍수 피해 저감을 위한 투수성 포장 시설 대상 유역 우선순위 선정에 수량 평가 지표는 DPSIR 체계를 기반

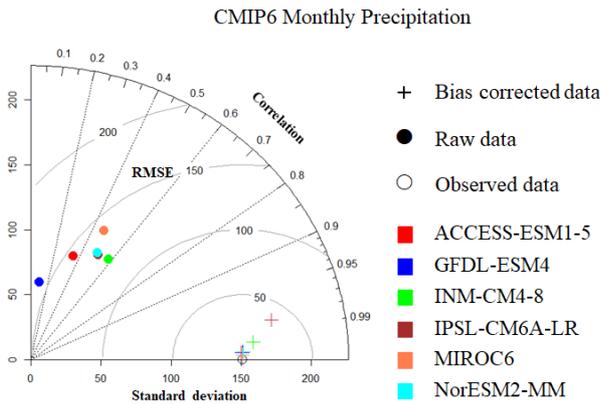


Fig. 2. Comparison between raw and bias-corrected CMIP6 GCMs data against observed data using Taylor diagram

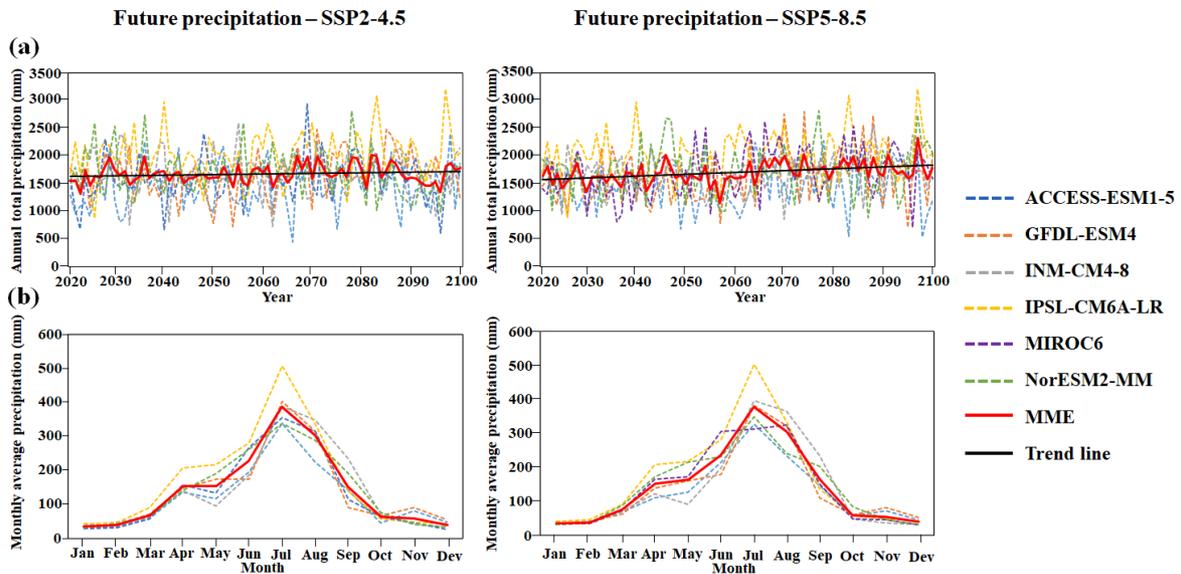


Fig. 3. Future precipitation of bias-corrected CMIP6 GCMs and multi-model ensemble: (a) Annual total precipitation and (b) Monthly average precipitation

Table 3. Determined TFNs of weighting values for evaluation criteria to flood mitigation

DPSIR	Criteria	Min	Mode	Max
Driving force	Population	0.47	0.52	0.57
	Population density	0.35	0.39	0.43
Pressure	Percent of impervious area	0.25	0.28	0.31
	Watershed slope	0.08	0.09	0.1
	Annual water supply amount	0.49	0.54	0.59
State	Total runoff	0.22	0.25	0.27
	Total infiltration	0.48	0.53	0.59
	Average flowrate during rainy season	0.11	0.13	0.14
Impact	Total runoff (future)	0.18	0.20	0.22
	Total infiltration (future)	0.53	0.59	0.65
	Average flowrate during rainy season (future)	0.10	0.11	0.12
Response	Permeable pavement performance in total runoff	0.09	0.10	0.11
	Permeable pavement performance in total infiltration	0.55	0.61	0.67
	Permeable pavement performance in flowrate during rainy season	0.04	0.04	0.05
	Cost for install LID facility	0.14	0.16	0.17

으로 Table 3과 같이 선정했다. “Driving force” 요소에는 홍수에 따른 인명 및 재산 피해에 영향을 줄 수 있는 인구 및 인구 밀도를 설정했다. “Pressure” 요소의 경우 값이 높을수록 유출량을 증가시키고, 침투량은 감소시켜 도시 유역 내 홍수 피해 위험을 증가시킬 수 있는 불투수면적 비율 및 유역 경사도를 설정했으며, 홍수 발생 시 수요에 따른 피해를 고려하기 위해 소유역 별 연간 급수량을 추가적으로 설정했다. 수문학적 요소가 대부분인 “State”, “Impact”, “Response” 요소의 경우 “State” 요소에는 과거 기간 총 유출량, 총 침투량, 우기 시(6월~8월) 유량을 설정했으며, “Impact” 요소에는 경우 미래 기간 총 유출량, 총 침투량, 우기 시 유량을 설정했다. “Response” 요소의 경우 투수성 포장 적용에 따른 유출량 및 우기 시 유량의 저감 및 침투량의 증가와 같은 물 순환 개선 효과 및 투수성 포장 설치비용을 설정했다.

“Driving force”, “Pressure” 요소에 해당하는 평가 기준 값들의 경우 고정된 값을 사용하였으며, SWMM 장기 유출 분석 값들의 경우 데이터들의 연간 변동성을 고려하여 TFN 값으로 선정했다. TFN 값의 경우 엔트로피 가중치 선정 시 그대로 적용이 힘들기에 defuzzification을 수행하여 엔트로피 값을 구하였다. 얻어진 데이터를 기반으로 각 평가 기준들의 객관적 가중치를 Entropy 방법을 사용하여 선정하였으나, 선정된 가

중치도 불확실성을 포함하고 있고 향후 Fuzzy TOPSIS 적용을 위해 10%의 유의 수준을 가정하였다. 결과는 Table 3과 같이 TFN 형태로 제시했다.

평가 기준들의 가중치는 상응하는 값들을 이용하여 객관적으로 산정할 수 있지만, DPSIR 체계의 각 구성 요소에 대한 가중치는 의사 결정자가 처해진 환경에 따라 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 3가지 경우를 가정했다. Case 1은 각 요소들에 대해 동일 가중치를 부여했으며, Case 2는 사회 및 물리적 요소보다는 수문학적 요소가 집중된 “State”, “Impact”, “Response” 요소에 높은 가중치를 부여하였고, Case 3은 미래 기후 변화에 따른 피해와 투수성 포장 설치에 따른 홍수 피해 저감 효과를 중요시하는 “Impact”, “Response” 요소에 높은 가중치를 부여했다.

4.4 Fuzzy TOPSIS 상대적 근접도 산정

본 연구에서는 Fuzzy TOPSIS 방법을 사용하여 6개의 CMIP6 GCM의 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오에서 모든 대안의 상대적 근접도를 Case 별로 가까운 미래(Near future, NF)와 먼 미래(Far future, FF)에 대해 각각 산정하였으며, 산정된 결과를 Table 4와 같이 DPSIR 요소 가중치에 따른 3가지 Case 및 2개의 미래 기간에 대해 평균값을 사용하여 나타냈다.

Fuzzy TOPSIS를 이용한 상대적 근접도 산정 시 DPSIR 요소 기반 평가 기준들에 상응하는 값들은 위에서 명시한 바와 같이 국가에서 제공하는 자료들과 SWMM의 장기 유출 분석 결과를 사용했으며, “Driving force” 및 “Pressure” 요소에 속한 평가 기준들에 상응하는 값들은 연간 변동성이 크지 않고 가장 최신 자료를 사용하였기에 고정 값으로 사용했다. 반대로 “State”, “Impact”, “Response” 요소에 속한 평가 기준들에 상응하는 값들은 연도별로 달라지기 때문에 연간 변동성에 따른 분포를 고려하기 위하여 TFN을 사용하여 나타냈다. 자료의 연간 변동성을 고려하여 TFN 적용 시 Fig. 4와 같이 분포가 고르지 않은 데이터는 대수 변형하여 TFN에 적합한 형태로 사용했다.

수량 평가 기준에 따른 상대적 근접도 값의 경우 Table 4에서와 같이 하류 유역 부근에서 높은 값을 나타냈으며, 27개의 소유역 중 가장 높은 상대적 근접도 값의 범위는 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오의 가까운 미래와 먼 미래 모두 Case 1에서 27개 소유역 중 면적 내 인구수가 가장 많은 S12(0.61~0.62), Case 2~3에서 면적 대비 인구밀도 및 불투수면적 비율이 가장 높은 S23(0.64~0.65) 소유역에서 확인되었다. 반대로 모든 Case의 SSP 2-4.5, SSP5-4.5 시나리오의 가까운 미래와 먼 미래에서 인구수가 거의 없고, 투수면적이 대부분인 S13 유역이

Table 4. Averaged relative closeness of candidate sites to flood damage mitigation by Fuzzy TOPSIS

Sub-watershed	Case 1				Case 2				Case 3			
	SSP2-4.5		SSP5-8.5		SSP2-4.5		SSP5-8.5		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	NF	FF										
12	0.613	0.612	0.614	0.620	0.565	0.563	0.566	0.573	0.548	0.547	0.549	0.559
13	0.134	0.136	0.133	0.146	0.164	0.166	0.163	0.179	0.161	0.164	0.160	0.179
13-1	0.313	0.313	0.313	0.321	0.349	0.350	0.350	0.360	0.337	0.338	0.339	0.350
14	0.527	0.527	0.528	0.532	0.532	0.531	0.533	0.538	0.523	0.522	0.524	0.531
15	0.328	0.329	0.329	0.336	0.353	0.355	0.354	0.363	0.350	0.352	0.351	0.362
16	0.476	0.476	0.477	0.482	0.480	0.481	0.482	0.488	0.475	0.475	0.477	0.485
17	0.404	0.405	0.405	0.411	0.409	0.411	0.411	0.419	0.410	0.412	0.412	0.421
18	0.505	0.505	0.506	0.508	0.535	0.536	0.536	0.539	0.537	0.537	0.538	0.542
19	0.233	0.234	0.233	0.243	0.269	0.270	0.269	0.282	0.258	0.260	0.258	0.273
20	0.210	0.211	0.210	0.221	0.239	0.241	0.239	0.253	0.232	0.234	0.232	0.248
21	0.214	0.215	0.214	0.226	0.245	0.247	0.245	0.260	0.232	0.234	0.232	0.249
22	0.568	0.567	0.569	0.571	0.575	0.575	0.577	0.580	0.571	0.570	0.572	0.576
23	0.604	0.603	0.605	0.604	0.646	0.645	0.646	0.645	0.645	0.644	0.646	0.645
24	0.394	0.395	0.395	0.402	0.401	0.402	0.403	0.411	0.399	0.400	0.401	0.410
25	0.213	0.214	0.210	0.223	0.237	0.239	0.233	0.250	0.231	0.233	0.227	0.247
25-1	0.178	0.179	0.178	0.189	0.222	0.223	0.221	0.236	0.209	0.210	0.208	0.226
26	0.192	0.193	0.189	0.203	0.230	0.232	0.227	0.244	0.222	0.225	0.219	0.239
27	0.192	0.194	0.193	0.203	0.236	0.238	0.237	0.249	0.225	0.226	0.226	0.240
28	0.207	0.209	0.209	0.217	0.249	0.251	0.251	0.262	0.241	0.243	0.243	0.256
29	0.155	0.157	0.153	0.152	0.192	0.194	0.189	0.188	0.188	0.190	0.184	0.183
30	0.163	0.164	0.158	0.174	0.196	0.197	0.190	0.210	0.189	0.191	0.182	0.206
31	0.242	0.243	0.245	0.253	0.296	0.297	0.299	0.309	0.275	0.276	0.279	0.291
32	0.187	0.188	0.188	0.198	0.230	0.231	0.230	0.244	0.220	0.221	0.220	0.236
33	0.189	0.190	0.189	0.200	0.236	0.236	0.235	0.249	0.219	0.220	0.218	0.235
33-1	0.188	0.189	0.187	0.199	0.231	0.232	0.229	0.245	0.214	0.216	0.213	0.231
34	0.166	0.168	0.166	0.175	0.204	0.205	0.203	0.214	0.198	0.200	0.197	0.210
34-1	0.161	0.161	0.161	0.172	0.193	0.194	0.193	0.208	0.176	0.177	0.176	0.193

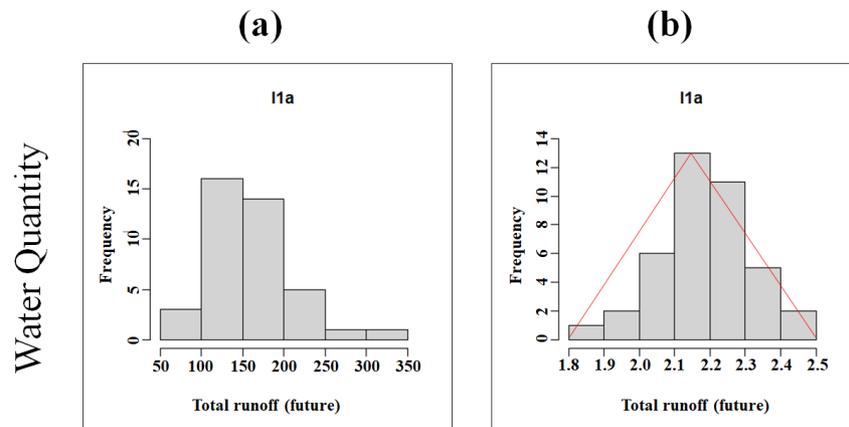


Fig. 4. Histogram of evaluation criteria: (a) raw data and (b) log transformed data

가장 낮은 범위 값 (0.13~0.18)이 확인됐다.

4.5 최종 우선순위 결과

Fuzzy TOPSIS를 이용한 상대적 근접도 계수에 따라 우선 순위를 산정할 경우 서로 다른 기후 예측에 의해 CMIP6 6개의 GCM에 대한 투수성 포장 시설 대상구역의 우선순위는 조금씩 달라진다. 그러나 최종 우선순위는 6개의 GCM에 의한 결과를 모두 고려하여 결정해야 하므로 본 연구에서는 Minimax regret 방법을 이용하여 최종 우선순위를 Table 5와 같이 결정했다. 최종 우선순위의 시공간적 분포는 모든 Case와 SSP 시나리오 그리고 가까운 미래와 먼 미래에서 약간의 변동은 있지만 비슷한 추세를 확인했다. 상대적으로 상류 유역 보다 하류

유역에 높은 우선순위가 집중되었으며, 하류 유역에서도 인구가 밀집되어 있으며, 도시화에 따른 불투수면적 비율이 높은 소유역들에서 높은 우선순위를 확인했다. 상위 우선순위 (1위~3위)의 결과는 모든 Case에서 SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오의 가까운 미래와 먼 미래에서 변동이 없었으나, DPSIR 각 요소에 동일한 가중치를 준 Case 1과 미래 기후 변화에 따른 수문학적 반응 및 투수성 포장 시설 적용에 따른 홍수 피해 저감 효과에 높은 가중치를 준 Case 2, Case 3의 결과가 달라짐을 확인했다. SSP2-4.5, SSP5-8.5 시나리오의 가까운 미래와 먼 미래에서 Case 1의 경우 S12, S23, S22 순으로 높은 우선순위를 확인했으며, Case 2와 Case 3의 경우 S23, S22, S12 순으로 높은 우선순위를 확인했다. 결과를 통해 Case 1에서 Case 3으

Table 5. Final rankings of candidate sites for permeable pavement considering six GCMs using the minimax regret approach

Sub-watershed	Case 1				Case 2				Case 3			
	SSP2-4.5		SSP5-8.5		SSP2-4.5		SSP5-8.5		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	NF	FF										
12	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3
13	27	27	27	26	27	27	27	26	27	27	26	26
13-1	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
14	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5
15	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
16	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
17	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
18	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
19	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
20	15	15	14	15	15	15	15	15	15	14	15	14
21	13	13	13	13	14	14	14	14	14	15	14	15
22	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2
23	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
24	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
25	14	14	16	14	18	16	21	16	16	16	21	16
25-1	22	22	22	22	22	22	20	22	22	22	20	22
26	18	18	21	17	21	19	22	19	18	18	22	17
27	17	17	17	18	17	17	16	17	17	17	16	18
28	16	16	15	16	13	13	13	13	13	13	13	13
29	26	26	25	27	26	25	25	27	25	24	25	27
30	24	24	26	23	24	24	26	24	24	25	27	24
31	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
32	21	21	20	21	20	20	18	21	20	19	17	19
33	19	19	18	19	16	18	17	18	19	20	18	20
33-1	20	20	19	20	19	21	19	20	21	21	19	21
34	23	23	23	25	23	23	23	23	23	23	23	23
34-1	25	25	24	24	25	26	24	25	26	26	24	25

로 갈수록 도시화가 진행되어 불투수면적 비율이 높은 소유역에서 높은 우선순위가 나타남을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 미래 기후 환경에서 도시 유역 내 홍수 피해 저감을 위한 투수성 포장 시설의 최적 부지 우선순위 선정을 위한 객관적인 의사 결정 프레임워크를 제시했다. 투수성 포장 시설 적용에 따른 수량 개선 효과 확인을 위해 6개의 CMIP6 GCM 및 2개의 SSP 시나리오에 의해 예측된 미래 월 강수량 및 SWMM의 장기 유출 분석 결과를 사용했으며, Fuzzy TOPSIS 및 Minimax regret 방법을 사용하여 최종 우선순위를 산정했다.

사회 및 경제적 요소와 홍수 피해 저감을 위한 수량 개선 효과들을 함께 고려할 수 있는 평가 지표 선정을 위해 DPSIR 체계를 사용하였으며, 각 평가 지표들의 객관적 가중치 산정에는 Entropy 방법을 사용했다. Entropy 방법에 의해 각 평가 기준들의 가중치가 객관적으로 산정되었어도 DPSIR 요소 가중치에 따라 최종 순위가 변동될 수 있기에 본 연구에서는 3가지 case로 나누어 연구를 수행했다. 산정 결과 전체적인 우선순위 추세의 변화는 미세하지만, 우선순위들간의 변동이 있음을 확인했다. Minimax regret 방법을 이용하여 최종 우선순위를 산정한 결과 3가지 case 모두 상류유역 보다는 하류 유역에서 높은 우선 순위가 확인 되었으며, “State”, “Impact”, “Response”에 높은 가중치가 할당됨에 따라 상위 우선 순위가 불투수면적이 높은 소유역 위주로 변동됨을 확인했다.

본 연구의 최종 우선순위 선정 결과를 통해 투수성 포장 시설의 최적 부지 우선순위가 인구 및 개발에 따른 불투수면적에 크게 영향을 받음을 알 수 있었으며, DPSIR 각 요소에 대해 의사결정자가 중요하게 생각하는 부분이 달라짐에 따라 우선순위의 결과가 달라질 수 있음을 확인했다. 본 연구에서는 수량 평가 기준만을 고려하여 우선순위를 선정하였지만, 향후 연구에서 수질을 함께 고려한다면 통합 물 관리를 위한 투수성 포장 시설의 최적 부지 우선순위를 선정 할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서의 평가 기준 및 가중치 결정, GCM 선정, 기후 변화 시나리오 등과 같이 우선순위 결정을 위한 과정에서 여러 불확실성이 존재한다. 따라서 향후에는 산정된 우선순위에 대한 불확실성을 정량적으로 분석하는 연구가 필요하다. 이에 더해 홍수 피해가 단기 강우사상에 영향을 받는 만큼 향후 미래 강수량의 단기 강우사상을 고려한 투수성 포장 시설의 물 순환 개선 효과를 고려할 필요가 있다.

감사의글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Cannon, A.J., Sobie, S.R., and Murdock, T.Q. (2015). “Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?.” *Journal of Climate*, Vol. 28, pp. 6938-6959.
- Chen, C.T. (2000). “Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment.” *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 114, pp. 1-9.
- Chung, E.S., and Kim, Y.J. (2014). “Development of fuzzy multicriteria approach to prioritize locations of treated wastewater use considering climate change scenarios.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 146, pp. 505-516.
- Chung, E.S., and Lee, K.S. (2009). “Prioritization of water management for sustainability using hydrologic simulation model and multicriteria decision making techniques.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, pp. 1502-1511.
- Chung, E.S., Park, K., and Lee, K.S. (2011). “The relative impacts of climate change and urbanization on the hydrological response of a Korean urban watershed.” *Hydrological Processes*, Vol. 25, No. 4, pp. 544-560.
- Foomani, M.S., and Malekmohammadi, B. (2020). “Site selection of sustainable urban drainage systems using fuzzy logic and multicriteria decision-making.” *Water and Environment Journal*, Vol. 34, No. 5, pp. 584-599.
- Hashino, T., Bradley, A.A., and Schwartz, S.S. (2007). “Valuation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts.” *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 939-950.
- Hong, J.Y., and Ahn, J.B. (2015). “Changes of early summer precipitation in the Korean peninsula and nearby regions based on RCP simulations.” *Journal of Climate*, Vol. 28, No. 9, pp. 3557-3578.
- Hou, J., Zhu, M., Wang, Y., and Sun, S. (2020). “Optimal spatial priority scheme of urban LID-BMPs under different investment periods.” *Landscape and Urban Planning*, Vol. 202, 103858.
- Hwang, C.L., and Yoon, K. (1981). “Multiple attribute decision making an introduction, Sage Publications.” *Thousand Oaks London New Delhi*, Vol. 104, pp. 38-45.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *AR6 climate change 2021: The physical science basis*. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.
- Ionita, M., and Nagavciuc, V. (2021). “Change in drought features at European level over the last 120 years.” *Natural Hazards and*

- Earth System Sciences*, Vol. 21, No. 5, pp. 1685-1701.
- Iqbal, Z., Shahid, S., Ahmed, K., Ismail, T., Ziarh, G.F., Chung, E.S., Wang, X. (2021). "Evaluation of CMIP6 GCM rainfall in mainland Southeast Asia." *Atmospheric Research*, Vol. 254, No. 11, 105525.
- Kim, Y., and Chung, E.S. (2015). "Iterative framework for robust reclaimed wastewater allocation in a changing environment using multi-criteria decision making." *Water Resources Management*, Vol. 29, pp. 295-311.
- Lee, J., Perera, D., Glickman, T., and Taing, L. (2020). "Water-related disasters and their health impacts: A global review." *Progress in Disaster Science*, Vol. 8, No. 5, 100123.
- Li, H., Sheffield, J., and Wood, E.F. (2010). "Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, D10101.
- Li, Q., Wang, F., Yu, Y., Huang, Z., Li, M., and Guan, Y. (2019). "Comprehensive performance evaluation of LID practices for the sponge city construction: A case study in Guangxi, China." *Journal of Environmental Management*, Vol. 231, pp. 10-20.
- Loizia, P., Voukkali, I., Zorpas, A.A., Pedreno, J.N., Chatziparaskeva, G., Inglezakis, V.J., Vardopoulos, I., and Doula, M. (2021). "Measuring the level of environmental performance in insular areas, through key performed indicators, in the framework of waste strategy development." *Science of the Total Environment*, Vol. 753, 141974.
- Movahedinia, M., Samani, J.M.V., Barakhasi, F., Taghvaeian, S., and Stepanian, R. (2019). "Simulating the effects of low impact development approaches on urban flooding: A case study from Tehran, Iran." *Water Science & Technology*, Vol. 80, No. 8, pp. 1591-1600.
- Nashwan, M.S., Shahid, S., and Chung, E.S. (2020). "High-resolution climate projections for a densely populated mediterranean region." *Sustainability*, Vol. 12, No. 9, 3684.
- O'Neill, B.C., Carter, T.R., Ebi, K., Harrison, P.A., Kemp-Benedict, E., Kok, K., Kriegler, E., Preston, B.L., Riahi, K., Sillmann, J., van Ruijven, B.J., van Vuuren, D., Carlisle, D., Conde, C., Fuglestvedt, J., Green, C., Hasegawa, T., Leininger, J., Monteith, S., and Pichs-Madruga, R. (2020). "Achievements and needs for the climate change scenario framework." *Nature Climate Change*, Vol. 10, pp. 1074-1084.
- Scoccimarro, E., and Gualdi, S. (2020). "Heavy daily precipitation events in the CMIP6 worst-case scenario: projected twenty-first-century changes." *Journal of Climate*, Vol. 33, No. 17, pp. 7631-7642.
- Shannon, C.E., and Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, London and New York.
- Shiru, M.S., Shahid, S., Chung, E.S., Alias, N., and Scherer, L. (2019). "A MCDM-based framework for selection of general circulation models and projection of spatio-temporal rainfall changes: A case study of Nigeria." *Atmospheric Research*, Vol. 225, pp. 1-16.
- Song, J.Y., and Chung, E.S. (2017). "A multi-criteria decision analysis system for prioritizing sites and types of low impact development practices: Case of Korea." *Water*, Vol. 9, No. 4, 291.
- Song, Y.H., and Chung, E.S. (2019). "Spatial prioritization of permeable pavement considering multiple general circulation models: Mokgamcheon watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 12, pp. 1011-1023.
- Song, Y.H., Nashwan, M.S., Shahid, S., and Chung, E.S. (2021). "Advances in CMIP6 INM-CM5 over CMIP5 INM-CM4 for precipitation simulation in South Korea." *Atmospheric Research*, Vol. 247, 105261.
- Su, X., Shao, W., Liu, J., and Jiang, Y. (2020). "Multi-site statistical downscaling method using GCM-based monthly data for daily precipitation generation." *Water*, Vol. 12, No. 3, 904.
- Tobler, W. (1970). "A computer movie simulating urban growth in the Detroit region." *Economic Geography*, Vol. 46, No. 2, pp. 234-240.
- Yao, L., Wu, Z., Wang, Y., Sun, S., Wei, W., and Xu, Y. (2020). "Does the spatial location of green roofs affects runoff mitigation in small urbanized catchments?." *Journal of Environmental Management*, Vol. 268, 110707.
- Yu, X., Xie, J., Jiang, R., Zuo, G., and Liang, J. (2020). "Assessment of water resource carrying capacity based on the chicken swarm optimization-projection pursuit model." *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 13, 39.
- Zhu, Y., Li, H., Yang, B., Zhang, X., Mahmud, S., Zhang, X., Yu, B., and Zhu, Y. (2021). "Permeable pavement design framework for urban stormwater management considering multiple criteria and uncertainty." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 293, 126114.