

기후변화대응 물관리를 위한 자연기반해법의 개념적 체계와 정책적 과제

박유진^{1,*} · 오재일²

¹중앙대학교 도시계획부동산학과, ²중앙대학교 사회기반시스템공학부

Nature-based Solutions for Climate-Adaptive Water Management: Conceptual Approaches and Challenges

Yujin Park^{1,*} · Jeill Oh²

¹Department of Urban Planning and Real Estate, Chung-Ang University

²School of Civil, Environmental Engineering, Urban Design and Studies, Chung-Ang University

(Received 1 April 2022, Revised 20 June 2022, Accepted 24 June 2022)

Abstract

Nature-based Solutions (NbS) are defined as practical and technical approaches to restoring functioning ecosystems and biodiversity as a means to address socio-environmental challenges and provide human-nature co-benefits. This study reviews NbS-related literature to identify its key characteristics, techniques, and challenges for its application in climate-adaptive water management. The review finds that NbS has been commonly used as an umbrella term incorporating a wide range of existing ecosystem-based approaches such as low-impact development (LID), best management practices (BMP), forest landscape restoration (FLR), and blue-green infrastructure (BGI), rather than being a uniquely-situated practice. Its technical form and operation can vary significantly depending on the spatial scale (small versus large), objective (mitigation, adaptation, naturalization), and problem (water supply, quality, flooding). Commonly cited techniques include green spaces, permeable surfaces, wetlands, infiltration ponds, and riparian buffers in urban sites, while afforestation, floodplain restoration, and reed beds appear common in non- and less-urban settings. There is a greater lack of operational clarity for large-scale NbS than for small-scale NbS in urban areas. NbS can be a powerful tool that enables an integrated and coordinated action embracing not only water management, but also microclimate moderation, ecosystem conservation, and emissions reduction. This study points out the importance of developing decision-making guidelines that can inform practitioners of the selection, operation, and evaluation of NbS for specific sites. The absence of this framework is one of the obstacles to mainstreaming NbS for water management. More case studies are needed for empirical assessment of NbS.

Key words : Blue-Green infrastructure, Ecosystem restoration, Nature-based solutions, Water management

¹ Corresponding author, 조교수(Assistant Professor), yujinp@cau.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-9680-4024>

² 교수(Professor), ohjeill@cau.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-7321-530X>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

2016년 세계자연보전연맹(International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN)은 현재 인류 사회가 당면한 과제를 크게 기후변화, 자연재해, 생태계 훼손, 수자원 및 식량위기, 인구보건, 사회경제적 발전으로 구분하였다. 도시화 및 인구집중은 자연순환 및 생태계보전에 심각한 왜곡을 초래하며 기후변화로 인한 자연재해 위험을 가중시킨다. 우리나라를 포함한 아시아 지역은 1 km²당 111명이 거주하는 세계 최고의 인구밀도를 가지고 있으며 도시 인구는 2050년 약 64%에 도달할 전망이다. 우리나라 수도권의 인구밀도는 1 km²당 8,088명으로 세계에서 6번째로 높다(Demographia, 2021). 또한 아시아 지역은 1970년부터 2019년까지 약 50년간 3,454개의 기후재난을 겪었으며, 975,622명이 목숨을 잃고 2,370조원의 경제피해가 발생했다. 재난의 45%는 홍수로 인한 피해였으며 이는 총 피해액의 57%에 달한다(WMO, 2021).

기후변화 및 그로 인한 자연재해의 빈도 및 강도의 증대는 기존 도시지역과 비도시지역 생태계의 물질순환 및 수자원 관리 시스템에 한계를 가져올 것이다. 대처해야 할 위기는 홍수, 태풍, 물부족, 가뭄, 폭염, 흑한, 산불, 산사태 등으로 다양하고 빈번해질 것이며, 기존과 다른 유연하고 혁신적인 친환경 해법을 필요로 할 것이다. 최근 코로나(COVID-19) 사태의 급속한 확산과 장기화는 자연친화적 도시환경의 강점이 부각되는 계기가 되었다. 도시화로 인해 훼손되었던 생태계가 락다운(lockdown)과 거리두기로 인해 활력을 되찾았고, 야외활동 수요가 증가하면서 자연생태계는 인류 보건과 회복탄력성(resilience)에 상당한 혜택을 제공하였다. 이러한 상황에서 생태계를 복원하고, 그 기능을 확대하며, 보다 넓은 스케일에서 자연물질의 순환을 구현할 수 있는 방안을 모색하는 일은 선택이 아닌 필수가 되었다. 자연기반해법(Nature-based Solutions, NbS)이란 지속적 인구증가와 도시개발, 기후변화로 발생하는 다양한 환경 문제를 자연과 생태계 기능을 기반으로 한 기법을 통하여 해결하고자 하는 것이다. NbS의 기법은 분야와 목적에 따라 다양하나, 단순히 인공물을 자연물로 대체하는 수준을 넘어서 자연 본연의 작동 원리를 혁신적으로 구현하는 기술을 추구하는 것이라 할 수 있다(IUCN, 2020).

국내외적으로 NbS의 중요성과 실제적 가치에 대한 연구와 논의가 활발해지고 있음에도 불구하고 그것이 구체적으로 어떠한 기법들을 의미하며 물관리 측면에서 기존의 친환경 수자원 관리 해법들과 어떠한 차이점을 지니는 지에 관한 고찰은 매우 미비한 실정이다(Shiao et al., 2020). 본 논문은 NbS와 유사개념들을 다룬 문헌들에 대한 고찰을 통해 NbS의 이론적, 기술적 성격을 구체적으로 분석하고자 한다. 구체적으로는 NbS의 정의와 의미에 대한 검토에서 시작하여 문헌들에서 NbS의 일환으로 다루고 있는 기법들의 분류, 종류 및 기대효과를 살펴보고, 향후 정책적 과제에 대한 시사점을 도출하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 NbS 개념 및 비교

2.1.1 NbS의 정의

본 장에서는 문헌고찰을 통해 NbS의 정의와 기존 친환경 수자원 관리 기법들과의 유사성 및 차이점에 대해 살펴본다. NbS에 관한 가장 보편적인 정의는 세계자연보전연맹과 유럽위원회(European Commission, EC)가 제시한 내용으로, 대부분의 보고서와 연구들은 이 2가지 정의 중 하나를 따르고 있다. 세계자연보전연맹에 따르면 NbS(자연기반해법)란 '인류 복지와 생물다양성 혜택을 동시에 제공하고 사회적 과제를 유연하고 효과적으로 해결하기 위해, 자연 생태계 및 변형 생태계를 보호하고 지속가능한 형태로 관리하는 조치'로 정의할 수 있다(Cohen-Shacham et al., 2016). 본 정의는 다양한 형태의 자연 및 인공 생태계를 복원하고 보전하는 데 초점을 맞추어 이러한 보전행위가 자연스럽게 더 큰 생태적 혜택으로 이어질 수 있도록 하는 것이다.

반면 2015년 유럽위원회는 NbS를 '사회가 환경적, 사회적, 그리고 경제적 과제를 지속가능하고 비용-효율적인 방식으로 해결하는 것을 목적으로, 자연을 배우고 모방하고 활용함으로써 기존의 해결책을 향상시키거나 혁신적 해결책을 개발하려는 행동'으로 정의하였다(EC, 2015). 특히 '탄소를 흡수하고 저장하며 물을 비롯한 자원을 순환시키고 재생시키는 자연의 특징(feature)과 프로세스(process)'를 적극 활용해 기후재난 저감 및 사회적으로 포용적인 녹색 성장을 이룩할 것을 강조하고 있다(EC, 2015). 즉 유럽위원회는 NbS를 혁신적 친환경 기술의 하나로 바라보고 이를 통해 환경-사회-경제라는 TBL (triple-bottom line)의 모든 축을 만족시킬 수 있는 다기능성(multifunctionality)을 강조하고 있다고 볼 수 있다. 세계자연보전연맹과 유럽위원회의 정의를 바탕으로 NbS는 생태계에 대한 개입 정도에 따라 『보전(preservation) < 관리(management) < 변형(alteration) < 재창조(re-creation)』로 세부적으로 분류될 수 있다(Shiao et al., 2020). 보전은 완전한 비개입적 해법을 의미하며, 재창조는 변형생태계 혹은 인공생태계를 창출하는 기술적 개입을 의미한다(Cohen-Shacham et al., 2016; World Bank, 2021).

최근 세계자연보전연맹은 NbS 이외에도 자연유래해법(Nature-derived Solutions, NdS)과 자연모방해법(Nature-inspired Solutions, NiS)이라는 새로운 개념도 언급하였다(Fig. 1, IUCN, 2020). 자연유래해법이란 바람, 파도, 태양 에너지처럼 자연에서 유래한 에너지를 이용해 저탄소발전을 실현하는 것을 의미하며, 자연모방해법은 자연의 원리를 닮은 혹은 생물학적 과정을 모방한 건축 및 인프라 디자인을 의미한다. NdS와 NiS 모두 건강한 자연생태계를 반드시 필요로 하지는 않는다는 점에서 NbS와 근본적으로 다르며, 세계자연보전연맹은 NbS의 본질은 생태계 복원과 확대라고 보고 있다. 이러한 정의를 물관리와 수자원 시스템에 적용한다면 NbS란 자연생태계와 수생태계, 그리고 종다양성의 회복을 돕는 기술이며 이를 통해 자연이 가지고 있는 자정 능력

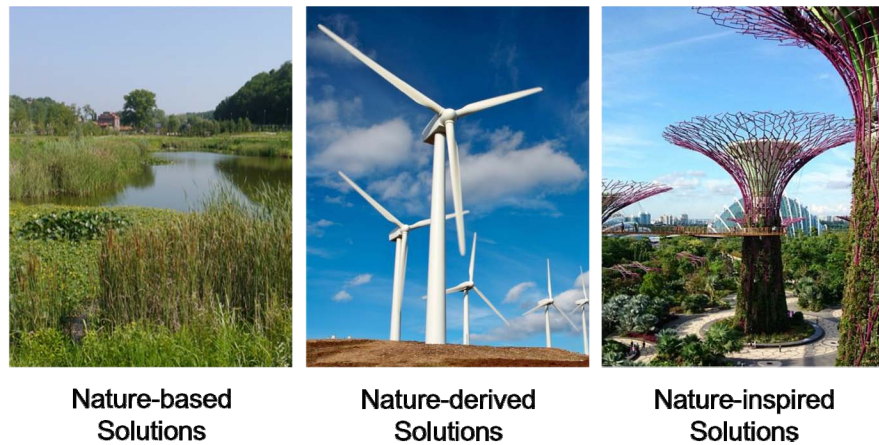


Fig. 1. Comparison of NbS, NdS, and NiS (adapted from IUCN, 2020).

및 재해조절능력, 그리고 회복탄력성을 이용해 다양한 수자원 문제를 해결하고자 하는 것이다.

2.1.2 NbS 연관 개념 및 비교

NbS는 자연물과 생태계 원리를 활용하는 해법이라는 측면에서 기존에 비슷한 방향성을 가진 친환경 공법들과 유사한 측면이 존재한다(Woo and Han, 2020). 국제 보고서들과 실증연구들을 살펴보면, NbS는 차별적 용어라기보다 기존의 유사한 용어들과 접근법을 통합하는 포괄적 프레임워크(umbrella framework)라고 보는 것이 합리적이다(Cohen-Shacham et al., 2016; IUCN, 2020; Ruangpan et al., 2020). 이러한 유사한 용어들이 문헌에 등장하기 시작한 시점들을 살펴보면 1963년 생태공학(Ecological Engineering)이 등장한 이후로 저영향개발(LID) (1977), 최적관리기법(BMP) (1980), 자연하천공법(close-to-nature river technique, CRT) (1985), 산림경관복원(FLR) (1993), 물민감형 도시설계(water-sensitive urban design, WSUD) (1994), 그린인프라(green infrastructure, GI) (1995), 지속가능한 도시배수시스템(sustainable urban drainage systems, SuDs) (2001), 자연기반해법(NbS) (2008), 생태기반적응(eco-

system-based adaptation, EbA) (2009), 생태기반 재해위험저감(ecosystem-based disaster risk reduction, Eco-DRR) (2010), 기후응답서비스(climate adaptation services, CAS) (2012), 그리고 블루그린인프라(BGI) (2013)의 순서로 용어들이 등장, 발전, 보급되어 왔다(Fig. 2) 이러한 용어들의 정의와 목적, 주요 도입지역을 정리하면 Table 1과 같다.

12개의 연관 개념들 중, LID, BMP, WSUD, SuDs는 도시 지역의 강우유출(stormwater) 관리에 초점이 맞춰져 있다. 구체적인 기법에서는 차이가 있지만 큰 틀에서는 도시 내에서 자연경관 및 자연물, 투수성 표면의 활용을 통해 종래의 직선적 유출량 관리에서 국지적 관리 및 순환적 접근방식으로 바뀌어 배수, 물공급, 생태계가 하나의 시스템으로 통합된 친환경 시스템을 창출하는 것을 말한다(Ruangpan et al., 2020). CRT는 보다 좁은 관점에서 인공하천을 자연하천의 형태와 물리적 구성에 가깝게 개조하는 기술을 의미하며, GI와 BGI는 도시화로 인해 단절되거나 훼손된 자연녹지와 물, 수자원의 네트워크를 복구하고 강화하는 것을 의미하는 것으로, 물 관리에서 더 나아가 다양한 생태계서비스와 사회경제적 부가 가치의 창출을 지향한다(Woo and Han, 2020). FLR은 그린

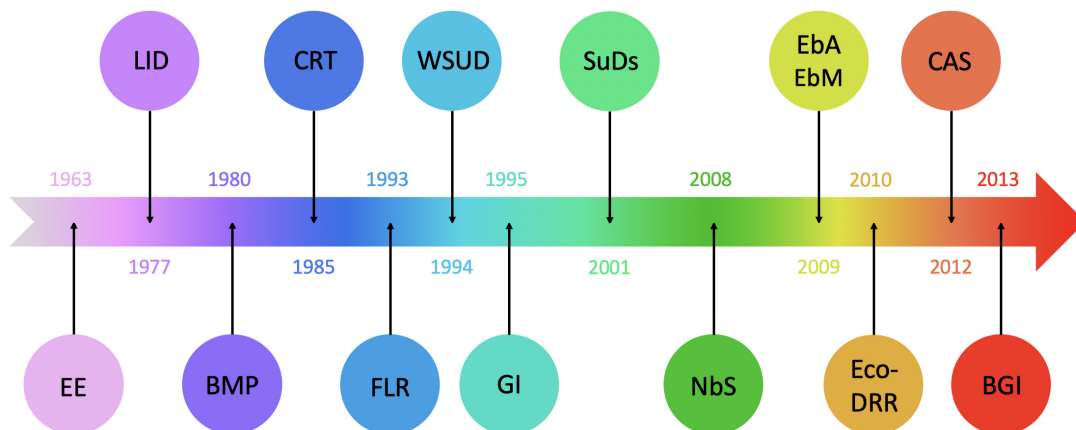


Fig. 2. The timeline of terminologies similar to nature-based solutions in literature (adapted from Cohen-Shacham et al., 2016 and Ruangpan et al. 2020).

Table 1. Definition of terminologies similar to NbS: Descriptions and major adoption countries (adapted from Cohen-Shacham et al., 2016, Ruangpan et al., 2020, Woo and Han, 2020)

Term	Full Name	Definition and Purposes	Main Adoption
EE	Ecological Engineering	Management of systems of human and environmental self-design or light management that joins human design and environmental self-design, so that they are mutually symbiotic	USA
LID	Low-impact Development	Urban retrofitting to increase natural pervious surfaces and features for infiltration and evapotranspiration that help reduce urban stormwater runoff and flooding	USA New Zealand
BMP	Best Management Practices	A practice or set of practices for eliminating, mitigating, or preventing targeted stormwater runoff pollutants and contaminants from reaching receiving waters	USA Canada
CRT	Close-to-nature River Techniques	Reintroduce natural physical processes (variation of flow and sediment movement), features (sediment sizes and river shape), and physical habitats of a river system (submerged bank and floodplain areas)	Germany Europe
FLR	Forest Landscape Restoration	Restoration of forested ecosystems through planting trees, forest succession, enhancing connectivity between protected areas, protecting water and soil resources, and reinforcing cultural values	Africa
WSUD	Water Sensitive Urban Design	A design and engineering approach to managing urban water balance, maintaining water quality and conservation, and enhancing water-related environmental and recreational opportunities	Australia
GI	Green Infrastructure	The network of natural and semi-natural areas, features, and green spaces that enhances ecosystem health and resilience, contributing to the maintenance and enhancement of ecosystem services and biodiversity	USA UK
SuDs	Sustainable Urban Drainage Systems	Facilitate the natural drainage processes of an area using natural features such as swales, rain gardens and green roofs, in order to enhance localized infiltration, attenuation and detention of stormwater	UK
NbS	Nature-based Solutions	NbSs focuses on the restoration and/or replication of natural processes, ecosystem services and biodiversity to address environmental, social and economic challenges in sustainable ways	Europe
EbA, EbM	Ecosystem-based Adaptation, Ecosystem-based Mitigation	The use of biodiversity and ecosystem services as part of an overall adaptation strategy to help adapt to the adverse effects of climate change and build resilience	Canada Europe
Eco-DRR	Ecosystem-based Disaster Risk Reduction	Manage, conserve, and restore healthy ecosystems to maximize their capacity to moderate and/or reduce natural hazards and disaster risk	Europe USA
CAS	Climate Adaptation Services	Restoration and use of the key ecological mechanisms and characteristics that support the capacity of ecosystems to adapt to climate changes	Multiple
BGI	Blue-Green Infrastructure	The use of ecosystem services provided by urban water bodies and vegetation including water supply, climate regulation, pollution control, hazard regulation, crops, food and timber, biodiversity, and cultural services	Europe

인프라 중에서도 산림생태계의 복원에 초점을 맞춘다. Eco-DRR, EbA, 그리고 CAS는 기후변화 적응이라는 목표를 달성하기 위한 수단으로 생태계와 생물다양성에 초점을 맞춘다. Eco-DRR은 중단기적 관점에서 생태계보전을 통해 자연재해 취약성 저감을 목표로 하며, EbA와 CAS는 장기적 관점에서 생물다양성과 생태계 보전을 통해 기후변화에 대한 포괄적 적응을 추구한다. EE는 모든 자연기반 솔루션을 가능케하는 공학 및 설계기술에 관한 것이다. 자연 생태계에 대한 초점과 포괄성 측면에서 BGI와 EE가 NbS에 가장 가깝다고 여겨지나, NbS는 자연기반해법에 대한 다양한 해석을 허용하고, 모든 기술적·비기술적 접근방식을 망라하기 때문에 다양한 이해관계자들을 논의에 포섭할 수 있다는 특징이 있다(Woo and Han, 2020).

역사적으로 NbS의 발전을 살펴보면, 물관리 패러다임은

단일 기능(예: 이수, 치수, 수량확보)에 대한 초점에서 점차 다기능적 설계로 발전하였고 나아가 생태계 보전, 회복탄력성 및 도시의 다른 기능과의 연계에 대한 강조로 나아갔다(Fig. 3). 최근 기후변화와 사회경제적 웰빙 등 수자원이 갖는 포괄적 중요성에 대한 대중들의 인식이 높아지고 이해관계자와 이익집단의 시각이 다양해지면서 사회적 협의를 통한 사회정치적(sociopolitical) 물관리라는 개념도 등장하였다(Oral et al., 2020). NbS는 이러한 패러다임 발전의 최전방에 위치하여 도시의 일부 혹은 전체를 대상으로 한 재자연화(re-naturalization)라는 급진적 해법까지도 수용할 수 있는 생태계 중심 물관리 패러다임을 내포하고 있다.

물관리 패러다임의 발전에서 NbS에 기반한 도시, 즉 Nature-based city라는 개념은 가장 최전방에 위치하고 이전에 등장한 상대적으로 협의의 유사 개념들은 자연기반 도시

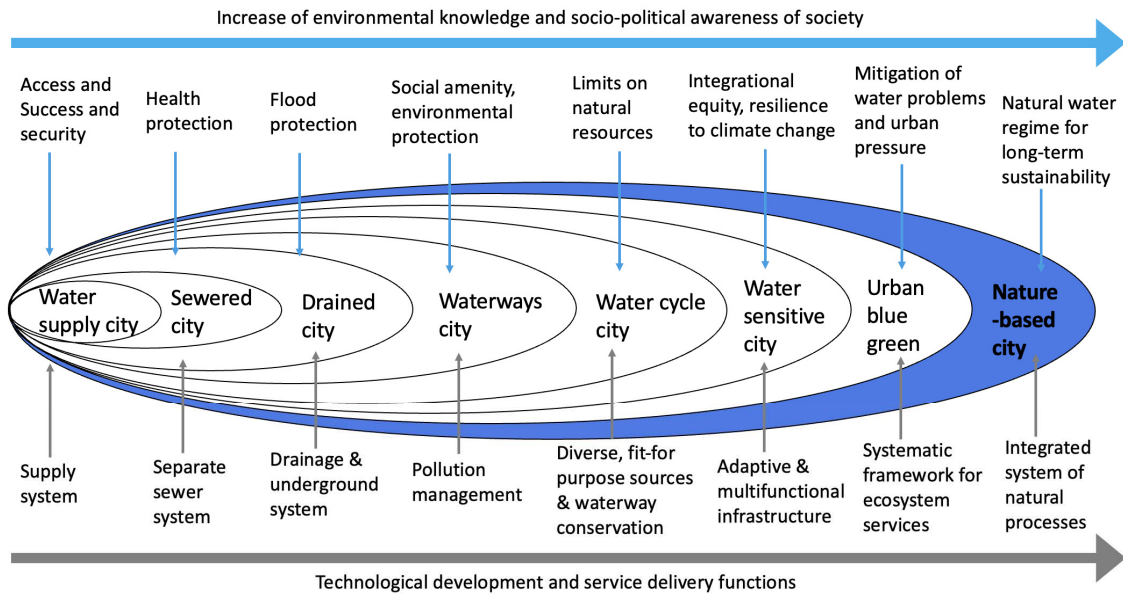


Fig. 3. Historical evolution of water management paradigm: From water-supply city to nature-based city (Adapted from Oral et al. 2020).

에 포함되는 형태로 나타난다(Fig. 3). SuDs, LID의 경우 물 순환 도시(water cycle city)에 초점을 맞춘 개념이며, WSUD는 기후변화에 대비한 물 민감형 도시(water sensitive city), 그리고 GI와 BGI는 물관리에서 더 나아가 포괄적 생태계서비스 제공을 목표로 하는 Urban blue green에 해당한다. NbS는 자연에 대한 훨씬 방대하고 기술적인 이해를 바탕으로 자연기반 시스템의 통합과 지속가능성, 기후변화 저감을 추구하는 포괄적 전략이다. 한편, EbA, EbM, 그리고 CAS는 기후변화 회복탄력성을 증시하는 물 민감형 도시 전략에 가장 가깝지만 기후변화에 수반되는 기타 재난(폭염, 폭한, 서식지 파괴, 홍수)에 대응하기 위한 목적도 가지고 있어 다른 개념들과 맥락이 다소 다르다고 볼 수 있다. CRT와 FLR은 각각 자연하천 그리고 자연산림 생태계 회복에 초점을 맞춘 하위 개념으로 단기적인 재해예방효과는 불분명하다.

3. Results and Discussion

3.1 NbS 분류

3.1.1 기능별 분류

NbS의 유형을 분류하는 체계는 다양하지만, 크게 기능별 분류, 규모별 분류, 목적별 분류를 시도할 수 있다. 먼저 NbS는 그 기능에 따라 저감(mitigation), 적응(adaptation), 기능향상(enhancement)을 위한 솔루션으로 나눌 수 있다. 하나의 NbS 사례가 둘 이상의 목표에 동시에 효과를 가질 수 있으며 이러한 다기능성(multifunctionality)은 NbS의 중요한 특징이다.

- 저감: 저감이란 오염물질의 저감 및 탄소배출의 저감을 의

미한다. 도시지역의 수자원 사용과 비점오염원 등으로 인해 배출되는 오염수의 정화, 물관리와 수자원 공급 등에 필요한 에너지 사용으로 인한 탄소 배출의 저감, 그리고 이산화탄소를 비롯한 온실가스의 흡착을 통한 저감 등을 달성할 수 있는 방안의 하나로 NbS가 사용될 수 있다(UN Environment-DHI, UN Environment and IUCN, 2018). 저감을 위한 NbS의 효과 평가는 오염물질의 감소와 탄소배출 감축 능력에 달려있다. 인공습지를 조성해 자연적 기작을 통해 하수와 비점오염원이 정화되도록 함으로써 인공처리시설 가동으로 인한 탄소배출을 줄이는 사례가 이에 해당한다. 습지 가운데 염습지(salt marshes), 이탄습지(peatlands)는 습지로서의 기능(수질정화, 저류, 침투)뿐만 아니라 이산화탄소를 흡수하고 저장하여 지구온난화를 늦추는 효과를 가지고 있어 다양한 저감기능을 가진 NbS로 거론된다(Gunther et al., 2020). 물관리 분야는 아니지만 도시 건축물에 녹색지붕과 녹색 벽을 설치하고 다양한 도시 숲을 조성해 도시 피복 표면의 기온을 낮춰서 열섬으로 인한 생태계 피해를 줄이고 여름철 냉방에너지 소비를 저감하는 전략도 포함된다.

- 적응: 향후 다양한 기후 변화 시나리오에 대해 효과적으로 적응하기 위한 방안으로서 NbS가 사용된다. 강우유출, 홍수, 가뭄, 태풍 등 수리기상학적 재해 저감 분야에서 기후변화로 인한 불안정한 강우패턴에 적응하기 위해 다양한 NbS가 이용될 수 있는데, 상류지역에 산림을 보전하거나 산림이 황폐화된 곳에 재산림화를 실시하여 자연생태계를 회복시키고 산림 함수량과 지하수량을 늘려서 가뭄 등 극단적 기후이벤트에 대비하는 전략이 이에 해당한다. 산림 보전 및 재산림화는 수질 및 토양 정화, 탄소흡수 효과도 가지고 있어 전술한 저감 기능과도 연결된다. 이상고온과 폭염에 대비하기 위해 도시지역 내 블루-그린인프라(BGI)

를 조성해 도시 기온을 적절히 조절하는 형태도 적응 기능에 속한다.

- 기능향상: 인구증가와 도시개발, 지속적 교외화로 인한 물순환 및 수생태계의 교란을 바로잡기 위한 방안으로서 NbS가 이용되는 경우이다. 도시개발은 자연적 토지피복을 콘크리트, 아스팔트 등의 인공표면으로 바꾸어 지하수 고갈, 수질악화, 홍수 등의 복합적 문제를 야기한다. NbS 중 LID(저영향개발), BMP, SuDs는 불투수표면을 투수표면으로 바꾸고 녹지면적을 확대해 물의 자연적 순환 과정을 회복시켜 줌으로써 도시 정주환경의 지속가능성과 쾌적성을 높여준다.

이외에도 NbS는 United Nations (UN)의 2030년 SDGs (Sustainable Development Goals)와 관련해 다양한 목표들을 성취하는 데 효과적이다. 예를 들어 습지 생태계서비스를 보존하는 NbS는 건강과 웰빙(SGD3), 깨끗한 식수와 위생(SDG6), 지속가능한 도시와 공동체(SDG11), 수생태계(SDG14), 생명체 보호(SDG 15) 등 다양한 SDG 목표를 조화롭게 달성하는 데 도움을 줄 수 있다(Ruangpan et al., 2020).

기후변화에 효과적으로 대응하기 위해서 현재 물관리 체계는 NbS의 저감, 적응 그리고 기능향상 부문을 모두 활용할 필요가 있다. 첫째, 기후변화를 일으키는 원인물질인 이산화탄소 등 온실가스의 배출을 저감하고, 둘째, 기후변화로 인한 홍수, 가뭄 등 극단적 강우현상의 발생 빈도와 강도 증대에 자연적이고 지속가능한 방식으로 대응하며, 마지막으로 기후변화로 인한 이상고온 및 저온 발생 시 자연기작을 통해 이상 기후를 감내가능한 범위로 조절해줌으로써 인간과 생태계에 가해질 충격을 완화시키는 것이다. 과학적 설계를 통한 물관리 시스템의 자연화를 통해 위와 같은 문제들을 통합적이고 동시에 해결하는 것이 중요하다.

3.1.2 규모별 분류

NbS는 주로 도시지역을 대상으로 하는 소규모 NbS와 비도시지역(하천, 산림, 해안지역)을 대상으로 하는 상대적으로 규모가 큰 광역 NbS로 나눌 수 있다. 소규모 NbS는 주로 건물이나 도로와 같은 단일 장소에 적용되거나 성능을 높이기 위해 특정 사이트 내 다수의 건물 및 도로에 적용된다. 주요 목적은 침투 홍수량 감소 및 지연, 하수 및 우수 관리 범람 저감, 지표면 유출량 감소이며, 가뭄 예방도 포함된다. 물 사용량이 높은 교외 주거지역에 빗물 저류 및 우수 재활용량을 높여서 물 소비를 줄이기도 한다. 가장 흔한 도시 NbS는 녹색지붕(혹은 옥상녹화), 빗물정원, 빗물집수, 투수성 포장, 건조저류연못(dry detention pond), 생태저류지, 인공습지, 그리고 식목이다(World Bank, 2021). 현재까지 대부분의 성능평가는 단일 NbS 기법에 대해서 이루어졌으며 통합적 적용에 의한 시너지 평가는 부족한 실정이다.

도시지역 NbS의 성능을 결정하는 가장 중요한 요인은 강우량과 강우빈도이다. 각각의 NbS는 서로 다른 저장능력과 투수효과를 갖고 있다. 가령, 녹색 지붕과 빗물정원의 침투 홍수량 감소 효과는 대량의 드문 강우패턴보다 소량의 잦은 강우 패턴에 효과적이며, 인공습지와 투수포장은 단기 집중

호수에 홍수예방효과가 더욱 큰 것으로 나타났다(Ruangpan et al., 2020). 다양한 NbS 기법들은 함께 연계해서 쓰일 경우 시너지를 낼 수 있다. 가령, 한 지역 내에서 녹색지붕과 투수포장 중 하나의 기법만을 적용할 경우보다 두 기법을 모두 적용할 경우 더 큰 최대 침수량의 감소를 기대할 수 있다(World Bank, 2021; Wu et al., 2018). 이는 서로 다른 NbS가 다른 하위유역(sub-catchment)에서 발생한 유출량을 국지적으로 동시에 처리하기 때문이다(Ruangpan et al., 2020). 따라서 여러 기법을 통합한 NbS를 적용할 때에는 세부 기법마다 공간적 배치를 신중히 결정해야한다. Lique et al. (2016)은 지하 흐름 인공습지, 지상 인공습지, 그리고 수생식물을 결합한 NbS가 combined sewer overflow (CSO)를 정화하는 데 탁월한 효과가 있으며 지하저류조와 건조저류지를 결합한 것보다 수질개선과 유출수조절에 더 효과적임을 발견했다.

기존 문헌에서 비도시지역의 하천, 산림, 해안지역을 대상으로 한 NbS 연구는 도시지역 대상의 연구에 비해 드물다(Turkelboom et al., 2021). 기후변화와 도시화로 인한 물관리 위기는 보다 광역적인 규모에서 이루어지는 물 수지 균형, 물 순환, 그리고 생태계 서비스에 지대한 영향을 준다. 따라서 넓은 규모의 NbS가 작은 규모의 NbS 보다 효과적일 수밖에 없다(WWAP/UN-Water, 2018). 홍수 및 가뭄 위험 저감에 있어서도 습지 재건, 유역 관리 등 광역 NbS의 효과가 토지 이용규제 등 도시지역 NbS에 비해 훨씬 크며 근본 원인(source)을 다루는 상위 해결책으로 여겨진다(Fig. 4). 그럼에도 불구하고 광역적 혹은 비도시지역 NbS에 대한 연구는 부족한 실정이다.

비도시지역에서 NbS의 개입형태는 관리(management)와 복원(restoration)으로 나눌 수 있다. 자연습지의 어류 개체수를 조절하는 것, 산림 수종을 탄소 흡착력 및 저장량이 높고 경제성이 높은 수종으로 대체하는 것은 기존 자연 생태계의 기능을 강화시키는 ‘관리’에 해당한다(Triest et al., 2016). 반면 생태하천을 만들고 더 나아가 유역규모의 LID기법과 연계시키는 것은 자연성의 ‘복원’에 해당한다. 가장 보편적 광역 NbS 형태는 홍수범람유역에서 산림의 보존 및 재생, 재산림화, 자연 홍수저류지 복원, 홍수터 조성, 하천 폭 확대, 하천 식생대 조성, 자연하천 복원, 그리고 대규모 습지 조성이다(Perosa et al., 2021; Turkelboom et al., 2021; U. S. EPA., 2005). 대표적으로 네덜란드의 ‘Room for the River 프로젝트’가 있다. 2006년부터 2015년까지 라인-뫼즈강을 따라 9개의 광역 NbS 프로젝트를 수행하였다. 주된 작업은 홍수터 및 주수로 준설, 제방 후퇴 및 재배치, 고수위 수로(high-water channel) 건설, 홍수소통 장애물 제거, 제방 강화이다. 저류공간을 확보하고 습지화하여 서식지와 생태계를 보호하고 휴양 기능도 강화하였다(Ruangpan et al., 2020). 폴란드의 국립산림청은 지하수위 감소로 인한 산림 황폐화와 산림습지 소멸을 막기 위해 국유림과 사유림에 소규모 저류지 조성 사업을 전개하였다(Matczak et al., 2019). 수천개의 소규모 저류지와 소수의 댐을 설치한 결과 지하수위 상승에 큰 효과를 거뒀으며 가뭄예방 및 산불예방, 그리고 수생태계 복원에도 높은 효과가 있음을 입증하였다. 농어촌지역은 이러한 광역적

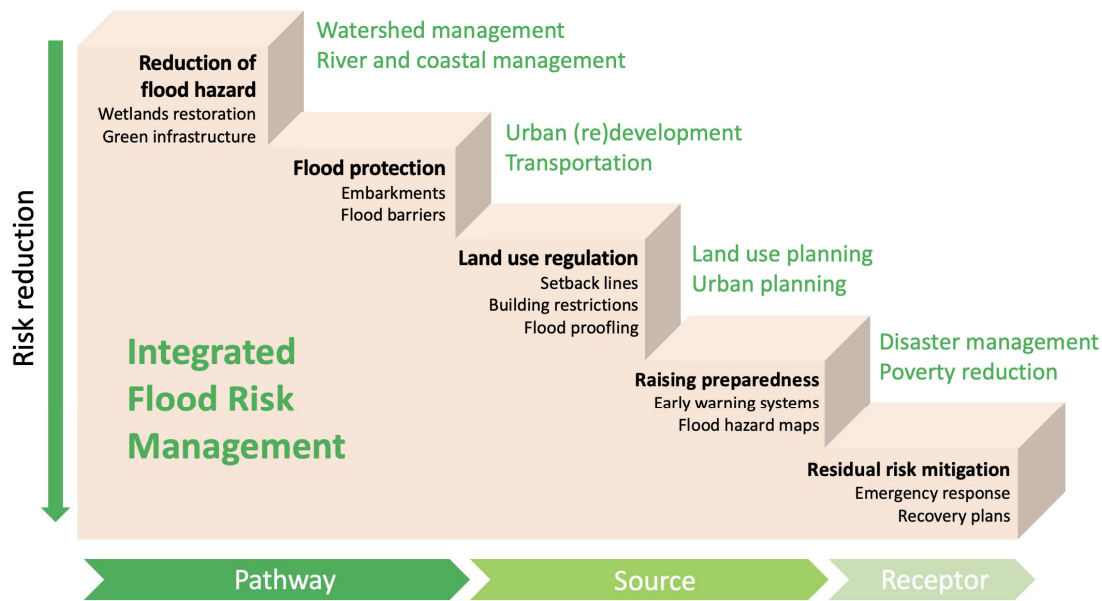


Fig. 4. SPR (Source to Pathway to Receptor) (WWAP/UN-Water, 2018).

NbS로 높은 편익을 누릴 수 있다. 광역 인공습지는 관개 및 농업용수 등 비음용 용도에 적합한 용수를 생산할 수 있어 효과적이며 하류 오염 감소와 같은 전반적 편익도 발생하기 때문이다(WWAP/UN-Water, 2018).

대규모 기후변화에 보다 효과적으로 대응하기 위해서는 광역적 차원의 NbS 설계가 필요하다. 광역적 NbS는 대규모 건설 및 관리 비용이 소요되며 오·폐수처리시스템 등 다른 광역 인프라와의 연계가 필수적으로 고려되어야 하는 등 매우 복잡한 속성을 지니고 있다. 유역과 연계되지 않은 생태하천 복원은 안정적 수량과 수질을 확보할 수 없기에 하천의 지속가능성을 위해서는 유역 내 다양한 NbS 기법 적용을 통한 수량확보가 필수적이다(WWAP/UN-Water, 2018). 해안지역과 산림지역도 NbS를 도입하여 다양한 재해 위험(예: 태풍, 풍랑, 해안 침식, 산사태)을 예방할 수 있는 잠재력이 매우 높다. 그러나 상대적인 불확실성과 복잡성으로 인해 광역 NbS에 대한 투자는 그레이인프라 투자와 소규모 NbS에 비해 상

대적으로 미비한 실정이다.

3.1.3 재해범주별 분류

NbS는 예방하고자 하는 재해의 범주에 따라 그 유형을 분류할 수 있다. 크게 홍수, 가뭄, 폭염, 산사태, 그리고 폭풍해일과 연안침식의 5가지로 자연재해 유형을 구분할 수 있으며 그 세부적인 기법은 Table 2와 같다(Kumar et al., 2021). 세부적인 기법들을 살펴보면, 다양한 형태의 자연 및 인공 습지의 사용이 가장 보편적으로 제시되며, 빗물정원의 설치, 투수층 확대, 생태저류지, 홍수터 복원, 재산림화, 천이적 식목, 덕턱(berm), 식생수로, 갈대밭, 망그로브, 수생식물 조성 등 앞서 살펴본 기존 친환경 공법들의 특징적 솔루션들이 고르게 포함되어 있음을 알 수 있다. 이는 NbS가 독창적 기법들을 제시한다기보다는 기존 친환경·생태공법들을 포괄적으로 지칭하는 상위 개념임을 다시 확인해준다.

NbS는 기후변화로 인한 도시 및 연안 홍수 피해를 저감하

Table 2. Type of NbS used for different types of disaster and risk (adapted from Kumar et al., 2021)

Type of Disaster	Type of NbS
Flood	Wetland, salt marshes, coastal wetlands, estuarine wetlands (mudflats and channels), vegetation roughness, wetland conservation, pond and lake, bio-retention, grass swale, porous pavement, low earth bunds and debris dams, tree woodland, storage pond, afforestation/revegetation, diversion channels, mangrove forests, hybrid (blue-green-grey approach), dune system rehabilitation, rain gardens, green walls/roofs
Drought	Afforestation/re-vegetation of hillslopes and degraded land, removal of invasive plant species, increasing water table in the main waterway, expanding the beds of small waterways, diverse afforestation (varying species), wetlands, salt marsh, retention ponds, drought tolerant crops
Heatwave	Blue-green-grey infrastructure, grassland, forests, tree planting, green roof/wall, water stretch, cool pavement, xerophytic trees with broad canopies
Landslide	Afforestation, re-vegetation, sand-filled drainage ditch, plant roots, birch trees
Storm Surge and Coastal Erosion	Salt marsh, mangroves, vegetated berms, dunes, coral reefs, seagrass, seagrass meadow, coastal wetland restoration, oyster reef restoration, beach restoration

기 위한 비용효과적인 수단이 될 수 있다. 홍수피해 저감 및 예방은 NbS의 효과가 가장 빈번히 검증된 부문이다. 네덜란드 에인트호벤에서 침투표면(porous pavement)의 다양한 확대·배치를 NbS로 활용한 연구는 홍수 시 침수면적 감소가 5년 주기 홍수의 경우 약 32%, 10년 주기 홍수는 23%, 그리고 100년 주기 홍수는 17%까지 가능함을 입증하였다(Costa et al., 2021). 유럽의 도시들을 대상으로 NbS (자연 저류지, 생태수로)와 그레이 인프라의 비용편익을 분석한 결과, NbS는 그레이 인프라보다 세제곱미터당 15~63% 가량 적은 비용으로 동일한 수준의 홍수 피해를 예방하는 것으로 나타났다(Le Coent et al., 2021). 염습지와 망그로브는 기존 공학적 대비책보다 2~5배 적은 비용이 드는 반면 홍수와 해일피해를 평균 약 70% 줄여주는 것으로 나타났다(Narayan et al., 2016). 녹색지붕과 녹색벽 등 건물 중심 하이브리드 NbS 기법은 홍수 저감 뿐만 아니라 생활하수 및 유출수 정화 측면에서 상당한 비용효과성과 에너지절약 잠재력을 가지고 있는 것으로 나타났다(Boano et al., 2020; World Bank, 2021). 가뭄 피해 저감은 기후변화 대응 과제 중 가장 복잡한 분야이다. NbS의 가뭄 예방 효과에 관해 명확히 밝혀진 실증적 증거는 아직까지 부족하다(Debele et al., 2019).

3.1.4 하이브리드 솔루션

NbS가 의미하는 솔루션에는 자연기반 해법을 기존 공학적 솔루션과 병합해 불확실성과 변동성을 낮추는 하이브리드 접근법(hybrid solutions)도 포함된다. 최상의 효과를 내기 위해서 종래의 엔지니어링 기법과 NbS를 결합하는 이러한 전략도 다양한 보고서와 연구들에서 제시되고 있다. 생태계가 수자원에 미치는 영향의 높은 변동성으로 인해 NbS의 효과에 대한 일반화가 어렵다는 점이 하이브리드 솔루션을 고려하게 되는 이유 중 하나이다. 일례로 고도처리시설을 통해 개선된 하수

처리수를 수량이 부족한 인공습지, 수변공간, 지하수 충전에 연계시키는 방안은 공학적 해법과 자연적 해법을 적절히 융합해 시너지 효과를 노린 NbS의 일종으로 볼 수 있다(WWAP/UN-Water, 2018). 이와 비슷하게 다양한 그린인프라 기법은 댐 건설과 하수처리플랜트 운영을 보조할 수 있다(Table 3). NbS의 일종인 그린인프라와 그레이인프라를 결합하면 비용을 절감하고 수자원 변동성에 더욱 잘 대처할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 현재 적절한 조합을 찾기 위한 기술적 지침이나 의사결정 가이드라인이 부재한 상황이며, 이런 이유로 프로젝트 개발계획 단계에서 쉽게 간과되고 있다(WWAP/UN-Water, 2018).

3.2 NbS 선택 및 평가

모든 유형의 NbS가 모든 문제 상황에 적합한 해결책은 당연히 아니다. 따라서 적합한 NbS를 선택하기 위한 의사결정 과정이 매우 중요하다(Croeser et al., 2021). 이에 필요한 최소한의 기준은 첫째, 적용대상지역의 특성(도시 혹은 비도시, 고밀 혹은 저밀도시 형태)과 적용가능한 공간의 규모, 둘째, 얻고자 하는 효능을 정확히 판단하는 것이다. 예를 들어, 도시지역의 강우유출 저감과 열섬현상 완화를 동시에 달성하고자 하는 경우 LID와 같이 투수성 자연 피복과 정원, 식목의 확대가 적절한 NbS 선택지일 수 있다. 저밀도의 교외지역에서는 유용할 수 있는 공간이 상대적으로 넓으므로 생태저류지나 대규모 습지 갈대밭 설치를 고려할 수도 있다(World Bank, 2021). 유럽위원회(EC), World Bank, 환경개발국제연구소(International Institute for Environment and Development, IIED) 등 국제기구들은 NbS 선택과 관련해 다양한 포털사이트를 만들어 적용지역과 목적에 적합한 NbS에 대한 정보를 얻을 수 있도록 하고 있다. 특히 유럽위원회는 NbS 지식공유 플랫폼인 ‘OPPLA(oppla.eu)’를 만들어 NbS 관련 사례와 연구

Table 3. Hybrid solutions for water supply and quality regulations and flood moderation (WWAP/UN-Water, 2018)

Water management issue (primary service)	Green Infrastructure solution	Location				Corresponding grey infrastructure solution
		Watershed	Floodplain	Urban	Coastal	
Water supply regulation (e.g., drought management)	Re/afforestation and forest conservation	O				Dams and groundwater pumping water distribution systems
	Reconnecting rivers to floodplains		O			
	Wetlands restoration/conservation	O	O	O		
	Constructing wetlands	O	O	O		
	Water harvesting	O	O	O		
	Green spaces (bioretention, infiltration)				O	
Water quality regulation	Permeable pavements				O	Water treatment plant
	Re/afforestation and forest conservation	O				
	Riparian buffers		O			
	Reconnecting rivers to floodplains		O			
	Wetlands restoration/conservation	O	O	O		
	Constructing wetlands	O	O	O		
	Green spaces (bioretention, infiltration)				O	
	Permeable pavements				O	

Water management issue (primary service)	Green Infrastructure solution	Location				Corresponding grey infrastructure solution
		Watershed	Floodplain	Urban	Coastal	
Erosion control	Re/afforestation and forest conservation	O				Reinforcement of slopes
	Riparian buffers		O			
	Reconnecting rivers to floodplains		O			
Biological control	Re/afforestation and forest conservation	O				Water treatment plant
	Riparian buffers		O			
	Reconnecting rivers to floodplains		O			
	Wetlands restoration/conservation	O	O	O		
	Constructing wetlands	O	O	O		
Water temperature control	Re/afforestation and forest conservation	O				Dams
	Riparian buffers		O			
	Reconnecting rivers to floodplains		O			
	Wetlands restoration/conservation	O	O	O		
	Constructing wetlands	O	O	O		
	Green spaces (bioretention, infiltration)			O		
Moderation of extreme events (floods)	Re/afforestation and forest conservation	O				Dams and levees
	Riparian buffers		O			
	Reconnecting rivers to floodplains		O			
	Wetlands restoration/conservation	O	O	O		
	Constructing wetlands	O	O	O		
	Establishing flood bypasses		O			Urban stormwater infrastructure
	Green roofs			O		
	Green spaces (bioretention, infiltration)			O		
	Water harvesting	O	O	O		
	Permeable pavements			O		
Coastal flood(storm) control	Protecting/restoring mangroves, coastal marshes and dunes				O	Sea walls
	Protecting/restoring reefs (coral/oyster)				O	

성과들을 꾸준히 공유하고 있다(Fig. 5).

보다 다양한 NbS 건설을 설계할 경우에는 각 NbS의 종류와 위치선정별 성능의 변화를 세밀하게 계획할 필요가 있다. NbS는 공간적 분포와 규모에 따라 성능이 달라지기 때문인데, 이러한 공간배치 의사결정을 돕기 위해 다양한 오픈소스 시뮬레이션 소프트웨어(예: SWMM, SUSTAIN, SOLWEIG)를 사용할 수 있다(Ruangpan et al., 2020). 그러나 NbS 프로젝트를 기획하고 NbS 종류와 규모를 결정하는 데 있어 가장 중요한 기준 중 하나는 비용 대비 편익이다. 현재까지 다양한 NbS의 실행 비용과 편익에 대한 분석이 폭넓게 이루어지지 않았다(WWAP/UN-Water, 2018; World Bank, 2021). NbS 기법 중에서 생태계 및 수자원 보전만으로도 다양한 사회경제적 혜택을 창출할 수 있다. 10만 명 이상 인구를 가진 전 세계 4,000개 도시 가운데 4/5가 상류 수림의 보호와 재산림화를 통해 수질개선을 기대할 수 있으며, 1/6은 자연기반 해법의 실행비용을 도시의 수처리비용의 절약을 통해서 충당이 가능하다(Abell et al., 2017). 또한 도시 수자원 보전은 5,400여 생물종의 멸종을 막을 수 있고 매년 10기가 톤의 탄소를

저감할 수 있으며, 홍수, 토사유출, 산불 재해 위험을 낮춰준다(Abell et al., 2017).

NbS로 인한 편익의 정량화는 의사결정자 및 주민들에게 사업성을 설득하기 위해 반드시 필요하다. 기존 연구들은 생애주기비용, 다기준분석, 다속성효용이론 등을 사용해 편익을 추정하고 있다(Han and Kuhlicke, 2019; Ruangpan et al., 2020). 생애주기비용(life cycle costing, LCC) 접근법은 기반시설 전 단계의 투자비용(건설, 운영, 유지보수 비용 및 기회비용) 대비 편익을 산정하는 방법이다(Boano et al., 2020). 현재까지 다수 NbS 관련 연구들이 2년 미만의 운영기간을 지닌 NbS를 대상으로 실시한 분석을 기반으로 하고 있는 만큼 15년 이상의 운영기간을 가지고 초기투자 및 장기 유지보수를 모두 거친 NbS를 대상으로 한 생애주기비용분석이 필요하다(Boano et al., 2020). 다기준분석(multi-criteria analysis, MCA) 접근법은 사회적, 경제적, 기술적으로 충돌하는 여러 기준들이 있을 때 사용할 수 있는 분석법으로 평가기준별로 중요도를 매겨 고려되고 있는 대안별로 우선순위를 계산할 수 있는 의사결정 방법이다(Croeser et al., 2021; Lique et

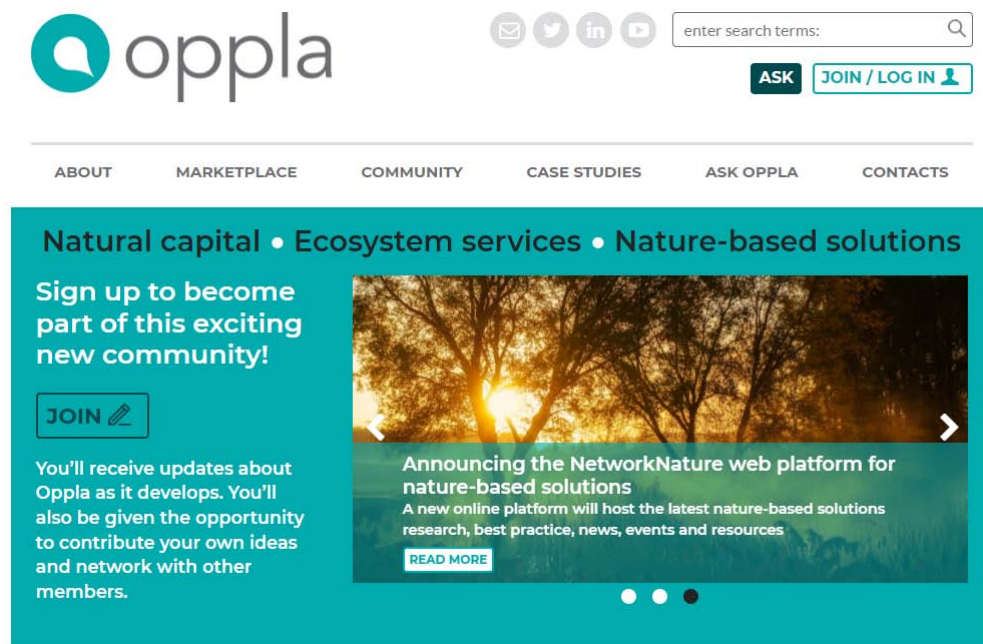


Fig. 5. NbS-related knowledge-sharing platform of European Commission: OPLLA (oppla.eu).

al., 2016). 현실에서 NbS를 운영하게 될 주체들(예: 지방자치단체)은 다양한 이해관계와 선호도 뿐만 아니라 상이한 전문성과 자본력을 가지고 있을 가능성이 높다. 따라서 NbS 운영의 지속가능성을 높이기 위해서는 기술적, 사회적, 경제적 성능을 고루 평가할 필요가 높다(Croeser et al., 2021). 다속성 효용이론(multi-attribute utility theory)을 이용할 경우, 정량적 수치뿐만 아니라 속성간 상충(trade-off), 주민들의 선호도, 효과의 불확실성도 고려하여 대안들의 가치를 평가할 수 있다(Ruangpan et al., 2020).

기존 NbS 대안의 선택 및 평가에 있어 공통된 한계점들이 있다. 첫째, NbS의 편익 평가에서 금전적으로 환원되기 어렵거나(예: 질적 만족도) 아직 환원되지 않은 효과들(예: 기온 및 대기질 향상효과)을 평가체계에 합리적으로 통합하는 것은 아직 해결되지 못한 과제이다(Shiao et al., 2020). 둘째, 도시지역 소규모 NbS 개입에 비해 광역규모 NbS (하천유역 및 해안범람 위험, 가뭄, 산사태, 태풍 등)에 관한 편익 평가 연구는 부족한 실정이다. NbS가 주류 해법이 되기 위해서는 광역규모 NbS (예: 하천 재자연화)에 대한 검토가 필요하다. 마지막으로, NbS의 효과적 운영과 정확한 평가를 위한 운영 통제 체계에 관한 연구가 필요하다. 원격 센서 및 통신, 감시 제어 및 데이터 획득 시스템을 지칭하는 SCADA (supervisory control and data acquisition)를 이용한 NbS의 제어가능성은 스마트 NbS로도 불린다(Ruangpan et al., 2020). NbS의 편익을 정량화하고 운영상의 불확실성에 대한 의구심을 해소시키기 위해 보다 실증적인 NbS 연구의 축적이 앞으로 더욱 필요하다.

3.3 향후 과제

NbS 관련 선행 문헌들에서 공통적으로 언급되는 향후 과제

는 크게 3가지로 나눌 수 있다. NbS 선택 매뉴얼과 가이드라인의 개발, 집행 거버넌스 구축, 그리고 NbS 국제 표준의 수립이다. 첫째로, 다기능(multi-functional) NbS 설계에 필요한 기술적 가이드라인을 개발할 필요가 있다. 이를 위해서는 NbS의 개별적 기능들에 초점을 맞추고 있는 서로 다른 학술 및 실무 분야의 지식(예: 환경공학, 조경학, 도시계획, 에너지공학 등)을 통합하여 일관된 가이드라인을 개발할 필요가 있다. 일례로, 유럽연합과 미국 등 여러 나라들이 추진하고 있는 그린뉴딜 정책은 녹색에너지 전환이 그 핵심이다. 도시지역 건축물의 표면에 녹색 지붕(green roofs)과 녹색 벽(green walls)을 설치해 우수유출을 저감하고 도시기온을 저감해 에너지를 절약한다는 NbS 전략은 공통적으로 제시된다. 그러나 정책 안에는 건물표면에 태양광패널을 설치해 친환경 에너지를 활용한다는 그린리모델링 정책도 동시에 제시되고 있어 자칫 한정된 공간을 두고 상반된 투자로 이어질 우려가 있다. 즉 자연기반해법(NbS)과 자연유래해법(NdS)간 상충관계가 발생하고 있는 것이다. 정책적 정합성 측면에서 환경 분야 내 다른 국가계획들(예: 녹색성장 5개년 계획, 재생에너지2030)과 NbS 정책 사이에 일관성을 확보하는 것이 필요하다.

둘째는 집행 거버넌스이다. 현재 NbS 관련 논의는 과학적 지식과 기술을 수집, 축적 및 발전하는 단계에 머물러 있어 향후 정책으로 번역되어 사회에 도달하기 위해서는 관련 전문가들과 투자운영주체들이 긴밀히 협력할 필요가 있다(Kabisch et al., 2016). 흔히 NbS를 제안하는 집단은 환경생태학자, 조경 및 산림과학자, 혹은 도시계획가로, 이들은 NbS를 설계하고 집행하는 의사결정자인 토목공학자, 엔지니어링 회사, 금융공학자 집단과 서로 다른 과학분야의 지식을 갖고 있기 때문에 이러한 시각차이가 NbS의 확산에 장애물일 수 있다(Ruangpan et al., 2020). NbS는 지역에 따라서 상당히 비

싼 선택지(예: 사유지)일 수 있기 때문에 과학적으로 입증된 NbS의 실질적 효능과 사회경제적 가치에 대한 활발한 논의가 필요하다. 가령 미국의 경우 빗물정원 및 저류지가 설치된 지역사회에서 NbS의 가치에 대한 인식이 부족하여 미개발 공터 혹은 버려진 공간으로 인식되는 등 어려움이 있었다. NbS의 지역사회 확산을 위해서는 연구자, 엔지니어, 정치인, 관리자 및 주민 등 이해관계자 간 지식과 선호도 격차를 좁힐 수 있는 참여적 거버넌스가 중요하다(Kabisch et al., 2016).

셋째는 NbS 국제 표준의 수립이다. 세계자연보전연맹은 향후 국제 표준 NbS 전략이 반드시 포함해야 할 필수조건으로 다음의 8가지 항목을 제시하였다(IUCN, 2020).

- Societal Challenges: NbS는 사회적으로 우선순위가 높은 과제를 해결하는 것이어야 함
- Design at Scale: 소규모 NbS이더라도 광역 규모 생태계 시스템과 연계되어야 지속가능함
- Biodiversity Net-gain: 모든 생물종의 서식환경을 고려해야 하며 총 편익이 정(+)이어야 함
- Economic Feasibility: NbS에 대한 파이낸싱이 투자비용 대비 효율적이어야 함
- Inclusive Governance: NbS의 선택과 설계, 관리에 투명하고 민주적인 의사결정이 필요함
- Balance Trade-offs: NbS의 기회비용과 편익, 다른 NbS와의 충돌 가능성을 고려해야 함
- Adaptive Management: 시행착오와 증거기반 학습을 통해 NbS 성능을 개선시켜야 함
- Mainstreaming & Sustainability: NbS를 제도적 주류 솔루션으로 만들기 위한 전략이 필요함

NbS는 최근 우리나라 물관리 및 기후변화 대응 관련 계획 및 정책 문헌에 본격적으로 등장하고 있다. 우리나라의 물관리 관련 최상위 계획은 현재 제1차 국가물관리 기본계획(계획연도 2021~2030년)이며, 기후변화 관련 최상위 국가계획은 제2차 기후변화대응 기본계획(계획연도 2020~2040년)과 제3차 국가 기후변화 적응대책 세부시행계획(계획연도 2021~2025년)이다. 제1차 국가물관리 기본계획의 수립배경 및 세부 내용에는 향후 해결해야 할 문제 가운데 하나로 극한 가뭄·홍수 발생 등 기후변화로 인한 물관리 환경의 근본적 변화가 명시되어 있다(Joint Ministries Concerned, 2021a). 이러한 지구적 여건변화에 대응하기 위한 전략 및 추진과제로 물환경의 자연성 회복, 지속가능한 물 이용 체계 확립, 그리고 물 재해 안전 체계 구축이 중요한 대응 과제로 제시되었다. 본 계획에서 NbS는 수량·수질·수생태를 동시에 고려할 수 있는 기법으로서 통합적 물관리 전략 중 하나로 선정되었으며 분산형 저류 공간 확대가 구체적인 수단으로 명시되었다. 그러나 분산형 저류 공간은 LID 등 NbS의 다양한 하위기법 가운데 일부에 해당한다. NbS가 기후변화 대응 물관리 전략에 확대·적용되기 위해서는 R&D 연구를 통해 NbS의 기법적 다양성을 높이고 가뭄·홍수예방 효과, 탄소저감 효과에 대한 검증이 이뤄져야 한다.

국가 물관리 전략은 또한 제2차 기후변화대응 기본계획에 따라 기후변화 적응체계 구축과 탄소중립 실현에 적극 참여할 필요가 있다. 본 기본계획에 따르면 물관리는 기후변화 적응력 제고가 필요한 5대 부문 중 하나(국토·물·생태계·농수산·건강)로, 홍수·가뭄 등 위험 대응력 강화와 물순환 건전성 확보가 필요하며, 이를 위해 저영향개발(LID)과 생태하천복원기법(CRT)을 확대·적용할 것을 강조하였다(Joint Ministries Concerned, 2019). 제3차 국가 기후변화 적응대책 세부시행계획에서는 해양보호구역 관리계획 수립 시에 NbS의 활용 필요성을 명시하였다. 그러나 두 계획 모두에서 NbS의 세부기법이 무엇인지, 기대되는 효과는 무엇인지 아직 구체적으로 명시되지 않았다(Joint Ministries Concerned, 2021b).

NbS는 다양한 하위 기법들을 포함하는 포괄적 접근법이다. 이 전략이 기후변화 대응과 같은 복잡한 문제 해결에 기여하기 위해서는 문제점 진단과 대상지의 특성에 맞는 NbS 기법들을 비교·선택할 수 있도록 돕는 매뉴얼과 가이드라인이 필요하다. 이를 위해 먼저 NbS 기법의 독창성 및 효용성에 대한 자체 검증과 명확한 기술화가 이루어져야 한다. 과학기술정책연구원(STEPI, 2021)은 정부 R&D 사업에 보다 적극적으로 NbS 개념을 도입하고, 이와 관련된 예산의 확보, R&I 사업 추진을 위한 기준 마련, 적정 단계 설계 및 모니터링을 통해 국가 자연자본(Nature Capital)¹⁾의 확보에 나서야 한다고 권고하였다. 향후 NbS가 정책적 주류 솔루션으로 발전하기 위해서는 NbS의 성능에 대한 객관적 증거와 성공사례를 생산할 수 있는 R&D 투자가 우선되어야 할 것이다.

4. Conclusion

본 연구에서는 도시화와 기후변화로 인해 더욱 복잡해진 물관리 환경에 대한 대응방안으로서 등장한 자연기반해법(NbS)의 구체적 의미와 기법들을 살펴보고 향후 과제들을 파악하였다. 문헌고찰 결과 NbS는 의미적 측면에서 생태계와 종다양성, 자연경관의 복원과 회복을 통해 근본적이고 포괄적인 해결책의 도입을 지향하고 있지만 기법 측면에서는 아직까지 기존의 친환경, 생태 공학적 접근법과의 차별성은 두드러지지 않았다. 또한 규모 측면에서 아직까지 도시지역 중심의 소규모 기술적 개입방법이 다수를 차지하고 있으며, 하천, 산림, 해안지역 등 비도시지역을 포함한 광역단위에서 기술적 혹은 비기술적 개입방식을 적용하고 평가한 사례는 부족한 실정이다. NbS의 개념적 포괄성은 다양한 이해관계자들과 전문가들을 논의에 포섭할 수 있다는 장점으로 여겨지나 결과물의 측정 및 평가에 있어 그레이 인프라에 비해 상대적으로 높은 불확실성으로 인해 실제 의사결정과정에 대한 논의는 아직 구체적인 수준에 이르지 못하는 것으로 보인다. 향후 NbS가 실질적 솔루션으로 발전하기 위해서는 질적, 양적으로 다양한 사례의 발굴이 필요하며 이를 통해 기술적 가이드라인의 개

1) 자연자본이란 모든 경제활동 및 인간의 복지를 뒷받침하는 자연 및 생태계 자산이며, 자연자본에 대한 인간의 수요 규모는 측정이 불가능할 정도로 탈산업화된 국가의 지속가능한 성장을 위한 가장 중요한 자산이다(STEPI, 2021).

발이 이루어져야 할 것이다.

우리나라는 급속한 도시화와 경제성장을 겪으며 물관리 패러다임의 변화를 여러 차례 겪어왔다. 도시인구와 경제발전을 지원하기 위해 더 많은 인구와 산업부문에 충분한 물을 공급하기 위한 인프라 건설과 하천 사업이 끊임없이 이루어졌고, 첨단 기술력으로 자연을 더욱 잘 다스리고 길들이는 것이 국가의 발전으로 여겨졌다. 그러나 NbS, 즉 자연기반해법은 오늘날 우리 사회의 위기는 기술력의 부재가 아니라 자연의 부재라는 인식에서 출발한다. 자연을 길들이는 것이 아니라 자연이 자연으로서 기능할 수 있도록 생태계를 되살리는 데에 기술력을 집중해야 한다는 의미이다. 기후변화라는 유례없는 위기에 대응하고 기후재난으로부터 탄력적으로 회복하기 위해서는 건강하고 원활하게 작동하는 생태계가 필수적이다. 도시의 정주환경과 생산구조를 자연 생태계와 공존할 수 있도록 하면서 그 안에서 물과 자원의 선순환 구조를 만드는 일은 결코 쉬운 일이 아니다. 다행히 자연친화적 기술과 패러다임은 LID, WSUD, GI, Eco-DRR, NbS 등 보다 포괄적으로, 보다 근본적인 방향으로 발전해오고 있다. 그동안 축적된 학문적, 기술적, 사회적 지식을 통해 NbS가 지속가능한 발전을 견인할 메인스트림(mainstream) 정책으로 자리잡기를 기대해본다.

Acknowledgement

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 상하수도 혁신 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020 002700015).

References

Abell, R., Asquith, N., Boccaletti, G., Bremer, L., Chapin, E., Erickson-Quiroz, A., Higgins, J., Johnson, J., Kang, S., Karres, N., Lehner, B., McDonald, B., Raeppe, J., Shemie, D., Simmons, E., Sridhar, A., Vigerstøl, K., Vogl, A., and Wood, S. (2017). Beyond the source: The environmental, economic and community benefits of source water protection, *The Nature Conservancy*, Arlington, VA, USA.

Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Galvao, A., Piseiro, J., Rizzo, A., and Masi, F. (2020). A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits, *Science of The Total Environment*, 711, 134731.

Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., and Maginnis, S. (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges*, Gland, Switzerland.

Costa, S., Peters, R., Martins, R., Postmes, L., Keizer, J. J., and Roebeling, P. (2021). Effectiveness of nature-based solutions on pluvial flood hazard mitigation: The case study of the city of Eindhoven (the netherlands), *Resources*, 10(3), 24.

Croeser, T., Garrard, G., Sharma, R., Ossola, A., and Bekessy, S. (2021). Choosing the right nature-based solutions to meet

diverse urban challenges, *Urban Forestry & Urban Greening*, 65, 127337.

Debele, S. E., Kumar, P., Sahani, J., Marti-Cardona, B., Mickovski, S. B., Leo, L. S., Porcu, F., Bertini, F., Montesi, D., Vojinovic, Z., and Di Sabatino, S. (2019). Nature-based solutions for hydro-meteorological hazards: Revised concepts, classification schemes and databases, *Environmental Research*, 179, 108799.

Demographia. (2021). *Demographia World Urban Areas*, 17th Eds.

European Commission (EC). (2015). *Nature-based solutions and re-naturing cities, Final report of the Horizon 2020 expert group on nature-based solutions and re-naturing cities*, European Union.

Gunther, A., Barthelmes, A., Huth, V., Joosten, H., Jurasinski, G., Koebsch, F., and Couwenberg, J. (2020). Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions, *Nature communications*, 11(1), 1-5.

Han, S. and Kuhlicke, C. (2019). Reducing hydro-meteorological risk by nature-based solutions: What do we know about people's perceptions?, *Water*, 11(12), 2599.

International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2020). *Guidance for using the IUCN global standard for nature-based solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions*, First edition, Gland, Switzerland: IUCN.

Joint Ministries Concerned (2019). *The 2nd climate change response master plan (2020~2040)*, Joint Ministries Concerned. [Korean Literature]

Joint Ministries Concerned (2021a). *The 1st national water management master plan (2021~2030)*, Joint Ministries Concerned. [Korean Literature]

Joint Ministries Concerned (2021b). *The 3rd national climate change adaptation strategies (2021~2025) detailed implementation plan*, Joint Ministries Concerned. [Korean Literature]

Kabisch, N., Frantzeskaki, N., Pauleit, S., Naumann, S., Davis, M., Artmann, M., Haase, D., Knapp, S., Korn, H., Stadler, J., Zaunberger, K., and Bonn, A. (2016). Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas: Perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action, *Ecology and Society*, 21(2), 39.

Kumar, P., Debele, S. E., Sahani, J., Rawat, N., Marti-Cardona, B., Alfieri, S. M., Basu, B., Basu, A. S., Bowyer, P., Charizopoulos, N., Gallotti, G., Jaakko, J., Leo, L. S., Loupis, M., Menenti, M., Mickovski, S. B., Mun, S., Gonzalez-Ollauri, A., Pfeiffer, J., Pilla, F., Prohl, J., Rutzinger, M., Santo, M. A., Sannigrahi, S., Spyrou, C., Tuomenvirta, H., and Zieher, T. (2021). Nature-based solutions efficiency evaluation against natural hazards: Modelling methods, advantages and limitations, *Science of the Total Environment*, 784, 147058.

Le Coent, P., Graveline, N., Altamirano, M. A., Arfaoui, N., Benitez-Avila, C., Biffin, T., Calatrava, J., Dartee, K., Douai, A., Gnonlonfin, A., Herivaux, C., Marchal, R., Moncoulon,

- D., and Piton, G. (2021). Is-it worth investing in NBS aiming at reducing water risks? Insights from the economic assessment of three European case studies, *Nature-Based Solutions*, 1, 100002.
- Liquete, C., Udias, A., Conte, G., Grizzetti, B., and Masi, F. (2016). Integrated valuation of a nature-based solution for water pollution control. Highlighting hidden benefits, *Ecosystem Services*, 22, 392-401.
- Matczak, P., Takács, V., and Goździk, M. (2019). *Reversing the current: Small scale retention programs in polish forests. In nature-based flood risk management on private land*, Springer, 23-37.
- Narayan, S., Beck, M. W., Reguero, B. G., Losada, I. J., van Wesenbeeck, B., Pontee, N., Sanchirico, J. N., Ingram, J. C., Lange, G. M., and Burks-Copes, K. A. (2016). The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences, *PLoS ONE*, 11(5), 1-17.
- Oral, H. V., Carvalho, P., Gajewska, M., Ursino, N., Masi, F., Hullebusch, E. D. V., Kazak, J., Exposito, A., Cipolletta, G., Andersen, T. R., Finger, D. C., Simperler, L., Regelsberger, M., Rous, V., Radinja, M., Buttiglieri, G., Krzeminski, P., Rizzo, A., Dehghanian, K., Nikolova, M., and Zimmermann, M. (2020). A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: A critical assessment based on case studies and literature, *Blue-Green Systems*, 2(1), 112-136.
- Perosa, F., Gelhaus, M., Zwirgmaier, V., Arias-Rodriguez, L. F., Zingraff-Hamed, A., Cyffka, B., and Disse, M. (2021). Integrated valuation of nature-based solutions using tessa: Three floodplain restoration studies in the Danube catchment, *Sustainability*, 13(3), 1482.
- Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Di Sabatino, S., Leo, L. S., Capobianco, V., Oen, A. M., and Lopez-Gunn, E. (2020). Nature-based solutions for hydro-meteorological risk reduction: A state-of-the-art review of the research area, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 243-270.
- Science and Technology Policy Institute (STEPI). (2021). Understanding nature based solutions and cases from the viewpoint of research and innovation (R&I), *STEPI Insight*, 281, 1-50. [Korean literature]
- Shiao, T., Kammeyer, C., Brill, G., Feinstein, L., Matosich, M., Vigerstol, K., and Muller-Zantop, C. (2020). *Benefits accounting of nature-based solutions for watersheds: Guide, United nations global compact CEO water mandate and pacific institute*, Oakland, California.
- Triest, L., Stiers, I., and Van Onsem, S. (2016). Biomanipulation as a nature-based solution to reduce cyanobacterial blooms, *Aquatic Ecology*, 50(3), 461-483.
- Turkelboom, F., Demeyer, R., Vranken, L., De Becker, P., Raymaekers, F., and De Smet, L. (2021). How does a nature-based solution for flood control compare to a technical solution? Case study evidence from Belgium, *Ambio*, 50(8), 1431-1445.
- UN Environment-DHI, UN Environment and IUCN. (2018). *Nature-based solutions for water management: A primer*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/32058>.
- United Nations World Water Assessment Programme (WWAP)/ UN-Water. (2018). *The united nations world water development report 2018: Nature-based solutions for water*, Paris, UNESCO.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (2005). *National management measures to protect and restore wetlands and riparian areas for the abatement of nonpoint source pollution*, Washington, D. C., EPA.
- Woo, H. and Han, S. W. (2020). Typological system of nature-based solutions and its similar concepts on water management, *Ecology and Resilient Infrastructure*, 7(1), 15-25. [Korean literature]
- World Bank. (2021). *A catalogue of nature-based solutions for urban resilience*, Washington, D.C. World Bank Group.
- World Meteorological Organization (WMO). (2021). *WMO Atlas of mortality and economic losses from weather, Climate and water extremes (1970-2019)*, World Meteorological Organization.
- Wu, J., Yang, R., and Song, J. (2018). Effectiveness of low-impact development for urban inundation risk mitigation under different scenarios: A case study in Shenzhen, China, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 2525-2536.