

도시 홍수: 원인, 영향 및 저감 전략 고찰

이진용*

강원대학교 지질지구물리학과 지질학전공 교수

A Review of Urban Flooding: Causes, Impacts, and Mitigation Strategies

Jin-Yong Lee*

Professor, Division of Geology and Geophysics, Kangwon National University

Abstract

Urban floods pose significant challenges to cities worldwide, driven by the interplay between urbanization and climate change. This review examines recent studies of urban floods to understand their causes, impacts, and potential mitigation strategies. Urbanization, with its increase in impermeable surfaces and altered drainage patterns, disrupts natural water flow, exacerbating surface runoff during intense rainfall events. The impacts of urban floods are far-reaching, affecting lives, infrastructure, the economy, and the environment. Loss of life, property damage, disruptions to critical services, and environmental consequences underscore the urgency of effective urban flood management. To mitigate urban floods, integrated flood management strategies are crucial. Sustainable urban planning, green infrastructure, and improved drainage systems play pivotal roles in reducing flood vulnerabilities. Early warning systems, emergency response planning, and community engagement are essential components of flood preparedness and resilience. Looking to the future, climate change projections indicate increased flood risks, necessitating resilience and adaptation measures. Advances in research, data collection, and modeling techniques will enable more accurate flood predictions, thus guiding decision-making. In conclusion, urban flooding demands urgent attention and comprehensive strategies to protect lives, infrastructure, and the economy.

Keywords: urban flooding, urbanization, inundation, torrential rain

초 록

도시 홍수는 도시화와 기후 변화의 상호작용에 의해 전 세계 도시들에게 중요한 도전으로 인식된다. 이 논문은 최근 도시 홍수 연구사례들을 조사하여 그 원인, 영향 및 잠재적인 완화 전략을 이해하려고 하였다. 도시화는 증가하는 불투수 표면과 변화된 배수 패턴으로 인해 자연적인 수류를 방해하며 강한 강우 이벤트 동안 표면 유출을 강화시킨다. 도시 홍수의 충격은 광범위하게 생명, 기반 시설, 경제 및 환경에 영향을 미치는데 생명과 재산 피해, 중요 서비스 중단 및 환경적 피해는 효과적인 도시 홍수 관리의 긴급성을 요구한다. 도시 홍수를 완화하기 위해서는 통합된 홍수 관리 전략이 필수적인데 지속 가능한 도시 계획, 녹색 인프라, 그리고 개선된 배수 시스템은 홍수 취약성을 감소시키는 데 중요한 역할을 한다. 조기 경보 시스템, 긴급 대응 방안, 그리고 지역 주민의 참여는 홍수 대비 및 회복탄력성의 필수 구성 요소이다. 미래 전망에 의하면 기후 변화에 따른 홍수 위험 증가를 보여주므로 회복탄력성과 적응 조치가 필요하다. 그러므로 관련 분야의 연구, 데이터 수집 및 모델링 기술의 발전은 더 정확한 홍수 예측을 가능하게

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Jin-Yong Lee
E-mail: hydrolee@kangwon.ac.kr

Received: 6 August, 2023
Revised: 1 September, 2023
Accepted: 7 September, 2023

© 2023 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하며 의사 결정에 도움을 줄 것이다.

주요어: 도시홍수, 도시화, 범람, 폭우

서론

도시화(Urbanization)는 도시의 급격한 성장을 일컫는 세계적 현상으로 도로, 상하수도, 전력 공급 등의 시설 및 인프라의 발전과 주민의 생활수준의 향상을 의미한다(Wang et al., 2023). 그러나 도시 지역의 전례 없는 확장은 도시 주민들을 도시 홍수를 포함한 다양한 환경적 도전에도 직면하게 하였다. 도시 홍수는 과도한 강우나 물의 범람으로 인해 배수 시스템과 도시 인프라가 기능을 상실하여 도로, 동네, 건물이 물에 잠기고 침수되는 현상을 말한다(Bibi et al., 2023; Zheng and Huang, 2023). 지난 몇 십 년 동안 도시화는 특히 개발도상국에서 가속화되었다(Bae and Chang, 2019; Parvin et al., 2022). 경제 기회와 개선된 생활 조건의 덕분에 수백만 명의 사람들이 도시로 몰리면서 불투수성 표면이 증가하였다(Lee and Koo, 2007). 이로 인해 땅이 비를 흡수하는 자연적 능력이 약해지고 강한 비가 내리면 표면 유출이 급격히 증가하였고, 특히 인구 밀집도가 높은 상황에서 불충분한 도시 계획으로 인해 홍수 취약성이 크게 상승하였다(Muis et al., 2015; Sakijege and Dakyaga, 2023).

한편 최근 몇 년간 기후 변화의 영향이 더욱 뚜렷해져 극단적 강우 현상의 빈도와 강도에 큰 영향을 미치고 있으며 세계적인 기온 상승으로 인해 강우 패턴이 강화되고 폭풍우가 더욱 심해지고 예측 불가능해지고 있다(Park et al., 2013, 2022; van Wilgen et al., 2015; Rahmat et al., 2019; Cho et al., 2022; Lee et al., 2022; Song and Park, 2022). 또 도시 지역은 인구 밀집과 기반 시설로 인해 기후 변화의 영향을 크게 받고 있으며 더욱 빈번하고 강렬한 홍수 사건을 경험하고 있다(Ahmed et al., 2018; Wang et al., 2021; Head et al., 2022; Huang et al., 2022). 도시 홍수는 지역 내 주민들에게 큰 영향과 고통을 준다. 즉각적인 영향으로는 인명 피해, 재산 훼손, 그리고 교통, 전력, 수도 등 필수 서비스의 중단이 포함된다(Hammond et al., 2015). 더군다나 홍수는 물 공급원의 오염과 수인성 질병의 전파로 인해 주민들에게 심각한 건강 위협을 초래할 수 있다(Charron et al., 2004; Mark et al., 2015). 또 사회·경제적 영향 또한 매우 커서 건물의 피해로 인한 이사, 소득의 손실, 그리고 비상 대응 체계에 대한 압박 등이 발생할 수 있다(Hammond et al., 2015; Alabbad et al., 2023).

도시 홍수는 전 세계 도시들에게 지속적으로 큰 위협으로 작용하고 있으며 이를 해결할 수 있는 종합적인 홍수 관리 전략이 절실하다. 이러한 전략은 지속 가능한 도시 계획, 탄력적 인프라 개발, 효과적인 조기 경고 시스템을 포함하여 홍수의 영향을 완화해야 하며 정부, 도시 기획자 및 지역 사회들은 현재와 미래의 기후적 위협을 고려하는 적응적 조치를 함께 개발하기 위해 적극적으로 협력해야 한다(Qi et al., 2021; Dadrasajirlou et al., 2023). 이 논문의 목적은 최근 도시 홍수 사례 연구를 조사하고 그 원인을 파악하며 도시 지역 사회에 미치는 영향을 평가하고 효과적인 완화와 관리 전략을 모색하는 것이다. 여러 지역의 연구사례를 분석하여 도시 홍수의 복잡성을 이해하고 적극적인 홍수 위험 완화와 관리의 중요성을 제시하고자 한다. 특히 도시 홍수는 점점 더 도시화되는 지역에서 더욱 우려되는 문제이다. 그러므로 이 문제의 배경과 맥락을 이해하는 것은 기후 변화에 따른 도전에 대처할 수 있는 지속 가능하고 탄력적인 도시를 개발하는 데 매우 중요하다. 그런 면에서 이 논문은 최근 도시 홍수의 다양한 측면을 살펴보고, 홍수로부터 도시 지역 사회를 보호하기 위한 해결책을 찾고자 하는 정책 결정자, 도시 기획자 그리고 연구자들에게 소중한 정보를 제공할 것이다.

연구 방법

도시 홍수에 대한 원인, 영향 및 저감 전략에 대한 식견을 도출하기 위하여 본 연구에서는 국제적으로 가장 널리 사용되는 문헌 자료의 하나인 클레리베이트에서 제공하는 Web of Science 데이터베이스를 이용하였다. 이 데이터베이스에는 SCIE(9,498종), SSCI(3,557종), A&HCI(1,833종), ESCI(8,244종)가 포함된다. 이 리뷰를 위한 문헌 검색은 2023년 7월에 수행하였고 첫 번째 검색단어는 저자가 지정하는 주요어로 “Urban flood”를 그리고 AND 조건으로 모든 필드에 대하여 “City”를 추가하여 검색하였다. 그 결과 1,317건의 문헌이 수집되었고 이들에 대한 연구결과와 연구동향을 검토하고 분석하였다.

결과 및 토론

추출된 연구논문 특성과 연관 관계

Fig. 1에서 보듯이 도시홍수에 대한 연구는 1995년을 시작으로 2000년에는 관심 수준이 미미하였으나 2010년대 이후 빠르게 증가하였고 2020년대에 이르면서 연구관심이 매우 크게 증가하는 양상을 확인할 수 있다. 이는 기후변화와 그에 따른 실제적 위협으로서 도시 홍수가 빈발하고 있음으로 인해 사회적 관심이 증가하고 저감대책 마련이 절실해져 이에 따른 연구 필요성이 증대되었기 때문으로 사료된다(Schreider et al., 2000; Miller and Hutchins, 2017; Zhou et al., 2019; Pour et al., 2020; Sun et al., 2021).

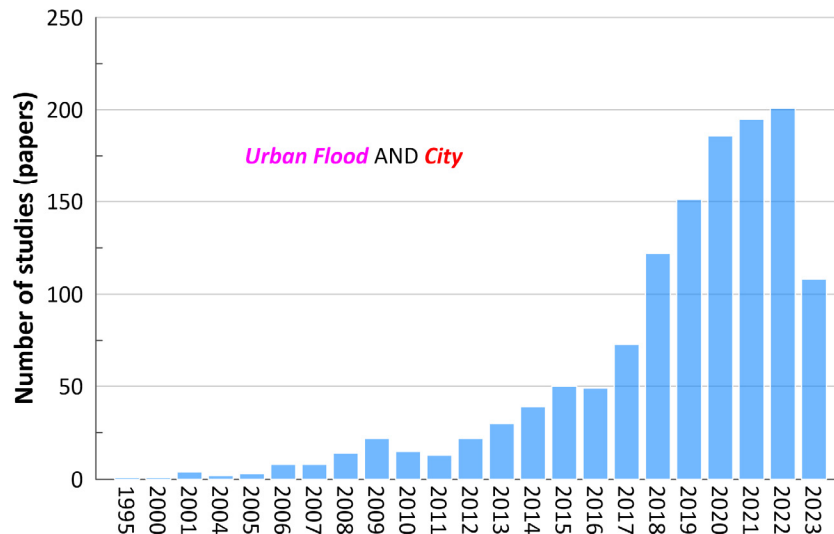


Fig. 1. Number of researches (total = 1,317) conducted for 1995~2023 regarding urban flood searched for the Web of Science database.

한편 추출된 연구논문의 주요어(key words)들의 상호 연관관계를 살펴보면 크게 5개 정도의 그룹으로 대별된다(Fig. 2). 도시홍수를 정점으로 범람(inundation), 모델, 모의(simulation), 강우가 밀접한 동시출현(co-occurrence) 관계를 보이며 기후변화는 관리(management), 취약성(vulnerability), 회복탄력성(resilience) 및 구조/framework와 밀접한 상관관계를 보였다. 그리고 위험도(risk)는 영향, 강(river), 기후변화와 밀접한 공생을 보였으며 도시(city)는 도시화(urbanization),

Table 1. Continued

References	Country studied	Affiliation (1st author)	Key words
Grip et al. (2021)	Sweden	Ramboll Sweden	Sea level, rainfall impact, urban drainage networks
Karamouz et al. (2015)	Iran	University of Tehran	Coastal floods, mapping, planning strategies
Pour et al. (2020)	Malaysia	Universiti Teknologi Malaysia (UTM)	Low impact development, climate-change, urban floods
Sun et al. (2021)	China	East China Normal University	Climate change, urban flood, Shanghai

또한 이들 연구가 진행된 나라들의 분포를 살펴보면 Fig. 3과 같다. 연구비중이 큰 나라는 중국, 영국, 미국, 네덜란드, 호주, 프랑스, 이탈리아, 독일과 스페인 순이다. 우리나라의 연구 비중은 이들 나라의 절반 이하로 아직은 미흡하다. 공저자의 국적 측면에서 협력관계를 살펴보면 중국의 경우 미국, 영국, 네덜란드, 호주 학자와의 협력에 적극적이며 영국은 중국, 미국, 인도, 호주와 다양한 협력을 하고 있는 것으로 사료된다(Fig. 3). 한편 우리나라의 경우에도 연구 비중은 높지 않으나 중국, 호주, 미국, 인도 그리고 일본 및 유럽국가와의 협력이 진행 중인 것으로 보인다.

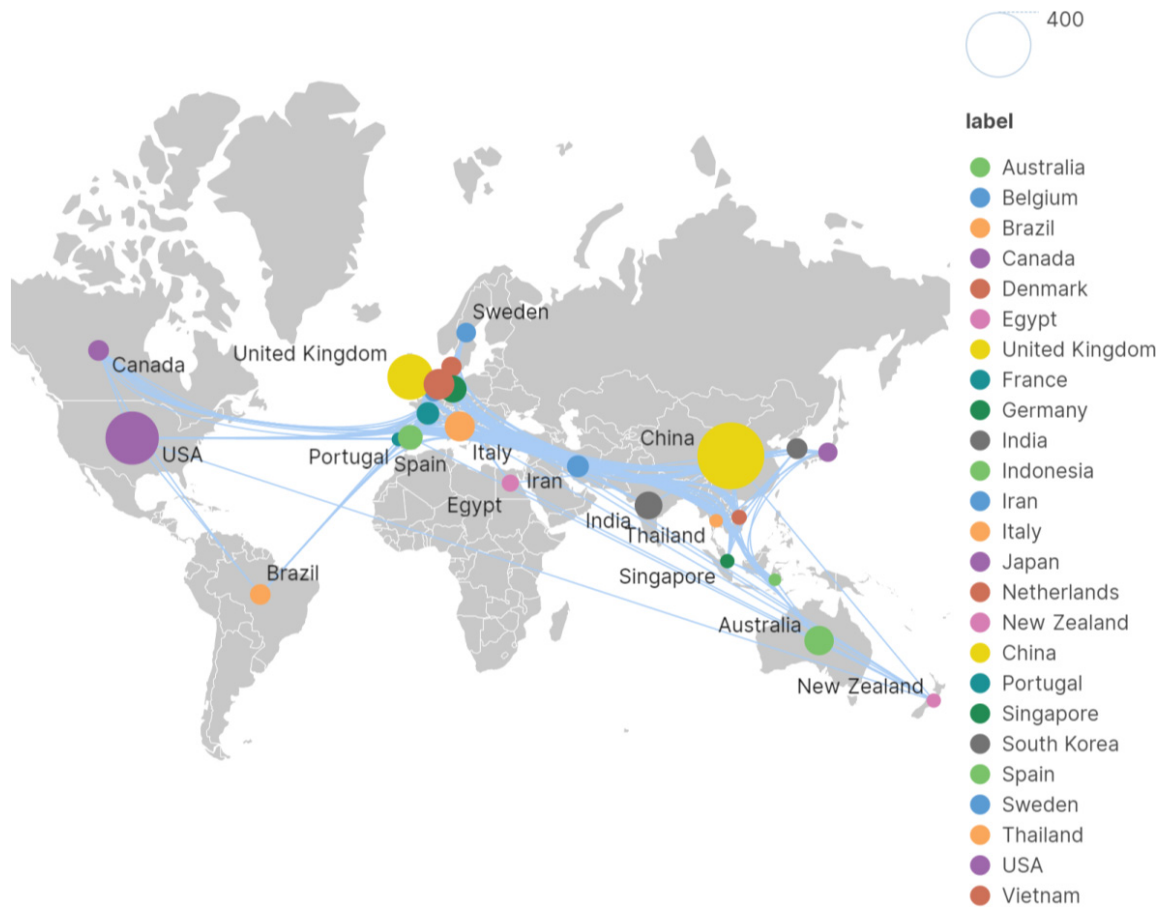


Fig. 3. Co-authorships of the studies (n = 1,317) of urban flooding conducted for 1995~2023, searched within the Web of Science database.

도시 홍수의 특성

도시 홍수란 도심에서 배수 및 하수 시스템을 압도하는 과도한 강우, 폭우 유출 혹은 강이나 호수와 같은 수체의 과잉 흐름에 의해 발생하는 물의 범람을 의미한다(Shrestha et al., 2022). 한편 도시화는 도로, 건물 그리고 포장 등 광범위한 불투수성 지표면을 동반하며 이는 자연적인 물의 흡수를 저해하고 결국은 빠른 지표 유출과 강한 강우 이벤트 발생 시에 홍수의 위험을 증가시킨다(Scalenghe and Marsan, 2009; Jia et al., 2013). 도시 홍수는 결국 도심의 거리, 지하시설물, 그리고 건물 내부에 물을 유입시키고 이는 공공의 안전, 재산과 도시 기반시설에 위협으로 작용한다. 도시가 성장함에 따라 자연 경관과 녹지 공간은 대부분 콘크리트와 아스팔트 같은 불투수성 표면으로 교체되며 이들은 빗물의 자연적인 토양 침투를 방해한다(Wang, 2018). 투수성 공간의 축소는 결국 강수 시 지표유출을 증가시키며 도로, 주차장, 저지대 등의 침수를 유발하며 배수시스템을 초과하여 도시 홍수를 유발한다.

한편 도시화는 하천의 직선화 및 교량 건설 등으로 인해 강과 하천의 자연적인 유동 패턴을 변화시키며 이는 큰 비가 내릴 경우 과잉의 물을 수용할 수 있는 능력을 축소시킨다. 특히 홍수에 대한 완충지대로서 작용하는 강 근처 범람원과 습지에 대한 개발로 인해 도심에서 홍수 위험을 더욱 증가시키고 있다(Chang et al., 2009; Gupta and Nair, 2011; Arinabo, 2022). 무분별한 도시개발의 경우 홍수에 취약한 지역에 대한 취약계층의 집중과 인프라 시설의 건설이 발생하여 홍수 시에 심각한 충격의 가능성을 증가시킨다(Barbedo et al., 2014; Manawadu and Wijeratne, 2021).

또한 온실가스 배출에 따라 지구 온도가 증가함에 따라 대기의 수분 보유 능력이 상승하고 이는 보다 잦은 강한 강수 사건으로 이어진다(Trenberth, 1998; Trenberth et al., 2014). 이런 강수 사건의 강화는 도심의 배수 시스템을 무력화시키며 도시의 돌발 홍수(flash floods) 가능성을 증대시킨다. 이와 같은 강수 패턴에 대한 직접적인 영향은 물론 기후변화는 해수면 상승과 폭풍 해일(storm surges)에 영향을 미치며 그로 인해 해안 도시지역의 홍수를 악화시킨다(Qiang et al., 2021). 특별히 해안 도시의 경우 강한 강우와 해수면 상승이 중첩될 경우 도시홍수에 매우 취약한데 다른 지역보다 잦은 홍수와 치명적인 영향 아래에 놓여있다(Karamouz et al., 2015; Grip et al., 2021; Qiang et al., 2021).

도시 홍수의 원인

도시 홍수는 다양한 자연적·인위적 인자와 도시 환경의 상호작용의 결과이다. 다음은 도시 홍수를 일으키는 주요 인자들이다. 우선 강한 그리고 지속된 강우는 흔히 천둥번개, 열대성 폭풍(태풍, 허리케인, 윌리윌리, 사이클론) 그리고 우기와 연관되는데 도심지역의 배수 시설을 압도한다(Zheng et al., 2016). 강우 강도가 토양의 침투율과 우수배수시설의 배출 용량을 초과하면 지표에 물이 축적되고 이는 결국 홍수로 이어진다(Manawi et al., 2020).

한편 도시의 일부 지역은 강한 강우 시에 발생된 물을 처리할 수 있는 효율적이면서 잘 관리되는 배수시스템이 부족하다. 특히 오래되거나 제대로 설계되지 못한 배수시설 예를 들어 막히거나 저용량 혹은 크기가 작은 우수관로, 수로, 하수관로 등 때문에 지표면에 물이 쌓이고 도시홍수를 악화시킨다(Hammond et al., 2015; Archer et al., 2020). 또 자연 경관을 불투수 지표면 예를 들어 도로, 포장면, 건물과 같은 것으로 전환하는 것은 도시화의 중요한 결과물인데 이런 불투수 표면은 빗물이 지하로 스며드는 것을 방해하며 지표 유출을 증가시키며 그리고 지하수 함양을 감소시켜 홍수 위험을 배가시킨다(Liu et al., 2014; Sarkar Chaudhuri et al., 2017).

또한 강, 하천, 해안가 근처에 거주지를 건설하는 것은 강의 범람 혹은 해일 등에 의한 홍수에 매우 취약하다. 특히 자연 수로를 변형시키거나 범람원이나 습지를 개발할 경우 도심에서 강의 영향과 해안 홍수의 충격을 악화시킨다(Magadza, 2000). 미흡한 도시계획과 무계획적인 개발로 인한 홍수취약지구 내 건물과 인프라 시설의 건설로 이어지며 이로 인해 도시 공동체와 중요 기간시설이 홍수 위험에 높게 되고 재산과 인명 피해를 유발한다(Loucks et al., 2008). 기후변화도 하

나의 요인으로 작용하는데 폭우, 태풍, 허리케인, 사이클론 같은 극한 기상현상을 강화시킨다. 이런 기후패턴의 변화는 결국 강우 강도와 빈도의 증가 그리고 잦고 극심한 도시 홍수로 귀결될 수 있다(Andersen and Shepherd, 2013).

도시 홍수는 물건의 잔해, 쓰레기, 퇴적물의 침적 혹은 불충분한 관리에 따른 배수시스템의 막힘 현상에 의해 발생할 수 있다. 배수시스템에 막힘이 발생하면 물의 속도가 느려지고 폭우 시 홍수를 악화시킨다(Wallace et al., 2017). 또 각종 쓰레기를 부적절하게 처리하거나 불법으로 건물을 건(증)축하거나 또 자연 수체나 습지를 파괴하는 것은 자연 배수시스템을 파괴하여 도시 홍수를 악화시키는 원인이 되기도 한다(Poku-Boansi et al., 2020).

도시 홍수는 극한 기상현상과 같은 자연인자 및 도시화, 토지용도 변경, 불충분한 도시 계획 및 관리와 같은 인위적 요인의 상호작용의 결과이다(Abass et al., 2020). 이러한 원인들에 효과적으로 대처하기 위해서는 지속가능한 도시개발, 기후 변화 적응 및 회복탄력성 그리고 종합적인 홍수위험저감 조치를 통합하는 홍수관리전략의 도출이 중요하다.

도시 홍수의 영향과 피해

도시 홍수는 공동체, 도시 인프라, 경제 그리고 환경에 걸쳐 심대하고 광범위한 피해를 유발하는데 즉시 나타나는 충격과 장기간에 걸친 피해로 구분할 수 있다(Hughes et al., 2021). 다음은 중요한 몇 가지 도시홍수의 피해이다.

우선 도시홍수의 가장 큰 최악의 피해는 인명손실로서 홍수 시 물의 속도는 매우 빠르며 위협적이어서 익사 및 사고를 유발한다(Ajibade et al., 2013). 또한 홍수는 주택 및 상업건물에 광범위한 피해를 유발하여 결국 개인과 기업체에 경제적 손실을 초래한다. 또 도시홍수는 도로, 교량, 공공 교통시스템과 상수공급 시설 및 전기공급망 등의 도시 기간시설에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 특히 교통망에 대한 파괴는 긴급 대응 및 핵심적인 서비스의 접근을 크게 제한한다(Singh et al., 2018). 한편 홍수는 심각한 환경적 충격도 유발하는데, 각종 오염물질, 쓰레기, 그리고 위험물질들을 운반하여 수체와 토양의 오염을 일으키며 이런 오염의 영향으로 수생태계가 교란되고 사람과 야생동물의 건강을 위협한다(Tingsanchali, 2012).

상기한 피해 중 일부를 다시 상세히 살펴보면 홍수는 다양한 건강 문제를 유발하는데 수인병 질병의 발생, 호흡기 질환 그리고 대피 및 복구 노력과정에서 발생하는 외상 등이 있다(Burton et al., 2016). 또 주택의 손실과 재산 피해에서 오는 트라우마와 스트레스 등의 정신 건강적 문제도 상당하다. 도시홍수는 경제적 피해도 상당한데 건물과 기간시설의 복구에 드는 비용과 증가된 건강치료 등에 드는 비용도 크게 증가한다. 홍수지역에는 산업계도 불경기에 따른 어려움과 영구적 폐업을 경험하기도 하고 이에 따는 실업과 경제적 생산성의 저하를 겪게 된다(Bukvic and Barnett, 2023). 또 일부 주민들은 일시적 혹은 영구적으로 그들의 집을 떠나게 되기도 하며 불가항력적으로 임시적인 쉼터나 구난처에서 생활하고 이웃과 친지의 집에서 기거하여 자원의 부족과 스트레스를 경험하게 된다(Takagi et al., 2018).

한편 건강관리, 교육 그리고 소방, 치안 등 비상대응 등 핵심적인 도시기능에 대한 마비도 발생한다. 병원과 학교의 접근이 불가능하거나 기능이 중지되고 그리고 긴급한 상황에 처한 사람들을 돕는 기능도 마비된다(Albano et al., 2014). 홍수가 발생하면 또 물공급 시설을 오염시켜서 음용수의 확보와 수원의 수질에 영향을 미친다. 이런 이유로 홍수가 나면 수인성 질병의 발생이 증가하고 홍수 지구 주민의 건강이 위협을 받는다. 홍수는 해당 지역의 생활 및 고용여건도 영향을 주는데 농업에 종사하는 사람들과 비공식적인 가내수공업과 중소기업의 업무여건도 악화된다. 농업생산이 줄고 각종 생활용품의 공급망 축소 그리고 축소된 생산활동에 의한 소득 손실로 경제적 어려움에 처하게 된다. 파괴된 기자재, 가전제품과 건물의 재건으로 인해 상당한 경제적 투자를 요구한다. 각 지자체는 향후 도시 홍수로 인한 공동체와 기간시설의 취약성을 완화하기 위한 회복탄력성에 대한 장기적 대비가 필요하다(Handayani et al., 2019).

최근 도시 홍수 사례들

2017년 8월 미국 텍사스 휴스턴에서는 허리케인 하비에 의한 도시 홍수가 발생하였다(Sarkar et al., 2018). 허리케인 하비는 카테고리 4의 폭풍으로 텍사스 걸프만을 타격했는데 엄청난 양의 비를 뿌리고 광범위한 홍수를 유발하였는데 특히 휴스턴시가 직격탄을 맞았다. 수일 동안 하비는 엄청난 피해를 입혔는데 미국 역사상 가장 크고 파괴적인 피해를 남겼다. 허리케인 하비로 인해 100명 이상의 사망자가 발생했고 수천 명 이상의 주민이 집을 잃고 비상 쉼터, 호텔 그리고 가족과 친지의 집으로 이주하였다(Qin et al., 2020). 범람하는 물로 인해 휴스턴의 가정 주택과 상업지구가 침수되고 광범위한 재산피해 및 산업시설 이동을 발생시켰다(Fitzpatrick, 2021). 도시의 도로, 교량, 학교, 병원 및 공공교통시설에 치명적인 피해를 입었으며 많은 고속도로와 거리가 접근 불가능하였다. 경제적 피해규모가 1,250억 달러에 달하였다(Lee, 2021).

한편 2015년 11~12월에 인도 타밀나두 주의 수도 첸나이 시에서 폭우와 가뭄 홍수가 발생하였다(Mishra, 2016). 이 도시는 이례적으로 많은 강우를 맞았으며 도시의 배수시스템은 제대로 작동하지 않았으며 심각한 홍수 피해를 입었다. 첸나이 홍수로 인하여 300명 이상이 사망하였고 도로, 철도 등 교통시설이 마비되었으며 건물, 교량 그리고 전력배급시스템이 파괴되었다. 이로 인해 전력공급이 끊어져 피해 주민들의 생활과 복구를 더욱 어렵게 하였다. 수 천명 이상의 이재민이 발생하여 피난캠프가 마비되었고 도시의 기간시설이 작동하지 않았다. 첸나이 홍수로 인해 22.5억의 경제적 피해가 발생한 것으로 알려진다(Parida, 2020).

2017년 8월 태풍 하토에 의해 마카오와 홍콩에 도시 홍수의 피해가 발생하였다(Takagi et al., 2018). 초강력 태풍 하토는 마카오와 홍콩으로 상륙하였는데 이 태풍은 엄청난 양의 폭우와 강한 바람을 동반하였고 두 도시에 심각한 홍수를 유발하였다. 이 홍수로 인하여 세계 최첨단 도시인 이곳에서 16명의 사망자와 수 백명의 부상자를 발생시켰다. 태풍에 의한 홍수로 인하여 도로, 건물, 교량 등의 기간 시설이 피해를 입었으며 특히 폭풍 해일에 의한 저지대 해안가 침수가 크게 발생하였다. 이 홍수로 인하여 마카오는 14.2억 달러 그리고 홍콩의 경우 10.2억 달러의 경제적 손실을 입은 것으로 알려진다(Choy et al., 2020).

홍수 취약성 평가 및 위험 관리

취약성 평가(vulnerability assessment)란 도시지역의 홍수 취약성을 이해하고 공동체, 기간시설 및 환경에 대한 잠재적 위험을 확인·평가하는 과정이다(Wamsler et al., 2013). 이에는 홍수 취약성에 영향을 주는 다양한 인자에 대한 종합적인 평가를 포함한다(Eini et al., 2020). 다음은 일반적인 도시 홍수에 대한 취약성 평가를 수행하는 단계들이다. 우선 위험 노출(hazard exposure)에 대한 인지 단계이다. 이는 과거 홍수지역을 결정하고 기후 자료와 역사적 자료에 기반한 잠재적 홍수 위험의 규모와 가능성을 평가하는 단계이다(Tincu et al., 2018). 두 번째는 노출 분석(exposure analysis) 단계이다. 여기서는 도시 기간시설, 주택지역, 학교, 병원 그리고 홍수 위험에 노출될 수 있는 핵심적인 시설을 파악하고 맵핑한다. 그 다음은 사회적 취약성 분석(social vulnerability analysis) 단계이다. 여기서는 다양한 사회적 그룹, 예를 들어 홍수 대처에 있어 제한적인 자원과 이동성을 가진 노년층, 저소득층, 그리고 장애우들의 취약성을 평가한다(Deria et al., 2020). 다음 단계는 물리적 취약성 분석(physical vulnerability analysis) 단계이다. 이 단계에서는 각종 건물과 기반시설의 홍수에 대한 회복탄력성 평가를 위해 구조적 무결성을 평가한다. 그 다음 단계는 핵심시설(critical facility) 평가이다. 이 단계에서는 홍수로부터 보호 및 위험 저감을 위한 핵심시설 즉 비상 대응센터, 병원 등을 파악하고 우선 순위화 하는 것이다. 마지막으로 환경취약성분석(environmental vulnerability analysis)을 수행한다. 이때 잠재적 생태 피해를 이해하기 위해 자연 서식지 및 생태계에 대한 홍수 피해를 평가한다.

한편 취약성 평가에 이어 이어지는 위험관리(risk management)는 도시 홍수에 의한 악영향을 줄이기 위한 전략을 개발

하고 적용하는 단계를 말한다(Fratini et al., 2012). 이것은 공동체, 기반시설 및 환경의 홍수 피해에 대한 회복 탄력성을 증대하기 위한 목적이다. 위험관리는 일반적으로 다음의 단계를 포함한다. 우선 홍수 대비 계획(flood preparedness planning) 단계이다. 여기서 조기경보시스템, 탈출절차 및 비상대응 프로토콜을 포함한 종합적인 홍수대비 계획을 개발한다. 그 다음은 토지 이용계획 및 구획화(land use planning and zoning)이다. 여기서 홍수 취약지역을 보호하고 상습 침수 지역에 대한 개발을 규제하는 스마트한 토지 이용 및 구획 계획을 개발하고 적용한다. 다음은 녹색 인프라를 조성하는 것이다. 녹색 지붕, 투수성 포장, 그리고 빗물 정원과 같이 자연적인 우수 관리를 증진하고 지표 유출을 줄이는 시설을 통합하여 적용한다. 그 다음은 폭우 시에 불어난 물을 제어하고 홍수를 줄일 수 있도록 도시의 배수시설을 개선하고 점검한다. 다음으로 홍수를 극복하고 피해를 최소화하기 위하여 핵심기간 시설 및 빌딩을 개선하고 개조한다.

이와 같은 물리적 노력 외에 홍수의 위험성, 준비태세 등에 대한 공공에 대한 인식개선 그리고 교육 등이 필요하고 또 홍수 피해 저감을 위한 계획 및 의사결정에 공동체가 같이 참여하는 것이 중요하다. 아울러 기후변화에 대한 회복 탄력성과 적응 관점의 계획을 반영하는 것이 필요하다. 또 취약 지구의 건물에 대한 홍수 보험의 개발을 도모하며 아울러 홍수 피해 회복과 저감 노력이 포함되도록 유도한다. 상기와 같은 위험관리는 정부기관, 민간부문과 공동체 모두의 총합적이고 효과적인 참여가 매우 절실하다(Puzyreva et al., 2022).

전망과 향후 연구

주지하다시피 기후변화의 영향과 그 강도는 점점 더해가는 상황이다. 아울러 이와 함께 수반되는 도시 홍수의 빈도와 강도도 강화되는 강우 사상과 해수면 상승으로 더욱 증가하고 있다. 도시지역은 특별히 해안 도시는 보다 높은 홍수 위험성에 노출되어 있으며 그로 인한 기반시설, 경제 및 공동체의 피해는 점점할 것으로 예측된다. 우리나라를 포함한 전 세계의 현행의 도시화의 경향으로 볼 때 많은 지역이 홍수의 취약성에 노출되어 있다. 특히 빠른 그리고 무계획적인 도시 성장의 경우 기존의 배수시스템을 위축시키고 불투수면을 증가시키고 또 지표유출을 증가시킬 것이다. 그러므로 홍수에 대비하여 도심의 기반시설에 대한 회복을 확보하는 것이 도시 계획자나 정책입안자에게 중요한 우선순위가 될 것이다. 특히 홍수에 견디는 건물, 필수 기반시설, 그리고 배수시스템에 대한 투자가 매우 중요하다. 또한 강우패턴의 변화, 해수면 상승 그리고 극한 기후사상에 대한 불확실성을 고려한 장기 계획이 요구된다.

한편 도시 홍수에 대비하고 상기와 같은 계획을 수립하기 위해서는 여러 분야에 대한 연구가 필요하다. 우선 기후 변화에 대한 모델링과 예측 기술의 선진화가 필요하다. 이를 통해 장기간의 기후변화를 예측하고 향후 강우패턴이 도시 홍수에 미치는 영향을 파악하고 대비할 수 있게 해준다. 또 고도화된 수리모델링이 필요하다. 도시 홍수를 정교하게 모델링하여 어떤 지역이 홍수에 취약한지 평가하여 대비할 수 있게 해준다. 그리고 홍수 위험과 도시의 수리학적 혹은 수리지질학적 조건의 변화를 면밀하게 파악할 수 있는 자료 수집 및 모니터링 시스템이 필요하다. 도시홍수에 특화된 사물인터넷, 빅데이터, 원격탐사 등의 기술발전이 반드시 필요하다.

또한 그린 인프라 및 자연기반 솔루션 연구가 필요하다. 인공적인 대비만으로는 도시 홍수를 근본적으로 극복하는 것이 어려우며 지속가능한 홍수관리를 위해서는 생태적 그리고 사회적 솔루션의 연계와 상호작용에 대한 이해가 필요하며 도시계획에 반영하는 것이 필수적이다. 사회경제적 영향분석에 대한 연구도 필요하다. 정책입안자로 하여금 도시 홍수를 저감하기 위한 조치와 자원의 효과적 배분에 필요한 사회경제적 분석 결과의 제공이 중요한 역할을 한다. 아울러 도시홍수에 대한 사회적 준비와 공동체적 인식의 제고를 위한 참여연구 및 행동학적 연구도 반드시 필요하다(Pearce, 2003; Cook et al., 2022).

한편 도시 홍수에 대한 종합적이고 효과적인 대책이 나오기 위해서는 다학제적 접근이 매우 중요하다. 기후학, 수리

학, 수리지질학, 지질공학, 사회학 및 공학 등 복잡한 도시 홍수의 문제를 풀기 위해서는 여러 분야 전문가의 협업 그리고 정부기관, 학계, 산업계 및 도시 공동체의 협조가 절실하다.

결론

도시 홍수는 도시화와 기후 변화의 두 축에 의해 추동되는 긴급한 세계적인 과제로 떠오르고 있다. 도시가 계속 확장되고 그리고 극단적인 기상 사건이 더 자주 발생하고 심해짐에 따라 도시 지역의 홍수 취약성이 증가하고 있다. 이 논문은 최근에 증가하는 도시 홍수의 다양한 측면, 즉 원인, 영향 및 잠재적인 완화 전략에 대한 정보를 제공한다.

도시화는 급속한 성장과 증가하는 불투수 지역들로 인해 자연적인 물 흐름을 방해하며 강우 이벤트 동안 표면 유출을 강화한다. 특히 기후 변화의 영향과 결합되어 강우 패턴을 강화시키고 해수면을 높이면서 도시들은 더 높은 홍수 위험에 직면하게 되었다. 도시 홍수는 광범위하게 생명, 기반 시설, 경제 및 환경에 영향을 미치며 인명과 재산 피해, 핵심적 서비스 중단 및 환경적 피해는 효과적인 도시 홍수 관리에 대한 필요성을 강조한다.

도시홍수로 인해 발생하는 문제에 대처하기 위해서는 통합된 홍수 관리 전략이 필수적이다. 이러한 전략은 지속 가능한 도시 계획과 녹색 인프라 구축부터 개선된 배수 시스템과 홍수 저항성 건축물까지 다양한 조치를 포괄한다. 조기 경보 시스템, 긴급 대응 계획, 그리고 지역 주민의 참여는 홍수 취약성을 감소시키고 대비를 강화하는 데 중요한 역할을 한다.

기후 변화 예측에 따르면 보다 심한 홍수 사건이 예상되므로 도시 지역은 생태적 건강성과 적응 조치에 우선순위를 두어야 한다. 이를 위해 관련 연구, 데이터 수집 및 모델링 기술의 발전은 더 정확한 홍수 예측을 가능케 하며 의사 결정에 도움을 줄 것이다. 녹색 인프라, 자연 기반 솔루션, 그리고 사회경제적 영향 평가에 투자하는 것은 지속 가능한 홍수 관리 방법을 제시할 수 있다. 세계 각국의 도시 인구가 증가하고 도시화가 심화되며 기후 변화의 영향이 강화됨에 따라 최근 도시 홍수로부터 얻은 교훈과 수행된 연구를 통해 효과적인 홍수 관리 전략을 설계하는 데 도움이 될 것으로 사료된다.

사사

본 결과물은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2019R1A6A1A03033167). 초안을 읽고 수정해준 최수정 선생님께 감사드립니다. 또한 세심한 지적과 건설적인 수정의견을 주신 세분의 심사위원님들께 깊은 감사를 드립니다.

References

- Abass, K., Buor, D., Afriyie, K., Dumedah, G., Segbefi, A.Y., Guodaar, L., Garsonu, E.K., Adu-Gyamfi, S., Forkuor, D., Ofosu, A., Mohammed, A., Gyasi, R.M., 2020, Urban sprawl and green space depletion: Implications for flood incidence in Kumasi, Ghana, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 51, 101915.
- Ahmed, F., Moors, E., Khan, M.S.A., Warner, J., van Scheltinga, C.T., 2018, Tipping points in adaptation to urban flooding under climate change and urban growth: The case of the Dhaka megacity, *Land Use Policy*, 79, 496-506.
- Ajibade, I., McBean, G., Bezner-Kerr, R., 2013, Urban flooding in Lagos, Nigeria: Patterns of vulnerability and resilience among women, *Global Environmental Change*, 23(6), 1714-1725.
- Alabbad, Y., Yildirim, E., Demir, I., 2023, A web-based analytical urban flood damage and loss estimation framework, *Environmental Modelling & Software*, 163, 105670.

- Albano, R., Sole, A., Adamowski, J., Mancusi, L., 2014, A GIS based urban flood risk analysis model for vulnerability assessment of critical structures during flood emergencies, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussion*, 2, 2405-2441.
- Andersen, T.K., Shepherd, J.M., 2013, Floods in a changing climate, *Geography Compass*, 7(2), 95-115.
- Archer, N.A.L., Bell, R.A., Butcher, A.S., Bricker, S.H., 2020, Infiltration efficiency and subsurface water processes of a sustainable drainage system and consequences to flood management, *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), e12629.
- Arinabo, D., 2022, Unveiling the role of contextual factors in the evolution of urban floods in Sub-Saharan Africa: Lessons from Kampala city, *Environmental Science & Policy*, 137, 239-248.
- Bae, S., Chang, H., 2019, Urbanization and floods in the Seoul Metropolitan area of South Korea: What old maps tell us, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 37, 101186.
- Barbedo, J., Miguez, M., van der Horst, D., Marins, M., 2014, Enhancing ecosystem services for flood mitigation: A conservation strategy for peri-urban landscapes? *Ecology and Society*, 19(2), 54-65.
- Bibi, T.S., Kara, K.G., Bedada, H.J., Bededa, R.D., 2023, Application of PCSWMM for assessing the impacts of urbanization and climate changes on the efficiency of stormwater drainage systems in managing urban flooding in Robe town, Ethiopia, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 45, 101291.
- Bukvic, A., Barnett, S., 2023, Drivers of flood-induced relocation among coastal urban residents: Insight from the US east coast, *Journal of Environmental Management*, 325, 116429.
- Burton, H., Rabito, F., Danielson, L., Takaro, T.K., 2016, Health effects of flooding in Canada: A 2015 review and description of gaps in research, *Canadian Water Resources Journal*, 41, 238-249.
- Chang, H., Franczyk, J., Kim, C., 2009, What is responsible for increasing flood risks? The case of Gangwon Province, Korea, *Natural Hazards*, 48, 339-354.
- Charron, D.F., Thomas, M.K., Waltner-Toews, D., Aramini, J.J., Edge, T., Kent, R.A., Maarouf, A.R., Wilson, J., 2004, Vulnerability of waterborne diseases to climate change in Canada: A review, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 67(20-22), 1667-1677.
- Cho, Y., Kim, J., Kim, M., Lee, C.O., Oh, H.J., 2022, Topsoil erosion risk assessment using MUSLE: Case study of the Jungsan-ri region in Mt. Jiri national park, *Journal of the Geological Society of Korea*, 58(4), 479-488 (in Korean with English abstract).
- Choy, C.W., Wu, M.C., Lee, T.C., 2020, Assessment of the damages and direct economic loss in Hong Kong due to Super Typhoon Mangkhut in 2018, *Tropical Cyclone Research and Review*, 9(4), 193-205.
- Cook, B.R., Cornes, I., Satizábal, P., de Lourdes Melo Zurita, M., 2022, Experiential learning, practices, and space for change: The institutional preconfiguration of community participation in flood risk reduction, *Journal of Flood Risk Management*, e12861.
- Dadrasajirlou, Y., Karami, H., Mirjalili, S., 2023, Using AHP-PROMOTHEE for selection of best low-impact development designs for urban flood mitigation, *Water Resources Management*, 37, 375-402.
- Deria, A., Ghannad, P., Lee, Y.C., 2020, Evaluating implications of flood vulnerability factors with respect to income levels for building long-term disaster resilience of low-income communities, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 48, 101608.
- Eini, M., Kaboli, H.S., Rashidian, M., Hedayat, H., 2020, Hazard and vulnerability in urban flood risk mapping: Machine learning techniques and considering the role of urban districts, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101687.
- Fitzpatrick, K.M., 2021, Post-traumatic stress symptomatology and displacement among Hurricane Harvey survivors, *Social Science & Medicine*, 270, 113634.
- Fratini, C.F., Geldof, G.D., Kluck, J., Mikkelsen, P.S., 2012, Three Points Approach (3PA) for urban flood risk management: A tool to support climate change adaptation through transdisciplinarity and multifunctionality, *Urban Water*

Journal, 9, 317-331.

- Grip, I.L., Haghightafshar, S., Aspegren, H., 2021, A methodology for the assessment of compound sea level and rainfall impact on urban drainage networks in a coastal city under climate change, *City and Environment Interactions*, 12, 100074.
- Gupta, A.K., Nair, S.S., 2011, Urban floods in Bangalore and Chennai: Risk management challenges and lessons for sustainable urban ecology, *Current Science*, 100(11), 1638-1645.
- Hammond, M.J., Chen, A.S., Djordjević, S., Butler, D., Mark, O., 2015, Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review, *Urban Water Journal*, 12(1), 14-29.
- Handayani, W., Fisher, M.R., Rudiarto, I., Setyono, J.S., Foley, D., 2019, Operationalizing resilience: A content analysis of flood disaster planning in two coastal cities in Central Java, Indonesia, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 35, 101073.
- Head, M.J., Steffen, W., Fagerlind, D., Waters, C.N., Poirier, C., Syvitski, J., Zalasiewicz, J.A., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Rose, N.L., Summerhayes, C., Wagnreich, M., Zinke, J., 2022, The Great Acceleration is real and provides a quantitative basis for the proposed Anthropocene Series/Epoch, *Episodes*, 45(4), 359-376.
- Huang, J., Fatichi, S., Mascaro, G., Manoli, G., Peleg, N., 2022, Intensification of sub-daily rainfall extremes in a low-rise urban area, *Urban Climate*, 42, 101124.
- Hughes, J., Cowper-Heays, K., Olesson, E., Bell, R., Stroombergen, A., 2021, Impacts and implications of climate change on wastewater systems: A New Zealand perspective, *Climate Risk Management*, 31, 100262.
- Jia, H., Yao, H., Yu, S.L., 2013, Advances in LID BMPs research and practice for urban runoff control in China, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 7, 709-720.
- Karamouz, M., Zahmatkesh, Z., Goharian, E., Nazif, S., 2015, Combined impact of inland and coastal floods: Mapping knowledge base for development of planning strategies, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(8), 04014098.
- Lee, J., 2021, The economic aftermath of Hurricanes Harvey and Irma: The role of federal aid, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 61, 102301.
- Lee, J.Y., Kim, H., Finney, S., Pereira, M.D., 2022, Geological themes in need of more attention, *Episodes*, 45(1), 1-3.
- Lee, J.Y., Koo, M.H., 2007, A review of effects of land development and urbanization on groundwater environment, *Journal of the Geological Society of Korea*, 43(4), 517-528 (in Korean with English abstract).
- Liu, W., Chen, W., Peng, C., 2014, Assessing the effectiveness of green infrastructures on urban flooding reduction: A community scale study, *Ecological Modelling*, 291, 6-14.
- Loucks, D.P., Stedinger, J.R., Davis, D.W., Stakhiv, E.Z., 2008, Private and public responses to flood risks, *International Journal of Water Resources Development*, 24, 541-553.
- Magadza, C., 2000, Climate change impacts and human settlements in Africa: Prospects for adaptation, *Environmental Monitoring and Assessment*, 61, 193-205.
- Manawadu, L., Wijeratne, V.P.I.S., 2021, Anthropogenic drivers and impacts of urban flooding- A case study in Lower Kelani River Basin, Colombo Sri Lanka, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 57, 102076.
- Manawi, S.M.A., Nasir, K.A.M., Shiru, M.S., Hotaki, S.F., Sediqi, M.N., 2020, Urban flooding in the northern part of Kabul City: Causes and mitigation, *Earth Systems and Environ* 4, 599-610.
- Mark, O., Jørgensen, C., Hammond, M., Khan, D., Tjener, R., Erichsen, A., Helwigh, B., 2015, A new methodology for modelling of health risk from urban flooding exemplified by cholera - case Dhaka, Bangladesh, *Journal of Flood Risk Management*, 11, S28-S42.
- Miller, J.D., Hutchins, M., 2017, The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 345-362.

- Mishra, A.K., 2016, Monitoring Tamil Nadu flood of 2015 using satellite remote sensing, *Natural Hazards*, 82, 1431-1434.
- Muis, S., Güneralp, B., Jongman, B., Aerts, J.C.J.H., Ward, P.J., 2015, Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: A probabilistic analysis using global data, *Science of The Total Environment*, 538, 445-457.
- Parida, Y., 2020, Economic impact of floods in the Indian states, *Environment and Development Economics*, 25(3), 267-290.
- Park, J.Y., Song, Y.S., Lee, M., Jeong, J., Lee, C.W., 2022, Development of shallow landslide hazard maps by combining continuous rainfall scenarios with physically based model, *Journal of the Geological Society of Korea*, 58(4), 489-508 (in Korean with English abstract).
- Park, Y., Mok, J.K., Jang, B.J., Park, Y.C., Lee, J.Y., 2013, Influence of open and closed loop geothermal cooling and heating systems on hydrogeological properties, *Journal of the Geological Society of Korea*, 49(6), 649-659 (in Korean with English abstract).
- Parvin, F., Ali, S.A., Calka, B., Bielecka, E., Linh, N.T.T., Pham, Q.B., 2022, Urban flood vulnerability assessment in a densely urbanized city using multi-factor analysis and machine learning algorithms, *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 639-659.
- Pearce, L., 2003, Disaster management and community planning, and public participation: How to achieve sustainable hazard mitigation, *Natural Hazards*, 28, 211-228.
- Poku-Boansi, M., Amoako, C., Owusu-Ansah, J.K., Cobbinah, P.B., 2020, What the state does but fails: Exploring smart options for urban flood risk management in informal Accra, Ghana, *City and Environment Interactions*, 5, 100038.
- Pour, S.H., Wahab, A.K.A., Shahid, S., Asaduzzaman, M., Dewan, A., 2020, Low impact development techniques to mitigate the impacts of climate-change-induced urban floods: Current trends, issues and challenges, *Sustainable Cities and Society*, 62, 102373.
- Puzyreva, K., Henning, Z., Schelwald, R., Rassman, H., Borgnino, E., de Beus, P., Casartelli, S., Leon, D., 2022, Professionalization of community engagement in flood risk management: Insights from four European countries, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 71, 102811.
- Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., Han, H., 2021, A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies, *Natural Hazards*, 108, 31-62.
- Qiang, Y., Zhang, L., He, J., Xiao, T., Huang, H., Wang, H., 2021, Urban flood analysis for Pearl River Delta cities using an equivalent drainage method upon combined rainfall-high tide-storm surge events, *Journal of Hydrology*, 597, 126293.
- Qin, R., Khakzad, N., Zhu, J., 2020, An overview of the impact of Hurricane Harvey on chemical and process facilities in Texas, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 45, 101453.
- Rahmat, A., Zaki, M.K., Effendi, I., Mutolib, A., Yanfika, H., Listiana, I., 2019, Effect of global climate change on air temperature and precipitation in six cities in Gifu Prefecture, Japan, *Journal of Physics: Conference Series*, 1155, 012070.
- Sakijege, T., Dakyaga, F., 2023, Going beyond generalisation: Perspective on the persistence of urban floods in Dar es Salaam, *Natural Hazards*, 115, 1909-1926.
- Sarkar Chaudhuri, A., Singh, P., Rai, S.C., 2017, Assessment of impervious surface growth in urban environment through remote sensing estimates, *Environmental Earth Sciences*, 76, 541.
- Sarkar, S., Singh, R.P., Chauhan, A., 2018, Anomalous changes in meteorological parameters along the track of 2017 Hurricane Harvey, *Remote Sensing Letters*, 9, 487-496.
- Scalenghe, R., Marsan, F.A., 2009, The anthropogenic sealing of soils in urban areas, *Landscape and Urban Planning*, 90 (1-2), 1-10.
- Schreider, S.Y., Smith, D.I., Jakeman, A.J., 2000, Climate change impacts on urban flooding, *Climatic Change*, 47, 91-115.
- Shrestha, A., Mascaro, G., Garcia, M., 2022, Effects of stormwater infrastructure data completeness and model resolution on urban flood modeling, *Journal of Hydrology*, 607, 127498.

- Singh, P., Sinha, V.S.P., Vijhani, A., Pahuja, N., 2018, Vulnerability assessment of urban road network from urban flood, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 237-250.
- Song, Y.S., Park, J.Y., 2022, State-of-the-art on development and operation of landslide early warning system for climate change response, *Journal of the Geological Society of Korea*, 58(4), 509-525 (in Korean with English abstract).
- Sun, X., Li, R., Shan, X., Xu, H., Wang, J., 2021, Assessment of climate change impacts and urban flood management schemes in central Shanghai, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 65, 102563.
- Takagi, H., Xiong, Y., Furukawa, F., 2018, Track analysis and storm surge investigation of 2017 Typhoon Hato: Were the warning signals issued in Macau and Hong Kong timed appropriately? *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 12(4), 297-307.
- Țîncu, R., Zêzere, J.L., Lazar, G., 2018, Identification of elements exposed to flood hazard in a section of Trotus River, Romania, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9, 950-969.
- Tingsanchali, T., 2012, Urban flood disaster management, *Procedia Engineering*, 32, 25-37.
- Trenberth, K., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P.D., Barichivich, J., Briffa, K.R., Sheffield, J., 2014, Global warming and changes in drought, *Nature Climate Change* 4, 17-22.
- Trenberth, K.E., 1998, Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change, *Climatic Change*, 39, 667-694.
- van Wilgen, N.J., Goodall, V., Holness, S., Chown, S.L., McGeoch, M.A., 2015, Rising temperatures and changing rainfall patterns in South Africa's national parks, *International Journal of Climatology*, 36(2), 706-721.
- Wallace, T., Gibbons, D., O'Dwyer, M., Curran, T.P., 2017, International evolution of fat, oil and grease (FOG) waste management - A review, *Journal of Environmental Management*, 187, 424-435.
- Wamsler, C., Brink, E., Rivera, C., 2013, Planning for climate change in urban areas: From theory to practice, *Journal of Cleaner Production*, 50, 68-81.
- Wang, L., Zhang, Y., Kong, Z., 2021, Late Pleistocene-Holocene vegetation and climate change in Ebinur *Betula* wetland, Xinjiang, NW China, *Episodes*, 44(3), 249-257.
- Wang, M., Fu, X., Zhang, D., Chen, F., Liu, M., Zhou, S., Su, J., Tan, S.K., 2023, Assessing urban flooding risk in response to climate change and urbanization based on shared socio-economic pathways, *Science of The Total Environment*, 880, 163470.
- Wang, Z., 2018, Evolving landscape-urbanization relationships in contemporary China, *Landscape and Urban Planning*, 171, 30-41.
- Zheng, J., Huang, G., 2023, Towards flood risk reduction: Commonalities and differences between urban flood resilience and risk based on a case study in the Pearl River Delta, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 86, 103568.
- Zheng, Z., Gao, J., Ma, Z., Wang, Z.F., Yang, X.Y., Luo, X.Z., Jacquet, T., Fu, G.T., 2016, Urban flooding in China: Main causes and policy recommendations, *Hydrological Processes*, 30(7), 1149-1152.
- Zhou, Q., Leng, G., Su, J., Ren, Y., 2019, Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation, *Science of The Total Environment*, 658, 24-33.