



Developing domestic flood resilience indicators and assessing applicability and significance

Kim, Soohong^a · Jung, Kichul^{b*} · Kang, Hyeongsik^c · Shin, Seoyoung^d · Kim, Jieun^e · Park, Daeryong^f

^aResearcher, Division for Integrated Water Management, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

^bTeam Leader, Performance Management Team, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

^cChief Research Fellow, Division for Integrated Water Management, Korea Environment Institute, Sejong, Korea

^dBachelor's Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

^eBachelor's Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

^fProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

Paper number: 24-024

Received: 16 April 2024; Revised: 16 July 2024; Accepted: 22 July 2024

Abstract

Due to climate change with extreme weather events, occurrences of unprecedented heavy rainfall have become more frequent. Since it is difficult to perfectly predict and prevent flood damages, the limitation of traditional prevention-centered approaches has come an issue. The concept of “resilience” has therefore been developed which emphasizes the ability to swiftly recover from damages to previous states or to even better conditions. In this study, we 1) developed a total of 20 domestic flood resilience indicators based on the 4R principles (Redundancy, Robustness, Rapidity, Resourcefulness), 2) conducted applicability evaluations targeting specific disaster-prone areas, and 3) assessed the importance of each indicator through Analytic Hierarchy Process (AHP) analysis with flood-related experts. To confirm the suitability of the developed flood resilience indicators, multicollinearity analysis was performed, and the results indicated that all 20 indicators had tolerance limits above 0.1 and Variance Inflation Factors (VIF) below 10, demonstrating suitability as factors. Furthermore, evaluations of proposed indicators were carried out targeting disaster-prone areas in 2022(21 areas), and AHP analysis was utilized to determine the relative importance of each indicator. The analysis revealed that the importance of each indicator was as follows: Robustness 0.46, Rapidity 0.22, Redundancy 0.17, and Resourcefulness 0.16, with Robustness exhibiting the highest importance. Regarding the sub-indicators that had the greatest influence on each 4R component, river embankment maintenance emerged as the most influential for Robustness, healthcare services for Rapidity, fiscal autonomy of local governments for Resourcefulness, and drainage facilities for Redundancy.

Keywords: Resilience, Assessment indicators, Redundancy, Robustness, Rapidity, Resourcefulness

국내 홍수회복력 지표 개발과 적용성 및 중요도 평가

김수홍^a · 정기철^{b*} · 강형식^c · 신서영^d · 김지은^e · 박대룡^f

^a한국환경연구원 통합물관리연구실 연구원, ^b한국환경연구원 성과관리팀 팀장, ^c한국환경연구원 통합물관리연구실 선임연구위원,

^d건국대학교 사회환경공학부 학사과정, ^e건국대학교 사회환경공학부 학사과정, ^f건국대학교 사회환경공학부 교수

요지

최근 기후변화와 이상기후로 인해 지금까지 경험하지 못했던 극한 강우의 발생이 빈번해지고 있다. 홍수 피해 자체를 완벽히 예측하거나 제거하는 것은 한계가 존재하여 기존의 예방 중심의 대응보다는 신속히 이전의 상태로 복구하거나 더 나은 상태로 개선하는 능력을 의미하는 ‘회복력(Resilience)’ 개념이 중시되고 있다. 본 연구에서는 1) 4R(가외성(Redundancy), 내구성(Robustness), 신속성(Rapidity), 자원부존성(Resourcefulness))을 기반으로 국내 홍수회복력 지표를 개발하였다. 특별재난지역을 대상으로 적용성 평가를 수행하였으며 개발된 홍수회복력 지표의 적합성을 확인하기 위해 다중공선성 분석을 수행하였다. 분석 결과 20개 지표 모두 공차 한계 0.1 이상, VIF (Variance Inflation Factor) 10 미만으로 다중공선성이 존재하지 않아 인자로서의 적합성을 갖는 것으로 판단하였다. 또한 각 지표의 상대적 중요도를 판단하기 위해 AHP 분석 방법을 활용하였다. 분석 결과, 지표별 중요도는 내구성 0.46, 신속성 0.22, 가외성 0.17, 자원동원력이 0.16으로 내구성이 가장 큰 중요도를 나타냈다. 4R의 항목별로 가장 큰 영향을 미친 세부 지표의 경우 내구성은 하천제방 정비, 신속성은 보건의료서비스, 자원동원력은 지방자치단체 재정자립도, 가외성은 배수시설로 나타났다. 본 연구는 특별재난지역을 대상으로 회복력에 영향을 미치는 요인을 분석함으로써 국가에서 홍수의 예방 및 대응을 전략적으로 관리할 수 있는 기초를 마련하였다는 점에서 의의가 있다.

핵심용어: 홍수회복력, 평가지표, 가외성, 내구성, 신속성, 자원부존성

*Corresponding Author. Tel: +82-44-415-7965

E-mail: kcjung@kei.re.kr (Jung, Kichul)

1. 서론

최근 기후변화와 이상기후로 지금까지 경험하지 못했던 예상치 못한 극한 강우의 발생 빈도가 잦아져 국민의 안전을 지속해서 위협하고 있다(Kim *et al.*, 2018; Han, 2020). 집중 호우의 강도가 더 세지고 빈도가 잦아지면서 그에 따른 인명·재산 피해의 규모도 커지고 있어 기존의 예방 중심의 대응만으로는 홍수 피해를 최소화하기 어려운 실정이다(Sharma *et al.*, 2021). 이처럼 홍수 발생의 예측 가능성은 작아지고 그 피해는 최대화됨에 따라 기존의 예방 중심의 대응보다는 홍수 발생 이후의 회복 및 예방을 종합적으로 고려하는 홍수 관리 패러다임의 변화가 요구되고(Kim *et al.*, 2011; Karrasch *et al.*, 2021; Kim, 2021), 더 나은 상태로 개선하는 능력을 의미하는 ‘회복력(resilience)’의 개념이 중시되고 있다. 기후변화로 인한 국지성 호우와 집중호우를 피하기 어려운 현실에서 리질리언스가 확보되면 재난으로 인한 피해를 줄일 수 있다는 것이다. ‘회복력’은 다양한 분야에서 이전의 상태로 되돌아가는 힘(Bouncing back)으로 정의되고 있으며(Manyena *et al.*, 2011; Kim and Shin, 2015), 재난 분야에서는 ‘현재의 위험이 초래하는 상황을 최소화하고 잠재된 미래 위험을 줄이기 위한 개선복구를 수행하는 능력’으로 정의된다. 나아가 ‘재난 발생 이전보다 더 강한 안전성을 지닌 공동체로 만들 수 있는 역량’으로 확대되고 있다(Lee and Kim 2018; Kim and Hong, 2021).

국내에서 회복력과 관련된 연구는 1990년대 말부터 시작되었다. MCEER (United States Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research)은 재해 프레임워크인 4R 접근법(내구성(robustness), 가외성(redundancy), 자원동원력(resourcefulness), 신속성(rapidity))을 정립하였으며, 이후에도 리질리언스 진단 및 분석에 관한 다양한 연구가 수행되었다(Renschler *et al.*, 2010). Chan *et al.* (2022)는 홍수 발생 이전의 준비성을 강조하여 고위험 홍수 위험 지역을 구분하고 사전에 위험 정도를 정기적으로 공유하며 지역사회의 인식을 높이는 것을 강조하였다. Laurien *et al.* (2020)은 지역 사회 수준에서 회복 능력과 사회경제적 발전을 기반으로 홍수 회복력을 강화하는 데 도움이 되는 특성이 무엇인지를 분석하는 연구를 수행하였으며, 통합적 접근 방식의 중요성을 강조하였다. Miguez and Verol (2016)은 통합 홍수회복력 지수를 개발하고 브라질 수도권 지역에 적용함으로써 하천 복원 기술과 지속 가능한 배수시설을 결합한 접근 방식이 도시 홍수 조절 설계에 중요한 요인임을 확인하였다. Ji and Oh (2022)는 회복력의 개념 정립과 측정을 시도한 선행연구들을 재난관리 관점에서 분석하고 개선 방안을 제시하였다. Lee (2015)는 자연재해를 대처하고 극복할 수 있는 회복력을 측정하고 지자체

가 회복력 증진을 위해 어떤 노력을 해왔으며, 어떠한 영향력을 미치는지를 분석하고 시사점을 도출하였다. Lee and Choi (2018)는 국내 연안 지역을 대상으로 새로운 홍수 취약성 평가 지표를 구축하고 홍수 취약성을 평가하는 연구를 수행하였다. Choi *et al.* (2021b)은 재난에 대한 지역의 회복력에 영향을 미칠 수 있는 지역의 특성 요인을 조사하고 그에 따라 지역별 특성 요인과 회복력 비용지수의 변화량 관계를 분석하여 회복력에 영향을 미칠 수 있는 요인을 도출하였다.

이같이 홍수회복력 및 재난회복력과 관련된 연구에서는 대부분 홍수회복력을 강화하기 위한 요인 및 영향력 분석을 통해 개선 방안을 마련하였다. 우리나라에서도 큰 홍수 피해 이후에 회복을 위해 다양한 정책을 시도하고 많은 예산을 투입하고 있지만 복구가 완료된 지역은 일부분에 불과한 것으로 확인된다. 따라서 국내 상황에 맞는 홍수회복력 정책을 마련하기 위해서는 홍수회복력 지표를 개발하고 국내 홍수 피해 지역을 대상으로 적용성을 평가하고 우선순위를 도출하여 중요도에 따른 홍수 대응 방안을 마련할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 1) 국내 홍수회복력 지표를 개발하고, 2) 특별재난지역을 대상으로 적용성 평가를 수행하고, 3) 전문가를 대상으로 체계적인 그룹 의사결정 도구인 AHP (Analytic Hierarchy Process) 분석을 통해 지표별 중요도를 평가하였다.

2. 연구방법

2.1 홍수회복력의 개념

공학적 차원에서의 회복력은 교란 발생 이후 기존의 상태나 균형으로 돌아가는 능력으로 정의되며, 외부의 충격이 발생했을 경우 빠른 속도로 원래의 상태로 되돌아가는 능력이 중요하게 평가된다(Davoudi *et al.*, 2012). 일반적으로 재난 분야에서 회복력은 현재의 위험이 초래하는 상황을 최소화하고 잠재된 위험성을 저감하기 위한 개선 및 복구 능력으로 정의된다(Bruneau *et al.*, 2003; Tierney and Bruneau, 2007; Cutter *et al.*, 2008). 회복력의 개념은 원래 상태로의 복구만을 의미하는 것이 아니라 외부의 충격 발생 이전 상태의 안정성(Stability)과 변화된 환경에 대한 적응력(Adaptability)과 충격 발생 이후의 새로운 수준의 전환 능력(Transformability)까지 포함한다(Kim, 2016). 홍수회복력은 홍수 발생 이전과 도중 그리고 이후에 지역사회와 인프라에 미칠 수 있는 잠재적인 영향을 완화하고, 홍수 발생 이후에 이전의 상태 또는 더 나은 상태로 회복하여 홍수 위험과 피해를 최소화할 수 있는 능력으로 정의할 수 있다(Batica and Gourbesville, 2014; Batica, 2015; Disse *et al.*, 2020). 홍수회복력의 정의와 속성의 구분

은 해석 방법에 따라 다르게 나타나고 있으나, 공통으로 제시하는 속성은 ‘4R’로 내구성(Robustness), 신속성(Rapidity), 가외성(Redundancy), 자원동원력(Resourcefulness)이다. 이러한 속성은 재난과 같은 외부 충격에 얼마나 견딜 수 있는지, 홍수 발생에 대비하여 여러 보호 조치를 통해 기능을 유지할 수 있는 장치를 마련했는지, 구축된 자원동원력으로 신속하게 대비할 수 있는지를 나타낸다(Kim, 2021). 내구성은 기능 저하 또는 손실 없이 외부의 충격을 견딜 수 있는 능력, 가외성은 기능이 손실되거나 중단될 때 그 기능을 미리 대비하여 유지할 수 있는 능력, 자원동원력은 문제가 발생했을 때 내·외부의 자원을 동원하여 해결할 수 있는 사회적 능력, 신속성은 우선순위에 따라 손실을 방지하고 신속하게 복구하는 능력을 의미한다(Table 1)(Bruneau *et al.*, 2003; Tierney and Bruneau, 2007; Han *et al.*, 2016).

본 연구에서는 회복력의 개념을 4R (Redundancy (가외성), Robustness (내구성), Rapidity (신속성), Resourcefulness (자원동원력))을 기반으로 ‘홍수의 위험 및 피해를 최소화하고 이전의 상태로 복구하거나 더 나은 상태로 개선하는 능력’으로 정의하였다. Fig. 1은 현재 위험의 영향을 최소화하고 미래의 잠재적인 위험을 완화하여 복구할 수 있는 능력을 바탕으로 4R 기반의 홍수회복력 개념을 나타낸다(Kim *et al.*, 2016b; Linnenluecke and Griffiths, 2010).

Table 1. 4R principles of flood resilience

4 R Principles	Definition
Redundancy	Capacity to maintain functionality through multiple protective measures, ensuring system operation
Robustness	Capacity to withstand external shocks without degradation or loss of functionality in a system
Rapidity	Capacity to meet priorities and accomplish objectives in a timely manner
Resourcefulness	Capacity to identify problems and use resources based on priorities when parts of the system are disrupted

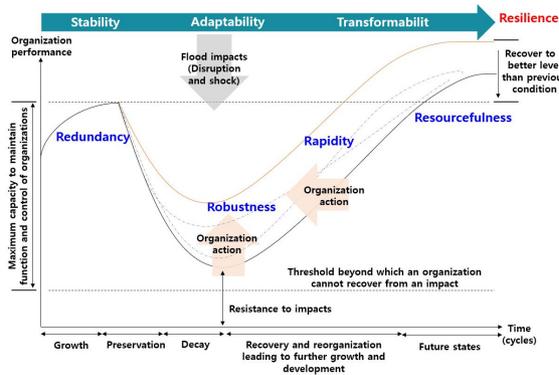


Fig. 1. Concept of flood resilience based on 4R principles

2.2 선행연구 검토 및 홍수회복력지표 개발

홍수회복력 지표를 선정하기 위해 홍수 피해 특성과 홍수 및 재난회복력 지표와 관련된 선행연구를 고찰하고 항목별로 홍수회복력에 가장 큰 영향을 미친 요인과 지자체별 데이터 확보 가능성에 따라 홍수 영향의 강도를 조사하였다. 사례연구 조사를 기반으로 지표별 상호 연관성과 기존 시스템과의 차별성을 나타낼 수 있는 홍수회복력 속성(4R)을 분류 기준으로 하여 총 20개의 홍수회복력 지표를 개발하였다(Table 2). Table 3은 홍수회복력 지표 선정을 위해 조사했던 항목별 주요 내용 및 참고문헌을 나타낸 것이다.

지역의 지형 및 인프라 특성은 홍수 피해 규모와 관련이 있다. 높은 녹지율과 넓은 하천 면적은 상대적으로 수해의 대비를 쉽게 하여 재난회복력을 높이고(Park and Yoon, 2017; Jung and Byun, 2022), 제방 관리가 미흡하거나 제방이 유실 및 붕괴할 때 홍수 피해가 극대화된다. 한편, 고령인구 비율이 증가함에 따라 홍수 대응 능력이 취약한 사회구조로 변화하여 신속한 전달체계, 자동화, 효율화 등의 수요가 증가하고 그에 따라 홍수예보 서비스 품질의 고도화가 요구되고 있다(Kim *et al.*, 2016a). Choi *et al.* (2021a)에 따르면 지역의 경보체계는 재난 발생 직후의 사전 대응 체계로, 지자체의 대응 능력을 나타낸다. 음성 통보 시스템, 강우량계, 수위 관측시설, 재난감시 CCTV, 자동기상관측시스템, 재해 문자, 전광판 등이 포함된 경보시스템 및 통신전달체계는 하천의 수위가 위험수위에 도달했을 때 경보를 통해 주민들의 신속한 대피를 도와주고 있다.

행정 및 시설 분야 외에도 홍수 위험 인식을 하고 홍수 발생 시 빠르게 대처하는 것이 중요하다. 선행연구에서는 지표의 홍수 위험성 인식과 관련한 데이터로 고등교육자 비율을 사용한 경우가 많았으나(Kim and Hong, 2021; Park, 2016; Lee, 2015), 본 연구에서는 재난과 연관성이 높은 지표를 선정하기 위해 재난 교육을 중점으로 데이터 확보가 가능한 재난훈련 예산 현액을 지표로 활용하였다. 지역사회와 연계한 홍수회복력은 홍수 피해 이후 지역사회 이해관계자들 사이에서 이루어진 사회적 학습의 정도에 의해 결정되며, 사회적 학습이 잘 이루어질수록 홍수회복력이 강화된다고 조사된 바 있다(Kim and Hong, 2021; Zhang *et al.*, 2021; Chang *et al.*, 2021).

홍수 피해로 인해 발생한 이재민을 수용할 수 있는 시설의 확보는 홍수 회복에 필수적인 요소이다. 학교와 같은 커뮤니티 시설은 이재민의 대피처로 사용되며 이재민 수용시설과 민방위 대피시설 또한 임시주택으로 사용 가능하다(Heo, 2017). 재난 발생 이후 신속한 복구를 위해서는 행정적 지원뿐 아니라 지역 주민의 자체적인 노력이 중요하며, 지역 주민들의 노력에는 자율방재단과 자원봉사가 있다. 지역의 자율방재단은 정부와 지자체의 행정력만으로는 재난에 대처하기에 한계가 있으

Table 2. Flood resilience indicators based on 4R classification

Category	Subcategory	Flood resilience indicators	Contents
Redundancy	Infrastructure for temporary evacuation	Temporary shelter facilities	Number of disaster refugee accommodations + number of civil defense evacuation facilities (places)
	Resource availability	Public official capacity for disaster management	Number of public officials responsible for river management (people) (river management, firefighting, environment, outsourced workers)
		Budget for disaster and emergency management fund	Disaster management fund (KRW 1,000,000)
		Flood insurance	Status of storm and flood insurance coverage (Case)
	Temporary flood prevention facilities	Detention and retention facilities	Number of detention basins (EA) by municipality (si/gun/gu)
Drainage facilities		Number of pumping stations (EA)	
Robustness	Flood impact facilities	Water supply and sanitation service facilities (public sewerage)	Public sewerage penetration (%) by municipality (si/gun/gu)
		Water supply and sanitation service facilities (water supply)	Water supply penetration (%) by municipality (si/gun/gu)
		River bank improvement	River bank length (m)
	Natural environment	Area of parks and green space	Green space (%)
		River area (%)	River area (m ²)/area of administrative division (km ²)
Rapidly	Resource transportation	Transportation network	Road length per national land area (km/km ²)
	Information system	Flood risk awareness	disaster drill and preparedness budget (KRW 1,000,000)
		Disaster alert	Disaster and safety communications text message (times)
		Warning system and communications network	Disaster early warning system (EA)
	Disaster response service	Medical service	Healthcare workers (people)
Resourcefulness	Support system	Volunteers	Number of volunteers (people)
		Citizen corps for disaster prevention	Local autonomous disaster prevention corps (people)
	Financial resources	Fiscal self-reliance of municipalities	Fiscal self-reliance (%)
		Gross Regional Domestic Product (GRDP)	GRDP per capita (KRW 1,000,000/person)

Table 3. Description of key flood resilience indicators

Classification			Brief description	References
Category	Subcategory	Item		
Redundancy	Infrastructure for temporary evacuation	Temporary shelter facilities	<ul style="list-style-type: none"> - These facilities can be used as a shelter for evacuation or temporary dwellings in the event of a disaster - When setting indicators related to disaster prevention facilities, the capacity of the evacuation facilities is used 	Heo (2017), Jeon and Lee (2018)
	Resource availability	Public officials' disaster management capacity	<ul style="list-style-type: none"> - The number of public officials per 1,000 population indicates the capacity for the provision of civil/administrative services to the public in the event of a disaster - The larger the number of public officials per 1,000 population, the greater the capacity to cope with and respond to natural disasters - The number of fire officers represents the manpower capacity to be deployed for rescue and emergency services in the event of a disaster, and a higher ratio of fire officers increases disaster resilience. - Resilience increases with the number of public officials responsible for disaster management policy 	Park and Song (2014, 2015), Lee and Kwon (2017), Park (2016)
		Budget for disaster and emergency management fund	- Although the disaster prevention/civil defense budget is not a budget directly allocated for natural disasters, it indicates how much effort individual municipalities are putting into disaster risk management	Choi <i>et al.</i> (2022)
		Flood insurance	- The storm and flood insurance system is a key indicator of total resilience capacity (related to recovery expenses)	Kang <i>et al.</i> (2013)
Redundancy	Temporary flood prevention facilities	Detention and retention facilities	- In cases of complex human and property damage, the presence/absence of detention and retention facilities was found to be important.	Kim and Hong (2021)
		Drainage facilities	- Problems with sewers and rainwater pumping stations accounted for 56.7% of the causes of flood damage in Seoul	Lee <i>et al.</i> (2006)
Robustness	Flood impact facilities	Water supply and sanitation service facilities (public sewerage)	<ul style="list-style-type: none"> - Resilience increases with higher water supply/public sewerage penetration (%) - These facilities are crucial in disaster recovery for ensuring the supply of clean water, a basic necessity for human survival - Public sewerage must be maintained in good condition to ensure safety from flood damage 	Park and Yoon (2017), Mottahedi <i>et al.</i> (2021), Park (2016)

Table 3. Description of key flood resilience indicators (Continued)

Classification			Brief description	References
Category	Subcategory	Item		
Robustness	Flood impact facilities	Water supply and sanitation service facilities (water supply)	- A systematic review reported that the number of prior studies on water supply networks is second only to energy systems and transportation	Park <i>et al.</i> (2005)
		River bank improvement	- Erosion of the river bank, loss of reservoir, and inadequacy in the cross-sectional area of the river bank are the main causes of aggravated flood damage - Lack of river improvement work and inadequate length of river bank are major factors influencing flood damage	
	Natural environment	Area of parks and green space	- Green space serves as a buffer zone or area for absorbing the damage from disasters - Parks and green spaces protect residential and community spaces from river flooding and affect sediment yield and the rainwater infiltration structure, thereby mitigating flood risk - The larger the area of green space, the higher the disaster resilience - Due to the nature of their use, parks and green spaces are likely to be located in the suburban area or on the outskirts of a region. - Green space reduces the physical dimension of flood vulnerability by improving the permeability of rainwater.	Kim and Hong (2021), Choi <i>et al.</i> (2022), Park and Yoon (2017), Park and Song (2014), Kim (2021), Park (2016)
	Natural environment	River area (%)	- The larger the river area, the more vulnerable the region is to storm and flood damage, and a large river area lowers the flood resilience of the applicable region - Most studies in the literature river length instead of river area as a variable, making it difficult to collect quality data on river area (%) - River area (%) is also used as a proxy indicator	Park and Yoon (2017), Park (2016)
Rapidly	Resource transportation	Transportation network	- To enable immediate normalization of building and equipment functionality after a disaster, the rapid transportation and delivery of material, human, and technical resources is critical - Transportation infrastructure plays an arterial role in transporting material resources needed for post-disaster response and recovery	Park (2016)
	Information system	Flood risk awareness	- The number of people with higher education is a parameter representing the acquisition of information about flood risk - The ratio of expenditure on education in individual municipalities is an indicator of the adaptive capacity of citizens in the community - The higher the investment rate in education, the greater the social capacity for disaster response - The resilience of the community is higher with an increasing percentage of people with higher education	Kim and Hong (2021), Park and Song (2014)
		Disaster alert Warning system and communications network	- Adaptive capacity refers to how quickly a system is able to recover from climate impact. There are social, economic, and environmental dimensions to capacity - Adaptive capacity includes policy and institutional factors such as economic resources and crisis management programs - Institutional capacity includes a disaster prevention/pre-warning system	Koh and Kim (2010)
	Emergency response service	Medical service	- The number of medical and healthcare workers per 1,000 population represents the capacity for medical service responses in the event of a disaster - The higher the indicator value of medical service, the greater the social response capacity - Coordinated actions for human casualties are carried out in the event of a disaster	Park (2016), Park and Song (2014)
Resourcefulness	Support system	Volunteers	- It is assumed that Resourcefulness improves with an increasing number of volunteers - Citizen volunteers have the greatest impact on improving regional resilience	Choi <i>et al.</i> (2021b), Park and Song (2015)
		Citizen corps for disaster prevention	- Maintaining public order and safeguarding people in a chaotic, post-disaster environment - Disaster response capabilities are improved through community-based autonomous disaster prevention with the participation of citizens	Lee and Kwon (2017), Jeong and Lee (2016)
	Financial resources	Fiscal self-reliance of municipalities	- Fiscal self-reliance of municipalities refers to a budget that can be used at the discretion of the individual local government - Regions with high fiscal self-reliance have a high capability to cope with even if damage occurs and provide financial support	Jung and Byun (2022), Park and Yoon (2017), Park and Song (2014), Arup (2014), Park (2016)
Resourcefulness	Financial resources	Fiscal self-reliance of municipalities	- Border regions tend to suffer significant physical and economic damage, including population decline, due to stagnant regional economic development, partially owing to their geographical vulnerability to disasters	Yoo and Kim (2008)
		GRDP	- GDP (GRDP) is used as a proxy variable, representing the adaptive capacity of economic resilience	

로, 민간이 참여하는 지역 단위의 자율 방재를 통해 재난 대응 능력을 향상하기 위해 수립되었다(Jung and Lee, 2016). 자율 방재단은 재난 대비 순찰 활동 및 주민 교육, 재난 발생 시 주민 대피 유도, 이재민과 대피소 관리, 긴급 구호물자의 조달 등을

수행한다. 자원봉사자의 경우 재난 발생 이후 피해 현장에서 이 재민을 직접적으로 돕는 역할을 하며, 지역의 특성 요인 중 회복 력에 큰 영향을 미친다. 자원봉사자 등록 인원수는 사회복지자 원봉사인증관리시스템과 1365 자원봉사포털을 통해 파악할

Table 4. Flood resilience indicator sources

Items	Flood resilience indicators	Source
Temporary shelter facilities	Number of disaster refugee accommodations + number of civil defense evacuation facilities + number of schools (places)	National Disaster and Safety Portal (2023)
Disaster management capacity of public officials	Number of public officials responsible for river management (people)	Direct information request to the local government
Budget for disaster and emergency management fund	Disaster management fund (KRW 1,000,000)	Local Finance Integrated Open System (2023)
Flood insurance	Status of storm and flood insurance coverage (cases)	Information Disclosure Portal (2023)
Detention and retention facilities	Number of detention basins (EA) by municipality (si/gun/gu)	Information Disclosure Portal (2023), Korea Land and Geospatial Informatix Corporation (LX, 2023)
Drainage facilities	Number of pumping stations (EA)	Ministry of Environment (ME, 2023) (Sewage Statistics)
Water supply and sanitation service facilities (public sewerage)	Public sewerage penetration (%) by municipality (si/gun/gu)	Ministry of Environment (ME, 2023) (Sewage Statistics)
Water supply and sanitation service facilities (water supply)	Water supply penetration (%) by municipality (si/gun/gu)	Ministry of Environment (ME, 2023) (Sewage Statistics)
River bank improvement	River bank length (m)	Water resources Management Information System (WAMIS, 2023)
Area of parks and green space	Green space (%)	Korea Land and Geospatial Informatix Corporation (LX, 2023)
River area (%)	River area (m ²)/area of administrative division (km ²)	Korea Land and Geospatial Informatix Corporation (LX, 2023)
Transportation network	Length of roads per square kilometer of land (km/km ²)	Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT, 2023)
Flood risk awareness	Disaster drill and preparedness budget (in KRW 1,000)	Local Finance Integrated Open System (2023)
Disaster alert	Disaster and safety communications text message (time)	Public Data Portal (2023)
Warning system and communications network	Disaster early warning system (EA)	Information Disclosure Portal (2023)
Medical service	Healthcare workers (people)	National Health Insurance Service (2023)
Volunteers	Number of volunteers (people)	Information Disclosure Portal (2023)
Citizen corps for disaster prevention	Local autonomous disaster prevention corps (people)	Information Disclosure Portal (2023)
Fiscal self-reliance of municipalities	Fiscal self-reliance (%)	Korean Statistical Information Service (2023)
Gross Regional Domestic Product (GRDP)	GRDP per capital (in KRW 1,000,000/person)	Korean Statistical Information Service (2023)

Table 5. Declared special disaster areas

Natural disaster	2022 Special disaster areas	
Typhoon Hinnamnor	1st	North Gyeongsang Province, city of Gyeongju, city of Pohang
	2nd	Ulsan Metropolitan City: Duseo-myeon, Onsan-eup (within Ulju-gun) South Gyeongsang province: Yokji-myeon, Hansan-myeon (within city of Tongyeong); Irun-myeon, Nambu-myeon (within city of Geosje)
Localized heavy rainfall	1st	Seoul: Gwanak-gu, Yeongdeungpo-gu, Gaepo 1-dong (in Gangnam-gu) Gyeonggi province: cities of Seongnam and Gwangju; Yangpyeong-gun, Geumsa-myeon and Sanbuk-myeon (within city of Yeosu) Gangwon province: Hoengseong-gun South Chungcheong province: Buyeo-gun, Cheongyang-gun
	2nd	Seoul: Dongjak-gu, Seocho-gu Gangwon province: Hongcheon-gun Gyeonggi province: Gocheon-dong, Cheonggye-dong (within city of Uiwang), Dongcheon-dong (within city of Yongin) South Chungcheong province: Cheongra-myeon (within city of Boryeong) Gyeonggi province: City of Yeosu

수 있다. 사회복지자원봉사인증관리시스템은 보건복지부에서 관리하고 있으므로 지자체 기준의 인원수를 파악하는 데 어려움이 있으므로 1365 자원봉사포털을 통해 지자체별 자원봉사자 현황을 조사하였다. 또한 홍수 피해 이후 추가적인 지역 인명피해를 막기 위해서는 보건의료서비스의 활용이 중요하다. 본 연구에서 의료 인력의 경우 재난 현장에서 이재민을 돕는

보건소 소속의 의료 인력 지표를 사용하였으며 보건소 소속의 사, 약사, 간호사, 물리치료사, 행정직 등이 포함되어 있다.

지자체의 재정적 능력은 재정자립도 현황 및 재난관리기금 결산액 자료를 통해 평가할 수 있다. 재정자립도를 평가하기 위해서는 지자체의 예산 규모가 포함되므로 1인당 지역총생산(GRDP)이 지자체의 재정 능력을 평가하는 지표가 될 수

있다고 판단하였다. GRDP는 행정안전부의 한국도시통계의 지자체 재정자립도 자료를 활용하고, 재난관리기금의 경우 지방재정365의 재난관리기금 결산액 정보를 활용하였다.

도시회복력 측정을 위해서는 자연환경 외에도 경제나 행정 분야의 종합적인 평가가 필요하다(Choi et al., 2021b). 홍수 피해 회복을 위해서는 지자체의 적절한 재난기금 확보가 매우 중요하기 때문에 재난기금은 지자체의 재난 대응 능력을 나타내는 지표로 활용할 수 있다(Kim, 2016). 또한 풍수해 보험은 태풍, 홍수, 호우 등의 재난 발생 시 복구에 필요한 보상을 받을 수 있는 정책보험으로, 침수 주택과 상가의 복구와 일상으로의 회복에 경제적으로 도움이 된다. 풍수해 보험 가입 현황 자료는 정보공개포털을 통해 지자체별 자료를 요청하여 활용하였다. 본 연구에서 개발한 홍수회복력지표를 특별재난지역에 적용하기 위해 지표별 자료를 수집하였으며, 출처는 Table 4에 정리하였다.

2.3 시범지역

2022년 집중호우와 태풍 힌남노로 인해 전국적으로 큰 피해를 겪은 이후, 정부는 집중호우 피해 지역에 대한 사전 조사 결과를 토대로 전국 21개 지역을 특별재난지역으로 선포하였다. 특별재난지역을 선포한 이후, 일부 지역만 수해 복구가 완료되었고 일부 지역은 복구되지 못했거나 복구 현황 파악이 어려운 상황이다. 특별재난지역을 선포한 이후에 국가 및 시·도로부터 많은 지원금을 받고 많은 조직을 총동원하고 있음에도 불구하고 복구 속도 및 정도에는 차이가 존재하는 것으로 파악된다. 따라서 본 연구에서는 홍수 회복에 영향을 미치는 지표가 무엇인지 파악하기 위하여 2022년 특별재난지역을 대상 지역으로 선정하였다(Table 5). 특별재난지역 중 읍면동의 경우 자료 수집에 어려움이 있어 시군구로 통일하여 연구를 진행하였다.

특별재난지역은 「재난 및 안전관리 기본법」 제60조제1항에 따라 중앙대책본부장이 중앙안전관리위원회의 심의를 거쳐 대통령에게 건의하여 지정될 수 있다. 재난 및 안전관리 기본법 시행령 제69조에 의하면 대통령으로 정하는 규모의 재난이란 국고 지원 대상 피해 기준금액의 2.5배를 초과하는 피해가 발생하거나, 사회재난의 재난 중 재난이 발생한 해당 지방자치단체의 행정 능력이나 재정 능력으로는 재난의 수습이 곤란하여 국가적 차원의 지원이 필요하다고 인정되는 재난 등에 해당하는 경우를 말한다.

약 2조 원의 재산 피해와 13명의 인명피해를 발생시킨 태풍 힌남노로 인해 포항과 경주 지역의 피해가 극심했다. 따라서 태풍 힌남노 1차 특별재난지역은 경상북도 경주시, 포항시가 선정되었다. 이후 2차로 울산광역시 울주군 온산읍과 두서면, 경상남도 통영시 옥지면과 한산면, 경상남도 거제시 일운면과 남부면이 특별재난지역으로 선포되었다. 최대 400mm의

폭우로 9명이 숨지고 7명이 실종됐던 중부지방 일대 집중호우로 인한 특별재난지역은 1차로 서울특별시 영등포구, 관악구, 경기도 성남시, 광주시, 양평군, 강원 특별자치도 횡성군, 충청남도 부여군, 청양군이 선포되었으며 지자체 내 읍면동 서울특별시 강남구 개포1동, 경기도 여주시 금사면과 산북면이 선포되었다. 이후 2차로 서울특별시 동작구, 서초구, 강원 특별자치도 홍천군, 경기도 의왕시 고천동, 청계동, 경기도 용인시 동천동, 충청남도 보령시 청라면이 추가되었으며 읍면동으로 선포되었던 여주시는 시 전체로 확대되었다.

2.4 지표 표준화

지자체별로 지표에 대응하는 자료들을 모두 수집하였으나, 지표별로 모두 다른 단위를 가지고 있으므로 각각의 지표가 홍수회복력에 얼마만큼의 영향을 미치는지 알아보기 위해 단위를 통일시키는 표준화 과정을 거쳤다. 본 연구에서는 표준화 값으로 Z-Score를 이용하였다. 표준화를 통해 단위를 통일한 이후, 지표별 중요도를 산정하기 위해서는 가중치를 산정해야 한다. 지표별 가중치는 전문가를 대상으로 체계적인 그룹 의사결정 도구인 AHP (Analytic Hierarchy Process) 방식을 활용하여 산정하였다. 여기서 i 는 지표의 개수를 의미한다.

$$\text{홍수 회복력 지표} = \sum_{i=1}^i \text{가중치} * \text{표준화 값} \quad (1)$$

2.5 중요도 평가

요소별 상대적 중요도를 파악하기 위해 체계적인 그룹의사결정 도구인 계층분석기법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 활용하였다. AHP 기법은 계층화 분석법, 절대적 측정 방법 등으로 활용할 수 있으며, 여러 가지 요인이 존재하는 의사결정에 유용한 기법으로 평가되어 다양한 연구에 활용되고 있다(Kim, 2020). 문제를 계층화하여 주요 요인과 세부 요인으로 구분하고, 쌍대비교(Pairwise Comparison)를 통해 생성된 데이터를 기반으로 상대적 중요도를 측정하여 정량적 결과를 도출할 수 있다. AHP 분석에서 산정하는 일관성 비율(Consistency Ratio, CR)은 쌍대비교를 통해 산정되는 가중치가 논리적인 일관성을 유지하는지를 판단하는데 활용되는 척도로, 0.1 미만의 일관성 비율이 나타나면 합리적이라고 평가한다.

쌍대비교는 여러 개의 평가지표 중 상대적 중요도를 수치로 나타내는 방법 중 가장 명확한 방식으로, 각 평가지표 사이의 중요 차이를 비율 척도로 결정한다(Bae, 2014). 이를 통해 각 계층에 소속된 항목별 중요도를 서로 비교하는 쌍대비교행렬을 구성한다. n 개의 구성요소로 구성된 항목 중 항목 i 가 항목 j 에 비해 a_{ij} 배의 중요도를 갖는다면 쌍대비교행렬은 다음 Eq. (2)과 같이 나타낼 수 있고 행렬의 각 원소는 Eq. (3)와 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (w_i : \text{항목 } i \text{의 가중치}) \quad (3)$$

AHP 분석은 10명 내외의 소수 표본으로도 유효한 결과를 확보할 수 있다는 장점이 있다(Kim and Shin, 2015). 이에 본 연구에서는 홍수회복력 지표의 중요도를 파악하기 위해 홍수분야의 전문 지식을 가진 산·관·학·연 전문가 20명을 대상으로 12월 11일부터 12월 15일까지 5일간 전문가 조사를 시행하였다. 홍수회복력 지표의 중요도 분석을 위해 계층화를 Fig. 2와 같이 구성하였다. 앞서 선정된 4R 기반의 홍수회복력 지표를 기반으로 하여 상위 계층의 그룹은 4R인 대분류 항목으로 구성되어 있으며, 각각의 하위 지표들은 중분류 및 소분류 항목으로 구성되어 있다.

3. 결과

3.1 적합성 평가 결과

홍수회복력 지표의 적합성을 검증하기 위해 범용 통계 프로그램인 SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)를 활용하여 분석하였다. 종속변수는 지표별 표준화된 값을 모두 합친 값을 적용하였고 독립변수는 각 지표의 표준화 값을 적용하였다. 이때 다중공선성(Multicollinearity)이란 독립변수 간의 상관관계가 존재하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 다중공선성을 알아보기 위해 SPSS를 활용하여 공차한계(Tolerance)와 분산팽창계수 VIF (Variance Inflation Factor)를 산정하였다. VIF는 Eq. (4)와 같이 산출되며 독립변수 간의 정확도 척도인 R-squared 값을 이용하는 것으로, R-squared

값이 크면 상관성이 크고, VIF도 큰 값을 갖는다(Koo and Shin, 2015; Montgomery *et al.*, 2021).

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2} \quad (4)$$

본 연구에서는 4R을 기반으로 다중공선성 분석을 수행하였고 분석 결과는 Table 6과 같다. 공차한계가 모두 0.1 이상이며, VIF가 10 미만이므로 다중공선성에 문제가 없고 회귀 모형이 적합한 것으로 판단된다. 20개 지표 모두 다중공선성이 존재하지 않은 것으로 나타나 모두 인자로서의 적합성을 갖는 것으로 분석되었다.

3.2 적용성 평가 결과

Table 7은 시범지역을 대상으로 홍수회복력지표에 대해 산정한 값을 나타낸 것이며, Table 8는 표준화 과정을 거친 결과를 나타낸 것이다. 시범지역의 홍수회복력 지표는 20개의 인자별 지점값을 선형 합에 의해 모두 합하여 산정하였다. 홍수회복력 지표의 값이 클수록 지자체별 홍수회복능력이 높으며, 작을수록 상대적으로 홍수회복능력이 낮다는 관점에서 적용성 평가를 수행한 결과, 홍수회복력 지표가 가장 높은 상위 3개 지역으로는 경기 용인시(92.36), 경북 경주시(72.62), 경기 성남시(67.15)로 나타났다.

Table 8에서 알 수 있듯이, 경기 용인시의 경우 다른 지역에 비해 자율방재단의 영향이 크게 나타난 것으로 확인된다. 용인시의 경우 2019년 재난 예방 및 신속한 대처를 위해 시민 중심의 자율방재단을 전면 재정비하고 2018년 12월 개정된 ‘용인시 자율방재단 운영 등에 관한 조례’에 따라 조직을 확대한 바 있다. 경북 경주시의 높은 홍수회복력은 하천제방 및 펌프장 수의 영향인 것으로 확인된다. 지난 2021년 경주시는 하천유로 폭이 좁고 제방이 낮아 매년 우수기 때마다 침수 피해가 발생하는 하천을 대상으로 기존의 토사 제방 대신, 호안 블

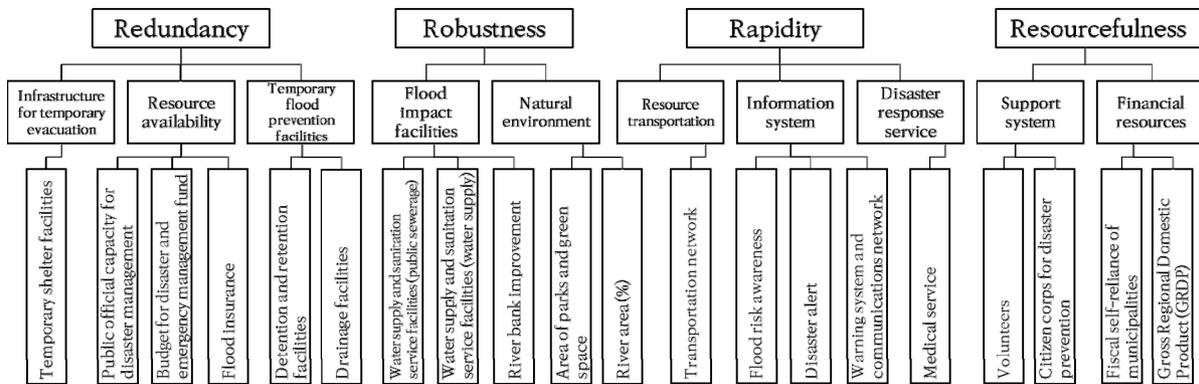


Fig. 2. Flood resilience indicator hierarchy tree

Table 6. Results of multicollinearity analysis

Factors		Standardized coefficient	Multicollinearity statistics	
		Beta	Tolerance	VIF
Rapidly	Transportation network	.421	.734	1.362
	Flood risk awareness	.276	.830	1.205
	Disaster alert	.210	.867	1.153
	Warning system and communications network	.364	.680	1.471
	Medical service	.695	.837	1.195
Redundancy	Disaster refugee accommodations, civil defense evacuation facilities, number of schools (places)	.282	.202	4.942
	Number of public officials responsible for disaster policy (Flood response/flood control divisions)	.178	.119	8.397
	Budget for disaster and emergency management fund	.094	.467	2.139
	Status of storm and flood insurance coverage	.051	.425	2.353
	Detention basins by municipality (si/gun/gu)	.404	.298	3.352
	Relay pumping station by metropolitan city/province	.621	.565	1.769
Robustness	Public sewerage penetration rate	.395	.303	3.302
	Water supply penetration rate	.179	.310	3.223
	River bank improvement	.683	.535	1.870
	Green space (%)	.241	.459	2.178
Resourcefulness	River management status	.383	.506	1.977
	Volunteers	.229	.124	8.070
	Citizen corps for disaster prevention	.454	.407	2.456
	Fiscal self-reliance	.492	.128	7.827
	GRDP per capita	.157	.493	2.028

* For correlation between factors (Zero-Order), + indicates a positive relationship, and - indicates a negative relationship

* In general, if tolerance ≥ 0.1 and VIF* ≤ 15 , it is judged that there is no multicollinearity among variables/factors

* VIF: Variation Inflation Factor

록 형태의 제방을 쌓아 하천 치수 안정성을 높여 하천 범람을 근본적으로 막을 수 있는 사업을 추진한 것으로 나타났다 (Gyeongju City, 2021). 또한 2022년 환경부 하수도 정비 중점 관리지역에 선정되어 국비 48억 원 포함 사업비 80억 원을 들여 경주시의 상습 침수지역인 충효지구 일대의 우수관로 1.2 km 개량 및 빗물펌프장 설치로 침수 피해 최소화를 위한 대책을 마련하였다. 추가로, 네 번째로 높은 지역인 울산광역시 경우 2016년 태풍 ‘차바’로 인해 큰 피해를 겪은 이후 홍수 피해를 막기 위해 총 1,016억 원의 사업비를 들여 피해가 컸던 신명천과 보은천 제방을 정비하고 태화·우정 시장에 배수펌프장과 우수지를 설치하는 등 수해방지종합대책을 추진하는

등 홍수 대응과 회복력 향상을 위한 노력을 시행하였다.

반면, AHP 분석 기반으로 산정한 세부 지표에서 홍수회복력 지점값이 가장 낮은 3개 지역으로는 충남 청양군(-61.61), 강원 횡성군(-58.43), 경남 통영시(-40.84)로 나타났다. 충남 청양군의 경우 낮은 하수도 보급률이 큰 영향을 미친 것으로 분석되었다. 실제로 충남도 내 상수도 보급률이 전국 평균에도 미치지 못한 것으로 조사되었으며(Chungcheong Today, 2023), 특히나 청양군의 경우 55%대로 매우 낮아 농촌 지역 거주자의 경우 홍수 피해를 겪을 확률이 큰 것으로 나타났다 (Chungcheong Newspaper, 2023). 횡성의 경우 제방 연장이 큰 영향을 미친 것으로 분석되었는데, 실제 2022년 8월 집중호우로 인해 횡성읍 등 9개의 읍·면에 걸쳐 101개 하천에 제방 유실 등의 큰 피해를 본 것으로 나타났다(Hwaseong News, 2023). 이후 피해가 심한 3개 하천(이리천, 성골천, 일리천)이 재해 방지를 위한 개선복구 사업 대상지로 선정되며 516억 원을 확보하였다(Local Autonomy TV, 2022). 개선복구 사업을 통해 약 14km의 제방과 호안을 강화하고 보 및 낙차공 22개소 등을 정비할 계획으로 복구 사업을 추진하고 있지만 본 연구에서 수행한 데이터에서는 복구 사업 시행 이후의 결과가 반영되지 않아 제방 연장의 중요도가 낮게 반영된 것으로 판단된다.

세 번째로 낮은 지역인 경남 통영시(-40.84)는 충남 보령시(-40.34)와 비슷한 수준으로 낮게 나타났다. 경남 통영시도 마찬가지로 제방 연장이 큰 영향을 미친 것으로 분석되었다. 2019년 10월 평균 217 mm의 폭우가 쏟아지면서 침수 사고가 발생하였으며(Gyeongnam Daily, 2019), 이후 2022년 태풍 ‘힌남노’, 2023년 태풍 ‘카눈’으로 인해 제방이 붕괴하는 등 큰 피해가 발생하여 홍수에 취약한 것으로 판단된다. 충남 보령시의 경우 하수도 보급률이 큰 영향을 미친 것으로 판단되는데, 실제로 보령시의 경우 하수도 보급률이 76.7% 정도의 수준으로 충남도 전체 보급률(83.2%)보다 낮은 수준으로 조사되었다(Yonhap News, 2022). 이후 보령시는 2023년 270억 원을 투입하여 하수도 기반 시설을 확충할 예정이라고 밝혔다.

3.3 중요도 평가 결과

전문가 조사를 통한 홍수회복력 지표의 중요도 평가 결과는 Fig. 3, 4R의 중요도를 기반으로 항목별로 중요도가 높게 나타난 하위 항목을 분석한 결과는 Fig. 4와 같다. Table 9는 AHP 분석을 통해 산출한 지표별 가중치와 통합가중치를 적용한 홍수회복력 지표의 우선순위를 나타낸 것이다. 4R을 기준으로 분석한 종합 중요도는 0.46으로 내구성이 가장 크게 나타났으며, 이어서 0.22로 신속성, 0.17로 가외성, 0.16으로 자원동원력으로 나타났다. 학교 기관의 설문 참여자는 보건의료서비스가 가장 중요하다고 설문하였으며, 국가기관과 회사의 설문 참여자

Table 7. Flood resilience indicator values by region

	SG-gu_1	SY-gy	SD-gu	SS-gu	SG-gu_2	GS-si	GG-si_1	GY-si_1	GY-si_2	GU-si	CB-si	GG-si_2	GP-si	GT-si	GG-si_3	GY-gun	GH-gun_1	GH-gun_2	CB-gun	CC-gun	UU-gun
Disaster refugee accommodation + civil defense evacuation facilities + number of schools	1.101	0.783	0.548	1.012	1.106	2.609	1.957	0.204	2.870	0.438	0.318	0.689	1.701	0.663	1.122	0.459	0.000	0.078	0.026	0.355	0.537
Number of public officials responsible for river management	0.749	0.784	0.640	0.856	1.714	1.111	0.709	0.269	1.810	0.266	0.220	0.900	1.607	0.334	0.336	0.382	0.234	0.216	0.087	0.000	0.705
Disaster management fund (KRW 1,000,000)	0.011	0.011	0.008	0.025	0.960	0.060	0.016	0.006	0.038	0.012	0.003	0.011	0.032	0.004	0.028	0.005	0.000	0.006	0.000	0.000	0.016
Status of storm and flood insurance coverage (Case)	0.222	0.330	0.040	0.349	0.520	0.130	0.029	0.000	0.064	0.067	0.072	0.431	0.471	0.082	0.176	0.042	0.162	0.116	0.304	0.052	0.461
Number of detention basins	0.211	0.422	0.422	0.211	0.738	2.529	0.738	0.105	4.110	1.159	0.948	1.475	3.056	0.948	0.527	0.843	0.000	0.105	0.211	0.000	3.372
Number of pumping stations	0.000	0.154	0.042	0.056	0.056	0.266	1.258	2.069	0.056	0.210	0.028	4.670	0.308	0.126	0.042	4.712	0.657	1.426	3.104	0.294	6.320
Public sewerage penetration (%)	9.610	9.610	9.610	9.610	9.610	9.528	8.809	6.345	8.152	9.507	4.497	8.440	6.571	6.797	6.550	5.359	2.977	5.236	2.238	0.000	8.441
Water supply penetration (%)	11.555	11.555	11.555	11.555	11.555	11.555	9.978	9.640	11.442	11.555	9.190	10.203	10.654	11.239	11.127	7.343	8.987	6.982	8.942	0.000	11.059
River bank length (m)	0.464	0.233	0.000	0.661	0.310	0.071	1.624	14.803	6.170	3.040	4.602	16.610	7.504	1.433	2.508	12.947	2.443	7.565	15.910	8.337	11.889
Green space (%)	2.456	1.634	0.000	3.203	1.541	4.398	5.840	5.178	5.432	5.279	3.664	5.497	2.890	3.933	3.709	5.870	3.322	5.000	5.661	4.165	4.240
River area/area of administrative division	0.311	0.002	0.773	4.655	1.442	9.070	2.090	9.320	6.251	5.480	4.638	8.271	1.810	2.199	2.164	7.212	3.238	5.813	5.370	6.992	0.000
Road length per national land area	3.118	4.630	4.376	2.383	3.204	1.334	0.263	0.254	0.267	0.993	0.000	0.226	0.339	0.644	0.353	0.150	0.136	0.111	0.000	0.000	0.185
Disaster drill and preparedness budget (KRW 1,000,000)	0.160	0.252	0.016	0.259	0.000	0.191	0.009	0.046	0.716	0.116	0.120	0.047	0.120	0.262	0.143	0.046	0.366	0.999	0.120	0.221	0.151
Disaster and safety communications text message(times)	0.642	0.513	0.898	0.834	0.513	0.513	0.578	0.385	0.578	0.000	0.321	2.118	2.310	0.706	1.155	0.513	1.476	0.963	0.642	0.385	0.706
Disaster early warning system	0.697	0.363	0.814	0.247	0.262	0.843	1.598	0.785	3.603	0.000	0.087	3.763	0.814	2.470	4.010	1.598	0.494	2.848	2.237	0.102	2.659
Local health center staffing	2.541	2.934	2.751	3.877	4.270	7.650	2.122	2.043	7.519	1.677	0.707	0.576	3.380	0.576	0.655	2.410	1.100	0.996	0.341	0.000	0.105
Number of volunteers	0.811	0.707	0.599	0.861	1.460	2.750	0.594	0.271	2.222	0.350	0.215	0.506	1.243	0.152	0.522	0.181	0.000	0.047	0.064	0.014	0.466
Number of local autonomous disaster prevention corps	2.483	2.294	1.106	0.279	1.601	4.030	0.855	0.225	5.460	0.000	3.193	2.887	3.049	0.837	1.034	0.252	1.142	0.144	4.345	2.042	1.340
Fiscal self-reliance	1.142	3.123	2.093	5.418	5.541	5.910	2.977	1.298	4.399	3.011	0.481	1.164	1.970	0.325	0.851	0.828	0.224	0.224	0.000	0.034	2.787
GRDP	0.000	1.250	0.064	1.089	1.890	0.528	0.200	0.366	0.265	0.170	0.421	0.379	0.349	0.175	0.320	0.078	0.359	0.322	0.260	0.408	0.960

Note: SeoulGwanak-gu: SG-gu_1, SeoulYeongdeungpo-gu: SY-gy, SeoulDongjak-gu: SD-gu, SeoulSeocho-gu: SS-gu, SeoulGangnam-gu: SG-gu_2, Gyeonggi-Seongnam-si: GS-si, Gyeonggi Gwangju-si: GG-si_1, Gyeonggi Yeosu-si: GY-si_1, GyeonggiYongin-si: GY-si_2, Gyeonggi Uiwang-si: GU-si, Chungnam-Boryeong-si: CB-si, GyeongbukGyeongju-si: GG-si_2, GyeongbukPohang-si: GP-si, GyeongnamTongyeong-si: GT-si, GyeongnamGeoje-si: GG-si_3, Gyeonggi-Yangpyeong-gun: GY-gun, GangwonHoengseong-gun: GH-gun_1, GangwonHongcheon-gun: GH-gun_2, ChungnamBuyeo-gun: CB-gun, ChungnamCheong-yang-gun: CC-gun, UlsanUlju-gun: UU-gun

는 제방 정비, 연구소의 설문 참여자들은 시군구별 하수도 보급률이 가장 중요하다고 설문한 것으로 나타났다.

AHP 분석을 통해 산정된 지표별 중요도를 반영하여 홍수 회복력 지표의 우선순위를 분석한 결과, 하천제방이 16.61%로 가장 높게 나타났다. 이어서 물 위생시설(하수도)가 9.608%,

하천면적 비율이 9.319%, 보건의료서비스가 7.649%로 나타났다. 수자원학회 수해조사(2020.12~2021.7)에 따르면 폭우 및 홍수로 인해 호남지방과 중부 내륙에서 큰 피해가 발생하였으며, 이는 상당 부분 하천제방의 붕괴로 인한 것으로 나타난 바 있다(ME, 2021). 하천제방이 우선순위에서 가장 높은

Table 8. Standardized values by region

	SG-gu_1	SY-gy	SD-gu	SS-gu	SG-gu_2	GS-si	GG-si_1	GY-si_1	GY-si_2	GU-si	CB-si	GG-si_2	GP-si	GT-si	GG-si_3	GY-gun	GH-gun_1	GH-gun_2	CB-gun	CC-gun	UU-gun
Disaster refugee accommodation-n + civil defense evacuation facilities + number of schools	0.8	-0.4	-1.2	0.5	0.8	6.3	3.9	-2.5	7.3	-1.6	-2.1	-0.7	3.0	-0.8	0.9	-1.6	-3.3	-3.0	-3.2	-1.9	-1.3
Number of public officials responsible for river management	0.3	0.4	-0.1	0.7	3.7	1.6	0.2	-1.4	4.0	-1.4	-1.6	0.8	3.3	-1.2	-1.2	-1.0	-1.5	-1.6	-2.0	-2.3	0.2
Disaster management fund (KRW 1,000,000)	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	4.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.1	-0.2	-0.3	-0.2	-0.1	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2
Status of storm and flood insurance coverage (Case)	0.1	0.4	-0.5	0.5	1.0	-0.2	-0.5	-0.6	-0.4	-0.4	-0.4	0.7	0.9	-0.4	-0.1	-0.5	-0.1	-0.3	0.3	-0.5	0.8
Number of detention basins	-3.0	-2.2	-2.2	-3.0	-1.1	5.2	-1.1	-3.3	10.8	0.4	-0.4	1.5	7.1	-0.4	-1.9	-0.7	-3.7	-3.3	-3.0	-3.7	8.2
Number of pumping stations	-4.3	-3.7	-4.1	-4.1	-4.1	-3.3	0.1	2.9	-4.1	-3.5	-4.2	11.9	-3.2	-3.8	-4.1	12.0	-2.0	0.7	6.5	-3.2	17.6
Public sewerage penetration (%)	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	8.8	6.3	-2.4	4.0	8.8	-8.9	5.0	-1.6	-0.8	-1.7	-5.9	-14.3	-6.3	-16.9	-24.7	5.0
Water supply penetration (%)	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	0.2	-0.4	2.6	2.8	-1.2	0.5	1.3	2.3	2.1	-4.3	-1.5	-4.9	-1.6	-16.5	2.0
River bank length (m)	-15.5	-16.2	-16.9	-15.0	-16.0	-16.7	-12.1	27.3	1.5	-7.9	-3.2	32.6	5.5	-12.7	-9.4	21.7	-9.6	5.7	30.6	8.0	18.6
Green space (%)	-5.6	-8.7	-14.9	-2.8	-9.1	1.7	7.2	4.7	5.6	5.0	-1.1	5.9	-4.0	-0.1	-0.9	7.3	-2.4	4.0	6.5	0.8	1.1
River area/area of administrative division	-12.1	-13.1	-10.7	1.6	-8.6	15.6	-6.5	16.4	6.7	4.2	1.6	13.0	-7.4	-6.2	-6.3	9.7	-2.9	5.3	3.9	9.0	-13.1
Road length per national land area	6.4	11.2	10.4	4.1	6.7	0.8	-2.6	-2.7	-2.6	-0.3	-3.5	-2.8	-2.4	-1.4	-2.3	-3.0	-3.0	-3.1	-3.5	-3.5	-2.9
Disaster drill and preparedness budget (KRW 1,000,000)	-0.6	0.6	-2.5	0.7	-2.7	-0.2	-2.6	-2.1	6.6	-1.2	-1.1	-2.1	-1.1	0.7	-0.8	-2.1	2.1	10.3	-1.1	0.2	-0.7
Disaster and safety communications text message (times)	-0.7	-1.2	0.4	0.2	-1.2	-1.2	-0.9	-1.7	-0.9	-3.4	-2.0	5.6	6.4	-0.4	1.5	-1.2	2.9	0.7	-0.7	-1.7	-0.4
Disaster early warning system	-2.3	-3.4	-2.0	-3.7	-3.7	-1.9	0.5	-2.1	6.8	-4.5	-4.2	7.3	-2.0	3.2	8.0	0.5	-3.0	4.4	2.5	-4.2	3.8
Local health center staffing	0.9	2.3	1.7	5.8	7.2	19.5	-0.6	-0.9	19.0	-2.3	-5.8	-6.3	3.9	-6.3	-6.0	0.4	-4.4	-4.7	-7.1	-8.4	-8.0
Number of volunteers	0.6	0.2	-0.3	0.8	3.1	8.1	-0.3	-1.6	6.1	-1.2	-1.8	-0.6	2.2	-2.0	-0.6	-1.9	-2.6	-2.4	-2.4	-2.6	-0.8
Number of local autonomous disaster prevention corps	2.4	1.7	-2.7	-5.7	-0.9	8.0	-3.6	-5.9	13.2	-6.7	5.0	3.8	4.4	-3.7	-2.9	-5.8	-2.5	-6.2	9.2	0.7	-1.8
Fiscal self-reliance	-3.0	3.3	0.0	10.6	11.0	12.1	2.8	-2.5	7.3	2.9	-5.1	-2.9	-0.4	-5.6	-3.9	-4.0	-5.9	-5.9	-6.6	-6.5	2.2
GRDP	-2.0	3.3	-1.7	2.6	6.0	0.3	-1.1	-0.4	-0.9	-1.3	-0.2	-0.4	-0.5	-1.2	-0.6	-1.7	-0.5	-0.6	-0.9	-0.3	2.1
Flood resilience indicators	-26.1	-14.0	-35.6	5.3	8.3	67.2	-11.1	20.4	92.4	-11.8	-40.3	72.6	15.3	-40.8	-30.3	17.8	-58.4	-11.6	10.2	-61.6	32.2

Note: SeoulGwanak-gu: SG-gu_1, SeoulYeongdeungpo-gu: SY-gy, SeoulDongjak-gu: SD-gu, SeoulSecho-gu: SS-gu, SeoulGangnam-gu: SG-gu_2, Gyeonggi-Seongnam-si: GS-si, Gyeonggi Gwangju-si: GG-si_1, Gyeonggi Yeosu-si: GY-si_1, GyeonggiYongin-si: GY-si_2, Gyeonggi Uiwang-si: GU-si, Chungnam-Boryeong-si: CB-si, GyeongbukGyeongju-si: GG-si_2, GyeongbukPohang-si: GP-si, GyeongnamTongyeong-si: GT-si, GyeongnamGeoje-si: GG-si_3, Gyeonggi-Yangpyeong-gun: GY-gun, GangwonHoengseong-gun: GH-gun_1, GangwonHongcheon-gun: GH-gun_2, ChungnamBuyeo-gun: CB-gun, ChungnamCheongyang-gun: CC-gun, UlsanUlju-gun: UU-gun

순위를 차지한 것은 하천제방 붕괴를 동반한 홍수 피해는 인명 및 재산에 직접적인 피해를 발생시킬 뿐만 아니라 하천 및 수생태계에도 종합적인 영향을 미치기 때문에 판단된다 (Choi *et al.*, 2009). 이에 한국건설기술연구원에서는 홍수 및

하천 범람 시 제방의 방어 능력을 향상하기 위해 복합 폴리프로필렌 소재를 활용하여 2차 홍수 피해를 막기 위한 신기술을 개발하는 한편, 환경부에서는 내년 홍수 대응 예산을 올해보다 최대 20% 늘려 제방을 신설하거나 높게 짓기 위한 준설 작업

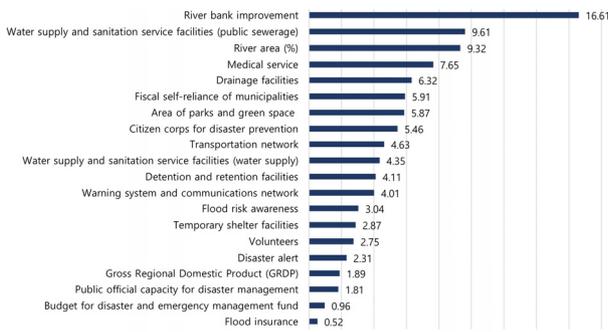


Fig. 3. Prioritization of flood resilience indicators

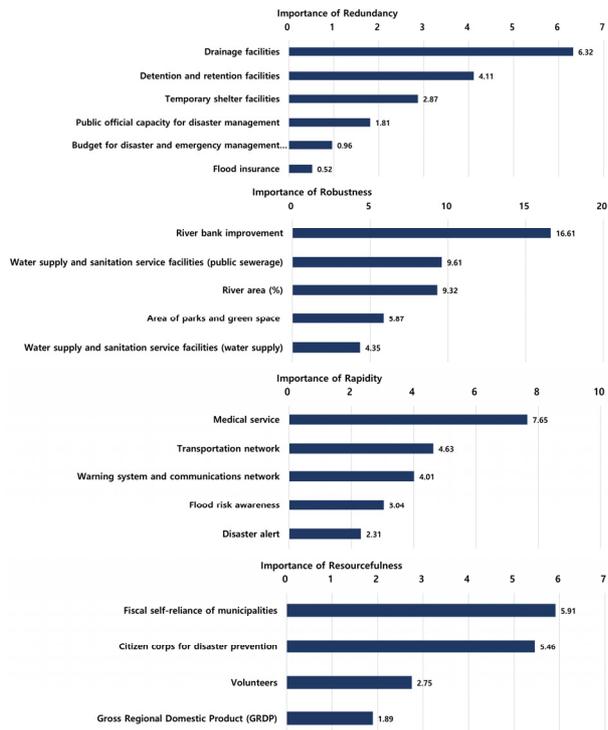


Fig. 4. Evaluation results of flood resilience indicator importance by category

을 진행할 계획을 밝혔다.

내구성에서 두 번째로 큰 영향을 미친 하위 항목은 ‘하수도’이다. 도시 침수의 경우 하수도 용량 부족이 주요한 원인으로 꼽혀 두 번째로 높은 순위를 나타낸 것으로 판단된다. 현재 우리나라는 전국 도시 침수 취약지역 중 135개소를 중점 관리 지역으로 지정하여 관리하고 있지만, 하수관로 및 빗물펌프장의 개량 등 정비가 완료된 지역은 32%인 43개소에 불과하다(ME, 2022). 세 번째로 큰 영향을 미친 하위 항목은 ‘하천 면적 비율’로, 하천제방 정비와 하수도와 마찬가지로 전체 20개 지표 중에서도 세 번째로 중요한 항목으로 나타났다. Park and Yoon (2017)에 따르면 풍수해 재난회복력에 영향을 미치

는 특성을 조사한 결과, 하천 면적 비율이 중요도 값 2.527로 가장 크게 나타났으며, 하천 면적이 클수록 풍수해에 취약하여 피해 발생 확률이 높아지고 회복력은 낮아질 수밖에 없는 것으로 나타났다. 홍수 발생 및 피해 발생 측면에서 기후와 하천의 영향을 종합적으로 고려했을 때, 하천 면적 비율과 연 강수량은 중요한 지역 특성 요인이 될 수밖에 없으므로 하천 면적 비율이 세 번째로 높은 순위를 나타낸 것으로 판단된다.

4R을 기반으로 두 번째로 중요도가 높게 나타난 신속성에서 가장 큰 영향을 미친 하위 항목은 ‘보건의료서비스’로 나타났다. 보건의료서비스는 전체 20개 지표 중에서도 네 번째로 중요한 항목으로 조사되었다. 보건의료서비스의 특징은 홍수 발생 이후에는 일시적으로 보건의료서비스의 수요가 급격하게 증가할 수밖에 없다는 것이다. 단순히 기존 진료 시간과 의료인력의 일부만 조정하는 응급 운영체계에 대응할 수 없고 (Ciottono *et al.*, 2006), 평소의 의료서비스 제공 방식이 아닌 재난대응체제로 전환하여 운영할 필요가 있다. 따라서 홍수와 같은 재난 발생 빈도가 증가하면서 위험 상황에서 쉽게 접근할 수 있는 보건 의료 체계의 회복탄력성이 증대하여 보건 의료서비스의 중요도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 규모가 큰 홍수 피해의 경우 국가적 차원에서 의료 공급에 대한 조정 및 통제가 필요하며, 다양한 재정적 지원을 통해 의료서비스를 보장하는 정책도 마련될 필요가 있다.

자원동원력에서 가장 큰 영향을 미친 하위 항목은 ‘지방자치단체 재정자립도’로 나타났다. 다양한 연구에서도 지역의 재정 수준은 재난 피해의 복구 활동 지원 및 예방을 위한 필수적인 요소로 제시되었으며(Tobin, 1999; Cheong, 2011), 재정자립도 및 예산은 재해의 피해를 줄이는 요인으로, 1%의 재정자립도의 증가는 재해의 피해를 1.02% 감소시키는 것으로 분석되었다(Kim, 2016). Kahn (2005)은 73개국을 대상으로 자연재해로 인한 사망자 수와 소득, 지리, 제도와의 관계를 분석하는 연구를 수행하였으며, 같은 충격에 직면했을 때 국가 또는 지역의 경제적 능력이 높을수록 재해를 효과적으로 대응하고 피해의 위험성을 낮출 수 있음을 보여주었다. 우리나라도 지방하천 관리 사업을 중앙 정부에서 지자체로 넘기면서 지자체의 재정으로 정비하게 되었다. 하지만 2020년부터 국가보조금이 중단되어 예산 부족 문제가 극대화되어 지자체의 낮은 재정자립도와 재정 지원의 불충분성으로 인해 체계적인 홍수 예방이 어려웠던 것으로 판단된다. 하지만 이후에 2023년 하천법이 개정되면서 지방하천 중 치수 목적으로 중요성이 큰 하천을 정비할 때는 중앙 정부가 지방하천의 재정을 지원하여 관리할 수 있게 되어 재정자립도 향상 및 홍수 대응 방안을 강화할 수 있을 것으로 기대된다.

가외성과 자원동원력은 비슷한 정도의 중요도로 조사되었

Table 9. Weight values and prioritization of flood resilience indicators

Category	Subcategory	Item	Weight values	Priority rank								
				Total priority rank	Universities		Governmental ministries		Research institutes		Private companies	
					weight	priority	weight	priority	weight	priority	weight	priority
Redundancy	Infrastructure for Temporary Evacuation	Temporary shelter facilities	2.87	14	1.41	17	2.25	16	4.75	7	3.57	13
	Resource availability	Public official capacity for disaster management	1.81	18	0.60	18	2.51	14	3.72	9	1.48	18
		Budget for disaster and emergency management fund	0.96	19	0.26	19	1.46	17	2.25	15	0.78	19
		Flood insurance	0.52	20	0.23	20	0.61	20	0.86	20	0.48	20
	Temporary flood prevention facilities	Detention and retention facilities	4.11	11	1.91	15	5.30	9	4.98	6	4.27	11
		Drainage facilities	6.32	5	3.98	10	5.87	6	10.90	3	4.73	8
Robustness	Flood impact facilities	Water supply and sanitation service facilities (public sewerage)	9.61	2	4.34	9	9.41	2	17.38	1	7.71	4
		Water supply and sanitation service facilities (water supply)	4.35	10	3.22	11	4.46	10	3.66	10	4.36	10
		River bank improvement	16.61	1	7.30	6	23.00	1	15.67	2	18.56	1
	Natural environment	Area of parks and green space	5.87	7	7.49	5	5.47	7	4.44	8	4.47	9
		River area (%)	9.32	3	13.48	2	6.05	5	6.79	4	9.36	2
Rapidly	Resource transportation	Transportation network	4.63	9	5.57	8	6.07	4	1.53	18	6.11	6
	Information system	Flood risk awareness	3.04	13	2.63	13	2.60	13	2.40	14	3.01	15
		Disaster alert	2.31	16	2.18	14	1.00	19	1.46	19	5.18	7
		Warning system and communications network	4.01	12	1.66	16	3.99	12	3.08	12	7.32	5
Emergency response service	Medical service	7.65	4	15.46	1	5.45	8	3.53	11	7.91	3	
Resourcefulness	Support system	Volunteers	2.75	15	5.90	7	2.37	15	1.55	17	2.00	16
		Citizen corps for disaster prevention	5.46	8	9.57	4	6.70	3	2.82	13	3.72	12
	Financial resources	Fiscal self-reliance of municipalities	5.91	6	10.06	3	4.14	11	6.48	5	3.45	14
		GRDP	1.89	17	2.77	12	1.33	18	1.74	16	1.52	17

다. 가외성에서 가장 큰 영향을 미친 하위 항목은 '배수시설'로 나타났다. 서울시의 경우 과거 집중호우에 의해 대규모의 침수 피해를 겪었으며, 이후 침수 대책으로 국내 최초로 도시 침수 예방을 위한 신월 빗물 저류 배수시설을 구축한 바 있다. 물 저류 배수시설은 비가 오면 수직구를 통해 빗물을 일시적으로 저장한 뒤 빗물펌프장을 통해 하천으로 배출하는 방식으로, 실제 신월 빗물 저류시설 구축 이후 서울시의 300 넘는 폭우에도 저류시설 일대는 피해가 발생하지 않았다. Oh and Jun (2021)는 신월 빗물 저류배수시설에 대한 다양한 홍수 시나리오를 적용하는 수리 모형 실험을 수행하였으며, 모의 결과 시설의 수리적 안정성이 확보되고 압축공기 배기가 원활할 경우 수리적 안정성이 확보되는 것으로 나타났다. 빗물 터널로 인해 침수 피해를 예방하여 빗물 저류 배수시설은 침수 피해 예방에 효과적인 것으로 인식되고 있으며, 앞으로도 기존의 배수시스템 노후화 검토 및 유지보수를 통해 배수 능력 향상을 위한 노력이 지속되어야 할 것이다.

4. 결론

재난 및 홍수회복력과 관련된 선행연구들을 바탕으로 후보 지표를 개발한 후, 홍수회복력과 관련된 4R 기반의 최종 지표를 도출하였다. 홍수회복력 지표 내 세부인자 선정의 적합성을 검증하기 위해 SPSS 프로그램을 활용하여 분석을 수행하였으며, 다중공선성 분석 결과 공차 한계가 모두 0.1 이상이며, VIF가 10 미만으로 다중공선성에 문제가 없고 회귀 모형이 적합한 것으로 분석하였고, 인자로서의 적합성을 갖는 것으로 판단된다.

요인별 상대적인 중요도를 판단하기 위해 AHP 분석 방법을 활용하여 산·관·학·연 분야에서 홍수 관련 분야의 전문성을 갖춘 20명의 전문가를 대상으로 설문조사를 실시하였다. 조사 결과 내구성(Robustness) 0.46, 신속성(Rapidity) 0.22, 가외성(Redundancy) 0.17, 자원동원력(Resourcefulness)이 0.16으로 내구성이 가장 큰 중요도를 나타냈다. 전체 20개 홍수회복력

지표 중에서는 내구성에 해당하는 하천제방이 16.61%로 중요도가 가장 높게 나타났으며, 이어서 물 위생시설(하수도)이 9.61%로 두 번째, 하천 면적 비율이 9.32%로 세 번째 중요한 요인으로 선정되었다. AHP 분석을 통해 분석된 홍수회복력 지표의 우선순위에 따라 문헌 연구와 조사를 통해 요인별 현안 및 특징을 분석하였다.

‘회복력’ 개념에 기반하여 홍수 피해 이후 복구뿐 아니라 더 나은 상태로 개선하기 위해서는 홍수 피해 복구를 위해 운영되고 있는 다양한 예방 및 복구 사업의 효과 분석과 지역 맞춤형 회복력 강화 방안을 적용하려는 노력이 필요하다. 홍수회복력 지표를 활용하면 데이터 기반의 면밀한 조사가 가능하여 홍수 피해 복구에 대한 지역별 세부 요인을 파악하기에 효과적이다. 본 연구는 국내에 적용할 수 있는 홍수회복력 지표를 개발하고 특별재난지역을 대상으로 적용성을 평가하여 지역별 특성에 따라 회복력에 영향을 미치는 요인을 분석함으로써 국가에서 홍수의 예방 및 대응을 전략적으로 관리할 수 있는 기초를 마련하였다는 점에서 의의가 있다. 하지만, 특별재난지역만을 대상으로 홍수회복력 지표를 적용하여, 홍수 피해 이후 회복에 영향을 미치는 요인을 세부적으로 비교 분석하지 못하였고, 자료 및 시간적 한계로 인하여 복구 사업 시행 이후의 홍수회복력의 변화를 반영하지 못했다는 한계점이 있다. 추후 보완된 데이터를 기반으로 홍수 피해 발생 전·후를 비교할 수 있는 지역에 홍수회복력 지표를 적용하여 홍수 피해 복구 측면에서 실효성 있는 요인을 선별하고 복구 사업 적용 전·후 차이를 비교하여 회복에 가장 큰 영향을 미치는 요인을 세밀하게 분석할 수 있을 것이다. 또한, 연구의 목적 및 연구자의 관점에 따라 홍수회복력 지표의 구성 및 분류 체계가 달라질 수 있다. 현재 국내에서는 홍수회복력 지표와 관련된 국내 연구가 활발히 수행되고 있지 않은 실정이므로 향후 다양한 목적 및 분류 체계를 기반으로 한 홍수회복력 지표 개발 및 분석과 관련된 연구 수행을 통해 홍수 예방 및 피해 복구를 위한 근거자료를 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경연구원의 A Study on Examining Flood Resilience in Asia and Developing Assessment Indicators of South Korea (아시아 지역 홍수회복력 분석 및 국내 평가지표 개발 연구)(RR2023-02) 과제와 환경부 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업(RS-2022-KE002214) 지원으로 수행되었습니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Arup (2014). *City resilience framework*. The Rockefeller Foundation, UK.
- Bae, H. (2014). *A study on region selection for rural village development projects using spatial analysis and AHP*, Master Thesis, Seoul National University, pp. 35-36.
- Batica, J. (2015). *Methodology for flood resilience assessment in urban environments and mitigation strategy development*. Ph. D. Dissertation, Université Nice Sophia Antipolis, France, pp. 62-64.
- Batica, J., and Gourbesville, P. (2014). *Flood resilience index-methodology and application*. CUNY Academic Works, NY, U.S., pp. 2-93
- Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., and Von Winterfeldt, D. (2003). "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities." *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, pp. 733-752.
- Chan, F.K.S., Gu, X., Qi, Y., Thadani, D., Chen, Y.D., Lu, X., and Chen, W.Y. (2022). "Lessons learnt from Typhoons Fitow and In-Fa: Implications for improving urban flood resilience in Asian Coastal Cities." *Natural Hazards*, Vol. 110, No. 3, pp. 2397-2404.
- Chang, H., David, J.Y., Markolf, S.A., Hong, C.Y., Eom, S., Song, W., and Bae, D. (2021). *Understanding urban flood resilience in the anthropocene: A social-ecological-technological systems (SETS) learning framework*. The Anthropocene, Routledge, United Kingdom, pp. 215-234.
- Cheong, S.M. (2011). "Policy solutions in the US." *Climatic Change*, Vol. 106, No. 1, pp.66-67.
- Choi, H., Kim, B., Lee G., Kim, M., and Lee H. (2022). *Assessment of urban resilience in declining areas for disaster response, environmental forum*. Korea Environment Institute, Vol. 26, No. 5, pp. 7-12. (in Korean)
- Choi, H., Lee, G., and Eo, S. (2021a). *Development and policy utilization of urban resilience evaluation indicators*. Korea Environment Institute, Vol. 25, No. 11, pp. 7-14. (in Korean)
- Choi, S., Han, K., and Cho, W. (2009). "GIS based flood inundation analysis in protected lowland considering the affection of structure." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 12, No. 4, pp. 1-17.
- Choi, Y., Hong, Y., Choo, M., and Yoon, D. (2021b). "An analysis of factors influencing regional resilience to disaster using the resilience cost index." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 6, pp. 21-29.
- Chungcheong Newspaper (2023). "Chungcheongnam-do's sewerage coverage rate ranked lowest nationwide for 10 years." September 11, p. 1. (in Korean)
- Chungcheong Today (2023). "Chungcheongnam-do's sewerage coverage rate 'last' in the nation for several years." July 6, p. 1. (in Korean)
- Ciottonne, G.R., Anderson, P., and Auf Der Heide, E. (2006). *Disaster medicine*. Elsevier Health Sciences, Amsterdam, Netherlands.

- Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., and Webb, J. (2008). "A place-based model for understanding community resilience to natural disasters." *Global Environmental Change*, Vol. 18, No. 4, pp. 598-606.
- Davoudi, S., Shaw, K., Haider, L.J., Quinlan, A.E., Peterson, G.D., and Wilkinson, C. (2012). "Resilience: a bridging concept or a dead end?." *Planning Theory & Practice*, Vol. 13, No. 2, pp. 299-333.
- Disse, M., Johnson, T.G., Leandro, J., and Hartmann, T. (2020). "Exploring the relation between flood risk management and flood resilience." *Water Security*, Vol. 9, 100059.
- Gyeongju City (2021). Preventing repeated flooding in Sindangcheon·Gyeongju City begins river disaster prevention projects. <https://www.gyeongju.go.kr/mayor/page.do?pageNo=119&pagePrvNxt=1&pageRef=0&pageOrder=0&step=258&parm_bod_uid=209226&srchVoteType=-1&parm_mnu_uid=1334&srchEnable=1&srchKeyword=&srchBgpUid=-1&srchSDate=&srchColumn=&srchEDate=&mnu_uid=1413>, accessed 19 October 2023 (in Korean)
- Gyeongnam Daily (2019). "Vehicles and roads submerged instantly, Chaos Ensues." January 1, p. 1. (in Korean)
- Han, D. (2020). *Economic impacts of flood disaster by climate change on industry and selection of structural measures for flood prevention in the basin using economic analysis*. Ph. D. Dissertation, Inha University, pp. 116-135.
- Han, W., Ha, S., Nam, K., Lee, S., Hong, S., Yu, J., and Jo, E. (2016). *Research on regional resilience improvement coping with flooding disaster by climate change effect (I) - Development and application of resilience assessment methods*. Korea Research Institute for Human Settlements, pp. 19-91.
- Heo, A. (2017). *Disaster resilience in local government: Indicator design and influence factors*. Ph. D. Dissertation, Sungkyunkwan University, pp. 39-85.
- Hwaseong News (2023). "Rivers in the Hwaseong Area are currently undergoing flood damage restoration." March 29, p. 1. (in Korean)
- Information Disclosure Portal (2023). accessed 19 October 2023, <www.open.go.kr>.
- Jeon, Y.M and Lee, J.S. (2018). "A comparative analysis of the level of urban resilience in the comprehensive plan." *Urban Design Institute of Korea*, Vol. 19, No. 3, pp. 21-32.
- Jeong, I.J., and Lee, Y.J. (2016). "Urban flood response and the integration of local disaster prevention teams." *Disaster Prevention Review*, Vol. 18, No. 4, pp. 65-73.
- Ji, Y., and Oh, Y. (2022). "A study on disaster resilience measurement: Examining policy applicability in disaster management." *Korean Public Administration Quarterly*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-27.
- Jung, I.J., and Lee, Y.J. (2016), "Urban flood response and the integration of local disaster prevention teams." *Korea Disaster Prevention Association*, Vol. 18, No. 4. pp. 65-73. (in Korean)
- Jung, J.W., and Byun, B. (2022). "Analysis on the effects of the factors of urban characteristics on resilience from natural disaster: Focusing on the Seoul Metropolitan Area." *The Geographical Journal of Korea*, Vol. 56, No. 2, pp. 137-145.
- Kahn, M.E. (2005). "The death toll from natural disasters: The role of income, geography, and institutions." *Review of Economics and Statistics*, Vol. 87, No. 2, pp. 271-284.
- Kang, S.J., Cho, S.H., and Hong, S.Y. (2013). *A policy implication for community resilience from natural disasters*. Gyeonggi Research Institute, pp. 1-102.
- Karrasch, L., Restemeyer, B., and Klenke, T. (2021). "The 'flood resilience rose': A management tool to promote transformation towards flood resilience." *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 14, No. 3, e12726.
- Kim, C. (2016). "A study of determinants on accumulation rates of disaster management fund of local government." *The Korea Local Administration Review*, Vol. 30, No. 4, pp. 353-380.
- Kim, C. (2021). *Analysis of community flood resilience in relation to characteristics of flood damage*. Ph. D. Dissertation, Seoul National University, pp. 9-30; 87-117.
- Kim, C., and Hong, J. (2021). "An analysis of community flood resilience with a focus on flood damage characteristics." *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol. 29, No. 3, pp. 225-252.
- Kim, H. (2020), "A study on analysis model of E-government business regulation using delphi and AHP method." *Information Policy*, Vol. 27, No. 2, pp. 40-65.
- Kim, H., and Shin, J. (2015). "Urban disaster prevention planning applying the concept of urban resilience." *Korea Research Institute for Human Settlements*, Vol. 400, pp. 17-24. (in Korean)
- Kim, H., Jo, H., and Jung, H. (2016a). "Establishment of a national flood forecasting master plan." *Water for Future*, KWRA, Vol. 49, No. 7, pp. 7-16. (in Korean)
- Kim, J., Lim, J., and Lee, S. (2016b). *A research on urban resilience for urban regeneration*. Land&Housing Research Institute, pp. 13-27.
- Kim, S. (2016). *The Effect of urban green on reducing disaster damage*. Master Thesis, Seoul National University, pp. 4-52.
- Kim, T., Kim, H., and Lee, K. (2011). "The concept and functional objectives of the urban resilience for disaster management." *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 26, No. 1, pp. 65-70.
- Kim, Y., Lee, J., and Kim, K. (2018). "Development of flood mitigation strategies for urban resilience: Focused on the assessment of Gulpo Stream's Watershed in Incheon, South Korea." *Urban Design*, Vol. 19, No. 5, pp. 5-20.
- Koh, J.K. and Kim, H.S. (2010). "A study on local vulnerability assessment to climate change: the case of municipalities of Gyeonggi-Do." *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol. 18, No. 2, pp. 79-105.
- Koo, B., and Shin, B. (2015). "Using ridge regression to improve the accuracy and interpretation of the hedonic pricing model: Focusing on apartments in Guro-gu, Seoul." *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 16, No. 5, pp. 77-85.
- Korea Land and Geospatial Informatix Corporation (LX) (2023). accessed 19 October 2023, <<https://www.lx.or.kr/kor.do>>.
- Korean Statistical Information Service (2023). accessed 19 October 2023, <www.kosis.kr>.
- Laurien, F., Hochrainer-Stigler, S., Keating, A., Campbell, K., Mechler, R., and Czajkowski, J. (2020). "A typology of community flood resilience." *Regional Environmental Change*, Vol. 20, pp. 1-14.
- Lee, C.H., Lee, S., and Yeo, C.G. (2006). *Development of the regional safety assessment model in Seoul-focusing on flood*. Seoul Development Institute, pp. 1-149.
- Lee, D.W., and Kwon, G.H. (2017). "An analysis on the determinants of disaster resilience: Focused on natural disaster." *Korean Policy Studies Review*, Vol. 26, No. 2, pp. 475-509.

- Lee, J. (2015). *Climate disaster resilience in municipalities*. Ph. D. Dissertation, Seoul National University, pp. 13-44.
- Lee, J., and Choi, H. (2018). "Development and implementation of an assessment framework for coastal flood vulnerability." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 6, pp. 291-299.
- Lee, S., and Kim, J. (2018). "Development and applicability of resilient city criteria for adopting resilient city model: Focused on Hamburg water cycle jenfelder au." *Germany Journal of the Urban Design Institute of Korea*, Vol. 19, No. 1, pp. 113-126.
- Linnenluecke, M., and Griffiths, A. (2010). "Beyond adaptation: Resilience for business in light of climate change and weather extremes." *Business & Society*, Vol. 49, No. 3, pp. 477-511.
- Local Autonomy TV (2022). "Hwaseong county secures funding for river improvement and restoration projects." October 6, p. 1. (in Korean)
- Local Finance Integrated Open System (2023). accessed 19 October 2023, <www.lofin365.go.kr/>.
- Manyena, B., O'Brien, G., O'Keefe, P., and Rose, J. (2011). "Disaster resilience: a bounce back or bounce forward ability?." *The International Journal of Justice and Sustainability*, Vol. 16, No. 5, pp. 417-424.
- Miguez, M., and Verol, A. (2016). "A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design." *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, Vol. 44, No. 5, pp. 925-946.
- Ministry of Environment (ME) (2021). "Government follow-up measures based on the investigation results of the downstream flood damage of dams, assessed 8 April 2024, <https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EC%88%98%ED%95%B4%EC%9B%90%EC%9D%B8&menuId=10525&orgCd=&boardId=1469350&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=>.
- Ministry of Environment (ME) (2022). Measures to Prevent Urban Flooding and River Flooding, August 23, p. 1.
- Ministry of Environment (ME) (2023). accessed 19 October 2023, <www.me.go.kr>.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2023). accessed 19 October 2023, <www.molit.go.kr>.
- Montgomery, D.C., Peck, E.A., and Vining, G.G. (2021). *Introduction to linear regression analysis*. Vol. 821, John Wiley & Sons, NJ, U.S.
- Mottahedi, A., Sereshki, F., Ataei, M., Nouri Qarahasanlou, A., and Barabadi, A. (2021). "The resilience of critical infrastructure systems: A systematic literature review." *Energies*, Vol. 14, No. 6, 1571.
- National Disaster and Safety Portal (2023). accessed 19 October 2023, <www.safekorea.go.kr>.
- National Health Insurance Service (2023). accessed 19 October 2023, <www.nhis.or.kr>.
- Oh, J., and Jun, S. (2021). "Experimental study on hydraulic stability and characteristics of pressure fluctuation in Shinwol rainwater storage and drainage system by continuous flood and air inflow." *Crisisonomy*, Vol. 17, No. 2, pp. 67-78.
- Park, H.N., and Song, J.M. (2014). "Empirical study on environmental justice through correlation analysis of the flood vulnerability indicator and the ratio of the poor population." *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 49, No. 7, pp. 169-186.
- Park, H.N., and Song, J.M. (2015). "Identification of main factors affecting urban flood resilience using resilience cost index." *Journal of Korean Planning Association*, Vol. 50, No. 8, pp. 95-113.
- Park, S. (2016). *The Impact of Regional Characteristics on Resilience to Natural Disaster*, Ph. D. Dissertation, Inha University, pp. 6-56.
- Park, S., and Yoon, S. (2017). "An analysis of regional characteristic factors affecting for resilience of damage by storm and flood." *The Korea Spatial Planning Review*, Vol. 92, pp. 59-73.
- Park, T.S., Kim, G.M., Yoon, Y.S., and Lee, S.B. (2005). *Analysis of flood damage characteristics and development of flood damage index*. Korea Research Institute for Human Settlements, Vol. 6, pp. 1-186.
- Public Data Portal (2023). accessed 19 October 2023, <www.data.go.kr>.
- Renschler, C.S., Frazier, A.E., Arendt, L.A., Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M., and Bruneau, M. (2010). *A framework for defining and measuring resilience at the community scale: The PEOPLES resilience framework*. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, U.S.
- Sharma, S., Gomez, M., Keller, K., Nicholas, R.E., and Mejia, A. (2021). "Regional flood risk projections under climate change." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 22, No. 9, pp. 2259-2274.
- Tierney, K., and Bruneau, M. (2007). "Conceptualizing and measuring resilience: A key to disaster loss reduction." *TR News*, Vol. 250, pp. 14-17.
- Tobin, G.A. (1999). "Sustainability and community resilience: The holy grail of hazards planning?." *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, Vol. 1, No. 1, pp. 13-25.
- Water Resources Management Information System (WAMIS) (2023). accessed 19 October 2023, <www.wamis.go.kr>.
- Yonhap News (2022). "Boryeong City invests 28.9 Billion Won in expanding sewer infrastructure this year." February 10, p. 1. (in Korean)
- Yoo, G.Y., and Kim, I.A. (2008). *Development and application of a climate change vulnerability index*. Korea Environment Institute, Vol. 2008, No. 5, pp. 1-97.
- Zhang, Q., Hu, J., Song, X., Li, Z., Yang, K., and Sha, Y. (2021). "How does social learning facilitate urban disaster resilience? A systematic review." *Environmental Hazards and Resilience*, Edited by Parker, D.J., Penning-Rowsell, E.C., Routledge, London, UK, pp. 180-202.