



기능 연속성 관점의 침수 재해 임계치 및 회복력 추정^{*,**}

Analysis of Flood Threshold and Resilience from The Functional Continuity Perspective

서세교^{***} · 오상원^{****} · 정주철^{*****}

Seo, Se-Gyo · Oh, Sang-Won · Jung, Ju-Chul

Abstract

Resilience, defined as the process encompassing disaster preparedness through recovery, has become a key paradigm in disaster research, particularly as the unpredictability of disasters increases due to climate change. Despite its growing importance, accurately measuring resilience which is essential for its application in urban areas poses significant challenges. Previous studies have primarily concentrated on regional indicators rather than examining the processes before and after a disaster, thus failing to distinguish themselves from traditional vulnerability assessments. Our study addresses this gap by considering damage level, duration of damage, recovery level, and recovery period as attributes of resilience, based on its conceptual definition. We estimate the threshold and resilience of an area from a perspective of functional continuity. While earlier research suggests that areas with abundant economic and social resources demonstrate greater resilience, our findings show that factors such as the extent of damage, recovery period, and frequency of damage also significantly affect resilience, offering a more comprehensive reflection of its attributes.

주제어 회복력, 홍수, 기후변화, 임계치 추정, 기능 연속성

Keywords Resilience, Flood, Climate Change, Threshold Analysis, Functional Continuity

1. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

도시는 기후변화의 영향에 직면하고 있다. 수만 명의 사망자가 발생한 유럽의 폭염, 영하 30도 이하의 혹한으로 미국을 마비시켰던 한파, 그리고 국내 여러 지역의 폭우 등 이상기후의 빈도가 최근 눈에 띄게 증가하였다. 피해의 범위가 구역 단위에서 도시 단위로 대형화되고, 시기와 장소의 불확실성이 높아지면서 기존 대응 체계의 한계점이 드러났다. 이에 도시의 내생적 속성으로써 재해 대응부터 복구까지의 과정을 포괄하는 회복력(Resilience) 개념이

주목받게 되었다(Tyler and Moench, 2012; Chen et al., 2024).

도시의 회복력을 산정하고 평가하기 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있으며, 대다수의 연구는 도시가 지닌 속성을 여러 부분의 회복력으로 분류하고 통계적 기법을 통해 합산하여 회복력 지수를 도출하는 방법을 활용하고 있다(Cutter et al., 2010; Links et al., 2017; Choptiany et al., 2017; 서세교 외, 2022). 해당 연구들은 지역의 사회·경제·제도 등 전반적인 조건을 고려하여 회복력을 산정함으로써 충격을 완화하고 신속하게 회복할 가능성이 높은 지역을 도출했다는 점에서 의의가 있다.

그러나, 선행연구에서 활용한 회복력 산정 방법론은 보편적으로 수행되어 왔던 취약성 평가와 분석 과정 및 결과에서 유사점을

* 이 논문은 한국환경산업기술원 「신기후체제 대응 환경기술개발사업(2022003570002)의 지원으로 수행되었습니다.

** 이 논문은 「2024년 아시아태평양 재난복원력센터 논문공모전」에서 우수상으로 선정된 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

*** Integrated Doctorate Candidate, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University (First Author: plan_ssg@pusan.ac.kr)

**** Doctorate Candidate, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University (speed-yooh@hanmail.net)

***** Professor, Department of Urban Planning and Engineering, Pusan National University (Corresponding Author: jchung@pusan.ac.kr)

보이며 차별점을 가지지 못한다(Yang et al., 2021). 지역 속성에 초점을 맞춘 회복력 산정 방법은 사회경제적으로 발달한 대도시일수록 회복력이 우수하게 평가될 가능성이 높고, 회복력이 낮게 분석된 지역과 실제로 상습적인 침수 재해에 적응하지 못하는 지역의 분포, 다시 말해서 현상과 분석결과 사이에 차이를 보인다(서세교 외, 2022).

또한 충격의 발생 및 재난 전후의 프로세스를 고려하지 않고 지역의 속성에만 초점을 맞춘 경우, 회복력의 주요 속성인 적응 및 학습에 따른 지역별 대응 역량의 차이를 회복력에 반영하기 어렵다(Marasco et al., 2022).

지역 회복력 산정에 관한 많은 연구가 수행되고 있음에도 지역의 본질적인 회복력과 실제 위험을 통합하는 것은 여전히 해결해야 할 문제이며, 분석 결과를 보편적으로 도시에 적용하는 것도 쉽지 않다. 이에 본 연구에서는 회복력의 기본 개념과 실제 현상에 초점을 맞추어 도시의 주요 기능이 연속성을 가질 수 있는 임계치와 회복력을 추정하고자 한다. 연구의 수행 절차에 따른 세부 연구 목표는 다음과 같다.

첫째, 회복력 개념 및 추정 방법론에 대한 고찰. 회복력은 공학적 회복력 개념에서 시작하여 적응적 회복력까지 다양한 방법으로 개념화되고 있지만, 추정 방법은 적응적 개념을 바탕으로 지역 속성 관련 데이터를 지수화하는 방법론에 연구가 집중되고 있다. 이러한 연구 현황에 대한 고찰을 통해 현상을 보다 잘 반영할 수 있는 회복력 추정의 필요성을 제시할 것이다.

둘째, 도시 침수 재해 임계치 및 회복력 분석 방법론 도출. 회복력의 개념적 정의를 바탕으로, 현상에 기반한 회복력 추정에 활용할 수 있는 다양한 분야의 선행연구를 분석하여 회복력 추정 방법론을 도출할 것이다.

셋째, 과거 지역 침수 피해 이력을 바탕으로 임계치 및 회복력 추정. 기능 연속성 관점에서 회복력을 추정함으로써 지역이 가진 속성뿐만 아니라, 계획·정책·환경의 복합적인 작용으로 결정된 피해 및 복구 양상을 반영하는 회복력은 도시의 방재적 의사결정에 직접적으로 활용될 수 있을 것이다.

II. 선행연구 및 이론적 고찰

1. 회복력의 개념적 정의

회복력(resilience)이 '다시 되돌아가다'라는 뜻을 가진 라틴어 'resiliere'에서 유래했다는 점에서 알 수 있듯이 '충격의 영향 이전의 상태로 복구하는 능력'이 회복력의 기본적인 속성이자 가장 널리 알려진 개념이다(Klein et al., 2003). 해당 개념은 정상상태의 안정성에 중점을 두고 있고, 충격에 대한 저항 및 정상상태로의 복구 속도가 회복력을 결정하는 요인으로 작용한다(Pimm, 1984; Tilman and Downing, 1994). 초기의 회복력은 위와 같이 충격

으로 인한 기능의 중단을 방지하고 신속히 회복하는 것에 초점을 맞추고 있다는 점에서 공학적 회복력으로 정의되고 있다.

2000년대에 들어서는 광범위한 재해, 경제위기 등 도시가 충격에 직면하는 상황이 증가하고, 도시 내에서 상호작용하는 구성 요소들이 복잡해지면서, 회복력은 이에 대응하는 시스템의 능력을 뜻하는 개념으로 활용되고 있다(Lindström, 2021; Aburn et al., 2016). 여기서 회복력 개념은 하나의 정상상태로 복구하는 것에 초점을 맞추지 않고, 다른 평형상태로 변화하거나, 충격에 대한 적응과 학습을 통해 더 나은 상태로 변화하는 과정을 포함한다(Adger et al., 2005; Folke, 2006). 이러한 관점은 다중평형의 생물학적 특징과 경험을 통한 적응 개념을 고려한다는 점에서 생태학적 회복력과 진화론적 회복력으로 정의되고 있다.

2. 취약성 평가와 회복력 평가의 구분

방재 분야에서 지역 취약성의 이론적 토대를 구축하고 실제 현상에 적용하기 위해 개념 모델 및 측정 프레임워크 개발에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다(Adger, 2006; Polsky et al., 2007; Nasiri et al., 2016; Rehman et al., 2019). 도시의 취약성을 평가하는 다양한 방법론이 개발되었지만, 대부분 다음의 네 가지 범주를 크게 벗어나지 않는다. (1) 물리적, 구조적 취약성을 평가, (2) 사회적, 생태학적 취약성을 평가, (3) 형평성, 인종 등의 취약성을 평가, (4) 재해 경험을 통한 취약지역의 식별(Cutter et al., 2000; Sarewitz et al., 2003; Brooks et al., 2005). 이러한 취약성 평가 방법은 반복적인 단일 재해에 효과적으로 대응할 수 있는 자기평가 수단이 되어 왔고, 현재도 평가에 대한 피드백을 통해 평가 수단과 방법을 발전시키고 있다.

그러나, 최근의 재해는 단일 스트레스에서 다중 스트레스 요인으로 변화하고 있어 지역의 취약 요인뿐만 아니라 동적 특성(시간적, 공간적)과 지역 내·외부 요인을 동시에 고려할 필요가 있다(Cutter et al., 2008). 또한, 기후변화로 인해 재해의 발생 시기, 장소 예측의 불확실성이 증가한 만큼 보다 복합적인 요인들의 영향 관계에 대한 분석이 요구되고 있다.

재난에 있어서 회복력 개념은 다양하게 정의되고 있지만, 일반적으로 재난 대비부터 복구까지 전 과정의 다양한 요인들을 포괄하는 개념으로 활용되고 있다는 점에서, 앞서 언급한 취약성의 한계점을 보완할 수 있을 것으로 주목받고 있다. 최근 연구들은 재난에 대응하고 복구할 수 있는 시스템의 능력을 회복력으로 간주하고, 더 나아가 충격을 흡수하고 대처하는 동적인 의사결정 프로세스를 회복력 평가에 반영해야 한다는 의견이 제시되고 있다(Cai et al., 2018; Carvalhaes et al., 2021; Zobel et al., 2021; Yabe et al., 2022).

3. 회복력 추정 방법론에 대한 고찰

회복력이 높은 지역은 회복력이 낮은 지역에 비해 충격에 대한 민감도가 낮다는 사실은 잘 알려져 있다. 그러나, 단일 개념으로 정의하기 어려운 회복력을 지역 수준에서 ‘어떻게 진단·평가하여 활용할 수 있는가?’라는 질문에 대한 답은 여전히 과제로 남아있다.

2020년 3월부터 2023년 3월까지 3년간 주요 저널(SCI, KCI, SCOPUS)에 게재된 논문 중 제목이 ‘resilience assessment’와 일치하는 논문만 67편이고 회복력 지수 개발, 정량화 등 유사한 주제를 포함하면 340편 이상으로 회복력을 정량화하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그러나, 이들 연구 중

대다수는 지진, 경제위기 등 일회성 재난 상황을 기준으로 지역 간 상대적인 회복력을 산정하거나(Gong et al., 2020, Tan, 2021; Manandhar et al., 2023), 지역의 속성을 기반으로 물리적, 사회적 환경 등에 따른 회복력 지수를 산정하는 연구였다(Mavhura et al., 2021; Khan et al., 2022).

이러한 연구의 가장 큰 한계점은 분석을 통해 산정된 회복력과 실제 재해 피해 사이의 괴리에 있다. 여러 요인의 복합적인 상호작용으로 결정되는 피해에 대응하기 위해 회복력 개념을 차용하고 있으나, 실제 현상을 반영하지 못한다면 지역 방재에 활용하기 쉽지 않다. <표 1>과 같이 선행연구에서 회복력 산정에 활용한 지표들을 살펴보면 충격의 발생 및 재난 전후의 프로세스보다 지

Table 1. Similarities between resilience assessment and vulnerability assessment

Resilience assessment		Vulnerability assessment	
Social resilience	Vulnerable (age)	Béné et al. (2017) Fu et al. (2016)	Vulnerable (age) Rasch (2016) Tate (2013) Flanagan et al. (2011)
	Social capital	Cutter et al. (2010)	Disability Tate (2013) Flanagan et al. (2011)
	Public space	Cox and Hamlen (2015) Fu et al. (2016)	Minority (race) Tate (2013) Flanagan et al. (2011) Schmidtlein et al. (2008)
	Level of education	Hung et al. (2016) Cox and Hamlen (2015)	Illiteracy rate Flanagan et al. (2011) Rasch (2016)
Economic resilience	Employment rate	Hung et al. (2016) Cutter et al. (2010)	Unemployed Flanagan et al. (2011) Fekete (2009)
	Income	Béné et al. (2017) Cutter et al. (2010) Sherrieb et al. (2010)	Income Tate (2013) Fekete (2009) Schmidtlein et al. (2008)
	Commercial facility	Cutter et al. (2008)	Poverty Tate (2013) Flanagan et al. (2011) Schmidtlein et al. (2008)
	Home ownership	Cutter et al. (2010)	Home ownership Flanagan et al. (2011) Rasch (2016)
Physical resilience	Energy consumption	Rosales (2011) Fu et al. (2016)	Vehicle availability Flanagan et al. (2011)
	Green	Adger (2006)	Forest Crona et al. (2009)
	Park	Adger (2006)	Proximity Rasch (2016) Fekete (2009)
	Farmland	Hung et al. (2016)	Infrastructure Rasch (2016) Chang et al. (2020)
	Sewage	Wehmeyer et al. (2011)	Open space Fekete (2009)
	Old building	Mileti (1999)	Sewage Fekete (2009) Crona et al. (2009)
	Urbanization	Fu et al. (2016)	Old buildings Rasch (2016) Chang et al. (2020)
			Impervious area Rasch (2016)

다음 페이지에 계속(Continued on next page)

Resilience assessment			Vulnerability assessment		
Institutional resilience	Shelter	Tierney (2009) Hung et al. (2016) Cutter et al. (2010)	Institutional vulnerability	Disaster preparedness	Fekete (2009) Rasch (2016)
	Land use	Béné et al. (2017) Cutter et al. (2010)		Land use	Furlan et al. (2021) Chang et al. (2020)
	Fire and police	Hung et al. (2016) Cox and Hamlen (2015)		Warning system	Alves et al. (2022)
	Medical service	Hung et al. (2016) Cutter et al. (2010)		Medical service	Fekete (2009)

역의 정적인 속성에 초점을 맞추고 있어 기존의 취약성 평가와 유사한 지표가 활용되었고, 분석 결과도 취약성과 차별점을 찾을 수 없었다.

이에 본 연구에서는 다른 개념과 구분되는 회복력의 성질을 중점적으로 고려하기 위해 도시 내부의 속성이 아닌 충격의 발생과 그에 대한 반응으로 초점을 전환하고자 한다. 즉, 지역이 침수 재해로 인한 기능의 손실을 겪고 다시 회복하는 현상을 반영하는 회복력 추정 방법론을 도출하고 분석을 수행하는 것이 본 연구의 목표이다.

재난 상황에서 회복력의 작용은 <표 2>에서 제시된 4R의 상호 영향으로 설명되는 경우가 많다(Bruneau et al., 2003; Zobel and Khansa, 2014). <그림 1>은 각각의 R이 충격의 완화 및 회복에 어떻게 관여하는지 나타낸 모식도이다. 내구성(robustness)은 충격을 완화하여 시스템의 손실을 줄이는 것에 기여하고 신속

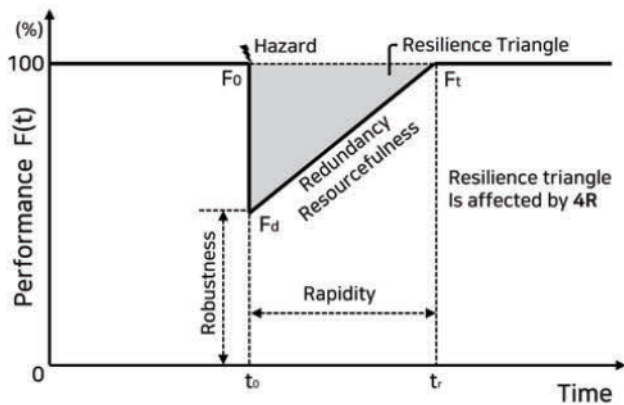


Figure 1. Resilience triangle with 4R

Table 2. Four factors of disaster resilience

Factor (R)	Explanation
Robustness	- The strength of the system, measured by determined ability to withstand the impact of a disaster, as indicated by the extent of damage it incurs.
Redundancy	- The degree to which system components can be replaced by one another when their functionality is lost or diminished.
Rapidity	- The speed at which a system can restore an acceptable level of functionality.
Resourcefulness	- The inherent capacity to dynamically respond to a disaster by enhancing rapidity and robustness.

성(rapidity)은 복구 기간을 단축하는 것에 영향을 미치며, 가의성(redundancy)과 자원부존성(resourcefulness)은 자원의 투입 및 대체 자원의 활용을 통해 시스템의 기능이 중단되는 것을 방지하고 제 기능을 회복하는 과정에 기여한다.

<그림 1>과 같이 해당 과정에서 결정되는 회복력 삼각형의 넓이는 충격으로 인해 손실된 기능의 크기와 비례한다. 이러한 속성을 활용하여 시간 t에 따라 변하는 기능 손실의 총량을 산정할 수 있다면 회복력 추정에 활용할 수 있을 것이다.

4. 회복력 추정 방법론에 대한 고찰

재난의 영향과 복구 과정을 회복력에 반영하기 위해서는 각 과정에서 발생한 현상을 정확히 식별할 수 있어야 한다. 그러나, 강한 충격을 받은 이후 빠르게 복구한 A지역과 약한 충격에도 복구에 오랜 시간이 소요된 B지역이 있다고 가정할 때, 회복력 삼각형만으로는 동일한 넓이를 가지는 두 지역의 차이를 식별하지 못한다. 마찬가지로 같은 강도의 재해가 발생하더라도 지역마다 체감하는 충격의 크기가 다르기 때문에 충격이 어떤 지역 시스템의 일부 기능을 중단시킬 만큼 큰 충격인지 식별할 수 있는 기준이 필요하다.

본 연구에서는 지역의 방재 역량에 따라 재해 강도의 임계치를 결정할 수 있다면, 임계값을 넘어서는 충격과 복구 수준이 회복력을 결정하는 중요한 요인이 될 수 있을 것이라고 판단하였고, 도시의 기능 중단이 발생하는 충격의 임계치를 결정하기 위한 파라미터로써 <그림 2>의 비즈니스 연속성 관리 모델(Business Continuity Management, BCM)을 차용하였다. 해당 모델은

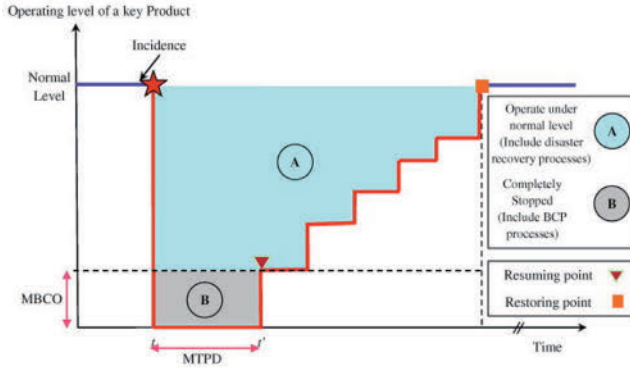


Figure 2. Business continuity management model (Torabi et al., 2014)

내/외부의 위협이 비즈니스 프로세스에 미치는 영향을 식별하고, 조직 내 비즈니스의 연속성 관리를 통해 다양한 충격으로부터 조직을 보호하기 위해 개발되었고 경영 분야에서 주로 활용되고 있다(Torabi et al., 2014).

〈그림 2〉에서 BCM은 충격으로 인한 기능의 상실과 복구를 다루고 있다는 점에서 〈그림 1〉의 회복력 삼각형 개념과 상당히 유사한 것을 알 수 있다. 그러나, 중요한 차이점은 해당하는 조직의 특성과 환경에 따라 MBCO(Minimum Business Continuity Objective)와 MTPD(Maximum Tolerable Period of Disruption)를 정의하여 충격으로 인한 기능의 중단이 발생할 수 있는 지점을 설정하고 전략을 도출한다는 점이다. 여기서 MBCO는 충격 발생 시 조직의 기능 연속성이 유지되기 위한 비용, 인력, 에너지 등 최소한의 운영 목표치를 의미한다. 이를 재난 상황에서의 회복력에 적용하면 지역 수준에서 허용할 수 있는 충격의 임계치를 설정할 수 있다.

한편, 기능의 중단 여부를 판단하는 과정에서 MBCO는 매우 중요한 개념이지만, 조직의 지침과 특성에 큰 영향을 받는 MBCO를 결정하기 위한 표준 방법론은 존재하지 않는다(Torabi et al., 2014). 따라서 회복력 및 임계치 추정에 앞서 지역 시스템의 기능 중단이 발생하는 지점을 결정하는 과정에서 보편적으로 동의할 수 있는 기준을 정립하는 과정이 선행되어야 할 것이다.

III. 연구의 설계

1. 연구의 범위 및 데이터

본 연구는 침수 피해 및 강우 데이터를 기반으로 개별 지역의 회복력을 평가하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 해당 데이터가 집계되는 가장 작은 단위인 시군구를 단위로 하여 전국의 250개 시군구(자치구가 아닌 구는 해당 구가 속한 시에 포함)를 대상으로 분석을 수행하였다.

임계치 및 회복력 추정을 위해서는 각 지역에서 일정 규모 이상의 침수 피해 이력이 존재하는 긴 시간적 범위가 필요하다. 이에 2001년부터 2020년까지 20년간의 데이터를 활용하였고, 시기별 회복력 변화를 추적하기 위해 지역별 최소 14일 이상의 침수 피해 데이터를 확보할 수 있는 5년을 단위로 4개 구간으로 나누어 분석에 활용하였다. 〈표 3〉은 본 연구에서 활용한 데이터 목록으로, 각각의 분석에서 데이터를 채택하는 구체적인 과정은 다음 절에 후술하였다.

2. 연구 방법론

본 연구에서는 재해로 인한 충격 및 복구에 관한 일련의 과정에 있어서 취약성과 차별화되는 회복력의 특성을 보다 잘 반영하기 위해 다음 세 가지 절차로 구분하여 분석을 진행하였다.

첫째, 기능 연속성을 고려하기 위한 MBCO 기준을 정립하고 기간별/시군구별 MBCO를 산정한다. 둘째, MBCO를 기준으로 지역이 견딜 수 있는 강우지속성, 강우강도 임계치를 산정한다. 셋째, 기능 연속성 개념을 통해 회복력 삼각형의 한계점을 보완하여 침수 재해 회복력을 추정한다.

1) MBCO 도출

2장에서 비즈니스 차원의 MBCO는 충격 발생 시 조직의 기능 연속성이 유지되기 위한 최소한의 운영 목표치로 정의되었다. 본 연구에서 기능 연속성이란 광범위한 위기 상황에서 도시의 핵심 기능을 중단하지 않고 유지·관리할 수 있는 능력이자 속성을 의

Table 3. Data for resilience & threshold analysis

Type	Data	Explanation	Source
MBCO determination	Legal standards	Criteria for declaring a special disaster area	MOLEG
	Financial ability index	Determining the standard damage for special disaster areas	KRILA
Threshold & resilience analysis	Duration of rainfall	Number of days the rainfall lasted	KMA
	Intensity of rainfall	Maximum precipitation for 1 hour	KMA
	Flood damage	Damage costs for each flood	MOIS / KMA

Note: MOLEG (Ministry of Government Legislation); KRILA (Korea Research Institute for Local Administration); KMA (Korea Meteorological Administration); MOIS (Ministry of the Interior and Safety)

Table 4. Standards for establishing MBCO according to financial ability index

Financial ability index (F)	Criteria for declaration of disaster area
$F < 0.1$	Amount of damage > 2 billion won
$0.1 \leq F < 0.2$	Amount of damage > 2.6 billion won
$0.2 \leq F < 0.4$	Amount of damage > 3.2 billion won
$0.4 \leq F < 0.6$	Amount of damage > 3.8 billion won
$0.6 \leq F$	Amount of damage > 4.4 billion won

Source: Article 5 of The Regulations on Natural Disaster Relief and Recovery Cost Burden Standards

미한다. 따라서, 재난 분야에서 해당 개념은 지역 수준에서 감내할 수 있는 최대의 충격 규모를 결정하는 데 활용할 수 있다.

본 연구에서는 특별재난지역 선포 가능 기준금액과 MBCO가 개념적으로 유사하다고 판단하였고, 그 근거는 「재난 및 안전관리 기본법」 제2절과 「재난구호 및 재난복구 비용 부담기준 등에 관한 규정」 제5조와 관련이 있다.

해당 항목에서 각 시군구의 최근 3년간의 재정력 지수를 기준으로 특별재난지역 선포가 가능한 피해 기준금액을 제시하고 있고, 해당 금액 이상의 피해가 발생할 경우 지역 수준에서 외부의 지원 없이는 제 기능을 회복하기 어렵다는 점을 언급하고 있다. 즉, 지역 시스템이 기능의 연속성을 유지할 수 있는 최대한의 범위를 법령으로써 구체적으로 제시하고 있다는 점에서 MBCO 결정 기준으로 활용하기 적합하다고 판단하였다.

본 연구에서는 법령에서 제시된 바와 같이 <표 4>의 재정력 지수에 기반하여 MBCO를 결정하였고, 직전 3년의 데이터가 존재하지 않는 2001년, 2002년은 당해 연도를 기준으로, 2003년부터는 법령과 동일하게 직전 3년간의 재정력 지수의 평균값을 활용하여 2020년까지 총 20구간, 250개 시군구의 MBCO를 도출하여 분석에 활용하였다.

2) 침수 재해 임계치 추정

지역의 침수 재해 임계치는 일정 강우 현상에 의해 발생하는 피해가 지역 내에서 감내할 수 있는 한계를 초과하여 도시의 기능 연속성이 단절되는 지점을 의미한다. 이는 리스크관리 차원에서 MBCO가 의미하는 최소한의 연속성 목표와 일치하는 개념으로, 각 지역에서 산정된 MBCO에 해당하는 침수 피해와 그에 대응하는 강우 데이터의 추정을 통해 침수 재해 임계치를 산정할 수 있다.

침수는 단시간 강도 높은 강우에 의해 발생하기도 하지만, 지속적인 강우에 허용 유량을 초과하여 발생하기도 한다. 이에 본 연구에서는 강우강도(1시간 최대강우량, mm/hour)와 강우지속성(호우지속기간, 일) 두 가지 측면에서 임계치를 추정하였다.

먼저, 개별 시군구에서 침수 피해에 대한 강우강도 및 강우지속성의 관계를 설명하는 함수를 결정하기 위해 각 시군구의 20년(2001-2020) 강우 데이터를 대상으로 경사 하강법을 활용하여

MSE(Mean Squared Error)를 최소화하는 함수를 추정하였다. 일반적인 모형 간 비교에서 평균제곱오차의 개념을 가진 MSE가 작을수록 해당 모형의 적합성이 우수한 것으로 판단할 수 있다 (Su et al., 2012).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i \in Data} [y - \hat{f}(X)]^2 \tag{1}$$

수학적으로 MSE를 최소화하는 함수를 직접 계산할 수 있는 경우에는 정규방정식 또는 특이값 분해를 활용하여 함수를 추정할 수 있지만, 계산복잡도가 n^2 이상인 행렬 연산을 수행해야 하기 때문에 표본(n)이 크거나 집단 간 분포가 불규칙할수록 비효율적이다.

백테스트는 Python 3.10을 활용하였고, 다음 과정에 따라 MSE(Θ)가 최솟값에 오차범위 내로 수렴할 때까지 반복 수행된다.

- (1) 개별 데이터 분포에 따른 학습률(η) 및 반복 횟수 설정
- (2) 학습 후 MSE(Θ) 산정
- (3) 시행 간 MSE(Θ)의 차이 산정 및 반복 수행(그림 3)

<그림 4>는 한 시군구에서 학습률(η)=0.05로 침수 피해와 강우강도 사이의 함수를 추정하는 과정으로, 반복 수행을 통해 하단의 초기함수로부터 상단의 결과함수로 수렴하는 것을 확인할 수 있

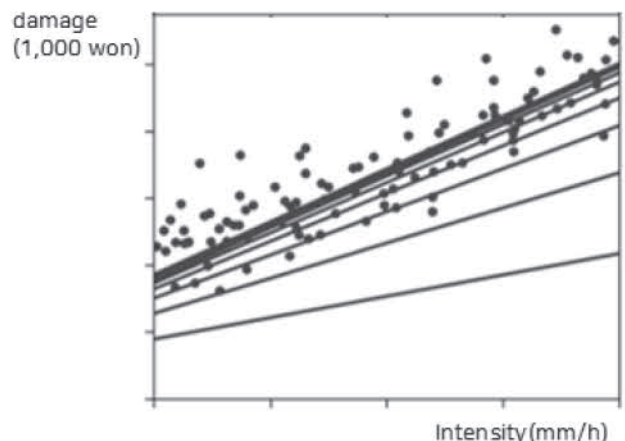


Figure 3. Iterative execution to minimize MSE

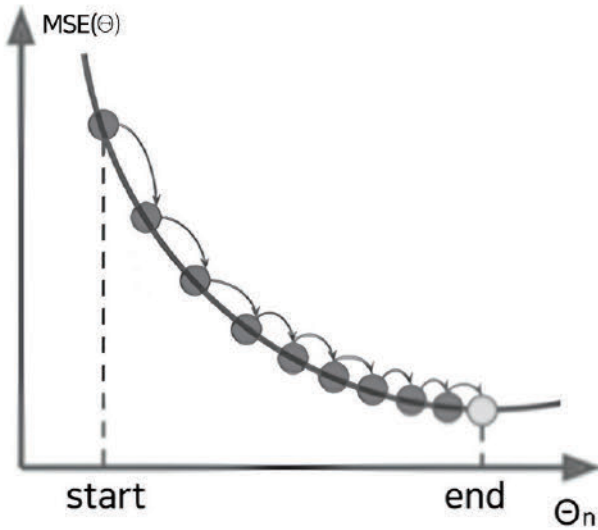


Figure 4. Estimating function by iteration

다. 강우강도 및 강우지속성 임계치는 위 과정에 따라 추정된 시군구별 관계식의 y값(피해액)에 MBCO에 해당하는 피해를 대입하여 산정하게 된다.

3) 침수 재해 회복력 추정

기능 연속성 관점에서 회복력의 산정은 단순히 원래 상태로의 복구가 아닌 충격으로 인한 시스템의 기능 중단이 얼마나 신속하게 정상화되었는지가 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 복구 속도만을 고려한 회복력 삼각형의 단일 넓이가 아닌, 충격과 복구 과정을 포괄하는 다각형의 전체 넓이 중에서 MBCO를 초과하여 기능이 중단된 기간의 넓이의 비율이 회복력의 크기를 결정하는 것에 큰 영향을 끼치게 된다.

〈그림 5〉는 비즈니스 분야에서 활용하던 분석모형을 재구성하여 지역 회복력 추정 방법을 개념화한 모식도이다. 여기서 t0는 충격이 발생한 시점이고, 이때 지역의 주요 기능이 MBCO 이하로 내려가 기능의 중단이 발생할 수 있다. T는 기능 중단의 지속

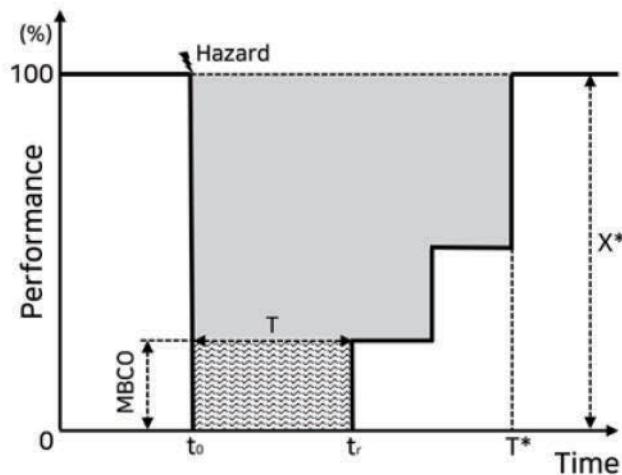


Figure 5. Concept diagram of resilience analysis

기간으로 t0-t1과 동일한 값을 가지며, MBCO를 초과하는 피해의 평균과 곱연산을 통해 기능이 중단된 구간의 넓이를 구할 수 있다. 위 개념을 활용하여 다음의 침수 재해 회복력 추정 식을 도출하였다.

$$R(X, T) = \frac{X^* T^* - \bar{X} T}{X^* T^*} = 1 - \frac{\bar{X} T}{X^* T^*} \quad (2)$$

$$\bar{X} \in [0, X^*], T \in [0, T^*]$$

R : Flood Resilience

\bar{X} : Average loss exceeding MBCO

X^* : Maximum loss exceeding MBCO

T : Duration of damage exceeding MBCO

T^* : Total recovery period

앞서 산정된 250개 시군구의 개별 MBCO와 침수 피해 데이터를 위의 추정 식에 대입하면 연도별 지역 회복력을 도출할 수 있다. 단, 1년 단위로 분석할 경우, 기상현상에 크게 좌우되는 침수 재해의 특성상 피해가 발생하지 않거나 MBCO 초과 손실이 발생하지 않는 지역이 대다수였기 때문에 본 연구에서는 5년 단위 4구간으로 나누어 분석을 수행하였다.

IV. 분석 결과

1. 침수 재해 임계치

전국 250개 시군구 대상 과거 침수 피해 데이터를 기반으로 개별 모형을 적용하여 MBCO에 해당하는 피해가 발생할 때의 강우강도와 강우지속성 임계치를 분석하였다.

20년이라는 비교적 긴 기간의 데이터를 활용하였지만 폭우가 주로 6~9월에 집중되어 있고, 일정 수준 이상의 피해가 집계된 침수 이력이 시군구별 9건에서 최대 113건으로 나타났으며 전주시, 천안시, 진천군 등 14개 지역에서는 MBCO 이상의 피해가 집계되지 않아 임계치가 분석되지 않았다. 본 연구에서는 개별 시군구의 침수 피해 표본 수의 한계를 고려할 때, 임계치를 상회하는 강우 현상이 예상될 때 반드시 지역의 대응 수준을 초과하는 피해가 발생한다고 해석하기보다 강우강도(1시간 최대강우량) 임계치가 높은 경우 순간적인 폭우에 대한 완화 능력이 우수한 지역으로, 강우지속성(호우지속기간) 임계치가 높은 지역은 지속되는 강우에 대한 저항이 높은 지역으로 해석하는 것이 바람직하다고 판단하였다.

〈그림 6〉은 일정 피해가 집계되지 않은 14개 시군구를 제외한 236개 시군구의 강우강도 임계치 분석 결과이며, 푸른색이 진할수록 강우강도에 대해 높은 임계치를 가지는 지역이다. 임계치가

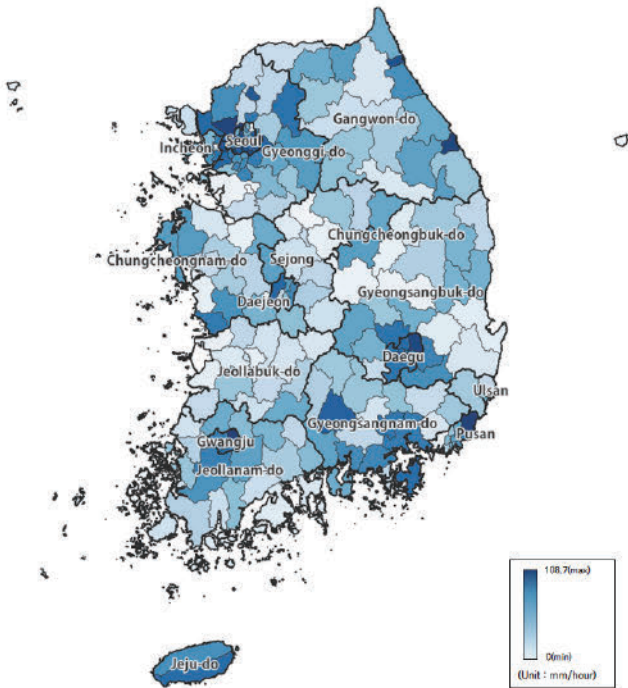


Figure 6. Flood threshold (intensity, mm/hour)

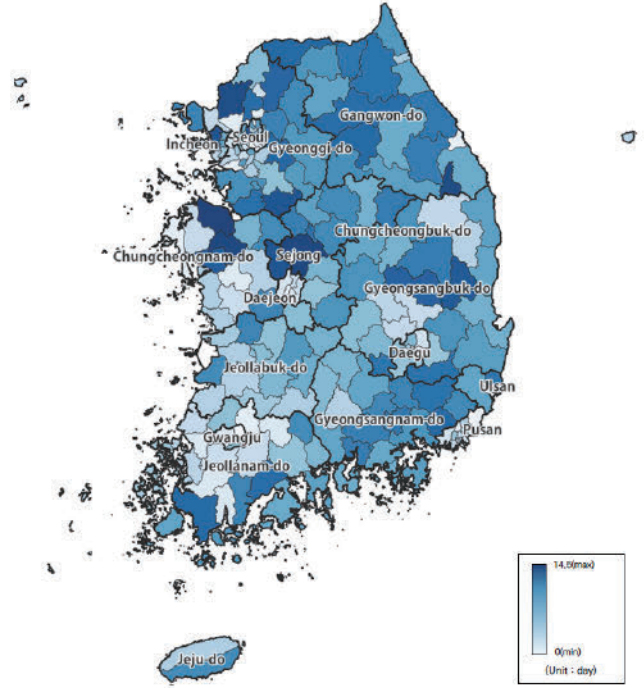


Figure 7. Flood threshold (persistence, day)

높은 지역은 한강, 낙동강, 섬진강 및 해안 등 주요 수계에 인접한 지역과 태풍의 주요 영향권인 경상남도, 전라남도에 다수 분포한 것으로 나타났다.

하천이 범람 등으로 침수 피해를 증폭시킬 수도 있지만 짧은 시간의 강수에 대해서는 배수 기능이 이점으로 나타났을 가능성이 있고, 태풍 등으로 순간적인 폭우에 자주 노출되었던 지역이 적응·학습을 통해 완화 능력을 개선해 온 영향으로 해석할 수 있다. 이들 지역은 침수 피해에 상승적으로 노출되는 지역의 비율이 높고 방재 및 대응체계에 대한 비판의 대상이 되는 경우가 많으나, 현상을 중심으로 분석했을 때 상대적으로 다른 지역에 비해 강우 강도 임계치가 높은 것으로 나타났다.

반면에 강우강도에 대한 임계치가 낮은 지역은 산간 지역에 다수 분포하고 있었다. 이는 산간 지역의 특성상 대기가 단열 팽창하여 강우가 시작되는 경우가 많고, 집중 호우가 내릴 경우 골짜기를 따라 유수가 집중되는 경향이 있다. 반면, 2022년 기록적인 폭우로 광범위한 침수를 겪었던 서울 강남구는 지난 20년(2001-2020)의 피해 이력 상 강우강도에 높은 임계치를 보이는 것으로 나타났는데, 이는 최근 기후변화의 가속화로 인해 이상기후의 시기와 장소를 예측하기 어려워지고 있음을 시사한다.

〈그림 7〉은 동일 범위의 강우지속성 임계치 분석 결과이다. 푸른색이 진할수록 오래 지속되는 강우에 높은 임계치를 가지는 지역을 의미한다. 임계치가 높은 지역은 주로 연안과 산지에 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 내륙의 경우에는 도시화율이 높은 지역일수록, 하천과 인접한 지역일수록 임계치가 낮은 경우가 많았다.

이러한 결과는 오래 지속되는 강우일수록 불투수 면적 비율이 낮고 배수가 용이한 지리적 조건을 가진 지역이 침수에 노출되는 경우가 적다는 것으로 해석할 수 있다. 한편, 강우강도 임계치 분석 결과와 비교했을 때 도시와 인접한 하천은 일시적 강우에는 배수에 이점을 제공할 수 있지만, 오래 지속되는 강우의 경우 오히려 침수 및 범람의 위험요인으로 작용할 수 있음이 확인되었다.

2. 침수 재해 회복력

전국 250개 시군구의 침수 피해 이력(2001-2020)을 바탕으로 3장에서 제시한 회복력 추정 모형을 활용하여 지역의 회복력을 분석하였다. 해당 모형은 도시 기능의 연속성에 초점을 맞추어 ‘기능의 중단 상황에서 얼마나 신속히 회복하였는가?’가 회복력의 척도이다. 따라서 자원·자본이 풍부한 지역이 높은 회복력을 보이던 기존의 회복력 지수 연구와 달리, 본 연구에서는 회복력의 기본 개념인 충격의 완화와 복구 관점에서 접근할 수 있었다.

일정 수준 이상의 침수 피해가 집계되지 않은 14개 시군구를 제외한 236개 시군구의 침수 재해 회복력을 분석한 결과는 〈그림 8〉에 제시하였으며, 임계치와 함께 시도별로 요약한 결과는 〈표 5〉와 같다. 지역 침수 재해 회복력이 높은 시군구는 주로 대구광역시, 인천광역시, 대전광역시에 위치하고 있었으며 회복력이 낮은 시군구는 경상남도, 충청북도, 전라남도에 속한 지역이 많은 것으로 나타났다.

회복력이 높은 지역 중 대구는 침수 피해의 발생 빈도가 높지 않았으나, 2003년, 2006년, 2011년에 강한 강도의 폭우에 피해를

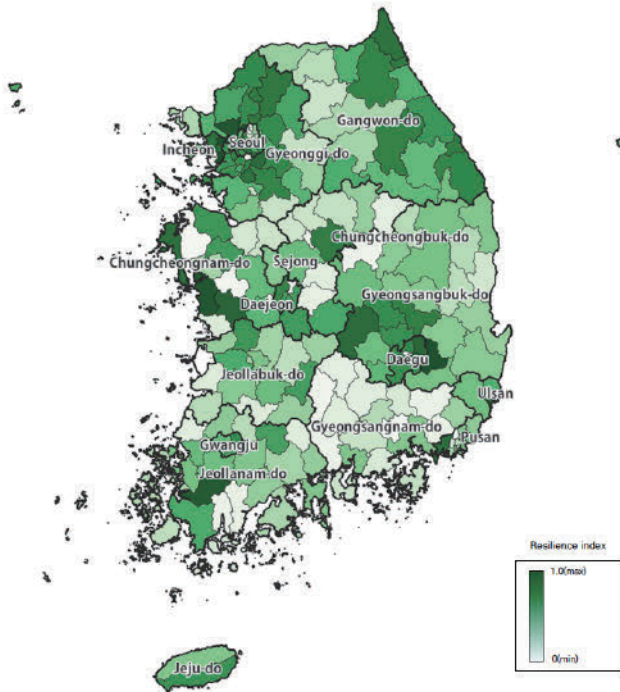


Figure 8. Result of resilience analysis

입었고 주요 피해를 복구하는 데 걸린 기간이 최장 6일로 신속하게 회복하는 모습을 보여주었다. 인천광역시와 대전광역시의 경우에도 마찬가지로 용진군, 강화군, 서구(대전)를 중심으로 다수의 피

해가 발생했으나 짧은 시간 내에 회복한 이력이 확인되었으며, 이러한 점이 회복력의 향상에 영향을 끼친 것으로 확인되었다.

반면에 경상남도과 전라남도는 여름철 태풍의 영향으로 광범위한 침수 피해가 집계되고 있으나, 시간이 경과함에 따라 적응과 학습을 통한 피해 규모 및 복구 기간의 개선은 확인되지 않았다. 지리와 기후적으로 유사한 조건에 해당하는 광주광역시, 울산광역시가 비교적 높은 회복력을 보인다는 점을 감안하면 위의 지역 간 차이는 지역의 대응 역량 차이가 원인일 가능성이 높다.

〈표 5〉에서 회복력과 임계치의 조합을 비교해 보면 회복력이 높은 지역의 임계치가 회복력이 낮은 지역에 비해 반드시 높은 값을 보이지는 않는다. 시군구별 평균 회복력이 가장 높은 것으로 분석된 대구광역시의 경우 강우강도 임계치는 79.73mm로 2위에 해당하는 높은 값을 보였지만, 강우지속성 임계치는 5.38일로 비교적 낮다. 반면에, 회복력이 가장 낮은 경상남도의 경우 강우강도 임계치는 60.98mm로 낮으나, 강우지속성은 8.33일로 임계치가 높은 편에 속했다.

이는 경상남도에 위치한 다수의 지역이 지속되는 호우에는 강하지만 짧은 기간의 폭우로 인해 많은 피해가 발생하고 있고, 대응의 초점을 단기간의 폭우에 맞추어야 한다는 것을 의미한다. 같은 맥락으로 대구광역시의 경우 단기간의 폭우에는 비교적 잘 대응하고 있지만, 지속적인 호우에 약점을 가지고 있는 만큼 해당 문제에 전략적으로 대응할 필요가 있다.

Table 5. Summary of regional resilience and thresholds

Region	Resilience	Rank	Threshold (intensity, mm/hour)	Threshold (persistence, day)
Seoul	0.8234	9	77.21	5.93
Busan	0.7517	14	62.07	5.17
Daegu	0.9255	1	79.73	5.38
Incheon	0.8884	2	59.54	7.14
Gwangju	0.8273	8	81.06	5.29
Daejeon	0.8806	3	64.54	4.65
Ulsan	0.8690	5	54.44	6.33
Sejong	0.7842	11	63.82	11.04
Gyeonggi	0.8781	4	65.93	7.45
Gangwon	0.8422	7	60.91	8.58
Chungbuk	0.7114	16	49.49	8.77
Chungnam	0.7833	12	55.44	7.66
Jeonbuk	0.7724	13	48.37	7.04
Jeonnam	0.7463	15	53.12	6.62
Gyeongbuk	0.8054	10	54.28	7.61
Gyeongnam	0.6426	17	60.98	8.33
Jeju	0.8444	6	73.81	7.42
Average	0.8103	-	62.58	7.08

Note: The analysis results of 236 municipalities have been summarized by cities/provinces.

V. 결론

이상기후로 인한 피해가 속출하면서 방재 전략으로써 회복력을 활용하고자 하는 시도가 증가하고 있다. 이를 위해서는 지역의 상황을 명확히 반영할 수 있는 회복력 산정 방법이 요구되나, 대다수의 연구에서 채택한 지역 특성에 기초하는 회복력 지수 산정은 회복력 개념의 근간이 되는 충격과 복원을 다루지 않고 있다.

본 연구는 위 방법으로 산정된 회복력이 과연 취약성과 차별점이 있는지, 방재적 의사결정에 활용할 수 있는지에 관한 질문에서 출발하여 실제 현상을 바탕으로 회복력을 산정할 수 있는 프레임워크를 구축하였다.

회복력 산정 과정에서 핵심 개념으로 비즈니스 연속성 관리 모델의 최소 비즈니스 연속성 목표(MBCO)를 활용하였다. MBCO로써 침수 재난 상황에서 지역의 기능이 연속성을 가질 수 있는 임계값은 특별재난지역 선정 기준에 따라 결정하였다. 특별재난지역 선정 기준을 넘어서는 피해가 집계된 모든 지역이 특별재난지역으로 선정되거나 스스로 회복하지 못하는 것은 아니지만, 지역 수준에서 감내할 수 있는 피해의 기준을 법적으로 고시하고 있다는 점에서 합리적이고 MBCO의 개념을 잘 반영할 수 있는 기준이라고 판단하였다.

분석 결과 시군구별 침수 재해 임계치와 회복력이 도출되었고, 개별 지역은 다음과 같은 방법으로 본 연구의 결과를 방재적 의사결정에 활용할 수 있을 것이다.

경상남도에 위치한 A지역의 경우 회복력이 전국 229위로 최하위에 해당하고, 강우 지속력에 대한 임계치는 비교적 높으나 강우강도 임계치가 낮은 것으로 나타났다. 따라서, A지역은 침수 피해를 완화하고 회복력을 향상시키기 위해 순간적인 폭우 대비에 초점을 맞출 필요가 있다. 지역 내 침수 피해 이력을 바탕으로 해당 지점의 우수 흐름을 파악하고 하수관거, 배수로 점검 및 확장 등에 집중함으로써 불필요한 예산과 인력 소모를 줄여 지역 수준에서 효과적인 대응이 이루어질 수 있다.

반대로 서울특별시에 위치한 B지역의 경우 강우강도에 대한 임계치는 높으나 강우지속력 임계치는 낮은 것으로 분석되었다. 강우강도 임계치가 높다는 점에서 배수시설의 용량은 충분할 것으로 예상되지만, 호우가 지속될 경우 피해가 발생한다는 점에서 주변의 하천 또는 인접한 지역으로부터 우수의 흐름이 집중되는 지역일 가능성이 높다. 따라서 해당 지역은 우수관의 확장과 같은 국지적 대책보다 위험 지역의 토지이용 제한, 저류지로의 우수 우회 등 주변 지역과 연계할 수 있는 계획이 필요할 것이다.

본 연구의 결과를 통해 도출된 시사점은 다음과 같다. 첫째, 기존의 모호했던 회복력 개념을 재해 현상 기반의 임계치 및 회복력을 산정함으로써 지역의 상황을 보다 잘 반영하고 홍수 대응에 실용적으로 활용할 수 있는 회복력 개념으로 확장하였다. 둘째, 주요 방재 정책이 광역 지자체 수준에서 수립되고 있으나, 회복력과

임계치의 비교를 통해 개별 시군구의 약점을 식별하고 대응할 수 있는 근거를 제시하였다. 셋째, 보편적으로 활용할 수 있는 회복력 평가 프레임워크를 도출하였다. 지역 수준에서 의사결정 근거로 회복력을 활용하기 위해서는 특수한 조건 없이 동일하게 적용할 수 있는 회복력 평가 프레임워크가 필요하나, 현재까지의 회복력 연구에서는 매우 다양한, 서로 다른 요인들을 고려하고 있으며 '어느 요소까지 회복력이라고 할 수 있는가?'에 대한 합의점을 찾지 못하고 있다. 본 연구에서는 회복력의 가장 기본적 속성인 충격의 크기, 복구 속도 및 지역 재정 조건에 따른 충격의 임계점을 반영하여 회복력을 산정함으로써 동일한 조건에서 회복력을 산정할 수 있는 방법론을 제시하였다.

한편, 본 연구는 다음과 같은 한계점을 가진다. 충격의 임계점을 산정하는 과정에서 MBCO로써 특별재난지역 선포 가능 기준을 활용하였다. 해당 조건은 지역의 재정적 상황을 고려하여 구체적인 피해의 규모를 결정한다는 점에서 전국의 시군구에 적용하기에 가장 적합한 조건이라고 판단하였으나, 기후변화의 가속화로 인해 2024년 7월 기준 임계점을 상회하는 폭우 사례가 빈번하게 나타나고 있다. 지자체들의 대응 수준이 강우강도의 증가와 함께 향상되면서 2000년대의 피해 사례와 비교할 때, 강우강도와 침수 피해액이 정비례하지 않는다는 점을 감안하면 낮은 임계점의 문제는 향후 침수 피해 데이터가 축적됨에 따라 해결될 수 있을 것이다.

회복력이 다시 주목받게 된 것은 최근 극단적인 이상기후의 시기와 장소를 예측하기 어려워졌기 때문일 것이다. 이는 지역에 예고된 위험에 대비하여 갑옷을 두르는 것보다 언제 어디서 발생할지 모르는 재해에 앞서 지역의 능력을 진단하고 약점을 보완하여 신체를 튼튼하게 만드는 것이 중요해졌음을 의미한다. 이를 위해 향후 회복력 연구에서는 더 다양하고 신뢰도 높은 최근의 기후 데이터를 적극적으로 활용할 필요가 있으며, 지역 및 관련 기관마다 데이터의 분류, 형태, 접근성이 상이한 부분은 개선이 이루어져야 할 것이다.

인용문헌 References

- 서세교·장새움·정주철, 2022. "지역 침수피해 특성에 따른 재해 회복력 지수 분석", 『한국방재학회논문집』, 22(6): 55-67.
Seo, S.G., Jang, S.W., and Jung, J.C., 2022. "Analysis of Disaster Resilience Index Using Regional Flood Damage Characteristics", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 22(6): 55-67.
- Aburn, G., Gott, M., and Hoare, K., 2016. "What is Resilience? An Integrative Review of The Empirical Literature", *Journal of Advanced Nursing*, 72(5): 980-1000.

3. Adger, W.N., Hughes, T.P., Folke, C., Carpenter, S.R., and Rockstrom, J., 2005. "Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters", *Science*, 309(5737): 1036-1039.
4. Adger, W.N., 2006. "Vulnerability", *Global Environmental Change*, 16(3): 268-281.
5. Alves, P.B., Djordjević, S., and Javadi, A.A., 2022. "Addressing Social and Institutional Vulnerabilities in the Context of Flood Risk Mitigation", *Journal of Flood Risk Management*, 15(4): e12839.
6. Béné, C., Chowdhury, F.S., Rashid, M., Dhali, S. A., and Jahan, F., 2017. "Squaring the Circle: Reconciling the Need for Rigor with the Reality on the Ground in Resilience impact assessment", *World Development*, 97: 212-231.
7. Brooks, N., Adger, W.N., and Kelly, P.M., 2005. "The Determinants of Vulnerability and Adaptive Capacity at the National Level and the Implications for Adaptation", *Global Environmental Change*, 15(2): 151-163.
8. 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*, 19(4): 733-752.
9. Cai, H., Lam, N.S., Qiang, Y., Zou, L., Correll, R.M., and Mihunov, V., 2018. "A Synthesis of Disaster Resilience Measurement Methods and Indices", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31: 844-855.
10. Carvalhaes, T.M., Chester, M.V., Reddy, A.T., and Allenby, B.R., 2021. "An Overview & Synthesis of Disaster Resilience Indices from a Complexity Perspective", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 57: 102165.
11. Chang, S.E., Yip, J.Z., Conger, T., Oulahen, G., Gray, E., and Marteleira, M., 2020. "Explaining Communities' Adaptation Strategies for Coastal Flood Risk: Vulnerability and Institutional Factors", *Journal of Flood Risk Management*, 13(4): e12646.
12. Chen, R., Samuelson, H., Zou, Y., Zheng, X., and Cao, Y., 2024. "Improving Building Resilience in the Face of Future Climate Uncertainty: A Comprehensive Framework for Enhancing Building Life Cycle Performance", *Energy and Buildings*, 302: 113761.
13. Choptiany, J.M., Phillips, S., Graeb, B.E., Colozza, D., Settle, W., Herren, B., and Batello, C., 2017. "SHARP: Integrating a Traditional Survey with Participatory Self-Evaluation and Learning for Climate Change Resilience Assessment", *Climate and Development*, 9(6): 505-517.
14. Cox, R.S. and Hamlen, M., 2015. "Community Disaster Resilience and the Rural Resilience Index", *American Behavioral Scientist*, 59(2): 220-237.
15. Crona, B.I., Rönnbäck, P., Jiddawi, N., Ochiewo, J., Maghimbi, S., and Bandeira, S., 2009. "Murky Water: Analyzing Risk Perception and Stakeholder Vulnerability Related to Sewage Impacts in Mangroves of East Africa", *Global Environmental Change*, 19(2): 227-239.
16. 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*, 18(4): 598-606.
17. Cutter, S.L., Burton, C.G., and Emrich, C.T., 2010. "Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions", *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 7(1): Article 51.
18. Cutter, S.L., Mitchell, J.T., and Scott, M.S., 2000. "Revealing the Vulnerability of People and Places: A Case Study of Georgetown County, South Carolina", *Annals of the Association of American Geographers*, 90(4): 713-737.
19. Fekete, A., 2009. "Validation of a Social Vulnerability Index in Context to River-Floods in Germany", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2): 393-403.
20. Flanagan, B.E., Gregory, E.W., Hallisey, E.J., Heitgerd, J.L., and Lewis, B., 2011. "A Social Vulnerability Index for Disaster Management", *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 8(1): Article 3.
21. Folke, C., 2006. "Resilience: The Emergence of a Perspective for Social-Ecological Systems Analyses", *Global Environmental Change*, 16(3): 253-267.
22. Fu, X., Wang, X., Schock, C., and Stuckert, T., 2016. "Ecological Wisdom as Benchmark in Planning and Design", *Landscape and Urban Planning*, 155: 79-90.
23. Furlan, E., Dalla Pozza, P., Michetti, M., Torresan, S., Critto, A., and Marcomini, A., 2021. "Development of a Multi-Dimensional Coastal Vulnerability Index: Assessing Vulnerability to Inundation Scenarios in the Italian Coast", *Science of the Total Environment*, 772: 144650.
24. Gong, H., Hassink, R., Tan, J., and Huang, D., 2020. "Regional Resilience in Times of a Pandemic Crisis: The Case of COVID-19 in China", *Tijdschrift Voor Economische en Sociale Geografie*, 111(3): 497-512.
25. Hung, H., Yang, C., Chien, C., and Liu, Y., 2016. "Building Resilience: Mainstreaming Community Participation into Integrated Assessment of Resilience to Climatic Hazards in Metropolitan Land Use Management", *Land Use Policy*, 50: 48-58.
26. Khan, M.T.I., Anwar, S., Sarkodie, S.A., Yaseen, M.R., Nadeem, A.M., and Ali, Q., 2022. "Comprehensive Disaster Resilience Index: Pathway Towards Risk-Informed Sustainable Development", *Journal of Cleaner Production*, 366: 132937.
27. Klein, R.J., Nicholls, R.J., and Thomalla, F., 2003. "Resilience to Natural Hazards: How Useful Is This Concept?", *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 5(1): 35-45.
28. Lindström, B., 2001. "The Meaning of Resilience", *International Journal of Adolescent Medicine and Health*, 13(1): 7-12.
29. Links, J.M., Schwartz, B.S., Lin, S., Kanarek, N., Mitrani-Reiser, J., Sell, T.K., and Kendra, J.M., 2017. "COPEWELL: A Conceptual Framework and System Dynamics Model for Predicting Community Functioning and Resilience after Disasters", *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 12(1): 127-137.
30. Manandhar, B., Cui, S., Wang, L., and Shrestha, S., 2023.

"Post-Flood Resilience Assessment of July 2021 Flood in Western Germany and Henan, China", *Land*, 12(3): 625.

31. Marasco, S., Kammouh, O., and Cimellaro, G.P., 2022. "Disaster Resilience Quantification of Communities: A Risk-Based Approach", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 70: 102778.

32. Mavhura, E., Manyangadze, T., and Aryal, K.R., 2021. "A Composite Inherent Resilience Index for Zimbabwe: An Adaptation of the Disaster Resilience of Place Model", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 57: 102152.

33. Mileti, D., 1999. *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*, Washington, D.C.: John Henry Press.

34. Nasiri, H., Mohd Yusof, M.J., and Mohammad Ali, T.A., 2016. "An Overview to Flood Vulnerability Assessment Methods", *Sustainable Water Resources Management*, 2: 331-336.

35. Pimm, S.L., 1984. "The Complexity and Stability of Ecosystems", *Nature*, 307(5949): 321-326.

36. Polsky, C., Neff, R., and Yarnal, B., 2007. "Building Comparable Global Change Vulnerability Assessments: The Vulnerability Scoping Diagram", *Global Environmental Change*, 17(3-4): 472-485.

37. Rasch, R.J., 2016. "Assessing Urban Vulnerability to Flood Hazard in Brazilian Municipalities", *Environment and Urbanization*, 28(1): 145-168.

38. Rehman, S., Sahana, M., Hong, H., Sajjad, H., and Ahmed, B. B., 2019. "A Systematic Review on Approaches and Methods Used for Flood Vulnerability Assessment: Framework for Future Research", *Natural Hazards*, 96: 975-998.

39. Rosales, N., 2011. "Towards the Modeling of Sustainability into Urban Planning: Using Indicators to Build Sustainable Cities", *Procedia Engineering*, 21: 641-647.

40. Sarewitz, D., Pielke Jr, R., and Keykhah, M., 2003. "Vulnerability and Risk: Some Thoughts from a Political and Policy Perspective", *Risk Analysis: An International Journal*, 23(4): 805-810.

41. Schmidlein, M.C., Deutsch, R.C., Piegorsch, W.W., and Cutter, S.L., 2008. "A Sensitivity Analysis of the Social Vulnerability Index", *Risk Analysis: An International Journal*, 28(4): 1099-1114.

42. Sherrieb, K., Norris, F.H., and Galea, S., 2010. "Measuring Capacities for Community Resilience", *Social Indicators Research*, 99(2): 227-247.

43. Su, X., Yan, X., and Tsai, C.L., 2012. "Linear Regression", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 4(3): 275-294.

44. Tan, J., 2021. "Regional Economic Resilience of Resource-based Cities and Influential Factors during Economic Crises in China", in *Economic Resilience in Regions and Organizations* edited by Wink, R., 91-115.

45. Tate, E., 2013. "Uncertainty Analysis for a Social Vulnerability Index", *Annals of the Association of American Geographers*, 103(3): 526-543.

46. Tierney, K., 2009. *Disaster Response: Research Findings and Their Implications for Resilience Measures*, CARRI Research Report 6. Oak Ridge: Community and Regional Resilience Institute.

47. Tilman, D. and Downing, J.A., 1994. "Biodiversity and Stability in Grasslands", *Nature*, 367(6461): 363-365.

48. Torabi, S.A., Soufi, H.R., and Sahebjamnia, N., 2014. "A New Framework for Business Impact Analysis in Business Continuity Management (with a Case Study)", *Safety Science*, 68: 309-323.

49. Tyler, S., and Moench, M., 2012. "A Framework for Urban Climate Resilience", *Climate and Development*, 4(4): 311-326.

50. Wehmeyer, M.L., Abery, B.H., Zhang, D., Ward, K., Willis, D., Hossain, W.A., and Walker, H.M., 2011. "Personal Self-determination and Moderating Variables that Impact Efforts to Promote Self-determination", *Exceptionality*, 19(1): 19-30.

51. Yabe, T., Rao, P.S.C., Ukkusuri, S.V., and Cutter, S.L., 2022. "Toward Data-driven, Dynamical Complex Systems Approaches to Disaster Resilience", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(8): e2111997119.

52. Yang, Y., Guo, H., Wang, D., Ke, X., Li, S., and Huang, S., 2021. "Flood Vulnerability and Resilience Assessment in China based on Super-efficiency DEA and SBM-DEA Methods", *Journal of Hydrology*, 600: 126470.

53. Zobel, C.W. and Khansa, L., 2014. "Characterizing Multi-event Disaster Resilience", *Computers & Operations Research*, 42: 83-94.

54. Zobel, C.W., MacKenzie, C.A., Baghersad, M., and Li, Y., 2021. "Establishing a Frame of Reference for Measuring Disaster Resilience", *Decision Support Systems*, 140: 113406.

Date Received 2024-07-30
 Date Reviewed 2024-09-19
 Date Accepted 2024-09-19
 Date Revised 2024-11-15
 Final Received 2024-11-15