



## Network analysis for assessing urban resilience from the perspective of urban flooding: case study of Seoul, Korea

Park, HyungJun<sup>a</sup> · Song, Sumin<sup>b</sup> · Kim, DongHyun<sup>c</sup> · Lee, Seung Oh<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>Master Course, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Master Course, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Research Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

<sup>d</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

Paper number: 24-012

Received: 3 March 2024; Revised: 29 April 2024; Accepted: 14 May 2024

### Abstract

The quantification methods and definitions of resilience vary and are studied across many fields. However, this diversity can lead to gaps in interpretation regarding the meaning and indicators of resilience, potentially having a negative impact on resilience assessments. Therefore, uniform standards for defining and quantifying resilience are essential. This study presented a definition of resilience and socio-structural evaluation methods of resilience through network analysis. Furthermore, through analyzing various definitions of resilience, the definition of resilience in the context of urban flooding was presented. Distinguishing between static and dynamic resilience, an evaluation method based on common attributes was proposed. Lastly, the economic effects of introducing resilience were analyzed using an inundation trace map. Future research on the secondary effects through standardized resilience assessments is expected to be widely utilized in decision-making stages within urban flood policies.

**Keywords:** Resilience, Urban flood, Urban network, Network Analysis

## 도시침수 관점에서의 도시회복력 평가를 위한 네트워크 분석: 서울특별시 중심으로

박형준<sup>a</sup> · 송수민<sup>b</sup> · 김동현<sup>c</sup> · 이승오<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>홍익대학교 토목공학과 석사과정, <sup>b</sup>홍익대학교 토목공학과 석사과정, <sup>c</sup>홍익대 토목공학과 연구교수, <sup>d</sup>홍익대 토목공학과 교수

### 요 지

회복력의 정량화방법과 정의는 다양하며 많은 분야에서 연구되어지고 있다. 하지만 이러한 다양성은 회복력의 의미, 지표 등에서 해석의 차이를 유발하여 회복력 평가 시 긍정적이지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 회복력 평가의 일관성 있는 기준이 필요하며 본 연구에서는 회복력 평가에 있어 고려해야될 정의와 회복력의 사회·구조적 평가방법을 네트워크 분석을 통해 검토하였다. 다양한 회복력 정의의 분석을 통해 도시침수분야에서의 회복력을 정의하였으며 회복력을 정적 및 동적 회복력으로 구별하여 일관성 있는 속성별 평가 방법을 제시하였다. 그리고 과거 침수흔적을 활용하여 회복력을 도입함으로써 얻을 수 있는 경제적인 효과를 분석하였다. 평가지역의 대부분은 낮은등급으로 나타났으며 최대 약 96억원의 복구 비용이 발생하였다. 향후 통일된 기준의 회복력평가를 통한 2차적인 파급효과에 대한 연구가 수행된다면 도시침수 관리정책 내 의사결정 단계 등에서 다양하게 활용될 것으로 기대된다.

**핵심용어:** 회복력, 도시침수, 도시 네트워크, 네트워크 분석

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-320-3046

E-mail: seungoh.lee@hongik.ac.kr (Lee, Seung Oh)

## 1. 서론

도시는 공업, 산업, 문화 등 수많은 기능이 중첩되어 있는 공간으로 19세기 산업혁명 이후 도시인구는 폭발적으로 늘어나기 시작하였다. 국내의 경우 1960년 대도시 집중현상을 시작으로 도시인구가 급증하기 시작하였으며 현재 국내인구의 약 92%가 도시에 거주하고 있다(MOLIT, 2023). 이와 같이 수많은 사람들이 밀집하여 살고 있는 도시의 특성상 도시에 발생하는 재해는 타 지역보다 큰 피해로 이어질 가능성이 높다. 특히 기후위기로 인하여 재해의 빈도와 강도가 높아지고 있으며 그 중 홍수는 국내뿐만 아니라 전세계적으로 가장 빈번하게 발생하여 심각한 인명피해와 재산피해를 발생시킨다(Kim, 2000; Yim and Choi, 2020). 기존 침수시설 중심의 구조적 홍수 방지 대책은 시설별 설계용량이 홍수방어능력에 있어 중요한 역할을 하나 계획을 초과하여 발생하는 도시홍수에 대해서는 취약한 문제점이 존재한다(Park and Won, 2019). 이와 같이 제한되어있는 홍수 방어능력을 보완하기 위한 대책으로서 침수피해를 최소화하면서 도시의 기능적 회복능력을 중요시하는 회복력에 관한 관심도가 높아지고 있다.

최근 들어 회복력의 개념이 대두되면서 재난분야에서의 회복력에 관한 많은 연구가 수행되고 있으며 정성적인 회복력의 개념을 정량화하여 회복력과 도시재해와의 관계를 분석하는 다양한 연구 역시 동시에 진행되고 있다(Lee, 2015; Heo, 2016; Meerow *et al.*, 2016; Kim, 2020). 하지만 일반적으로 통용되는 회복력의 측정법은 명료하게 정립되지 않아 연구자 및 기관별로 측정 방법의 차이가 분명히 존재하는 실정이다. Vugrin *et al.* (2010)은 회복력을 정량화하기 위한 물리식 기반 측정법을 제시하였으며 산정식에 ‘복구노력(Recovery Effort)’이라는 개념을 도입하였다. 하지만 복구노력을 개념적인 산정식으로만 제시하였고 물리적인 현상 외의 사회적인 현상을 반영하지 못한 한계가 존재한다. Cutter *et al.* (2010)은 회복력을 측정하기 위한 다양한 지표를 기반으로 도시의 회복력을 측정하였으나 물리적인 피해를 반영하지 못하였으며 경험적인 발전을 통해 지표를 발전 및 추가하여야 한다고 주장하였다. 앞선 선행연구 외에도 다양한 연구자별로 측정법에 관한 연구가 수행되어졌지만(Bruneau *et al.*, 2003; Rose, 2007; Burton, 2012; Jeon and Byun, 2017), 연구자별 다양한 측정 방식으로 인해 결과값의 스케일 간극, 단위 및 차원의 차이 등으로 인한 해석의 불편함이 야기된다. 또한 물리적인 요소와 이로 인해 촉발되는 사회문화적인 요소가 동시에 고려되는 회복력 연구는 미비하여 침수 전후 및 복구까지의 개념을 아우르는 회복력의 의미를 전달하기 어려운 상황이다. 이에 본

연구는 침수심에 따른 물리적 변화를 반영하는 동시에 사회·구조적 평가를 고려하기 위하여 네트워크분석 도입을 통한 회복력 평가방법을 제안하였다. 이후 그에 관한 직간접적인 영향을 정량적으로 분석하였다.

## 2. 방법론 및 정의

회복력을 평가하기 앞서 도시회복력을 명확히 정의하는 것은 정성적인 회복력 개념을 정량적으로 평가하기 위하여 필요한 첫 단계이다. 따라서 본 연구 범위인 자연재난 중 도시 침수 분야에서의 도시회복력의 정의 및 분류를 확립한 후 도시회복력을 구성하고 있는 각 속성별 평가법을 제시하였다. 이후 평가된 결과를 분석한 후 시사점을 도출하여 향후 연구 방향을 제시하였다.

### 2.1 재난분야에서의 회복력의 정의

수자원 분야에서의 회복력은 Hashimoto *et al.* (1982)에 의해 ‘충격으로부터 시스템이 빨리 복구되는 정도’로 설명되어졌다. 이중 도시침수는 사회, 체계, 구조, 인구특성 등이 복합적으로 원인이 되어 특성상 연구자와 기관별로 다양하게 그 의미가 정의되어지고 있다(부록).

회복력 평가에 앞서 회복력의 정의를 명확히 확립하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 회복력 정의를 위해 부록을 기반으로 Python 3.8을 사용하여 텍스트 빈도분석을 시행하였으며 상위 10%에 해당하는 빈도수의 단어목록과(능력, 시스템, 사회, 대응 등) 도시회복력의 의미를 동시에 고려하여 도시침수에서의 회복력을 ‘도시침수로부터 시스템을 유지하기 위한 도시의 사회적·구조적인 대응 능력’으로 정의하였다.

### 2.2 회복력의 분류 및 속성

회복력 관련 연구 문헌들은 주로 속성에 의한 분류와 측정법에 의한 분류로 나뉘게 된다. 회복력은 4가지 속성으로(4R) 구성되어 있으며 견고성, 자원부존성, 가외성, 신속성으로 나누어져 있다(Bruneau *et al.*, 2003). 견고성은(Robustness) 재해피해를 견딜 수 있는 능력을 의미하며 자원부존성(Resourcefulness) 도시의 복구 자원을 가용할 수 있는 능력을 의미한다. 또한 가외성은(Redundancy) 시스템이 작동하지 않을 때 대체할 수 있는 능력을 의미하며 신속성은(Rapidity) 신속한 복구능력을 뜻한다.

회복력을 평가하는 다양한 연구들은 4R로 속성을 구분하는데 동의를 하고 있으나 해당 속성들이 적절하게 반영되지는

**Table 1.** Classification of 4R in the literature

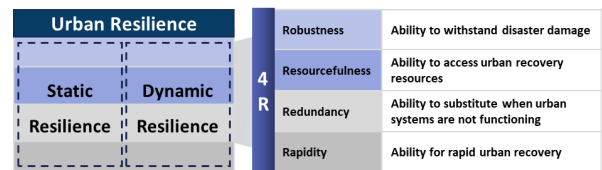
Author and institution	Robustness	Redundancy	Rapidity	Resourcefulness
Keating <i>et al.</i> (2017)	35	8	16	29
Lee <i>et al.</i> (2013)	8	1	2	1
Lee (2015)	7	1	2	2
Heo (2016)	15	1	3	5
Kim <i>et al.</i> (2016)	12	3	5	17
Lee and Kwon (2017)	6	1	2	2
Kim (2020)	8	0	2	4
Seo <i>et al.</i> (2022)	11	2	3	1
Bulti <i>et al.</i> (2019)	7	2	11	5
Edgemon <i>et al.</i> (2022)	5	2	4	4
Cutter <i>et al.</i> (2010)	5	2	10	0
Hung <i>et al.</i> (2016)	11	1	6	2
Average	10.8	2.0	5.4	6

Data: Ji and Oh (2022), The author additionally structured the data.

않고 있다. 특히 지표 기반 회복력의 정량화 관련 연구는 가외 성과 신속성을 반영하는 연구가 미비한 실정이다(Ji and Oh, 2022). 이에 Keating *et al.* (2017)이 분류한 88개의 4R별 측정 지표를 바탕으로 Ji and Oh (2022)이 정리한 결과와 본 연구에서 조사한 해외 회복력 연구들을 추가하여 정리한 표를 아래에 나타내었다(Table 1). 그 결과 신속성과 가외성은 Ji and Oh (2022)의 분류결과와 같이 여전히 적었으며 특히 가외성은 견고성에 비해 약 5배 적었다. 대부분의 연구가 지표의 가장 큰 차원을 환경, 경제, 물리 등으로 나누는 경우가 많았으며 이로 인해 연구별로 두가지 차원이 겹치거나 같은 지표가 다른 차원에 배치되는 등 회복력지표의 기준이 상이하였다. 이는 회복력을 평가하게 될 경우 평가 방법별로 일관되지 않고 한쪽으로 치우친 결과가 도출될 수 있음을 의미한다. 따라서 회복력의 큰 틀 안에서 속성별로 적절히 평가하기 위하여 4R을 기준으로 평가하는 통일된 기준이 필요하다.

### 3. 회복력의 평가

회복력의 정량화 방법은 크게 지표기반 측정법과 정량화된 식을 이용하는 방법이 존재한다. 지표기반 측정법은 주로 사회적, 구조적, 환경적 등의 차원으로 구분하여 세부 지표를 통해 회복력을 측정하는 방식이다. 이 방식은 평가하고자 하는 시스템의 사회적인 현상을 효과적으로 반영할 수 있다는 장점이 있지만 재해로 인한 구조적인 피해를 반영하기 어렵다는 단점이 있다. 이와 달리 정량화된 식 방식은 구조적인 피해



**Fig. 1.** Classification of resilience

가 반영된 실제 재해 시점의 회복력을 평가할 수 있지만 사회적 현상과 같은 비구조적인 특성을 반영하기가 상대적으로 어렵다. 이를 정리해보면 지표기반 측정법은 재해가 발생하기 전 평상시 도시의 사회적 회복력을 측정하는데 적합하며 정량화된 식 방식은 침수 시점별 수위와 같은 재해의 물리적인 변화에 따른 도시의 회복력을 평가하는데 적합하다. 따라서 본 연구에서는 도시회복력을 구성하고 있는 4R 속성에 기반하여 평상시 도시의 회복력을 의미하는 정적회복력(Static Resilience)과 재해가 발생할 시점의 회복력을 의미하는 동적회복력(Dynamic Resilience)으로 분류하였다(Fig. 1).

#### 3.1 정적회복력(Static Resilience, $R_{st}$ )

정적회복력을 통해 도시의 사회적 구조, 인구 등을 반영하여 재해에 대한 대비 및 재해 이후의 회복능력을 파악할 수 있다. 정적회복력은 사회적인 현상을 정량적으로 반영가능한 지표 기반 측정법을 통해 평가하며 평가 범위는 국내 행정력의 영향이 미치는 최소 단위이자 지역단위 자료획득이 가능한 행정동으로 설정하였다(Hong *et al.*, 2015). 또한 평상시 도시의 사회적 측면의 회복력을 나타내는 정적회복력 특성상 데이

터의 갱신속도로 인해 평가 시점과의 간극이 존재할 가능성이 있다. 이러한 간극을 최소화하고자 매년 데이터 갱신이 정기적으로 수행되는 ‘서울 열린데이터 광장’에서 제공 가능한 데이터 중 국내외 선행연구를 기반의 지표를 선정하였으며 아래 Table 2에 결과를 나타내었다.

3.1.1 데이터 전처리

사용된 데이터의 대부분은 정규성을 따르지 않은 멱함수 분포 형태가 많아 지표데이터의 전처리를 수행하였다. 채택된 지표의 단위나 값을 특정 범위로 분포시키기 위하여 정규성을 충족하도록 재구성하고 이상치 처리에 유리한 기법인 Box-Cox Scaling을 진행하였다(Eq. (1)).

$$r^\lambda = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}, & \text{if } \lambda \neq 0, \\ \log x, & \text{if } \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $r$ =스케일링된 값,  $x$ =데이터값,  $\lambda$ =변환변수를 의미한다. 이후 회복력의 각 속성에 맞추어 구분하기 위하여 요인분석(FA)을 진행하였다. 요인분석이란 여러 관찰

가능한 특성들로부터 소수의 일반적인 잠재변수를 발견하거나 만들어 내는 통계적 기법으로 측정변수들 간의 구조적 관계를 해석하는 자료 분석기법을 의미한다(Kang, 2013). 일반적으로 요인분석을 위한 데이터의 적합성을 나타내는  $KMO \geq 0.5$ , 상관관계의 적합성을 나타내는  $p \leq 0.05$  일 경우 적합하다고 판단하며 요인분석 결과는 Table 3에 나타내었다.

3.1.2 가중치 산정

각 지표별 가중치는 취약성 평가 중 지표별 가중치를 산정하는데 많이 활용되는 엔트로피 가중치를 산정하였다(Ha and Chung, 2019; Lee *et al.*, 2020). 엔트로피 크기는 분포를 통해 결정되며, 평가항목의 분포가 집중될수록 커지고 분산될수록 작아지며 Eqs. (2)~(6)를 통해 산출된 결과를 Table 4에 나타내었다.

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{i1} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Table 2. Selected static resilience indicators

Indicator	References
Number per population excluding the elderly	Bulti <i>et al.</i> (2019), Edgemon <i>et al.</i> (2022), Seo <i>et al.</i> (2022), Cutter <i>et al.</i> (2010), Hung <i>et al.</i> (2016)
Rate of people with disabilities	Bulti <i>et al.</i> (2019), Edgemon <i>et al.</i> (2022), Cutter <i>et al.</i> (2010)
Number of doctors per 1,000 population	Edgemon <i>et al.</i> (2022), Seo <i>et al.</i> (2022), Cutter <i>et al.</i> (2010), Hung <i>et al.</i> (2016)
Number of workers per total population	Edgemon <i>et al.</i> (2022), Cutter <i>et al.</i> (2010), Hung <i>et al.</i> (2016)
Rate of non- deteriorating buildings	Cutter <i>et al.</i> (2010)
Number of civil servants per 1,000 population	Kim <i>et al.</i> (2016), Bulti <i>et al.</i> (2019)
Number of schools per 1,000 population	Edgemon <i>et al.</i> (2022), Cutter <i>et al.</i> (2010), Hung <i>et al.</i> (2016)
Number of cars per total population	Edgemon <i>et al.</i> (2022)

Table 3. Result of factor analysis

Indicator	4R			
	Rapidity	Resourcefulness	Robustness	Redundancy
Number per population excluding the elderly	0.926	0.071	0.091	0.071
Rate of people with disabilities	0.914	0.178	0.069	-0.069
Number of doctors per 1,000 population	0.034	0.860	-0.004	0.035
Number of workers per total population	0.199	0.828	-0.169	-0.087
Rate of non-deteriorating buildings	-0.037	0.004	0.927	-0.078
Number of civil servants per 1,000 population	-0.370	0.239	-0.702	-0.208
Number of schools per 1,000 population	0.097	0.209	0.080	0.789
Number of cars per total population	-0.099	-0.338	-0.046	0.701

KMO=0.577, Bartlett’s  $\chi^2=858.698$  ( $p<0.001$ )

**Table 4.** Each weight by indicator for static resilience

4R	Indicator	Weight
Robustness	Rate of non-deteriorating buildings	0.429
	Number of civil servants per 1,000 population	0.571
Rapidly	Rate of people with disabilities	0.509
	Number per population excluding the elderly	0.491
Resourcefulness	Number of workers per total population	0.499
	Number of doctors per 1,000 population	0.501
Redundancy	Number of schools per 1,000 population	0.813
	Number of cars per total population	0.187

$$P_{ij} = \text{Normalization}(x_{ij}) \tag{3}$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \log p_{ij} \left( k = \frac{1}{\log m}; i = 1, 2, \dots, n \right) \tag{4}$$

$$d_j = 1 - E_j \tag{5}$$

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

(1) Calculate distance from ideal solution

$$S^+ = \left[ \sum (l_{ij} - l_{j+})^2 \right]^{1/2} \tag{7}$$

$$S^- = \left[ \sum (l_{ij} - l_{j-})^2 \right]^{1/2} \tag{8}$$

(2) Calculate score

$$S = \frac{S^+}{S^+ + S^-} \tag{9}$$

(3) Static resilience

$$R_{st} = \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^2 W_{i,k} S_{i,k} \tag{10}$$

여기서  $D$ =평가항목의 자료 행렬,  $m$ =대상지역 수,  $n$ :평가항목 수,  $P_{ij}$ : 정규화된 값,  $E_j$ : 엔트로피,  $d_j$ : 지표속성값의 다양성,  $w_j$ :가중치를 의미한다.

3.1.3 정적회복력 평가

정적회복력은 회복력 속성별 대표되는 지표를 통해 평가되며 각 지표를 종합적으로 평가하기 위하여 다기준 의사결정

론 방법 중 TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)를 적용하였다. 다기준의사결정론 방법은 도시침수 분야에서 위험성을 평가하기 위해 다양하게 사용되고 있는 이론으로 그중 TOPSIS는 이상적인 해로부터의 거리 개념에 근거한 이론이다(Park and Choi, 2008; Lee *et al.*, 2018). TOPSIS는 Eqs. (7)~(9) 과정에 의해 산정되며 해당 점수를 통해 최종적으로 행정동별 정적 회복력을 산정하였다(Eq. (10)).

여기서  $S^+$ =양의 이상적인 해,  $S^-$ =음의 이상적인 해,  $S$ =근접도 계수(점수),  $l$ =정규화된 행렬 데이터,  $l_{j+}$ =양의 기준,  $l_{j-}$ =음의 기준,  $R_{st}$ =정적회복력,  $W_{i,k}$ =지표별 가중치,  $S_{i,k}$ =지표별 점수를 의미한다( $i=1$ : 견고성, 2: 신속성, 3: 자원부존성, 4: 가외성,  $k=1$ : 각 속성별 첫 번째 지표의 가중치, 2: 각 속성별 두 번째 지표의 가중치).

3.2 동적회복력(Dynamic Resilience,  $R_{dyn}$ )

동적회복력은 도시홍수 발생 시 침수심과 같이 물리적 영향을 반영하는 회복력으로 재해예측 시점이나 발생 시점의 회복력을 평가할 수 있다. 동적회복력의 시점별 평가를 위해서 사용된 도시침수 인자는 수위이며 수위데이터를 기반으로 손상함수, 네트워크 분석을 통해 각 속성별(4R) 평가를 진행하였다.

3.2.1 손상함수 기반 평가

국내에서 홍수피해 발생 시 주로 사용되는 다차원 홍수피해산정법은 각 지역별 세부 항목별로 자산가치를 평가하여 홍수피해를 산정하는 방법이다(Shin, 2012). 이 중 건물의 피해금액을 산정할 때 건물구조물의 단가, 내구연한, 건물내용물 자산가치 비율, 침수심별 손상함수가 필요하며 해당 데이터는 KICT (2022)에서 제공하고 있는 데이터를 활용하였다. 또한 도로손상함수의 경우는 European Commission에서 제시한 아시아 지역의 도로손상함수를 사용하였다(Huizinga *et al.*, 2017).

건물의 피해예상금액을 산정할 경우 건물 구조물과 건물 내용물의 가치를 합산하여 산정하게 되지만 홍수피해의 경우 내부침수로 인한 피해가 대부분이다. MOIS (2022)에 따르면 실제 2022년 8월 홍수의 경우 주택건물 외부에서의 구조적인 피해가 일어난 경우는 단 두건으로 전체 피해대비(16,987건) 약 0.01%에 불과하였다(2022년 8월 19일 기준). 따라서 손상 함수를 기반으로 홍수피해를 산정할 때는 건물내용물 기반으로 산정하였다.

### (1) 견고성

동적회복력에서의 견고성은 외부충격이 시스템에 미치는 영향을 의미하는 SI (Systemic Impact) 개념을 일부 반영하여 평가하였다(Vugrin *et al.*, 2010).  $SI$ 는 전체 시스템의 퍼포먼스와 현재 시스템의 퍼포먼스 차로 측정되며 이 때의 퍼포먼스는 피해금액단위로 환산하여 측정하였다.  $SI$ 는 건물의  $SI(SI_b)$ , 도로의  $SI(SI_r)$ 을 가중평균하였으며 가중치는 동일한 것으로 가정하였다.

$$SI_t^d = (SI_b^d + SI_r^d) / 2 \quad (11)$$

$$SI_b^d = \frac{\sum D_{\max}^{id_b} - \sum D_t^{id_b}}{\sum D_{\max}^{id_b}} \quad (12)$$

$$D^{id_b} = DF^{id_b}(h) \times C^{id_b} \quad (13)$$

$$SI_r^d = \frac{\sum D_{\max}^{id_r} - \sum D_t^{id_r}}{\sum D_{\max}^{id_r}} \quad (14)$$

$$D^{id_r} = DF^{id_r}(h) \times A^{id_r} \quad (15)$$

여기서,  $SI$ (Systemic Impact)=시스템 영향,  $d$ =행정동,  $t$ =침수시점,  $SI_b$ (System Impact of Building)=건물영향,  $h$ =침수심(m),  $SI_r$ (System Impact of Road)=도로영향,  $D_{\max}$ =손상 함수 기준 최대 피해,  $DF(h)$ (Damage Function)= $h$ 별 손상 함수,  $C$ =가치,  $A$ =넓이( $m^2$ )를 의미한다.

### (2) 자원부존성

자원부존성의 경우 침수피해가 발생했을 경우 행정동이 동원할 수 있는 자원의 규모를 예측하여 복구할 경우 행정동이 가용가능한 예산을 통해 평가하였다. 따라서 도시침수가 발생하기 전 도시의 예상되는 피해를 기반으로 각 행정동이 동원할 수 있는 예산 규모를 판단하였다. 이 때 자원부존성을 판단하는

항목의 개념을 재해대비(Disaster Preparedness)로 정의하였으며 이를 통해 행정동 자체 예산능력으로 복구 가능한 범위를 파악할 수 있다. 재해대비를 평가하는 식은 아래 Eqs. (16) and (17)과 같으며 행정동별 예산 추정을 위해 재난이 발생할 때 쓰이는 재해·재난목적예비비와 재난관리에 드는 비용에 충당하기 위해 매년 적립하는 재난관리기금을 활용하였다.

$$DP_t^d = \frac{RF_t^d}{RF^g} \quad (16)$$

$$\frac{RF_t^d}{RF^g} = \frac{\sum D_{\max}^{id_b}}{\sum D_{\max}^{id_b}} \quad (17)$$

여기서  $DP$ (Disaster Preparedness)=재해대비,  $RF^g$ =구 단위 예비비와 재난관리기금,  $RF^d$ (Reserve Fund)=행정동 단위 예비비와 재난관리기금,  $\sum D_{\max}^{id_b}$ =동 단위 예상 최대 피해 금액,  $\sum D_{\max}^{id_b}$ =구 단위 예상 최대 피해금액을 의미한다.

### 3.2.2 네트워크 분석 기반 평가

네트워크 분석이란 노드와 링크로 구성된 데이터를 통해 각 노드간의 관계를 적절한 분석기법을 통해 정량적으로 분석하는 기법이다. 이 중 도시침수가 발생하게 될 경우 각종 복구 활동과 대피에 직접적으로 활용되는 기반시설인 도로에 관한 네트워크 분석을 실시하였다. 도로네트워크 데이터는 각종 실시간 데이터를 연동받을 수 있는 국가교통정보센터의 전국 표준노드링크를 사용하였다.

#### (1) 가외성

도로가 침수되면 그 즉시 통제가 이루어지거나 접근이 어려워져 해당 도로를 통하는 경로를 이용하는 것이 불가능해지며 실제 재해 발생 시 적절한 접근로의 미확보로 인해 피해가 발생한 사례가 다수 존재하였다(Yook, 2019). 이는 대피지역까지 이동할 경우의 경로수가 감소할 경우 대피의 용이성이 낮아짐을 의미한다. 따라서 대피를 위한 대체가능한 능력을 시스템 대체율로 정의하였으며 침수 전후의 도로 경로수를 통하여 평가하였다(Eq. (18)).

$$SR_t^d = \frac{\sum AR_t^{n:n_0}}{\sum AR^{n:n}} \quad (18)$$

여기서,  $SR$ (System Redundancy)=시스템 대체율,  $AR^{n_0, n_i}$  (Alternative Route) 침수된 도로노드( $n$ )부터 침수되지 않은 도로노드( $n_0$ )까지의 최대 경로수,  $AR^{m, n}$ =침수된 도로노드부터 침수가 안된 도로노드까지의 시점별 경로수를 의미한다.

(2) 신속성

도시홍수로 인한 도시침수가 발생할 경우 복구보다 더욱 중요한 것은 구조활동과 응급의료활동이며 이는 침수위험지역까지의 이송시간과 접근시간이 큰 영향을 미치게 된다 (Shin and Lee, 2014; Kwon *et al.*, 2015). 따라서 10분 이내의 구조시설에서 침수발생위치까지의 접근경로를 의미하는 신속접근성 개념을 통해 신속성을 평가하였으며 구조시설의 종류로는 행정안전부 긴급구조현장지휘규칙에 따라 소방서, 경찰서, 병원으로 구성하였다.

$$RA_t^d = \frac{\sum AT_t^{m, n_i}}{\sum AT^{m, n}} \quad (19)$$

여기서  $RA$ (Rapid Access)= 신속접근성,  $AT_{m, n}$  (Access Time)= 임의의 주요 도로노드( $m$ )부터 임의의 침수예정인 도로노드( $n$ )까지 10분이내의 경로수,  $AT_{m, n_i}$ =임의의 주요 도로노드부터 침수된 임의의 도로노드( $n_i$ )까지 10분 이내의 경로수를 의미한다.

3.2.3 동적회복력 평가

동적회복력은 정적회복력과 달리 침수 시점의 절대적인 회복력값이 중요하기 때문에 상대적인 거리개념을 통해 산정되는 TOPSIS 기법을 적용하기는 어렵다. 따라서 동적회복력의 경우 각 속성별 평가값들을 가중치는 1.0으로 동일한 것으로 가정한 후 선형합으로 계산하였다. 이후 정적회복력과의 스케

일 통합을 위해 이론적 동적회복력 최대값인 4.0와의 비를 통해 최종적인 동적회복력을 산정하였다. 최종적으로 동적회복력과 정적회복력의 선형합으로 도시회복력을 평가하였다.

$$R_{dyn} = (\alpha_{si}SI + \alpha_{dp}DP + \alpha_{sr}SR + \alpha_{ra}RA) / 4 \quad (20)$$

$$R_{urban} = R_{dyn} + R_{st} \quad (21)$$

여기서,  $R_{dyn}$ =동적회복력,  $R_{urban}$ =도시회복력,  $\alpha$ =동적회복력별 각 속성의 가중치를 의미한다.

3.3 회복력의 등급

산정된 도시회복력의 효과적인 가시화 및 평가를 위하여 등급구분을 진행하였으며 이를 위해 JNBC (Jenks Natural Breaks Classification)를 사용하였다. JNBC는 전체 값들의 평균값들을 기준으로 등급 내의 분산은 최소화하고 다른 등급 간의 분산은 최대화하는 기법으로 일반적으로 7~10등급 이하로 구분할 때 활용된다(Jenks, 1967). 해당 기법은 다양한 침수 관련 연구에서 활용되었으며 매우낮음, 낮음, 높음, 매우 높음 4가지 등급으로 구분되어지고 있으며 본 연구에서도 4가지 등급을 사용하였다(Lee *et al.*, 2018; Jeung *et al.*, 2023).

4. 평가방법론 적용

개발된 평가법을 분석하기 위하여 2022년 큰 피해가 발생한 지역을 대상으로 회복력을 평가하였다. 회복력 평가를 위해 한국건설기술연구원에서 제공하고 있는 건물데이터, 국가교통정보센터의 표준노드링크, 2022년 서울시 침수흔적도 등의 GIS 데이터를 사용하였다(Fig. 2).

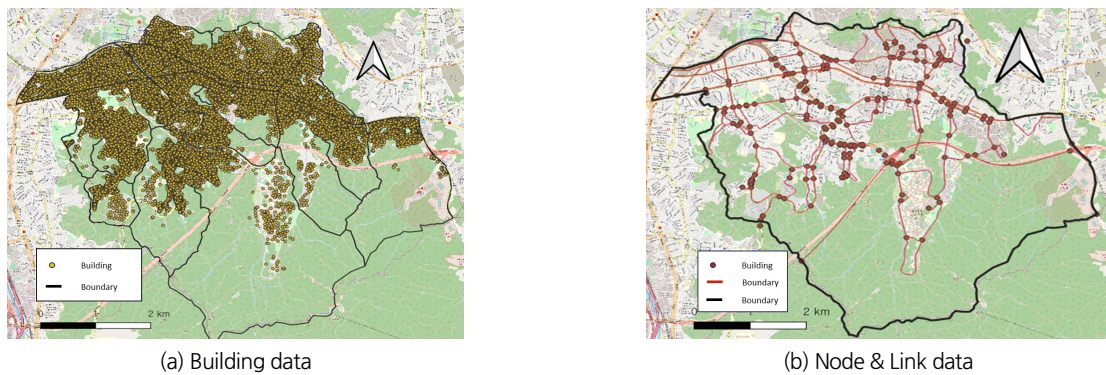


Fig. 2. GIS data in this study area

### 4.1 회복력의 평가

앞서 언급된 지표를 통하여 서울시 전체 행정동별 정적회복력을 평가하였으며 동적회복력의 경우 도시침수가 발생하지 않을 경우 자원부존성과 관련된 DP를 제외하고는 1로 동일하다. 서울시의 행정동을 대상으로 침수 전후의 회복력을 평가하였으며 가시화 결과를 Fig. 3를 통해 나타내었다.

평가지역의 경우 평상시 회복력은 매우 낮음, 낮음 등급이 17개로 전체의 약 81%를 차지하고 있어 전체적으로 회복력이 낮은 편에 속하였다. 또한 침수 이후 도시회복력의 매우 낮

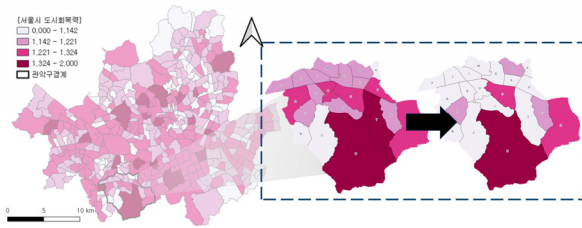


Fig. 3. Normal state (left) & Resilience after flood (right)

Table 5. Urban resilience in normal state

Region	SI		RA	SR	DP	R <sub>dyn</sub>	R <sub>st</sub>	R <sub>urban</sub>
	SI <sub>b</sub>	SI <sub>r</sub>						
A	1.00	1.00	1.00	1.00	0.03	0.76	0.27	1.03
B	1.00	1.00	1.00	1.00	0.02	0.76	0.35	1.10
C	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05	0.76	0.35	1.11
D	1.00	1.00	1.00	1.00	0.03	0.76	0.38	1.14
E	1.00	1.00	1.00	1.00	0.04	0.76	0.39	1.15
F	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06	0.76	0.40	1.16
G	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05	0.76	0.40	1.16
H	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06	0.76	0.40	1.17
I	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06	0.76	0.42	1.18
J	1.00	1.00	1.00	1.00	0.04	0.76	0.43	1.19
K	1.00	1.00	1.00	1.00	0.03	0.76	0.43	1.19
L	1.00	1.00	1.00	1.00	0.12	0.78	0.41	1.20
M	1.00	1.00	1.00	1.00	0.07	0.77	0.43	1.20
N	1.00	1.00	1.00	1.00	0.04	0.76	0.44	1.20
O	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05	0.76	0.46	1.22
P	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05	0.76	0.49	1.25
Q	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05	0.76	0.49	1.26
R	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06	0.77	0.51	1.27
S	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05	0.76	0.54	1.30
T	1.00	1.00	1.00	1.00	0.04	0.76	0.66	1.42
U	1.00	1.00	1.00	1.00	0.08	0.77	0.75	1.52

very low    low    high    very high

음등급은 총 18개로 전체의 약 76%를 차지하였다(Table 5). 가외성과(SR) 신속성의(RA) 경우 도로에 침수가 발생할 경우 해당 도로는 통제가 이루어져 통행제한이 이루어졌다고 가정된 뒤 회복력 평가를 진행하였다.

침수시점의 회복력을 통해 해당 도시가 도시침수로 인해 얼마나 영향을 받았는가를 판단 할수있다. 이 때 동적회복력과 정적회복력 중 어떠한 회복력이 침수피해에 큰 영향을 받았는지 파악하는 것은 향후 도시침수 관리에 중요한 방향이 될 수 있다. 따라서 이를 위해 정적회복력과 침수 시점의 동적회복력을 (Table 6)에 나타냈다. 이후 동적회복력 변화와 정적회복력의 비를 나타내는 영향률을 계산하였으며 이를 통해 행정동별 동적·정적회복력의 영향력을 평가하였다(Eq. (22)).

$$Impact\ Ratio = \frac{\Delta R_{dyn}}{R_{st}} \tag{22}$$

침수 직후의 회복력별 세부지표 중 SI<sub>b</sub>와 SI<sub>r</sub>는 최대 약 23% 정도 감소하였다. 이와 같은 타 지표에 비해 적은 감소는 시설의 구조적 피해가 상대적으로 미비하게 발생하는 도시침수의 특성이 반영된 것으로 해석이 가능하다. 특히 SR과 RA에서 상당한 감소가 발생하였는데 그중 E, G, J, M 도시의 경우 SR은 0인 동시에 RA 또한 0.01~0.12로 상당히 낮은 지역이다.

Table 6. Urban resilience after flood

Region	SI		RA	SR	DP	R <sub>dyn</sub>	R <sub>st</sub>	R <sub>urban</sub>
	SI <sub>b</sub>	SI <sub>r</sub>						
E	0.86	0.91	0.01	0.00	0.04	0.23	0.39	0.63
G	0.97	0.85	0.10	0.00	0.05	0.27	0.40	0.67
J	1.00	0.95	0.02	0.00	0.04	0.26	0.43	0.68
M	0.97	0.76	0.12	0.00	0.07	0.26	0.43	0.69
I	0.94	0.79	0.14	0.18	0.06	0.31	0.42	0.73
C	0.96	0.97	0.04	0.50	0.04	0.39	0.35	0.74
F	0.93	0.92	0.49	0.00	0.06	0.37	0.40	0.76
R	0.94	0.91	0.03	0.07	0.06	0.27	0.51	0.78
O	1.00	0.89	0.01	0.38	0.05	0.34	0.46	0.81
K	0.99	0.94	0.29	0.30	0.03	0.40	0.43	0.83
P	1.00	0.96	0.16	0.22	0.05	0.35	0.49	0.84
L	0.77	0.86	0.01	1.00	0.12	0.49	0.41	0.90
T	0.99	0.93	0.00	0.00	0.04	0.25	0.66	0.90
H	0.99	1.00	1.00	1.00	0.06	0.76	0.40	1.16
N	0.99	1.00	1.00	1.00	0.04	0.76	0.44	1.20
Q	0.99	1.00	1.00	1.00	0.04	0.76	0.49	1.25
S	0.99	1.00	1.00	1.00	0.05	0.76	0.54	1.30



Table 7. Urban resilience and Impact ratio

Region	R <sub>urban</sub> (Normal)	R <sub>urban</sub> (Flood)	Impact Ratio (%)	Estimated Recovery Cost (₩ (x10 <sup>6</sup> ))
E	1.15	0.63	134	372
G	1.16	0.67	124	642
J	1.19	0.68	118	1,224
M	1.20	0.69	117	840
I	1.18	0.73	108	63
C	1.11	0.74	107	1,422
F	1.16	0.76	100	1,548
R	1.27	0.78	98	618
O	1.22	0.81	91	123
K	1.19	0.83	84	57
P	1.25	0.84	83	42
T	1.42	0.90	78	297
L	1.19	0.90	71	1,968
H	1.17	1.16	0.47	99
S	1.30	1.30	0.33	195
Q	1.26	1.25	0.32	66
N	1.20	1.20	0.27	75

따라서 침수가 발생하여 도로의 통제가 발생할 경우 구조 및 대피에 상당한 어려움이 발생할 것으로 예상되며 이를 예방하기 위한 사전 대비가 필요할 것으로 판단된다.

영향률 계산 결과 M동이 가장 높았으며 S, N, Q, N동이 가장 낮았다(Table 7). 특히 M동의 경우 영향률이 약 134%로 침수로 인한 영향이 도시시스템의 사회적 영향보다 크게 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 동적회복력 변화에 비해 정적회복력이 낮아 도시침수에 의한 직접적인 피해가 사회적 대책으로 인한 감소 효과를 보기에 지나치게 크다는 의미다. 따라서 평상시 도시침수 대비를 위해 구조적인 대책 뿐만 아니라 비구조적인 대책을 정비해야 할 필요가 있다는 것을 뜻한다. 또한 S, N, Q, H동은 낮은 영향률은 해당 시점에 침수로 인한 영향이 미비함을 의미한다. 실제로 동적회복력의 전후차이가 거의 발생하지 않은 것을 확인할 수 있으며 특히 S, Q동의 경우 정적회복력이 관악구에서 상위 5개 안에 드는 지역이다. 이는 침수로 인한 영향에 비해 정적회복력이 높아 해당 지역의 사회구조적 시스템으로 충분히 대처 가능하다는 의미로 해석 가능하다.

4.2 경제적 영향

도시회복력을 고려하여 도시방지대책을 세울 경우 필요한 경제적 영향을 파악하기 위해 영향률 개념을 통해 변화되는

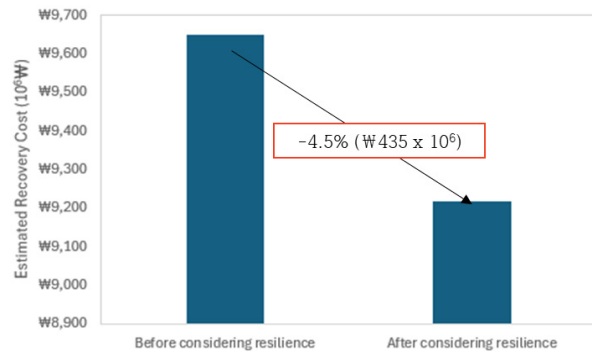


Fig 4. Estimated recovery cost considering resilience

재난복구비용을 분석하였다. 영향률이 높을 경우 사회적 효과를 기대하기 어려운 수준의 피해를 도시가 입었다는 의미이며 영향률이 낮으면 비구조적인 대책으로 충분히 도시침수피해에 대응을 할 수 있다는 의미이다. 따라서 영향률이 낮은 H, Q, N, S 지역은 사회구조적인 시스템으로 충분히 대응이 가능하며 해당 지역은 재난복구비용산정 지역에서 후순위로 정하였다. 행정안전부에 따르면 도시지역의 경우 0.3 m 이상 침수를 침수피해기준으로 분류하였으며 침수피해가 발생한 경우 세대당 3백만원을 지급한다. 이를 기준으로 0.3m 이상의 침수피해가 발생한 구조물을 재난복구비용 대상으로 가정하였으며 특히 H, S, Q, N 지역의 경우 사회구조적 능력이 충분하다고 판단되어 재난복구비용산정 대상에서 제외하였다. 이를 통

해 침수피해 전후로 변화하는 복구금액을 도출한 결과 4.35억 원(4.5%)의 복구비용 절감효과가 발생하였다(Table 7, Fig. 4). 해당 금액은 2023년 관악구 침수방지시설 설치 지원사업 예산의 약 2.2배(2억원)에 해당하는 금액으로 218여채의 단독주택과 44여채의 공동주택을 지원가능한 규모이다.

## 5. 결론

기존의 방재대책시설을 활용한 도시침수 방어는 극한홍수에 맞추어 설계홍수량을 늘려 구조적으로 대응할 수 있었지만 기후위기로 인하여 설계홍수량을 지속하여 늘리는 것은 경제적·사회적으로 효율성이 낮아지고 있다. 이에 따라 도시의 회복성에 관한 능력이 중요해지면서 도시회복력에 관한 연구가 활발해지고 있으나 평가방법, 범위 등이 달라 일관적이지 못한 실정이다. 본 연구에서는 도시회복력 평가를 위하여 선행연구에서 제시한 도시회복력 정의와 도시회복력의 의미를 분석하여 도시회복력을 정의하였으며 도시회복력을 이루고 있는 각 속성별 측정법을 제시하였다. 또한 도시회복력을 이루고 있는 속성 뿐만 아니라 회복력을 평가하는 항목에 따라 정적·동적 회복력으로 구분하였다. 정적회복력을 통해 사회구조적인 도시시스템의 평상시 회복력을 평가할 수 있으며 동적회복력을 통해 침수에 따른 구조적인 영향과 복구를 위한 도시의 기능적 능력을 평가할 수 있었다.

회복력 평가를 2022년 서울시 침수흔적도를 활용하여 적용을 하였으며 평상시 도시회복력과 침수 시점의 도시회복력을 각각 평가하였다. 예를 들어, 관악구 내의 행정동의 약 81%는 낮음 이하의 등급을 받았으며 그 중 매우낮음 등급은 4개의 지역으로 나타났다. 침수 시점의 도시회복력의 매우 낮음 등급은 16개로 확대되었다. 또한 도시회복력 중 정적회복력과 동적회복력의 영향력을 분석하기 위하여 영향률을 계산하였으며 정적회복력이 동적회복력에 비해 부족한 지역을 도출하였다. 해당 지역은 도시침수를 방지하기 위한 수해방지 시설 확충과 같은 구조적인 대책도 중요하지만 수해방지를 위한 사회구조 변화와 같은 중장기적인 대책이 중요한 지역임을 뜻한다. 이후 도시회복력을 고려한 경우와 그렇지 못한 경우를 구분하여 예상되는 복구예상비용을 도출하였다. 도출 결과 도시회복력을 고려할 경우 2022년 침수사상을 기준으로 복구비용을 예측할 시 약 4.5%의 복구비용 절감 효과를 확인하였으며 이를 통해 다양한 침수방지시설을 설치지원할 수 있음을 확인하였다. 또한 해당 복구비용 절감 효과 외의 2차적인 직간접적 효과를 고려한다면 절감효과는 더욱 커질 예상이 된다. 이와 같이 도시회복력 평가법을 제시하였으며 동시에

도시회복력이 가지는 의미를 분석하였지만 동적회복력의 경우 네트워크 분석의 영향이 상대적으로 크다는 한계점이 존재한다. 이는 더욱 세밀한 도로네트워크 데이터의 확충이 이루어진다면 보다 정밀한 평가가 이루어질 것으로 기대된다. 또한 현재는 8가지 항목으로 이루어져 있지만 보다 정확한 정적회복력을 산정하기 위한 지표들의 추가적인 연구가 필요하다. 행정동 단위의 데이터를 통하여 지표의 신뢰성과 항목수를 늘려 다양한 사회구조적인 영향을 평가할 수 있어야 한다. 이를 통해 향후 기후변화와 같은 다양한 침수시나리오 선정시 회복력에 따른 효과를 통해 침수시나리오를 선정하는 등 다양한 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후위기대응 홍수방어능력 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003470001).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., and Wisner, B. (1994). *At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Routledge, London, UK.
- Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., Shinozuka, M., Tierney, K., Wallace, W.A., and Winterfeldt, D.V. (2003). "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities." *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No. 4, pp. 733-752.
- Buckle, P., Marsh, G., and Smale, S. (2001). *Assessment of personal and community resilience and vulnerability*. EMA Project No. 15/2000, Emergency Management Australia, Canberra, Australia.
- Bulti, D.T., Girma, B., and Megento, T.L. (2019). "Community flood resilience assessment frameworks: A review." *SN Applied Sciences*, Vol.1, No.1663, pp. 1-17.
- Burton, C.G. (2012). *The development of metrics for community resilience to natural disasters*. ProQuest, Ann Arbor, MI, U.S.
- Campanella, T.J. (2006). "Urban resilience and the recovery of New Orleans." *Journal of the American Planning Association*, Vol. 72, No. 2, pp. 141-146.

- Cutter, S., Barnes, M., Berry, C., Burton, E., Evans, E., Tate, E., and Webb, J. (2008). "Community and regional resilience: Perspectives from hazards, disasters, and emergency management." *Geography*, Vol. 1, No. 7, pp. 2301-2306.
- 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*, Vol. 7, No. 1, 51.
- Edgemon, L., Freeman, C., Burdi, C., Hutchison, J., Marsh, K., and Pfeiffer, K. (2022). *Community resilience challenges index*. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C, U.S.
- Godschalk, D.R. (2003). "Urban hazard mitigation: Creating resilient cities." *Natural Hazards Review*, Vol. 4, No. 3, pp. 136-143.
- Ha, J., and Chung, G. (2019). "Snow vulnerability analysis for administrative districts in South Korea." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 6, pp. 187-195.
- Hamilton, W.A.H. (2009). "Resilience and the city: The water sector." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning*, Vol. 162, No. 3, pp. 109-121.
- Hashimoto, T., Stedinger, J., and Loucks, D. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- Henstra, D. (2012). "Toward the climate-resilient city: Extreme weather and urban climate adaptation policies in two Canadian provinces." *Journal of Comparative Policy Analysis: Research and Practice*, Vol. 14, No. 2, pp. 175-194.
- Heo, A. (2016). *Disaster resilience in local government: Indicator design and influence factors*. Ph.D. Dissertation. Sungkyunkwan University.
- Hong, J., Yeon, S., and Kim, J. (2015). Development of traffic accident frequency prediction model by administrative zone - A case of Seoul. *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 35, No. 6, pp. 1297-1308.
- Huizinga, J., De Moel, H., and Szewczyk, W. (2017). *Global flood depth-damage functions: Methodology and the database with guidelines*. No. JRC105688. Joint Research Centre, Brussels, Belgium.
- Hung, H.C., Yang, C.Y., Chien, C.Y., and Liu, Y.C. (2016). "Building resilience: Mainstreaming community participation into integrated assessment of resilience to climatic hazards in metropolitan land use management." *Land Use Policy*, Vol. 50, pp. 48-58.
- Jenks, G.F. (1967). *The data model concept in statistical mapping*. International Yearbook of Cartography No. 7, Munchen, Germany, pp.186-190.
- Jeon, E., and Byun, B. (2017). "A study on the development and application of community resilience evaluation indicators for responding to climate change." *The Geographical Journal of Korea*, Vol. 51, No. 1, pp. 47-58.
- Jeung, S., Yoo, J., Hur, D., and Seung, K. (2023). "Development of a method to create a matrix of heavy rain damage rating standards using rainfall and heavy rain damage data." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 56, No. 2, pp. 115-124.
- Ji, Y., and Oh, Y. (2022). "Study on measuring disaster resilience: Focusing on the applicability to disaster management policies." *Korean Public Administration Quarterly*. Vol. 34, No. 1, pp. 1-27.
- Kang, H.C. (2013). "A guide on the use of factor analysis in the assessment of construct validity." *Journal of Korean Academy of Nursing*, Vol. 43, No. 5, pp. 587-594.
- Keating, A., Campbell, K., Szoenyi, M., McQuistan, C., Nash, D., and Burer, M. (2017). "Development and testing of a community flood resilience measurement tool." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 17, No. 1, pp. 77-101.
- Kim, C. (2020). *Analysis of community flood resilience in relation to characteristics of flood damage*. Ph. D. Dissertation, Seoul National University.
- Kim, D., Song, S., Kang, S., Kwon, T., Kim, J., Nam, K., Yoon, D., Lee, D., Jung, J., Jo, S., and Hong, S. (2016). *Urban climate resilience: Operationalization and evaluation (II)*. Report 2016-02, Korea Environment Institute.
- Kim, Y.-S. (2000). "Techniques of flood damage investigation and flood losses data management." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 10, No. 2, pp. 36-51.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2022). Korea, accessed 28 April 2024, <<https://github.com/floodmodel/K-CDMS/wiki/Data-Download>>.
- Kwon, P., Lee, M., Huh, Y., and Yu, K. (2015). "Rearranging emergency medical service region using GIS network analysis - Daejeon metropolitan city case study." *Journal of Korean society for Geospatial Information Science*, Vol. 23, No. 3, pp. 11-21.
- Lee, D., and Kwon, G. (2017). "An analysis on the determinants of disaster resilience: Focused on natural disaster." *The Korean Association For Policy Studies*, Vol. 26, No. 2, pp. 475-509.
- Lee, E., Ji, J., and Yi, J. (2018). "A study of spatial multi-criteria decision making for optimal flood defense measures considering regional characteristic." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 4, pp. 301-311.
- Lee, J. (2015). *Climate disaster resilience in municipalities*. Ph.D. Dissertation. Seoul National University.
- Lee, S., Choi, Y., and Yi, J. (2020). "Urban flood vulnerability assessment using the entropy weight method." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 6, pp. 389-397.
- Lee, Y., Kim, S., Kim, Y., and Kim, H. (2013). "Evaluation of resilience in Anyang River basin for flood damage mitigation." *Journal of KOSHAM*, Vol. 13, No. 2, pp. 291-298.
- Mayunga, J.S. (2009). *Measuring the measure: A multi-dimensional scale model to measure community disaster resilience in the US Gulf Coast region*. Texas A&M University, TX, U.S.
- Meerow, S., Newell, J.P., and Stults, M. (2016). "Defining urban resilience: A review." *Landscape and Urban Planning*, Vol.

- 147, pp. 38-49.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2023). *Statistics on urban planning status*, Report No. 315002.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2022). Korea, accessed 28 April 2024, <[https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR\\_000000000336&nttId=94201#none](https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_000000000336&nttId=94201#none)>.
- Park, K., and Won, J.H. (2019). "Analysis on distribution characteristics of building use with risk zone classification based on urban flood risk assessment." *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 38, 101192.
- Park, M., and Choi, S. (2008). "Development of an inundation risk evaluation method based on a multi criteria decision making." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No.4, pp. 1148-1151.
- Pelling, M. (2003). *The vulnerability of cities: Natural disasters and social resilience*. Routledge, London.
- Rodin, J. (2014). *The resilience dividend: Being Strong in a world where things go wrong*. Perseus Books Group, New York, NY, U.S.
- Rose, A. (2007). "Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions." *Environmental Hazards*. Vol. 7, No. 4, pp. 383-398.
- Seo, S., Jang, S., and Jung, J. (2022). "Analysis of disaster resilience index using regional flood damage characteristics." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 22, No. 6, pp. 55-67.
- Shin, K., and Lee, T. (2014). "Priority assignment for emergency medical service provision in disaster by considering resource limitation." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 2, pp. 159-168.
- Shin, S. (2012). "Economic feasibility study of port disaster prevention facility from climate change storm surge using MD-FDA." *Ocean Policy Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 133-176.
- Timmerman, P. (1981). *Vulnerability, resilience and the collapse of society*. Environmental Monograph No. 1. Institute for Environmental Studies, Toronto University, Toronto, Canada.
- Vugrin, E.D., Warren, D.E., Ehlen, M.A., and Camphouse, R.C. (2010). *Sustainable & resilient critical infrastructure systems*. Springer, Berlin Heidelberg, Germany, pp. 77-116. doi: 10.1007/978-3-642-11405-2\_3.
- Wagner, I., and Breil, P. (2013). "The role of ecohydrology in creating more resilient cities." *Ecohydrology & Hydrobiology*, Vol. 13, No.2, pp. 113-134.
- Wildavsky, A.B. (1988). *Searching for safety*. Transaction Publishers, NJ, U.S.
- Yim, Y., and Choi, H. (2020). "Regression models on flood damage records by rainfall characteristics for regional flood damage estimates." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 22, No. 4, pp. 302-311.
- Yook, D. (2019). *Selection, operation, maintenance, and management methods for disaster management roads to effectively handle disaster situations*. KRIHS POLICY BRIEF No. 716, Korea Research Institute for Human Settlements, pp. 1-8.

## 부록

Table 8. Definition of resilience in the field of disaster management

Researcher	Definition
Timmerman (1981)	The capacity of a system to absorb and recover from an event.
Blaikie <i>et al.</i> (1994)	The ability to respond and adapt to disasters.
Wildavsky (1988)	The capacity to recover through learning despite the occurrence of unexpected risks.
Buckle <i>et al.</i> (2001)	The ability of personnel, communities, government departments, and facilities to reduce vulnerability.
Pelling (2003)	The ability to adapt to risks and prevent damages through optimized social systems and safe facilities.
Bruneau <i>et al.</i> (2003)	The capacity of a societal unit to mitigate disasters.
Godschalk (2003)	A resilient city through sustained community networks.
Campanella (2006)	The physical systems and capacities to restore a destroyed city.
Cutter <i>et al.</i> (2008)	The process of a social system adapting while responding to disaster impacts.
Hamilton (2009)	The ability to restore and provide key functions of life, industry, commerce, government, and social groups following disasters and other threats.
Mayunga (2009)	The community's ability to quickly predict, prepare, respond, and recover from disaster impacts.
Henstra (2012)	The capacity to endure stress caused by climate change, respond effectively to climate-related risks, and quickly recover from remaining adverse impacts.
Wagner and Breil (2013)	The ability of social communities to endure stress and quickly recover, adapt, and survive.
Rodin (2014)	The capacity to prevent collapse from disasters, recover from shocks and stresses when disasters occur, and learn and grow from the experience.
Meerow <i>et al.</i> (2016)	The ability of urban systems and subsystems like social, ecological, and technological networks to maintain function or quickly return to and adapt during disruptions, and to swiftly change systems that constrain the future.
OECD	The ongoing capacity of a city to maintain its functions and improve its resilience against future shocks by absorbing, adapting, transforming, and preparing across economic, social, institutional, and environmental dimensions.
UN-HABITAT	The ability of urban systems to withstand complex shocks and stresses, quickly recover, and maintain continuity of services.
UNDRR	The ability of any system, community, or society exposed to hazards to resist and efficiently manage these risks by absorbing, adapting, and quickly recovering.
ICLEI	The ability to adapt to ongoing changes and thrive, while maintaining essential functions, structures, and identities, absorbing and recovering from shocks and stresses.
Index, City Resilience (Fockefeller Foundation and ARUP)	The ability of individuals, communities, institutions, businesses, and systems within a city to survive, adapt, and grow regardless of the types of chronic stresses and acute shocks experienced.