

도시침수 시 도로네트워크가 도시회복도에 미치는 영향 분석

박형준¹ · 김동현² · 이현중¹ · 이승오^{3*}

¹홍익대학교 건설환경공학과 석사과정, ²홍익대학교 건설환경공학과 박사후연구원, ³홍익대학교 건설환경공학과 교수

The Effect of Road Networks on Urban Resilience in Flooding

Hyung Jun Park¹, Dong Hyun Kim², Hyun Jung Lee¹, and Seung Oh Lee^{3*}

¹Master Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University

²Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University

³Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hongik University

요약

홍수는 전 세계적으로 가장 빈번한 자연재해 중 하나로, 국내의 경우 지구온난화의 진행, 불투수면적의 증가, 기존 시가지 내 치수시설 확충의 한계 등 복합적인 요인으로 인하여 도시침수 발생 확률은 크게 증가하고 있다. 하지만 도시침수 방지를 위한 설계홍수량의 상향 및 대규모 토목공사는 사회·경제적으로 전 국민적인 동의를 받기 어렵다. 따라서 자연재해에 대해 지역공동체가 사회·경제적으로 감당 가능한 수준으로 대비를 하되, 신속한 복구를 통해 재해 이후 원래의 상태로 되돌아가는 능력인 회복도의 중요성이 높아지고 있다. 이에 도시회복도에 관한 다양한 연구가 수행되어지고 있지만 도시의 필수적인 서비스를 제공하는 라이프라인과 연관된 회복도 측정법은 미비한 상황이다. 특히 라이프라인 중 도로네트워크는 자연재해 발생 시 복구자원 수송과 신속한 복구를 진행하기 위한 중요한 시설인 만큼 도로네트워크는 도시의 회복도를 측정할 때 반드시 고려해야 하는 주요 요소이다. 따라서 본 연구는 회복도 특성 및 도로네트워크 기반의 회복도 평가법을 제시하고 도로네트워크가 도시회복도에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

핵심용어: 도시침수, 회복도, 도로네트워크

ABSTRACT

Flood is one of the most frequent natural disasters worldwide. In Korea, the probability of urban flooding is greatly increasing due to complex factors such as global warming, an increase in impervious areas, and limitations in expanding water supply facilities in existing urban areas. However, large-scale civil engineering works to prevent urban inundation are socially and economically difficult to obtain national consent. Recently the importance of resilience, which is the ability to return to the original state after a disaster through rapid recovery while preparing for natural disasters to a level that the local community can afford socially and economically, is increasing. Accordingly, various studies on urban resilience have been conducted, but the resilience measurement method related to the lifeline that provides essential services of the city is insufficient. However, among lifelines, road networks are important facilities for the transportation of recovery resources and rapid recovery in the event of a natural disaster, so road networks are a major factor that must be considered when measuring the degree of recovery of a city in the field of natural disasters. Therefore, this study proposes a recovery evaluation method considering the characteristics of resilience and road networks in the urban flooding field and analyzes the effect of road networks on urban resilience.

Keywords: Urban inundation, Resilience, Road network

*Corresponding author: Seung Oh Lee, seungoh.lee@hongik.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1726-3694>

Received: 15 May, 2023, Revised: 19 May, 2023, Accepted: 14 June, 2023



약어 종류

SI	Systemic Impact
BI	Building Impact
RI	Road Impact
DF	Depth-damage Function
DP	Disaster Preparedness
RF	Reserve Fund
SR	Systemic Redundancy
AR	Alternative Route
RA	Rapid Access
AT	Access Time
RCRm	Resilience Change Rate based on maximum rate of change

1. 서론

홍수는 전 세계적으로 가장 빈번한 자연재해 중 하나로, 기후변화로 인한 국지성 강우강도의 증가로 인해 사회, 경제, 환경적으로 심각한 피해를 입히고 있다. IPCC에 따르면 글로벌 물 순환의 변동성과 극한성은 기존의 추세보다 빠르게 증가하고 있으며 이는 지구온난화가 심화될수록 극한강우의 강도와 빈도가 더욱 증가할 것으로 전망하였다(IPCC, 2021). 특히 국내 도시지역의 경우 지구온난화의 진행, 불투수면적의 증가, 기존 시가지 내 치수시설 확충의 한계 등 복합적인 요인으로 인하여 도시침수 발생 확률은 매우 크게 증가하는 상황이다. 실제 서울의 경우 불투수면적이 1962년 7.8%에서 52%으로 꾸준히 증가중이며, 21세기 후반의 연평균 강수량은 평균 17.7% 증가할 것으로 예상되어 도시침수의 발생빈도는 증가할 것으로 예상되어진다(ME, 2020; Kim, 2022). 하지만 도시침수 방지를 위한 설계홍수량의 상향 및 대규모 토목공사는 사회·경제적으로 전 국민적인 동의를 받기 어렵기 때문에 자연재해에 대해 지역공동체가 사회·경제적으로 감당 가능한 수준으로 대비를 하되, 신속한 복구를 통해 재해 이후 원래의 상태로 되돌아가는 능력을 중요시하는 회복도에 관한 관심이 높아지고 있다(Wildavsky, 1988; Choi, 1994; Vugrin et al., 2010).

회복도의 중요성이 증가되면서 도시침수 분야에서의 도시회복도에 관한 다양한 연구가 수행되어지고 있다. Jeon and Byun(2017)은 6개 항목(사회, 경제, 제도, 인프라, 커뮤니티 역량, 환경), Cutter et al.(2010)은 5개 항목의(사회, 경제, 제도, 인프라, 커뮤니티 자본) 평가지표를 기반으로 회복도를 분석하였다. 이 외에도 Mayunga(2009), Burton(2012) 등은 지표 기반 측정법을 통해 회복도를 측정하는 방식을 제시하였다. 하지만 지표기반 측정법은 정량적 지표의 타당성, 항목별 변수 선택, 각 변수들의 유효성 부족 등의 한계점이 존재한다. 또한 데이터 취득의 어려움으로 인해 작은 지역 단위의 회복도 측정과 실제 자연재해 발생 시점의 회복도를 측정하는데 어려움이 있다. 이와 같은 시공간적 한계를 극복하고자 지표기반 측정법 외 방법으로 정량화된 식을 이용하는 방법이 제시되고 있다. Bruneau et al.(2003)은 인프라의 상태를 통해 회복도 저하(Resilience Loss) 측정법을 제시하였으며 Rose(2007)는 경제적 생산성을 통한 측정법을 제시하였지만 지표 기반 측정법과는 달리 특정 영역의 회복도만 고려한다는 한계가 있다. Vugrin et al.(2010)은 자연재해 후 복구노력(Recovery Effort)이라는 개념을 고려하여 자연재해 후 복구과정까지 포함한 회복도 정량법을 제시하였지만 복구노력을 측정하는 방법에 대해서는 정확한 측정법을 제시하지 못하였다. 특히 도시의 필수적인 서비스를 제공하는 도로, 전기, 가스, 수도와 같은 라이프라인을 고려하는 회복도 측정법은 일부 존재하나 지표기반 혹은 라이프라인 자체의 회복도를 고려하는 연구가 주를 이루고 있다. 하지만 라이프라인 중에서도 도로네트워크는 자연재해 발생 시 복구자원 수송과 신속한 복구를 진행하기 위한 중요한 시설로, 선진국들은 자연재해 발생 시 도로의 역할을 중요하게 여기고 있다. 실제로 일본의 경우 재난 발생 시 원활한 구조 및 복구 활동

을 위하여 방재도로를 지정하는 등 자연재해 상황 속 주요 도로를 통해 신속한 복구활동을 진행하고 있다(Yook, 2019). 이처럼 도로네트워크는 자연재해분야에서 도시의 회복도를 측정할 때 반드시 고려해야하는 주요 요소 중 한 가지로 볼 수 있다. 따라서 본 연구는 자연재해분야에서의 회복도 특성 및 도로네트워크 기반의 회복도 평가법을 제시하고 도로네트워크 복구가 도시회복도에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 본론

2.1 회복도(Resilience)

2.1.1 회복도에 관한 이론

회복도는 생태계의 회복도와 안정성(Resilience and Stability of Ecological Systems)에서 나온 개념으로 Holling(1973)에 의해 대중화된 개념이다. 해당 연구에서는 생태적 관점에서의 회복도에 관한 개념을 제시하였으며 다양한 분야에서의 회복도에 많은 영향을 미치는 기본적인 토대가 되었다(Timmerman, 1981; Wildavsky, 1988).

회복도는 앞에서 언급했듯이 심리학, 경제학, 생태학, 공학 등 다양한 분야에서 사용되어지는 개념이지만 주로 생태학과 공학 분야에서 광범위하게 사용되어지고 있다. 회복도에 관한 정의는 분야별, 연구자별로 굉장히 다양하지만 일반적으로 생태학에서의 회복도는 단일 균형에 머무르지 않고 적응적 주기를 통해 여러 균형을 순환하는 개념을 의미한다(Kang et al., 2022). 또한 생태시스템과 사회시스템은 밀접한 관계가 있다고 판단하여 생태적 관점에서의 회복도 개념을 사회시스템적 관점으로 확대를 하였고, 이는 재난과 같이 예측하기 어려운 위기에 대한 접근과 전략을 수립하는 기반이 되었다(Folke et al., 2010).

2.1.2 공학(재난)분야에서의 회복도

공학 분야 중 재난 분야는 기후변화로 인해 피해 및 빈도가 증가되고 있는 재해위험 관리 분야에서 주목받는 개념이다(Manyena, 2006; Nelson et al., 2007). Timmerman(1981)에 의해 처음 사용되었으며 ‘재해발생을 흡수하고 복구할 수 있는 역량’으로 정의하였다. 특히 재난분야에서의 회복도는 사회, 환경, 기술적 요소가 복합적으로 결합되어 발생하는 현상인 재난의 특성상 연구자 및 기관에 따라 다양하게 정의되고 있으며 단순히 충격 이전의 상태로 되돌아가는 복구와는 다른 관점에서 접근 되어지고 있다(Table 1).

Table 1. Definition of resilience by authors

Author	Definition of resilience
Timmerman (1981)	Ability to absorb and recover from disasters
Marsh et al. (2001)	Quality of people, communities, government departments and infrastructure that reduce vulnerability
Godschalk (2003)	A city that is resistant to disasters through a continuous network of human communities
Pelling (2003)	The ability to adapt to threats, reduce or avoid damage through social systems adapted to disasters and risk-free architecture
Campanella (2006)	The ability and physical systems to recover a destroyed city
Cutter et al.(2008)	The process by which the social system adapts while responding to the threat of accepting disaster impacts
ICLEI (2012)	It means the capacity or ability of the community to recover from crises and disasters, to adapt, to survive, and to overcome stress
OECD (2014)	Ability to absorb, recover and adapt to impacts from economic, environmental, social shocks or chronic pressures for well-being and inclusive growth

회복도를 구성하고 있는 특징 및 요소에 관한 연구는 다양하게 이루어지고 있지만 널리 알려진 개념은 Bruneau et al.(2003)이 제시한 네 가지 요소의 개념이다. Bruneau et al.(2003)은 회복도를 견고성(Robustness), 가외성(Redundancy), 자원부존성(Resourcefulness), 신속성(Rapidity)으로 특징을 설명하였다. 견고성은 외부충격에서 시스템이 감당 가능한 능력을 의미하고 가외성은 시스템 손상 시 시스템의 원활한 작동을 위한 대체 정도를 의미한다. 자원부존성은 외부 충격을 받을 때 시스템이 동원 가능한 자원의 능력을 의미하며 신속성은 외부충격을 최소화하기 위해 빠르게 복구하는 능력을 의미한다.

2.2 방법론

2.2.1 도시침수 분야의 회복도 정의 및 측정 방법

회복도를 정량적으로 측정하기 앞서 정확한 회복도 측정의 접근을 위해 도시침수 분야에서의 회복도의 개념을 정의하였다. 도시침수는 다른 재해와는 달리 비교적 짧은 시간에 일어나는 재해이기 때문에 도시의 신속한 복구작업과 복구능력을 회복도 측정 과정에서 중점적으로 고려하였다. 이에 본 연구에서는 회복도를 ‘도시침수 발생으로 시스템이 받는 침수영향으로부터 시스템을 유지하기 위한 도시의 복구 가능한 역량’으로 정의하였고 회복도를 구성하는 요소별 특징을 기반으로 도시회복도를 측정하였다. 회복도의 구성은 Bruneau et al.(2003)이 제시한 네 가지 구성 요소를 사용하였으며 각 회복도 요소 중 견고성과 자원부존성은 피해산정기법, 가외성과 신속성은 네트워크 분석기법을 통하여 측정하였다. 그 후 최종적으로 각 요소의 선형합을 통하여 회복도를 정량화하였다.

2.2.2 피해산정기법

국내에서 활용되어진 피해산정기법에는 농업피해를 기준으로 다른 항목들의 피해를 추정하는 간편법, 침수면적을 바탕으로 피해를 산정하는 개선법, 대상지역의 자산규모 및 공간적 분포와 공간자료 등 각종 데이터를 지리정보시스템(GIS)를 통해 분석하는 다차원 홍수피해산정법으로 나뉘어진다. 현재는 주로 다차원 홍수피해산정법을 사용하고 있으나 자산유형별 침수심과 손상률의 관계를 나타내는 손상함수를 대부분 일본 치수경제조사메뉴얼(MLIT, 2005)에서 차용하고 있는 등 국내 실정에 맞지 않다는 한계점이 있다. 이에 한국건설기술연구원(Kim et al., 2019)에서는 손상함수 및 측정방식을 국내 실정에 맞도록 개선하였으며 본 연구에서는 해당 방식을 사용하였다. 아래 Table 2는 국내 데이터 기반으로 한국건설기술연구원(KICT)에서 개발한 손상함수의 일부를 나타낸 표이다.

Table 2. Damage rate by facility category (Kim et al., 2019)

Category	0 m	0~0.3 m	0.3~0.6 m	0.6~0.9 m	0.9~1.2 m	1.2~1.5 m	1.5~1.8 m	1.8~2.1 m	2.1~2.4 m	2.4~2.7 m	2.7~3.0 m	3.0 m~
Apartment	0	4.5	11.3	17.4	23	28.1	32.7	39	46.4	51.1	53.1	53.8
Tenement house	0	3.7	10.5	16.1	20.9	25.9	30.9	36.6	43.1	47.4	49.6	50.1
Neighborhood living facility 1	0	2.5	5	8	11	13	16	19	22	25	29	32
Neighborhood living facility 2	0	1	9	14	16	18	20	23	26	30	34	38
Religious facility	0	5	10	11	11	12	12	13	14	14	15	17
Cultural and assembly facilities	0	5	10	11	11	12	12	13	14	14	15	17
Sales facility	0	1	9	14	16	18	20	23	26	30	34	38
Transportation facility	0	4.5	9	11	12	16	20	24	28	30	30	30
Medical facility	0	2	11	12	13	14	16	17	18	20	22	24

Unit: %

1) 견고성(Robustness)

회복도 측정 시 견고성은 도시가 침수에 얼마나 감당이 가능한가를 판단한다. 이를 위해 Vugrin et al.(2010)이 국가기반 시설의 회복도를 측정하기 위해 고안한 시스템적 영향(Systemic Impact)을 활용하였고 이를 통하여 건물과 도로를 대상으로 견고성을 측정하였다.

$$SI_t^d = (BI_t^d + RI_t^d)/2 \quad (1)$$

$$BI_t^d = \frac{\sum D_{\max}^{id_b} - \sum D_t^{id_b}}{\sum D_{\max}^{id_b}} \quad (2)$$

$$RI_t^d = \frac{\sum D_{\max}^{id_r} - \sum D_t^{id_r}}{\sum D_{\max}^{id_r}} \quad (3)$$

$$D^{id_b} = DF^{id_b}(h) \times C^{id_b} \quad (4)$$

$$D^{id_r} = DF^{id_r}(h) \times A^{id_r} \quad (5)$$

여기서, SI : 시스템이 받은 영향, BI : 건물이 받은 영향, RI : 도로가 받은 영향, d : 동, t : 측정시간, id_b : 건물의 고유번호, id_r : 도로의 고유번호, h : 침수심(m), $DF(h)$: h별 손상률(%), D_{\max} : 손상함수 기준 최대 피해, C : 가치(KRW), A : 넓이(km²)를 나타낸다.

2) 자원부존성(Resourcefulness)

도시침수 시 도시가 동원할 수 있는 가용능력을 측정하는 자원부존성은 도시의 재해재난목적예비비를 통해 산출하였다. 재해재난목적예비비란 일반회계 예비비 중 사용 목적이 재해재난으로 한정되어있는 예비비로 별도로 예산에 계상할 수 있는 예비비를 의미한다(MOIS, 2023). 침수가 발생하게 되면 해당 예비비로 복구작업이 진행되기 때문에 재해재난목적예비비를 근거로 평상시 복구자원을 동원할 수 있는 능력인 재해대비를 통해 자원부존성을 측정하였다.

$$DP_t^d = \frac{RF_t^d}{RF^g} \quad (6)$$

$$RF_t^d = \frac{\sum^d D_t^{id_b}}{\sum^g D_t^{id_b}} \times RF^g \quad (7)$$

여기서, DP : 재해대비, RF^d : 동 단위의 재해재난목적예비비(KRW), RF^g : 구 단위의 재해재난목적예비비(KRW), $\sum^g D_t^{id_b}$: 구 단위 피해(KRW), $\sum^d D_t^{id_b}$: 동 단위 피해(KRW)를 의미한다.

2.2.3 네트워크 분석기법

네트워크 분석이란 특정 구조나 집단 간의 관계를 노드와 링크로 구분하여 확산 및 각 노드간의 관계를 계량적으로 분석하는 기법을 의미한다. 본 연구에서는 실제 도시침수 시 발생하는 다양한 교통소통정보를 실시간으로 반영하기 위하여 국토교통부에서 구축 및 관리 중인 전국단위 표준 노드·링크와 5분 주기 단위의 교통소통정보를 파이썬(Python) 코드를 통하여 네트워크 분석을 진행하였고 아래 Fig. 1을 통해 각 항목별 네트워크 분석의 흐름도를 나타내었다.

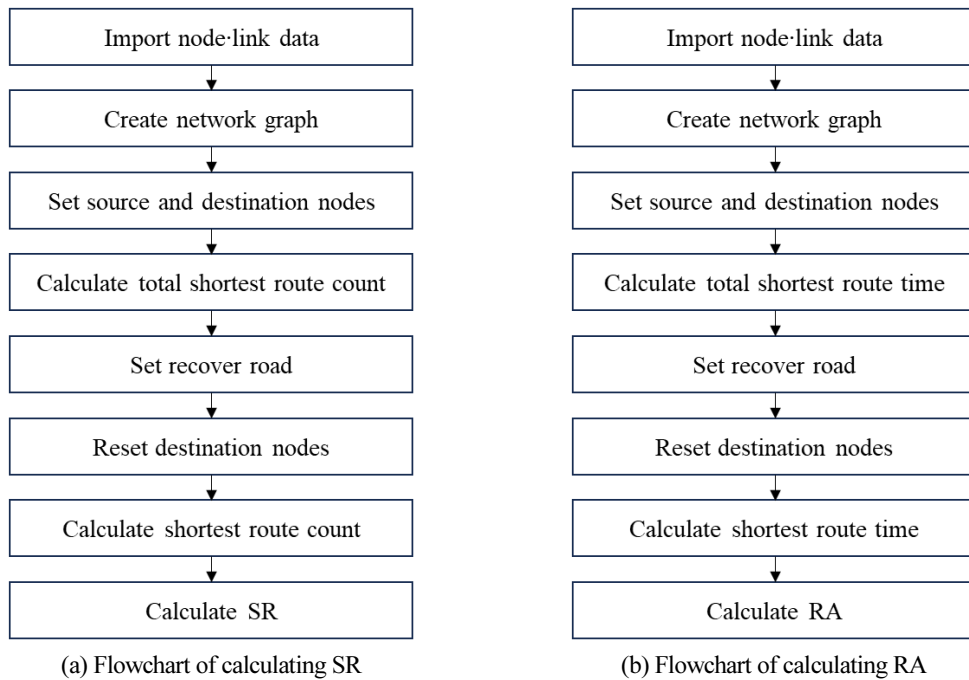


Fig. 1. Flowchart of network analysis

1) 가외성(Redundancy)

도시침수 시 침수가 발생하지 않은 안전지역으로 대피하는 것은 시민들의 안전과 직접적으로 연결되어있는 중요한 작업이다. 시민들이 원활하게 대피하기 위해서는 도로 네트워크가 침수가 발생해도 마비가 되지 않고 제 기능을 할 수 있는지 파악해야 한다. 따라서 자원을 대체할 수 있는 정도를 나타내는 가외성은 도시 내 도로가 침수되면 다른 경로로 대체할 수 정도를 나타내는 시스템대체율을 통해 파악하였다.

$$SR_t^d = \frac{\sum AR_t^{n,n_0}}{\sum AR^{n,n}} \tag{8}$$

여기서, SR : 시스템대체율, AR^{n,n_0} : 모든 노드(n)부터 침수가 안된 노드(n_0)까지의 경로(수), $AR^{n,n}$: 모든 노드부터 모든 노드까지의 경로(수)를 의미하며 네트워크분석을 통해 계산하였다.

2) 신속성(Rapidity)

주요 구조시설에서 침수가 발생한 위치까지 빠르게 접근하는 능력은 위급상황 속에서 시민들의 생존확률과 밀접한 연관이 있다. 따라서 주요 위치에서 침수가 발생한 위치까지의 접근 가능한 시간의 능력을 의미하는 신속접근성을 통하여 도시의

신속성을 파악하였다. 이때 주요 위치는 긴급구조기관인 소방서, 통제단 기구인 경찰서, 의료활동을 위한 병원으로 구성하였다(NFA, 2022).

$$RA_t^d = \frac{\sum A T^{m,n} - \sum A T_t^{m,n_t}}{\sum A T^{m,n}} \quad (9)$$

여기서, RA : 신속접근성, $A T^{m,n}$: 주요노드(m)부터 모든 노드(n)까지의 접근시간(hr), $A T^{m,n_t}$: 주요노드부터 침수 노드(n_t)까지의 접근 시간(hr)을 의미하며 네트워크분석을 통해 계산하였다.

2.2.4 도로복구 우선순위 산정

회복도 측정 후 도로네트워크 복구에 따른 회복도의 영향을 분석하고자 도로 id별 도로위험도 기반 복구우선순위 산정법을 개발하였다. 위험도를 측정하기 위하여 구간별 도로의 피해와 교통정보를 반영하였고 이를 위해 국토교통부의 도로소통정보를 API를 통해 제공받았다. 도로소통정보는 위험도 산정을 위한 가중치로 사용하였으며 가중치 산정 기준은 도로교통단 산하 교통과학연구원에서 제안한 교통상황별 속도값 범위를 사용하였다(Table 3).

$$RR_t^{id_r} = TI_t^{id_r} \times D_t^{id_r} \quad (10)$$

여기서, RR : 도로위험도, TI : 교통정보가중치, D^{id_r} : 도로의 피해(km^2)를 의미하며 도로위험도가 높을수록 도로의 복구를 결정하는 과정에서 우선순위는 높아진다.

Table 3. TI by traffic situation

Traffic conditions	Velocity (km/h)	Traffic information weight
Heavy	0~20	3
Slow	20~40	2
Smooth	Over 40	1

도로복구를 진행하기 앞서 예상되는 도로복구비용을 산정하는 것은 도로복구를 결정하기 위한 중요한 과정 중 하나이다. 도로복구비용을 산정하기 위하여 정보공개청구를 통해 제공받은 km당 복구비용 데이터를 사용하였다.

2.2.5 적용

서울특별시 관악구 봉천동은 2022년 8월 8일부터 8월 17일 사이에 발생한 집중호우로 큰 피해가 발생한 지역 중 한 곳이다. 이 지역은 특히 도립천 범람 외에도 내수 침수로 인해 피해가 발생한 지역으로 그 중에서도 도로 침수가 크게 발생하였다. 봉천동의 침수심 자료는 서울특별시에서 제공하고 있는 침수흔적도를 사용하였고 도로네트워크는 표준 노드·링크데이터를 사용하였다(Fig. 2). 또한 회복도 변화를 비교하기 위하여 도로 위치별로 차수판, 배수로 및 맨홀덮개의 청소 등 침수를 방지한 상황을 가정하였다. 이후 위험도를 기반으로 도로복구 우선순위가 가장 높은 도로를 복구한 후 도로의 견고성을 나타내는 RI를 재산정하였다. 또한 복구된 도로를 기반으로 도시의 가외성을 나타내는 SR, 신속성을 나타내는 RA와 자원부존성을 나타내는 DP를 복구 후 기준으로 산정하여 회복도를 산출한 후 도로네트워크와 회복도 간의 영향을 분석하였다.

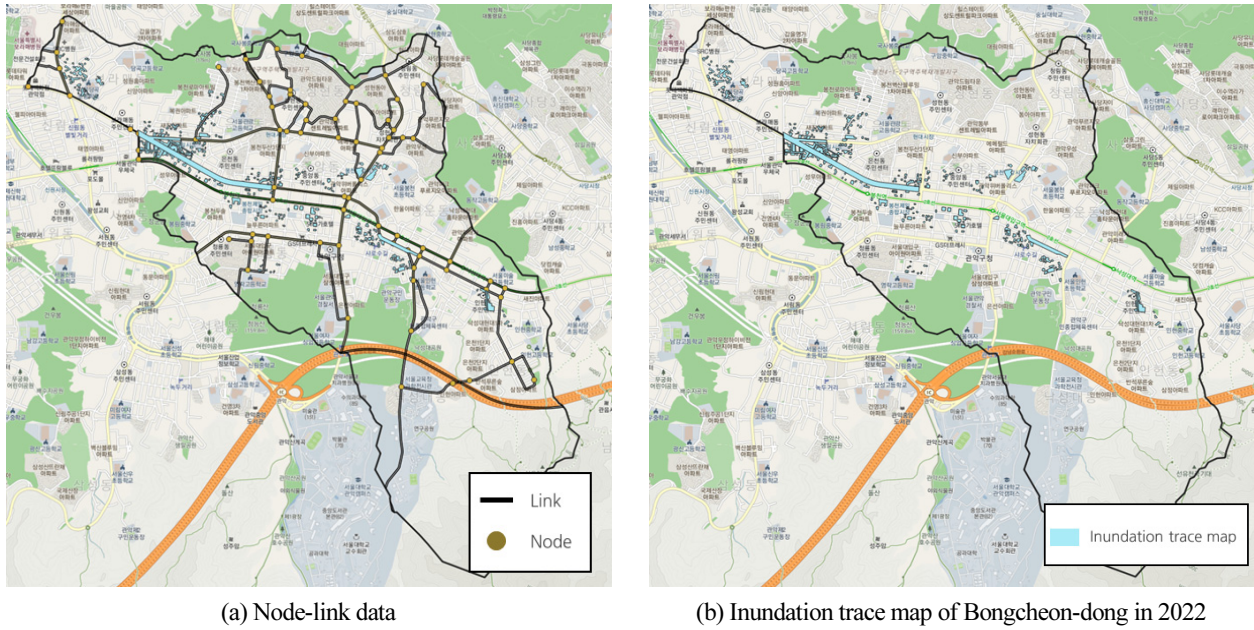


Fig. 2. Road network and inundation trace map of Bongcheon-dong

2.3 결과

2.3.1 2022년 봉천동 회복도

2022년 봉천동에 발생한 침수는 최대 침수심이 0.6 m로 나타났으며 침수된 노드는 표준노드 기준 총 9개로 분석되었다. 건물의 침수면적보다 도로의 침수면적이 상대적으로 더 넓었으며 재해대비항목(DP)의 경우 봉천동만 적용범위를 한정하였으므로 관악구의 모든 예비비를 봉천동에 사용할 수 있다고 가정하였다. 아래 그림은 2022년 8월 발생한 도시침수 기반으로 산정한 표준링크 별 도로위험도와 침수된 노드 위치를 나타낸 그림이다(Fig. 3).

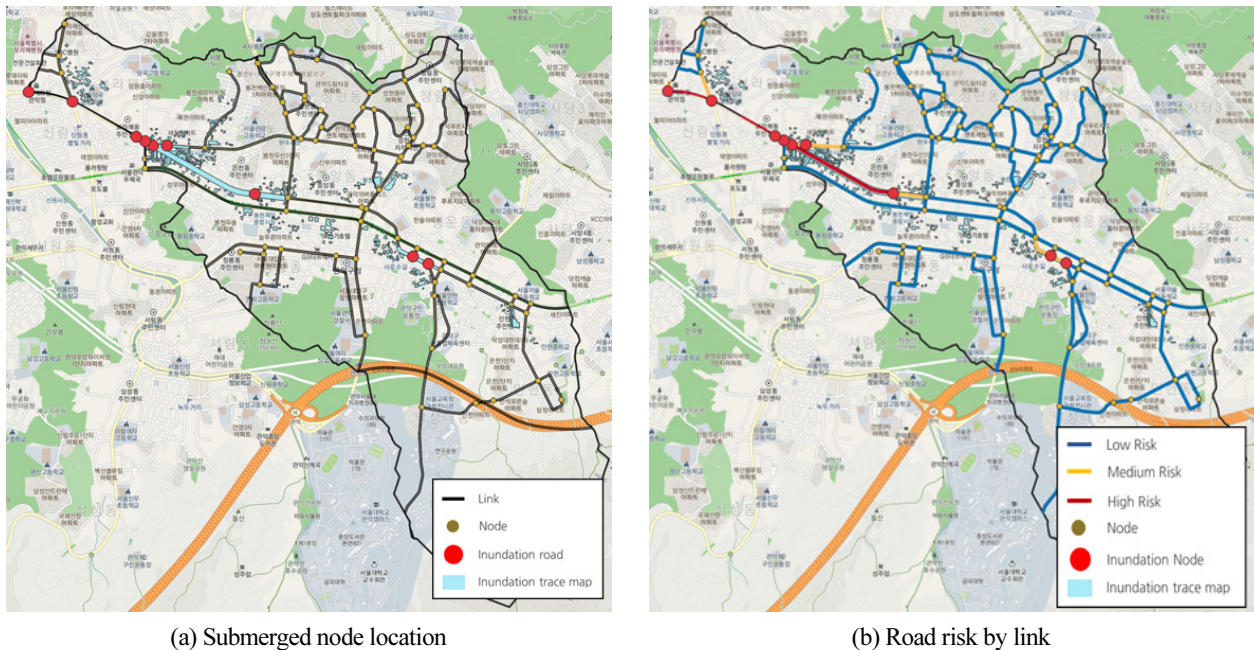


Fig. 3. Road risk by inundation depth in August 2022

아래의 Table 4는 2022년 8월 침수심 기반으로 산정한 회복도의 결과로 3.784로 측정되었다. DP항목이 관악구의 모든 예비비를 사용하는 것으로 가정되어 1로 가장 높게 측정이 되었으며 가장 낮게 측정된 항목은 SR로 가외성이 부족한 것으로 분석되었다. 또한 건물 밀도가 높고 침수면적이 동면적 대비 상대적으로 작아 BI값이 높게 측정되었다.

Table 4. Resilience at the time of inundation in August 2022

SI		SR	RA	DP	Resilience
BI	RI				
0.9924	0.9509	0.9055	0.9069	1.000	3.784

2.3.2 도로별 침수방지 및 복구 시나리오의 적용

1) 도로 ID별 사전 침수 방지(Scenario 1)

2022년 8월 집중호우가 발생하기 전 침수가 예상되는 도로의 차수판, 배수로 및 맨홀덮개의 청소와 같은 작업을 통해 침수를 사전 방지한 상황을 가정하여 기존 회복도와 시나리오 적용 후의 회복도 변화를 측정하였다(Table 5). 이 때 높은 건물 밀도와 동면적 대비 작은 침수면적으로 인하여 침수 방지 시나리오 적용 후 변화된 회복도 값의 증가폭이 크지 않아 RCRm 지표를 활용하였다. RCRm은 시나리오 적용 전의 회복도 값이 최대 회복도 값인 4까지의 변화량을 시나리오 적용 전 회복도와 시나리오 적용 후 회복도의 변화량으로 나눈 값을 의미한다(식 (11)). RCRm 지표를 활용하여 기존 회복도에서 최대로 복구 가능한 정도 대비 시나리오가 적용된 경우의 회복도 변화량을 통해 회복 효과를 정량적으로 나타낼 수 있었다.

$$\frac{\Delta R_0^i}{\Delta R_0^{\max}} \times 100 \quad (11)$$

여기서, ΔR_0^{\max} : 시나리오 적용 전 회복도와 최대 회복도와의 변화량, ΔR_0^i : 시나리오 적용 전 회복도와 i시나리오 적용 후의 회복도 변화량을 의미한다.

Table 5. Resilience by each road through inundation prevention scenario

Road ID	SI		SR	RA	DP	Resilience	RCRm (%)
	BI	RI					
No prevention	0.9924	0.9509	0.9055	0.9069	1.000	3.784	-
1200024900	0.9924	0.9608	0.9160	0.9205	1.000	3.813	13.41
1200025800	0.9924	0.9564	0.9160	0.9222	1.000	3.813	13.20
1200022600	0.9924	0.9604	0.9160	0.9170	1.000	3.809	11.71
1200023400	0.9924	0.9565	0.9160	0.9176	1.000	3.808	11.11
1200018900	0.9924	0.9615	0.9160	0.9147	1.000	3.808	10.92
1200022400	0.9924	0.9535	0.9160	0.9171	1.000	3.806	10.19
1200023100	0.9924	0.9522	0.9160	0.9173	1.000	3.806	9.941
1200015200	0.9924	0.9521	0.9160	0.9148	1.000	3.803	8.792
1200015800	0.9924	0.9525	0.9160	0.9142	1.000	3.803	8.594

Table 5를 통해 복구효과가 큰 상위 3개의 도로 ID와 하위 3개의 도로 ID를 확인하였다(상위도로 ID: 1200024900, 1200025800, 1200022600, 하위도로 ID: 1200015800, 1200015200, 1200023100). 최상위도로 ID의 경우 RCRm값은 약 13.41%, 최하위도로 ID의 경우 RCRm은 약 8.594%로 최상위도로 ID와 약 1.5배의 효과 차이가 있는 것으로 분석되었다.

2) 침수 방지 및 도로복구 후 회복도 변화(Scenario 2)

도로별로 침수방지 시나리오를 적용한 후 예상되는 도로위험도가 가장 높은 하나의 도로를 복구하는 시나리오를 적용한 회복도를 아래 Table 6에 나타내었다. 여기서 복구작업은 해당 도로의 침수된 물을 모두 배수하는 작업과 쓰레기 및 유사 청소작업으로 가정하였으며 복구비용은 정보공개를 통해 제공받은 km 당 복구비용을 활용하였다.

Table 6. Resilience after recovery scenario by each road

Road ID	SI		SR	RA	DP	Resilience	RCRm (%)
	BI	RI					
No prevention	0.9924	0.9509	0.9055	0.9069	1.000	3.784	-
1200024900	0.9924	0.9702	0.9265	0.9305	0.9891	3.827	20.06
1200022600	0.9924	0.9659	0.9265	0.9277	0.9890	3.822	17.72
1200025800	0.9924	0.9663	0.9265	0.9357	0.9794	3.821	17.09
1200018900	0.9924	0.9671	0.9265	0.9254	0.9890	3.821	16.93
1200023400	0.9924	0.9671	0.9265	0.9254	0.9887	3.820	16.78
1200022400	0.9924	0.9591	0.9265	0.9278	0.9890	3.819	16.20
1200023100	0.9924	0.9620	0.9265	0.9308	0.9794	3.814	13.80
1200015200	0.9924	0.9619	0.9265	0.9284	0.9794	3.811	12.66
1200015800	0.9924	0.9624	0.9265	0.9277	0.9794	3.811	12.46

RCRm이 가장 큰 상위 3개의 도로 ID와 하위 3개의 도로 ID를 확인가능하며 이는 복구 전 시나리오와 같은 도로 ID값임을 확인하였다(상위 노드 ID: 1200024900, 1200022600, 1200025800, 하위 노드 ID: 1200015800, 1200015200, 1200023100). 최상위도로 ID의 경우 20.06%, 최하위도로 ID의 경우 12.46%로 복구 전 시나리오의 최상위·하위도로별 RCRm의 차이보다 더욱 큰 차이가 발생하였다. 아래 Fig. 4를 통해 Scenario 1의 RCRm결과값과 Scenario 2의 RCRm의 값을 비교하여 나타내었다.

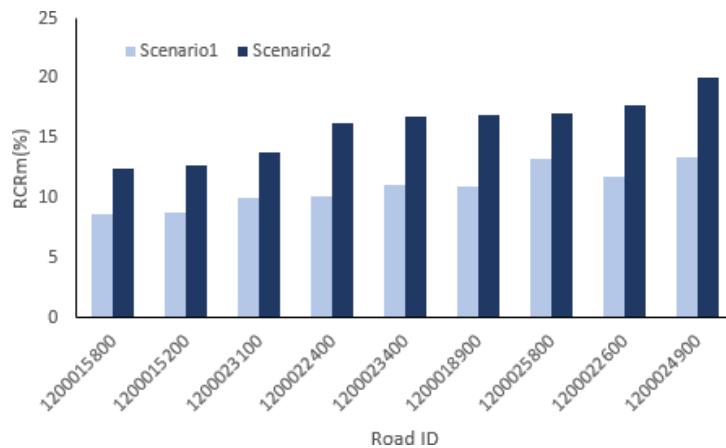


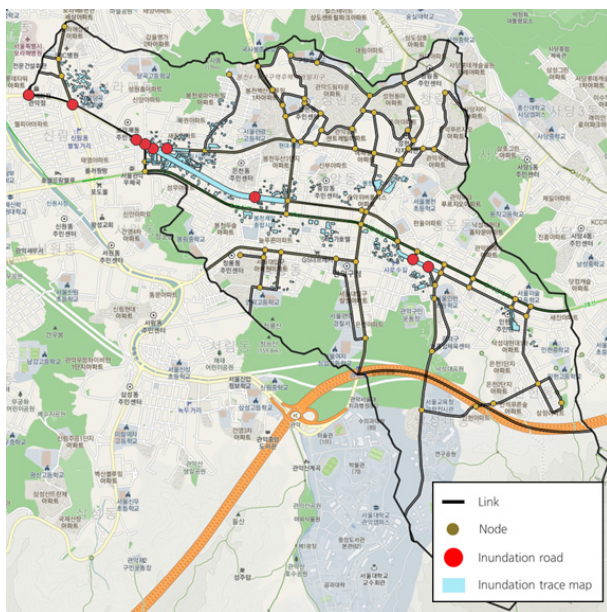
Fig. 4. RCRm by Scenario 1 and Scenario 2

3) 상위도로 ID 그룹과 하위도로 ID 그룹의 회복도

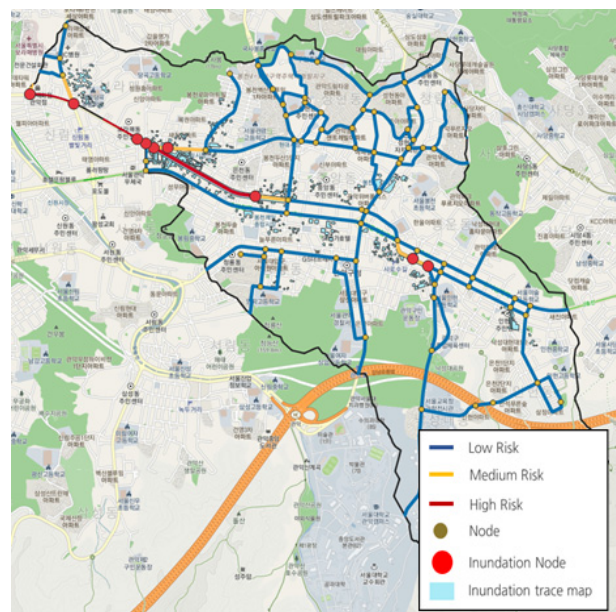
도로네트워크의 침수 방지작업과 복구에 따른 회복도 변화율을 기반으로 상위/하위 3개의 도로를 각각 Group 1과 Group 2로 구분하였으며 침수방지 작업과 복구 작업을 가정한 Scenario 2를 적용하여 그룹별 회복도 및 RCRm값을 확인하였다

Table 7. Prevention-Recovery scenarios by each group

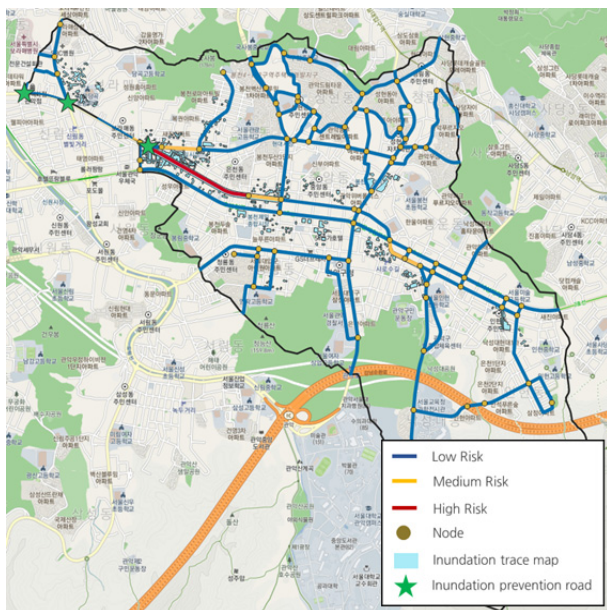
Road ID	SI		SR	RA	DP	Resilience	RCRm (%)
	BI	RI					
No prevention	0.9924	0.9509	0.9055	0.9069	1.000	3.784	-
Group 1 (top 3 roads)	0.9924	0.9816	0.9475	0.9565	0.9890	3.989	44.42
Group 2 (sub 3 roads)	0.9924	0.9656	0.9475	0.9460	0.9794	3.852	31.38



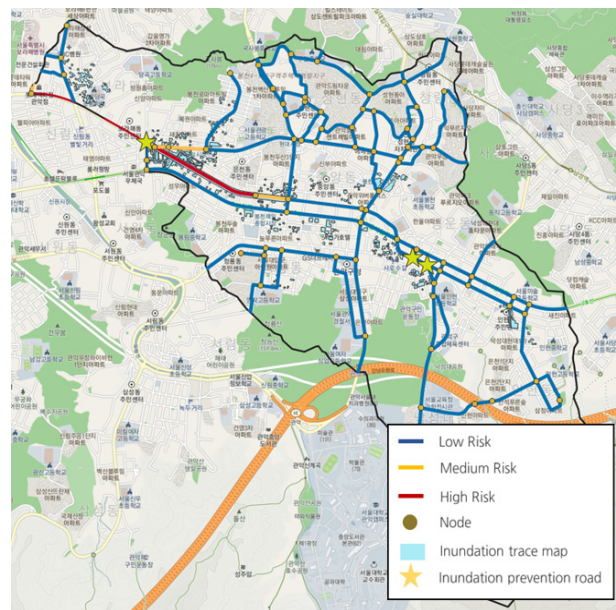
(a) Submerged node location



(b) Scenarios without flood protection and recovery



(c) Prevention-Recovery scenarios by group 1



(d) Prevention-Recovery scenarios by group 2

Fig. 5. Road risk by each scenarios

(Table 7). Group 1은 최대 회복도인 4에 근접하는 값이 나왔으며 각 그룹별 RCRm 값은 44.42%와 31.38%로 분석되었다. 아래 Fig. 5는 각 시나리오별 변화된 회복도에 따른 도로의 위험도를 나타낸 그림이다. 침수에 따른 복구효과가 큰 도로 ID 그룹인 Group 1의 도로회복도 변화폭이 가장 높았으며 Fig. 5(b)에서 높은 위험도를 가진 도로들이 시나리오 적용 후 대부분 낮아진 것을 확인 가능하다.

3. 결론

2022년 8월 침수피해는 기록적인 폭우가 발생하여 서울 곳곳이 침수되었고 특히 도로의 침수로 인해 수많은 차량피해와 도로가 통제되는 등 경제·사회적으로 많은 피해가 발생하였다. 이에 증가하는 집중호우의 빈도와 강우강도 조건하에서 감당 가능한 수준으로 대비를 하되, 신속한 복구를 통해 재해 이후 원래의 상태로 되돌아가는 능력을 표현할 수 있는 회복도의 중요성 및 필요성은 증가하고 있다. 또한 전기, 가스, 수도 중 도로네트워크는 도시침수 상황에서 국민들에게 직접적으로 영향을 끼치는 주요 요인으로 도시회복도를 산정할 경우 반드시 고려해야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 도로네트워크를 고려하는 회복도 측정 방식을 제안하였으며 실제 2022년 8월 발생한 침수흔적도를 통해 역산된 침수심을 서울특별시 관악구 봉천동에 적용하여 도로네트워크의 회복도를 계산하였다. 그 결과 침수 전 도로네트워크의 침수방지대책을 통해 가장 효과적인 도로위치를 확인하였으며 이를 기반으로 침수 후 도로네트워크의 복구에 따른 회복도 변화를 계산하였다. 그 결과 봉천동에 침수 발생 시 우선적으로 대비 및 복구해야 할 도로 ID는 1200024900, 1200025800, 1200022600이며 RCRm값은 44.42%로 분석되었으며 이를 통하여 집중호우 예보 전 사전에 대비하고 침수 후 복구 작업 시 가장 효과적인 도로의 위치를 예측할 수 있었다. 하지만 도시 건물의 복구작업과 회복도의 각 요소별 가중치를 고려하지 못하였다. 향후 건물의 복구작업에 필요한 복구비용의 산정법과 설문조사 기반의 AHP 분석 등을 통하여 각 요소별 가중치를 고려한 회복도 측정법이 개선된다면 더욱 정밀하고 경제적인 도시침수 관리에 활용 될 것으로 기대된다.

Acknowledgments

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

References

- Bruneau, M., S. E. Chang, R. T. Eguchi, G. C. Lee, T. D. O'Rourke, A. M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W. A. Wallace, and D. Von Winterfeldt. (2003). A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*. 19(4): 733-752.
- Burton, C. G. (2012). The Development of Metrics for Community Resilience to Natural Disasters. Doctoral Dissertation. University of South Carolina.
- Campanella, T. J. (2006). Urban resilience and the recovery of New Orleans. *Journal of the American Planning Association*. 72(2): 141-146.
- Choi, Byungseon. (1994). Modern Society and Risk Management; Risk Problem Characteristics and Strategic Response. *The Korean Journal of Public Administration*. 3(4): 4027-4049.
- Cutter, S. L., C. G. Burton, and C. T. Emrich. (2010). Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*. 7(1): 51.
- Cutter, S. L., L. Barnes, M. Berry, C. Burton, E. Evans, E. Tate, and J. Webb. (2008). A Place-Based Model for Understanding Community Resilience to Natural Disasters. *Global Environmental Change*. 18(4): 598-606.

- Folke, C., S. R. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Chapin, and J. Rockström. (2010). Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society*. 15(4): 20.
- Godschalk, D. R. (2003). Urban Hazard Mitigation: Creating Resilient Cities. *Natural Hazards Review*. 4(3): 136-143.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 4(1): 1-23.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC.
- International Council for Local Environmental Initiatives. (2012). <https://issuu.com/resilientcities>. Toronto: ICLEI.
- Jeon, Eunyeong and Byungseol Byun. (2017). A Study on the Development and Application of Community Resilience Evaluation Indicators for Responding to Climate Change. *The Geographical Journal of Korea*. 51(1): 47-58.
- Kang, Jeongeun, Cheongil Kim, Hansaem Kim, Donggeun Yoon, Saebyeol Yoon, Youngbae Yoon, Seunghyun Jeong, Jucheol Jeong, Sungyoon Jo, and Wooseok, Han. (2022). Disaster and Urban Resilience. *Urban Information Service*. 487: 8-16.
- Kim, Kyeongtak, Juhun Kim, Yunseok Choi, Gilho Kim, Cheonkyu Choi, and Seungjin Hong. (2019). Development of a Direct Damage Evaluation Method and Damage Function for Tangible Assets: Development of Damage Calculation and Prediction Techniques Considering Direct and Indirect Damage from Natural Disasters. Inha University Industry-Academia Cooperation Division.
- Kim, Seong Soo. (2022). Is Permeable Concrete Pavement Effective in Reducing Urban Flooding?. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 34(5): 20-22.
- Manyena, S. B. (2006). The Concept of Resilience Revisited. *Disasters*. 30(4): 434-450.
- Marsh, G., P. Buckle, and S. Smale. (2001). The Concept of Community in Community Capability and Disaster Management. *Australian Journal of Emergency Management*. 16: 5-7.
- Mayunga, J. S. (2009). *Measuring the Measure: A Multi-Dimensional Scale Model to Measure Community Disaster Resilience in the U.S. Gulf Coast Region*. Doctoral Dissertation. Texas A&M University.
- Ministry of Environment. (2020). <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1398830&menuId=286>. Sejong: ME.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. (2005). *Flood Control Economic Survey Manual*. Tokyo: MLIT.
- Ministry of the Interior and Safety. (2023). *Local Finance Act Article 22 Paragraph 2*. Sejong: MOIS.
- National Fire Agency. (2022). *Rules for Emergency Rescue Response Activities and On-Site Command*. Sejong: NFA.
- Nelson, D. R., W. N. Adger, and K. Brown. (2007). Adaptation to Environmental Change: Contributions of a Resilience Framework. *Annual Review of Environment and Resources*. 32: 395-419.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2014). *Guidelines for Resilience Systems Analysis*. Paris: OECD.
- Pelling, M. (2003). *The Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience*. Earthscan.
- Rose, A. (2007). Economic Resilience to Natural and Man-Made Disasters: Multidisciplinary Origins and Contextual Dimensions. *Environmental Hazards*. 7(4): 383-398.
- Timmerman, P. (1981). *Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society*. Environmental Monograph No. 1. Institute for Environmental Studies, Toronto University.
- Vugrin, E. D., D. E. Warren, M. A. Ehlen, and R. C. Camphouse. (2010). A Framework for Assessing the Resilience of Infrastructure and Economic Systems. *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems: Simulation, Modeling, and Intelligent Engineering*. 77-116.
- Wildavsky, A. B. (1988). *Searching for Safety (Vol. 10)*. Transaction Publishers.
- Yook, Donghyung. (2019). *Plans for Selection, Operation, Maintenance, and Management of Disaster Prevention Roads for Effective Response to Disaster Situations*. KRIHS Policy Brief. 716: 1-8.

Korean References Translated from the English

- 강정은, 김청일, 김한샘, 윤동근, 윤셋별, 윤영배, 정승현, 정주철, 조성윤, 한우석 (2022). 재난과 도시회복력(urban resilience). 도시정보, 487: 8-16.
- 김경탁, 김주훈, 최윤석, 김길호, 최천규, 홍승진 (2019). 사유자산에 대한 직접피해 평가 방법 및 손상함수 개발: 풍수해 직접간접 피해를 고려한 피해 산정 및 예측 기술개발. 인하대학교 산학협력단.
- 김성수 (2022). 투수성 콘크리트 포장에 도시홍수 저감에 효과적인가?. 콘크리트학회지, 34(5): 20-22.
- 소방청 (2022). 긴급구조대응활동 및 현장지휘에 관한 규칙. 세종: 소방청.
- 육동형 (2019). 재난상황의 효과적 대처를 위한 방재도로 선정·운영·유지·관리 방안. 국토정책 Brief, 716: 1-8.
- 일본 국토교통성 (2005). 일본치수경제조사메뉴얼 治水經濟調査マニュアル (案). 도쿄: 일본 국토교통성.
- 전은영, 변병설 (2017). 기후변화에 대응하기 위한 커뮤니티 리질리언스 평가지표 개발과 적용. 국토지리학회지, 51(1): 47-58.
- 최병선 (1994). 현대사회와 위험관리; 위험문제의 특성과 전략적 대응. 한국행정연구, 3(4): 4027-4049.
- 행정안전부 (2023). 지방재정법 제 22조 2항. 세종: 행정안전부.
- 환경부 (2020). <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1398830&menuId=286>. 세종: 환경부.