



# 재난회복력을 바탕으로 한 도로 복구 우선순위 지수 개발

## Development of a Disaster-resilience-based Priority Index Assessment Model for Road Recovery

심재웅\* · 조기혁\*\*

Sim, Jaewoong\*, and Cho, Gi-Hyoug\*\*

### Abstract

The concept of disaster response routes for damage reduction has emerged owing to recent large-scale earthquakes. Disaster response routes play an important role in the initial disaster response and recovery by evacuating populations and transferring supplies for disaster response. This study estimated the importance of each road that can be used as a disaster response route after the outbreak of disaster from the viewpoint of disaster resilience and network centrality and developed six types of priority indexes for road recovery based on the purpose of disaster recovery and the function of the disaster response route. Using these priority indexes developed in this study, critical roads for disaster recovery can be identified in short- and long-term periods. Disaster recovery is assumed to improve if disaster response routes are promptly assigned and restored based on these priority indexes.

**Key words :** Earthquake Disaster, Disaster Response Route, Road Recovery, Disaster Resilience, Network Centrality

### 요 지

최근, 대규모 지진 및 재난 피해가 발생함에 따라 피해 경감을 위한 긴급대피로 및 방재도로의 개념이 확장되고 있다. 재난 상황 시 도로는 주민들의 대피 및 물자 수송의 기능을 가지며, 초동 대응 및 재난 복구에 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구는 재난회복력과 교통 네트워크의 관점에서 재난 상황 시 방재도로로 활용될 수 있는 도로의 중요도를 산정하며, 재난 복구 목적과 도로의 기능에 따라 6가지 유형의 도로 복구 우선순위 지수를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 복구 우선순위 지수를 바탕으로 재난 대응에 있어 단기적으로 중요한 도로와 장기적으로 중요한 도로를 파악할 수 있었다. 개발된 지수를 바탕으로 재난 상황 시 도로의 복구 우선순위를 선정하고 신속하게 복구한다면 지역의 재난회복력을 높일 수 있을 것으로 기대한다.

**핵심용어 :** 지진재난, 방재도로, 도로 복구, 재난회복력, 네트워크 중심성

## 1. 서 론

최근, 2016년 경주 지진, 2017년 포항 지진과 같이 규모 5 이상의 큰 지진과 피해사례가 발생함에 따라 대규모 지진과 복합재해에 대응할 필요성이 대두되고 있다. 지진은 화재, 침수, 붕괴 등의 물리적인 피해를 동반(Kim, 2019)할 뿐 아니라 이재민의 발생 및 라이프라인의 파손으로 인한 각종 사회경제적 피해 또한 발생시킨다(Aldrich, 2011). 사회경제적 피해는 시간이 지남에 따라 지속해서 발생하기에, 신속한

초동대응을 통해 인적·물적 피해를 최소화하는 것이 중요하다(Koo et al., 2017).

도로는 주민의 대피, 복구를 위한 인적·물적 자원의 물자 수송의 기능을 하며 지진 피해의 초동 대응에 중요한 역할을 하지만(Chung et al., 2015; Noh et al., 2017), 지진에 의한 액상화 현상(Cooper, 2016), 건물 붕괴 잔해물에 의한 파손 등 지진의 직간접적인 피해에 취약성이 크다. 때문에, 일본의 긴급수송도로, 미국의 재난경로(Disaster Route), 한국의 방재경로(Chung et al., 2015)와 같이 재난 시 효과적으로 대응

\*정회원, 울산과학기술원 도시환경공학부 석박통합과정(E-mail: ryghl1994@unist.ac.kr)

Member, Combined MS/Ph.D. Candidate, Department of Urban and Environmental Engineering, UNIST

\*\*교신저자, 정회원, 울산과학기술원 도시환경공학부 교수(Tel: +82-52-217-2818, Fax: +82-52-217-2849, E-mail: gicho@unist.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Urban and Environmental Engineering, UNIST

할 수 있는 도로를 선제적으로 확보하는 것이 중요하다.

그러나, 국내외로 운영되고 있는 재난 대응 도로는 물자 수송 및 대피를 위한 교통 기능에만 초점을 두고 있으며, 재난 복구를 위한 인근 지역의 잠재 자원과 재난회복력을 충분히 고려하지 않고 있다. 재난 복구(Recovery)는 재난 피해 지역을 이전보다 나은 상태로 회복하는 것을 의미하며 (Bidwell and Dell, 2011) 재난회복력의 개념을 포함한다. 재난 회복력(Holling, 1973; Timmerman, 1981)의 관점에서 대응 능력(Coping response)과 적응 회복력(Adaptive resilience)은 재난 피해를 줄이고 신속하게 도시의 기능을 복구하기 위해 필수적으로 확보해야 하는 요소이다(Cutter et al., 2008).

본 연구는 도시의 재난 피해 경감을 위해 재난회복력의 관점에서 재난 상황에서 신속하게 복구해야 할 도로의 복구 우선순위 지수를 개발한다. 2017년 대규모 지진 피해가 발생한 포항시를 연구 대상으로 선정했으며, 재난회복력을 평가할 위해 이동인구, 신용카드 매출액 자료를 포함한 지역 특성 데이터를 수집했다. 또한, 재난분야 전문가와 포항 지진 당시 현장 업무를 담당했던 공무원을 대상으로 AHP 설문조사를 진행하여 특성 데이터별 재난회복력 가중치를 평가했다. 설문조사는 재난 피해 유형에 따라 ‘사회적 복구’, ‘경제적 복구’, ‘물리적 복구’ 관점에서 재난회복력을 평가한다. 평가된 재난회복력은 피해 유형별로 재난으로부터 피해가 적고 빠르게 회복하며, 재난회복을 위해 필요한 인적·물적 자원이 풍부한 정도를 의미한다. 이를 토대로 복구 우선순위 지수는 재난회복력이 높은 지역과의 연결성을 고려하여 도로의 중요도를 산정한다. 지진 발생 시 도로의 파손으로 인해 교통 기능이 마비되는 상황에서 초동대응과 지역 회복에 필요한 인적·물적 자원의 수송 도로를 신속하게 복구하는 것은 대응 능력(Coping response)과 적응회복력(Adaptive resilience)을 확보하게 한다. 본 연구의 복구 우선순위는 피해 유형별 우선순위에 따라 파손된 도로를 신속하게 복구하여 재난회복력 관점에서 중요 도로의 수송 기능을 유지할 수 있게 한다.

또한, 재난회복력과 함께 네트워크 중심성(Freeman, 1979) 지수를 고려하여 도로의 복구 우선순위 지수를 개발하였다. 매개 중심성(Betweenness Centrality)을 활용하여 재난 발생 직후 물자 수송 등의 재난 대응에 필요한 도로를 평가하며, 근접 중심성(Closeness Centrality)을 활용하여 재난 발생 후 장기적 관점에서 재난 대응 거점으로 활용될 지역과 연결되는 도로를 평가한다.

본 연구에서 개발한 복구 우선순위 지수는 도시의 기능회복을 위한 인적·물적 자원의 수송 등의 재난회복력의 개념을 고려하여 도로의 중요도를 산정함으로써, 도로의 특성과 기능, 네트워크 상의 중요도를 바탕으로 도로의 중요도를 선정한 선행 연구와의 차별점을 가진다. 이는 재난 상황에서 도로 네트워크를 통한 신속한 도시의 기능 복구를 가능케 할 것으로 기대한다.

## 2. 재난 대응 도로 사례 및 평가 기술

도로는 재난 상황 시 이재민의 피난, 대응 인력 및 장비의 수송, 복구 자원의 이동으로 활용된다. 재난 상황 시 신속한 재난 대응 및 복구를 위해서 주요 도로의 기능을 유지하는 것이 필수적이기 때문에, 국내외로 재난 상황에 대응하기 위한 재난 대응 도로를 마련하고 있다(Chung et al., 2015). 재난 대응 도로는 재난 발생 시 응급구호팀, 구호장비, 구호물품 등을 수송하는 도로로 정의되고 있다. 국외 재난 대응 도로로는 미국의 재난 경로(Disaster Route), 캐나다의 재난대응 경로(Disaster response routes), 일본의 긴급수송로가 있으며, 이러한 재난 대응 도로는 일반 시민들의 대피 경로와 구분되어 운영된다. 일본은 이재민의 피난과 구조, 소화 활동 등 단기적 대응을 위한 도로인 긴급교통로와 이재민의 생활안전을 위한 물자 수송과 장기적 복구를 목표로 하는 긴급수송로를 구별하여 운영하고 있다. 국내에서도 재난 대응 도로인 방재 도로의 개념이 도입되어 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

그러나, 이러한 재난 대응 도로는 고속도로나 간선도로, 중요시설과의 연결로 등 지역 간 이동에 사용되는 광역도로 위주로 선정되며, 이에 대한 체계적인 기준이 부족한 실정이다. 최근, 국내에서 방재도로 선정 기준을 마련하기 위해 AHP 평가, 네트워크 중심성(Centrality) 지수 등을 활용하여 도로의 기능을 평가하는 연구들이 진행되고 있다. Park and Kang (2010)의 연구에서는 도로 네트워크와 대중교통 네트워크에서 노드의 연결된 경로의 수, 경로의 굵기, 설계속도 및 용량을 고려하여 노드 간 연계성 지수를 정의하였다. Kim et al. (2012)의 연구에서는 고속도로 IC를 대상으로 매개중심성(Betweenness Centrality)과 정보중심성(Information Centrality)을 바탕으로 교통시설 중요도를 산정하였다. 이와 같은 선행 연구는 도로의 네트워크 기능을 바탕으로 재난 피해를 경감하고 빠른 복구를 위해 필요한 중요 도로를 선정함에 활용될 수 있다. 그러나, 교통 기능만을 강조한 평가는 지역의 재난회복력을 반영하지 못하는 한계를 가진다. 본 연구에서는 도시 기능의 신속한 회복을 위해 네트워크 중심성과 재난회복력을 반영한 도로의 복구 우선순위 지수를 개발하는 것에서 기존 연구와 차별성을 갖는다.

## 3. 연구의 이론적 틀

### 3.1 Community Disaster Resilience (CDR)

#### 3.1.1 재난회복력(Disaster Resilience)

Holling (1973)은 적응형 재생주기(adaptive renewal cycle) 이론을 바탕으로 회복력(Resilience)을 외부 변화를 흡수하여 현 상태를 유지하는 능력으로 정의하였다. 재난 및 방재 분야에서도 재난회복력의 정의가 이뤄졌는데, Timmerman (1981)은 재난회복력을 위협한 사건을 흡수하고 복구하는

역량으로 정의하였으며, Norris et al. (2008)은 손실로부터 저항하거나 복구하는 능력으로 정의했다. 재난회복력의 개념을 구체화한 Cutter et al. (2008)은 재난회복력을 재난으로부터 반응하고 복구하기 위한 사회적 시스템의 능력으로 정의하였다. Cutter et al. (2008)은 재난으로부터 사회가 회복하는 과정에서 재난회복력과 관계가 나타내는 Disaster resilience of place 모형을 제시하였다. Cutter et al. (2008)은 우리 사회가 사회적 시스템(Social system), 건축 환경(Build environment), 자연 시스템(Natural system)으로 구성되어 있으며 이는 재난으로부터의 취약성과 복구 능력을 내포한다고 주장하였다. 그리고 이러한 사회 능력을 바탕으로 재난이 발생했을 때의 대처 능력(Coping response)에 따라 재난의 영향 및 피해가 결정된다고 주장하였다. 또한, 재난 피해가 발생했을 때 사회의 피해 수용력(Absorptive capacity)에 따라 회복 수준이 결정되며, 만약 사회의 피해 수용력이 낮을 때 적응 회복력(Adaptive Resilience)이 높으면 사회는 높은 회복력을 보인다고 주장했다.

이러한 과정은 사회의 재난회복력을 평가하기 위한 4가지 구성요소인 4 R's (Bruneau and Reinhorn, 2007)과 연관이 있다. 4 R's에서 재난회복력은 피해를 견디는 지역의 내구성(Redundancy)뿐만 아니라, 재난 피해를 빠르게 회복하는 신속성(Rapidity), 재난으로 인한 피해 시설 등을 대체하여 추가적인 피해를 예방할 수 있는 대체성(Redundancy), 그리고 지역 내 신속한 피해 복구를 위한 인적·물적 자원의 풍부함을 나타내는 자원력(Resourcefulness)을 바탕으로 평가된다. 재난을 수용하는 시스템의 취약성은 내구성(Redundancy)과 관련이 있으며, 대처 능력은 신속성(Rapidity), 재난 피해를 수용하고 회복하는 과정은 자원력(Resourcefulness)과 대체성(Redundancy)으로 평가할 수 있다.

### 3.1.2 Community Disaster Resilience (CDR)

CDR은 지역의 재난회복력을 평가하는 평가 기술로, 불확실한 재난에 대응하는 지역 커뮤니티의 능력(Martin-Breen and Anderies, 2011)으로 정의된다. Hong and Lee (2018)은 재난 대응(Response) 단계에서 재난대응자(responder)의 역할이 중요함을 강조하고, 재난 교육이 대비 행동에 영향을 미침을 시사했다. CDR은 인적자원을 활용하여 재난 피해를 빠르게 복구할 수 있는 커뮤니티의 능력을 강조한다(Cox and Hamlen, 2015; Yoon et al., 2016). CDR을 평가하기 위한 연구들이 다수 진행되었는데, Ostadtaghizadeh et al. (2016)은 CDR이 사회(Social domain), 경제(Economic domain), 문화(Culture domain), 기관(Institutional domain), 물리적 요소(Physical domain), 환경적 요소(Environment domain)로 구성된다고 정의하였다. Orenco and Fujii (2013)는 필리핀 지역에서 전문가 AHP 설문을 바탕으로 지역의 CDR 구성요소별 가중치를 산정하였는데, 'Environmental and natural resource management'와 'Sustainable Livelihoods'가 높은 가중치를

가지는 것으로 나타났다. Alshehri et al. (2015) 또한 사우디아라비아 지역에서 CDR 가중치 평가 연구를 진행하였는데, Governance, Physical and environmental, Economic, Information and communication, Social 등이 중요한 가중치를 가지는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 재난 피해 유형을 사회적 피해, 경제적 피해, 물리적 피해로 나누고, 각 피해 유형에 대응하기 위한 재난회복력을 평가한다. 재난회복력 평가를 위해 4R의 관점에서 지역 특성 변수를 선정하고, 재난 분야 전문가 10명, 포항 지진 당시 현장 업무를 담당한 공무원 7명을 대상으로 '사회적 복구', '경제적 복구', '물리적 복구' 관점에서 AHP 가중치 평가 설문을 진행하였다.

### 3.2 네트워크 중심성

자연현상이나 도시에서 발생하는 현상은 복잡한 네트워크를 형성하고 있으며 개체 간에는 유기적 관계가 형성되었다. Newman (2003)은 현실 세계에서 나타나는 네트워크는 다수의 객체가 서로 적은 연결을 지니지만 소수의 특정 노드는 다수와 많은 연결을 가지는 복잡계(Complex system) 형태를 띠며 이러한 복잡계는 인간에 의해 만들어진 시스템에서도 발견된다고 주장하였다. 이러한 네트워크는 도로와 사회기반시설 간 구조에서도 나타나는데, 제방, 교량과 같은 교통망에 해당하는 사회기반시설이 파괴되었을 때 지역 서비스 성능이 저하되고 자연재해 피해가 빠른 속도로 지역에 파생된다는 연구결과(Ruth and Coelho, 2007; Haasnoot et al., 2011)가 있다. 따라서, 도로 네트워크 안에서 높은 연결성을 가지는 도로를 파악하고 복구 우선순위를 세우는 것은 재난 피해의 영향을 줄이기 위해 중요하다.

이러한 도로의 네트워크 기능을 평가하기 위해 네트워크 중심성 지수가 활용되고 있다. 네트워크 중심성은 개체 간 유기적인 연결성을 파악하기 위해 고안된 기술로 사회연결망 분석(Network analysis)에서 사용된다. Freeman (1979)은 네트워크 중심성을 측정하는 방법으로 연결정도 중심성(Degree centrality), 매개 중심성(Betweenness Centrality), 근접 중심성(Closeness Centrality)을 제시하였다. 이 중 근접 중심성과 매개 중심성은 광역 네트워크 관점에서 노드의 기능을 측정하는 지수로 활용된다. 매개 중심성은 서로 다른 지역 간 최근접 경로들이 특정 지역을 거쳐가는 정도를 측정하며, 근접 중심성은 적은 수의 도로를 활용하여 다른 모든 지역으로 이동하기 용이한 정도를 나타낸다. Kwon et al. (2021)은 매개 중심성을 바탕으로 도로의 유실로 인한 전체 네트워크의 교통피해를 예측하였다. Noh and Do (2014)는 근접 중심성을 활용하여 긴급대피교통로를 선정하였다. 매개 중심성은 재난 발생 후 피해 인원의 신속한 대피와 재난 피해 경감을 위한 물자 및 인력 수송이 활발하게 일어나는 도로를 평가할 수 있어 단기적 재난 대응 관점에서 신속하게 복구해야 할 도로를 평가할 수 있다. 반면, 근접 중심성은 모든

지역과 가장 가까운 지역을 나타내며 이는 재난 대응 거점과 그 거점과 연결된 도로를 나타내어 장기적 재난 대응 관점에서 복구 및 기능 유지가 필요한 도로를 평가할 수 있다.

복구 우선순위 지수는 재난회복력의 관점에서 지역이 가진 잠재 자원이 도로 네트워크를 통해 도시 기능의 회복을 위해서 사용될 수 있도록 중요 도로를 선정하는 것을 목적으로 개발되었다. 이러한 관점에서, 본 연구는 다양한 중심성 지수 중 도시 전체의 관점에서 재난 상황에서 활용될 수 있는 근접 중심성과 매개 중심성 지수를 활용하여 도로의 네트워크 기능을 평가한다.

## 4. 연구의 범위 및 연구 방법

### 4.1 복구 우선순위 산정을 위한 분석 자료 구축

본 연구는 2017년 규모 5.5 지진이 발생한 포항 지역을 대상으로 진행되었으며, 포항 지역의 재난회복력과 네트워크 중심성을 평가하기 위해 도로 네트워크 데이터(Networks data)와 지역 특성 변수 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터와 출처는 Table 1과 같다.

국가교통DB 센터에서 배포하는 노드·링크 데이터를 활용하여 포항시의 4차선 이상 도로와 그 사이 노드를 교통 네트워

**Table 1.** Regional Characteristic Variable and Data Source

Category	Data	Contents	Source
Networks Data	Road (Link)	Road with more than four lanes in Pohang	Korea Transport DataBase (KTDB)
	Node	Junction point and road point of Road data in Pohang	Korea Transport DataBase (KTDB)
Social infrastructure accessibility	Medical facility accessibility	Metric based on closest distance to medical facilities from each node in networks data	
	Police accessibility	Metric based on closest distance to police and security facilities from each node in networks data	
	Fire station and emergency facilities accessibility	Metric based on closest distance to fire station and emergency facilities from each node in networks data	
	Government office accessibility	Metric based on closest distance to government offices from each node in networks data	
	Commercial facilities accessibility	Metric based on closest distance to commercial facilities and commercial area from each node in networks data	
Economic Scale	Wholesale and retail sales	Annual sales of neighborhood living facilities and wholesale and retail within 500 m buffer of each node (2020)	Hanacard sales data
	Service sales	Annual sales of personal services, education services, recreation related services, professional and scientific technical services within 500 m buffer of each node (2020)	Hanacard sales data
	Accommodation and food service sales	Annual sales of accommodations, restaurants, beverage services within 500 m buffer of each node (2020)	Hanacard sales data
	Medical sales	Annual sales of hospitals, medical services, medical retails within 500 m buffer of each node (2020)	Hanacard sales data
Population characteristics	Floating population	Floating population within 500 m buffer of each node during November 14-16, 2017	Mobile big data from SK telecom
	Resident population	Resident population within 500 m buffer of each node	Statistics Korea 2020
	Non-Vulnerable age ratio	Population ratio between 10-59 years within 500 m buffer of each node	Statistics Korea 2020
Physical vulnerability	Number of road lanes	Average number of lanes on linked road	Korea Transport DataBase (KTDB)
	Building age	Average age of building within 500 m buffer of each node on 2020	Ministry of Land, Infrastructure and Transport
	Bridges and tunnel	Absence of bridge and tunnel on linked road	Korea Transport DataBase (KTDB)
	Degree centrality	Number of road linked with node	

크 데이터로 수집하였다. 수집된 도로 네트워크 데이터는 네트워크 중심성 지수와 재난회복력 지수 산정을 위한 지역 특성 변수를 산출하는 데 활용된다. 재난회복력을 평가하기 위해 사회기반시설 접근성(Social infrastructure accessibility), 경제 규모(Economic Scale), 인구 특성(Population characteristics), 물리적 취약성(Physical vulnerability)을 큰 범주로 하여 지역 특성 변수를 선정하였다. 각 변수는 재난회복력의 4가지 구성 요소(4 R's)인 Robustness, Redundancy, Resourcefulness, Rapidity를 바탕으로 선정되었다. 세부 지역 특성 변수와 재난회복력의 4가지 구성요소와의 연관성은 Table 2와 같다.

사회기반시설 접근성은 의료시설 접근성, 경찰시설 접근성, 소방시설 접근성, 행정시설 접근성, 상업시설 접근성으로 구성되었으며, 접근성은 ArcGIS Networks analyst 프로그램을 활용하여 산출되었다. 접근성  $A_i$ 의 산출식은 Eq. (1)과 같다.

$$A_i = 1/d_i \quad (1)$$

$d_i$ 는 각 노드에서 가장 가까운 시설(Closest facilities measure)과의 거리를 의미한다. 경제 규모는 연간 도소매업 매출액, 서비스업 매출액, 숙박 및 음식점업 매출액, 의료업 매출액 변수로 구성된다. 본 연구는 2020년도 1월~9월의 하나카드 매출액 데이터를 바탕으로 업종별 매출액 변수를 수집했다. 인구 특성은 유동인구, 거주인구, 비취약연령비율 변수로 구성되었는데, 본 연구는 통계청 주민등록 인구 통계 데이터를 활용하여 거주인구와 지역 내 비취약연령비율 변수를 수집했다. 비취약연령비율은 10세 이상 60세 미만 인구를

기준으로 산출되었다. 유동인구는 SK 통신 빅데이터를 기반으로 수집되었다. 마지막으로 물리적 취약성은 도로 차선 수, 건축물 노후도, 교량 및 터널의 유무, 인근 도로와의 네트워크 연결성으로 구성되어있다. 교량 및 터널과 연결된 노드의 경우 재난 발생 시 붕괴 위험이 있어 재난회복력에 부정적 영향을 미친다. 따라서 교량 및 터널과 연결된 노드는 0의 값을, 연결되지 않은 노드에 대해서는 1의 값을 부여하였다. 건축물 노후도 데이터는 국토교통부 건축물 토지대장을 통해 공개된 자료를 활용했다. 도로 근처의 노후된 건축물은 재난회복력에 부정적 영향을 미침으로 가장 노후된 건물을 기준으로 신축 정도를 기준으로 수집하였다. K.J. Kim et al. (2021)은 전문가 설문을 통해 ‘노후 건물’을 위험도 분석 평가 시 중요 지표로 선정했다. 모든 지역 특성 변수들은 재난회복력 지수의 가중치와 합산하기 위해 최대-최소 정규화(Min-Max normalization)를 통해서 정규화되었다. Table 3은 지역 특성 변수의 기술통계량과 주요 분석 대상인 포항시 북구 및 남구 시가지(동) 노드들의 지역 특성 변수를 표준화한 데이터의 평균을 나타낸다. Fig. 1은 지역 특성 변수의 값이 높게 나타나는 포항시의 중심지와 중심 도로를 나타낸다.

#### 4.2 AHP 가중치 평가 기반 재난회복력 지수 산정

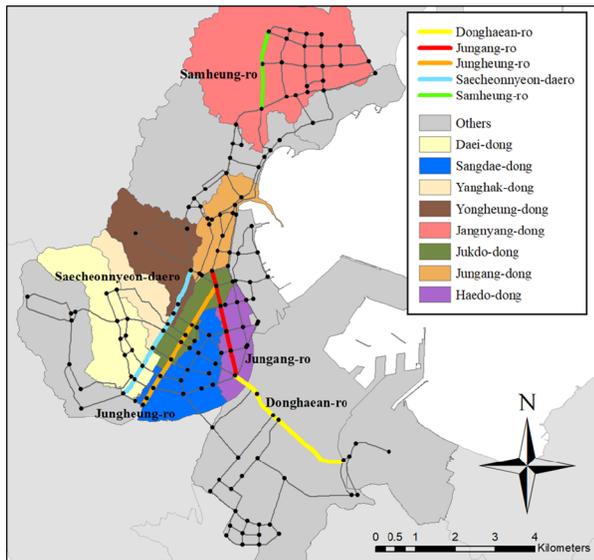
전문가 AHP (계층적 의사결정) 가중치 평가 설문 결과를 바탕으로 재난회복력 지수를 산출한다. AHP 가중치 평가 설문은 지역의 재난회복력의 개념을 중심으로 ‘사회적 복구’, ‘경제적 복구’, ‘물리적 복구’의 관점에서 지역 특성 변수의 가중치를 평가하는 것으로 설계되었다. 사회적 복구는 지진으로 발생한 피해자의 긴급 구조 및 구호와 도시의

**Table 2.** Regional Characteristic Variable and Associated Disaster Resilience Components

Category	Variable	Effect	Associated Disaster Resilience components
Social infrastructure accessibility	Medical facility accessibility	Positive	Rapidity, Resourcefulness (Human resources)
	Police accessibility	Positive	Rapidity, Resourcefulness (Human resources)
	Fire station and emergency facilities accessibility	Positive	Rapidity, Resourcefulness (Human resources)
	Government office accessibility	Positive	Rapidity, Resourcefulness (Human resources)
	Commercial facilities accessibility	Positive	Resourcefulness
Economic Scale	Wholesale and retail sales	Positive	Resourcefulness
	Service sales	Positive	Resourcefulness
	Accommodation and food service sales	Positive	Redundancy, Resourcefulness
	Medical sales	Positive	Resourcefulness (Human resources)
Population characteristics	Floating population	Positive	Resourcefulness (Human resources)
	Resident population	Positive	Resourcefulness (Human resources)
	Non-Vulnerable age ratio	Positive	Robustness, Resourcefulness (Human resources)
Physical vulnerability	Number of road lanes	Positive	Redundancy
	Building age	Negative	Robustness
	Bridges and tunnel	Negative	Robustness
	Degree centrality	Positive	Redundancy, Rapidity

**Table 3.** Descriptive Statistics of Variable and Normalization Result

Variable	Descriptive statistics of data				Normalization	
	All Node				Buk-gu (Dong)	Nam-gu (Dong)
	Max	Min	Mean	Std.	Mean	Mean
Medical facility accessibility	0.047	0.000	0.001	0.003	0.053	0.017
Police accessibility	0.020	0.000	0.001	0.002	0.083	0.062
Fire station and emergency facilities accessibility	0.010	0.000	0.001	0.001	0.099	0.076
Government office accessibility	0.030	0.000	0.001	0.003	0.050	0.065
Commercial facilities accessibility	0.018	0.000	0.001	0.001	0.063	0.050
Wholesale and retail sales (Million KRW)	2,561.488	11.087	404.414	528.935	0.355	0.149
Service sales (Million KRW)	251.115	0.193	58.544	64.728	0.493	0.249
Accommodation and food services sales (Million KRW)	915.812	1.370	198.584	232.254	0.442	0.249
Medical sales (Million KRW)	956.891	0.109	138.009	201.156	0.280	0.180
Floating population	4,110.633	0.217	929.891	780.559	0.375	0.242
Resident population	8,799.768	81.267	2,957.152	2,682.843	0.653	0.372
Non-Vulnerable age ratio	0.753	0.455	0.643	0.077	0.662	0.621
Number of road lanes	5.296	1.985	3.320	0.644	0.372	0.494
Building age	38.799	0.000	23.269	13.641	0.387	0.368
Bridges and tunnel	1.000	0.000	0.674	0.469	0.838	0.667
Degree centrality	6.000	1.000	3.105	0.721	0.465	0.435
Number of node (N)	239				68	81



**Fig. 1.** Main City Area and Main Road in Pohang

사회적 기능 상실 등의 피해를 복구하는 것을 의미하며, 경제적 복구는 건물, 도로 등의 파괴로 인한 업무시설, 상업시설, 공장 및 생산 시설의 기능 상실로 인한 직간접적 피해를 복구하는 것을 의미한다. 물리적 복구는 도로 및 건축물의 파괴, 라이프라인의 파손, 차량 파손, 창고 및 재고 자산

파괴, 개인 가구 및 자산의 손실 등의 피해를 복구하는 것을 의미한다.

이를 위하여 재난 분야 전문가 10명과 공무원 7명을 대상으로 AHP 가중치 평가 설문조사를 수행하였다. Table 4는 설문 응답자의 인구통계학적 특징을 나타낸다. 17명의 조사자 중 성별은 남자 65%, 여자 35%였으며, 연령대는 30대가 41%, 40대가 35%, 50대가 24%를 차지했다. 직업은 재난 및 도시 분야 교수, 연구원이 59%, 포항시 방재정책과 공무원이 24%, 포항시 주거안정과 공무원이 18%를 차지했다.

본 설문 조사 기간은 2021년 11월 1일에서 11월 8일까지 총 7일 동안 진행되었다. Table 2의 변수를 바탕으로 4개의 기준과 16개의 세부 기준으로 2계층 평가 요소를 구성했다. Table 2의 Category에 해당하는 Social infrastructure, Economic Scale, Population characteristics, Physical vulnerability를 바탕으로 Level 1계층 요소를 구성했고, 세부 기준인 16개의 변수를 바탕으로 Level 2계층 요소를 구성했다. 설문조사는 AHP 기법에 따라 이원 비교 방식으로 설문 진행되었다. 각 설문 문항은 리커트(Likert Scale) 5점 척도로 평가되었다. 각 설문조사자는 피해 복구 유형별로 총 3번의 설문조사를 수행했다. 본 설문은 결과의 신뢰성을 높이기 위해 일관성 검증 진행하였다. AHP 기법에서 활용되는 일관성 비율 (Consistency Ratio) 지표를 활용하여 응답자의 일관성을 평가했다. 경제적 복구 설문과 물리적 복구 설문 응답 중

**Table 4.** Demographic Characteristics of AHP Survey Participant

Demographic characteristics	Classification	Number	Ratio
Gender	Man	11	65%
	Woman	6	35%
Age	30's	7	41%
	40's	6	35%
	50's	4	24%
Job	Professor, Researcher	10	59%
	Public officer (Disaster Prevention Policies)	4	24%
	Public officer (Housing Stabilization)	3	18%

각각 하나의 설문조사 결과에서 일관성 비율이 0.2보다 높게 나타나 분석 결과에서 제외하였다. 일관성 비율  $C.R.$ 을 나타내는 산출식은 Eq. (2)와 같다.

$$C.R. = C.I./R.I. \quad (2)$$

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad (3)$$

$$\lambda_{\max} = (\sum_{i=1}^m (a_{i1} * w_1 + \dots + a_{in} * w_n) / w_i) / n \quad (4)$$

$C.I.$ 는 일관성 지수를 나타내며,  $R.I.$ 는 무작위 지수(Random Index)를 나타낸다.  $\lambda_{\max}$ 는 쌍대비교행렬의 가장 큰 고유치를 의미하며 산출식은 Eq. (4)와 같다.  $a_{ij}$ 은 쌍대비교행렬의 원소를 나타내며,  $w_i$ 는 표준화행렬의 평균 우선순위를 나타낸다.  $n$ 은 쌍대비교 행렬의 원소 수를 나타낸다.

AHP를 바탕으로 재난회복력 지수의 가중치를 산정한 상당수의 선행 연구(Orencio and Fujii, 2013; Patel et al., 2020; C.J. Kim et al., 2021)는 20명의 전문가를 대상으로 한 설문조사 표본을 바탕으로 재난회복력 지수를 개발했다. 이를 기준으로 20명의 전문가 및 현장 공무원을 대상으로 AHP 가중치 평가를 진행했고 17개의 응답을 수집했다. 17개의 설문 응답을 바탕으로 일관성 평가를 진행해 최종적으로 경제적, 물리적 복구 설문에서는 16개의 표본을 사회적 복구 설문에서는 17개의 표본을 바탕으로 재난회복력 가중치를 산출하였다.

AHP 가중치 평가를 이용하여 노드별로 수집된 지역 특성 변수에 재난회복력 가중치를 부여해 재난회복력 지수를 산출한다. 재난회복력 지수는 일차적으로 노드별로 산출되며, 도로(링크)의 재난회복력 지수는 도로에 연결된 두 노드의 평균으로 산출된다. 도로의 재난회복력 지수 산출식은 Eq. (5)와 같다.

$$R(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^m (X_{ik} * W_k) + \sum_{k=1}^m (X_{jk} * W_k)}{2} \quad (5)$$

$R(i, j)$ 는 노드  $i$ 와 노드  $j$ 를 잇는 도로의 재난회복력을 나타낸다.  $X_{ik}$ 는 특정 노드  $i$ 의 지역 특성 변수  $k$ 의 값을 의미하며,  $W_k$ 는 지역 특성 변수  $k$ 에 대한 AHP 가중치 값을 의미한다.

### 4.3 네트워크 중심성 지수 산정

매개 중심성 지수와 근접 중심성 지수를 바탕으로 단기적 관점에서 재난 상황 시 가장 많이 활용되는 도로와 장기적 관점에서 재난 대응 거점 확보에 있어서 중요한 도로를 평가한다. 매개 중심성은 재난 상황 시 가장 이용이 활발한 노드를 나타내며, 근접 중심성은 전체 네트워크 중에서 접근성이 가장 좋은 노드를 나타낸다. 네트워크 중심성 지수는 일차적으로 노드를 기준으로 산출되며, 도로(링크)의 네트워크 중심성 지수는 도로에 연결된 두 노드의 평균으로 산출된다. 도로의 매개 중심성 산출식과 근접 중심성 지수의 산출식은 각각 Eqs. (6), (7)과 같다.

$$C_b(i, j) = \frac{G_i + G_j}{(N - 1) * (N - 2)} \quad (6)$$

$$C_c(i, j) = \frac{(N - 1) \sum_{x=1}^n I_{i,x} + \sum_{x=1}^n I_{j,x}}{2 \sum_{x=1}^n I_{i,x} * \sum_{x=1}^n I_{j,x}} \quad (7)$$

$C_b(i, j)$ ,  $C_c(i, j)$ 는 각각 노드  $i$ 와 노드  $j$ 를 잇는 도로의 매개 중심성과 근접 중심성을 뜻한다. 매개 중심성 산출식 Eq. (6)에서  $G_i$ 는 서로 다른 두 노드의 최단 경로에 속하는 도로(링크) 중 노드  $i$ 를 지나는 도로(링크)의 수를 나타낸다. 근접 중심성 산출식 Eq. (7)에서  $I_{i,x}$ 는 노드  $i$ 와 서로 다른 지점 사이의 최소 경로에 포함되는 도로(링크)의 수를 나타낸다. Eqs. (6), (7)에서  $N$ 은 전체 네트워크에 속하는 노드의 수를 의미한다. 각 네트워크 중심성 지수는 복구 우선순위 지수 산정을 위해 최대-최소 정규화(Min-Max normalization)를 통해서 정규화되었다. 또한, 경계 부분에 속한 노드의

중심성 지수가 상대적으로 낮은 값을 가지게 되는 edge effect를 고려하여 포항시 시가지 외의 외곽지역의 도로를 포함해 네트워크 중심성 지수를 산출했다.

#### 4.4 복구 우선순위 지수 산정

재난회복력 지수와 네트워크 중심성 지수를 바탕으로 복구 우선순위를 지수를 개발했다. 복구 우선순위는 세 유형에 대한 피해 복구 유형과 두 가지 유형의 도로 기능에 따라 6가지 유형으로 산정되었다. 복구 우선순위 지수 유형은 ‘단기적 관점의 사회적 피해 복구’, ‘단기적 관점의 경제적 피해 복구’, ‘단기적 관점의 물리적 피해 복구’, ‘장기적 관점의 사회적 피해 복구’, ‘장기적 관점의 경제적 피해 복구’, ‘장기적 관점의 물리적 피해 복구’로 구성되었다. 도로 복구 우선순위 지수  $P(i,j)$ 의 산정 공식은 Eq. (8)과 같다.

$$P(i,j) = \sqrt[3]{R(i,j)} * \sqrt[3]{C(i,j)} \quad (8)$$

본 연구에서 개발한 복구 우선순위 지수  $P(i,j)$ 는 재난회복력 지수  $R(i,j)$ 와 네트워크 중심성 지수  $C(i,j)$ 의 기하평균으로 산출되었다.

## 5. 연구 결과

### 5.1 도로별 재난회복력 지수

AHP 설문을 통해 산출된 지역 특성 데이터 항목별 가중치는 Table 5와 같다. 본 연구는 Level 2계층의 가중치를 바탕으로 재난회복력 지수를 산출한다. 응답 결과 항목별로 사회적 복구 지수에서는 의료시설 접근성, 소방시설 접근성, 비취약 연령비율 변수에 높은 가중치가 산정되었고, 경제적 복구 지수에서는 도소매업 매출액, 유동인구, 거주인구 변수에 높은 가중치가 산정되었다. 물리적 복구 지수의 경우 물리적 취약성을 나타내는 건축물의 노후도, 네트워크 연결성 변수 항목에 높은 가중치가 부여되었다.

포항시의 노드별 수집된 지역 특성 변수와 AHP 설문조사를 통한 지역 특성 변수 가중치를 바탕으로 재난회복력 지수를 산출했다. 포항시 전체의 도로의 재난회복력 지수는 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 사회적 복구 관점의 재난회복력 지수의 도로별 순위 분포를 나타내며, Fig. 2(b)는 경제적 복구 관점의 재난회복력 지수의 도로별 순위 분포를 나타낸다. 마지막으로 Fig. 2(c)는 물리적 복구 관점의 재난회복력 지수의 도로별 순위 분포를 나타낸다. 산출한 지역별 재난회복력 지수는 모든 피해 복구 유형에서 유사하게 나타났다.

**Table 5.** Weight of Regional Characteristic Variable from AHP Result

Level	Variable	For Social recovery	For Economical recovery	For Physical recovery
Level 1	Social infrastructure accessibility	32.54%	25.75%	31.37%
	Economic scale	17.94%	25.66%	18.58%
	Population characteristics	23.06%	24.84%	18.70%
	Physical vulnerability	26.46%	23.75%	31.35%
	Total	100%	100%	100%
Level 2	Medical facility accessibility	8.47%	5.69%	6.47%
	Police accessibility	6.62%	4.90%	6.04%
	Fire station and emergency facilities accessibility	8.13%	5.26%	7.13%
	Government office accessibility	5.66%	5.57%	7.49%
	Commercial facilities accessibility	3.68%	5.09%	4.22%
	Wholesale and retail sales	3.64%	8.20%	4.54%
	Service sales	3.33%	5.48%	4.14%
	Accommodation and food service sales	4.59%	6.06%	5.04%
	Medical sales	6.38%	5.58%	4.87%
	Floating population	6.10%	9.45%	5.95%
	Resident population	7.31%	9.52%	7.19%
	Non-Vulnerable age ratio	9.65%	5.23%	5.57%
	Number of road lanes	4.52%	5.29%	5.98%
	Building age	7.95%	6.09%	9.28%
	Bridges and tunnel	6.47%	5.01%	6.89%
	Degree centrality	7.51%	7.58%	9.20%
	Total	100%	100%	100%

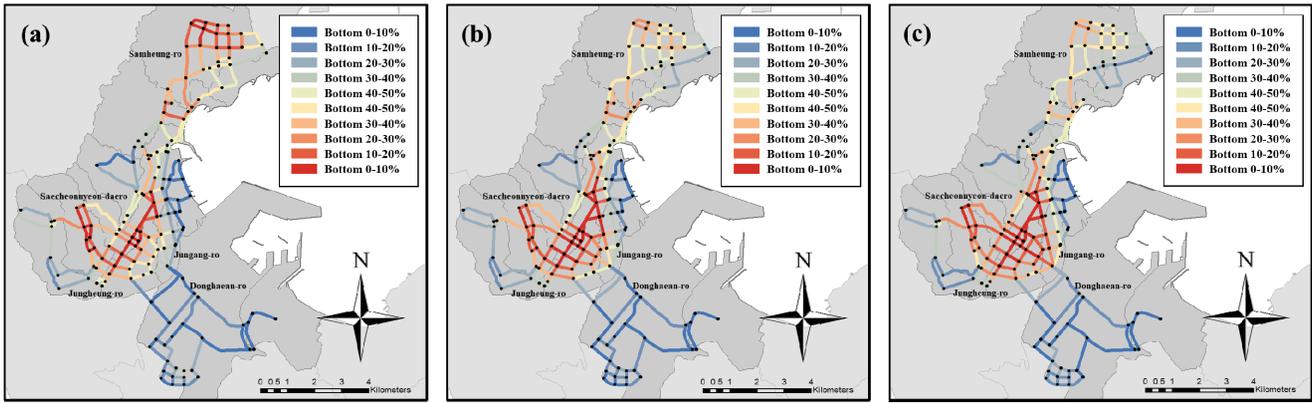


Fig. 2. Rank of (a) Disaster Resilience for Social Recovery, (b) Disaster Resilience for Economical Recovery and (c) Disaster Resilience for Physical Recovery on Each Road

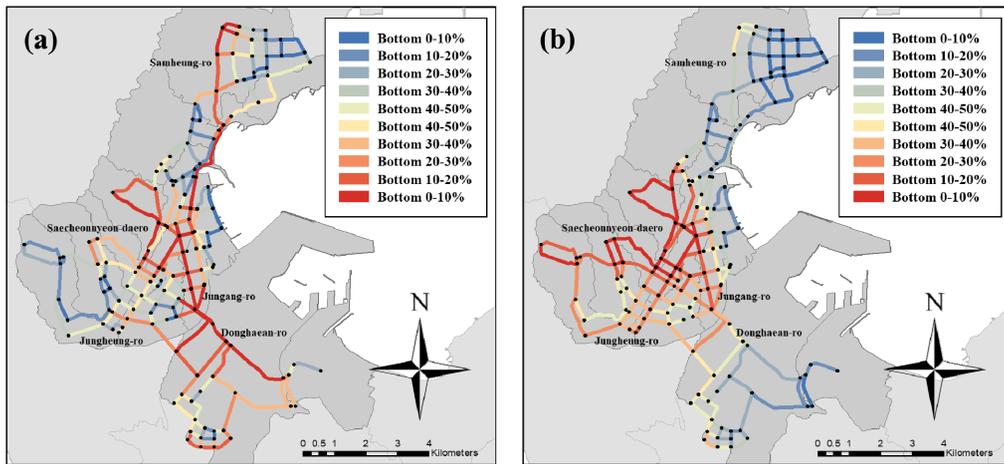


Fig. 3. Rank of (a) Betweenness Centrality and (b) Closeness Centrality on Each Road

세 복구 유형의 재난회복력 지수는 복구 죽도동 및 죽도동 인근의 남구 상대동, 대이동, 해도동 일대와 복구 장량동 지역에서 공통적으로 높게 나타났다. 장량동 지역의 경우 사회적 복구 관점에서 재난회복력 지수가 더 높게 나타났다. 남구 상대동, 대이동, 해도동, 죽도동 지역은 포항시의 도심지로 사회기반시설 접근성과 매출액, 인구밀도가 높아 재난회복력 지수가 높게 나타났으며, 복구 장량동 지역은 신도시 형성으로 인해 사회기반시설 접근성, 물리적 안정성, 비취약 인구 비율이 높아 재난회복력 지수가 높게 나타났다.

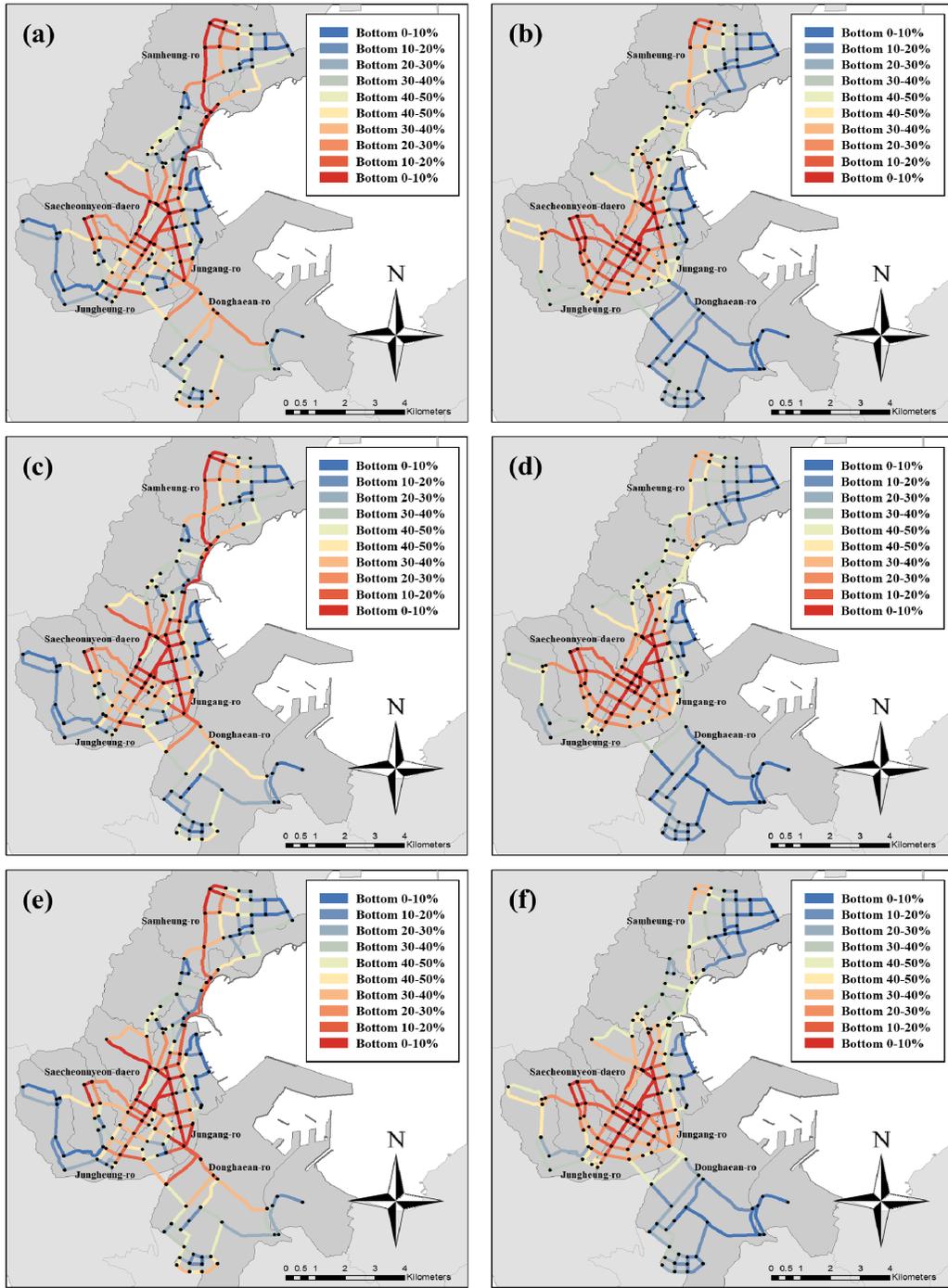
### 5.2 도로별 네트워크 중심성 지수

포항시 전체의 도로의 네트워크 중심성 지수는 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)는 매개 중심성 지수의 도로별 순위 분포를 나타내며, Fig. 3(b)는 근접 중심성 지수의 도로별 순위 분포를 나타낸다. 네트워크 중심성 분석 결과, 지역별 매개 중심성 지수와 근접 중심성 지수의 분포는 다르게 나타났다. 이는 재난 발생 이후 단기적 관점의 중요 도로와 장기적 관점의 중요 도로가 다르게 나타난다는 것을 시사한다. 남구 해도동

의 중앙로, 복구 죽도동의 중흥로, 새천년대로 등은 매개 중심성과 근접 중심성 모두 높게 평가된 도로로 재난 발생 이후 가장 높은 빈도로 활용되면서, 장기적 관점에서 재난 대응 거점과의 연결로 활용될 수 있는 도로를 나타낸다. 복구 장량동의 삼흥로와 남구 제철동의 동해안로는 매개 중심성 지수가 높게 평가된 지역으로 단기적 관점에서 재난 대응 및 인력 수송의 역할에 있어 중요한 도로를 나타낸다. 복구 양학동, 남구 대이동의 도로는 매개 중심성에 비해 근접 중심성이 상대적으로 높게 평가된 도로로, 단기적 관점보다 장기적 관점에서 재난 대응에 활용될 수 있는 도로를 나타낸다.

### 5.3 복구 우선순위 지수

개발한 6가지 유형의 복구 우선순위 지수를 포항시에 적용한 결과는 Fig. 4와 같다. Figs. 4(a)와 (b)는 포항시 시가지의 사회적 피해 복구를 위한 도로 복구 우선순위를 단기적 관점과 장기적 관점에서 평가한 결과이다. 마찬가지로 Figs. 4(c)와 (d)는 경제적 피해 복구를 위한 도로 복구 우선순위를,



**Fig. 4.** (a) Short-term Road Recovery Priority Index for Social Recovery, (b) Long-term Road Recovery Priority Index for Social Recovery, (c) Short-term Road Recovery Priority Index for Economical Recovery, (d) Long-term Road Recovery Priority Index for Economical Recovery, (e) Short-term Road Recovery Priority Index for Physical Recovery, (f) Long-term Road Recovery Priority Index for Physical Recovery

Figs. 4(e)와 (f)는 물리적 피해 복구를 위한 도로 복구 우선순위를 단기적 관점과 장기적 관점에서 평가한 결과이다. 본 연구는 시가지를 대상으로 수행되었으나, 포항시 외곽지역(읍, 면)과의 연결성을 고려하여 포항시의 전체 도로를 대상으로 복구 우선순위 지수를 산정하였다.

연구 결과 피해 복구 유형에 따른 복구 우선순위의 차이는 크지 않으나, 도로 기능에 따른 복구 우선순위의 차이는 크게 나타났다. 단기적 복구 우선순위와 장기적 복구 우선순위 지수 모두에게서 복구 용흥동의 새천년대로, 복구 죽도동, 남구 해도동의 중앙로 등의 포항 도심지의 도로가 높은 순위

를 받았다. 해당 도로들은 매개 중심성, 근접 중심성, 재난회복력 지수가 모두 높은 도로이다. 해당 지역의 교통 기능이 마비된다면 재난 발생 이후 시민들의 대피와 재난 복구에 큰 차질이 발생하게 될 것으로 예상된다. 따라서, 재난으로 인해 해당 도로가 파손될 시 신속한 복구가 필요하다.

복구 장량동의 삼흥로, 남구 제철동의 동해안로는 단기적 복구 우선순위 지수에서 높은 점수를 받았다. 이는 도로의 매개 중심성이 높기 때문인데, 해당 도로들이 재난 상황에서 많이 활용되는 도로라는 것을 시사한다. 따라서, 재난 발생 직후 해당 도로들의 파손 및 기능이상을 파악하고 대응하는 것이 중요하다. 단기적 복구 우선순위에 비해 장기적 복구 우선순위 지수가 높은 지역은 포항시 복구 양학동, 남구 대이동이다. 해당 지역들은 교통 네트워크 관점에서 다른 모든 지역으로 신속하게 이동할 수 있는 지역이기도 하지만, 실제 포항시의 중심지이기도 하다. 특히, 대이동의 경우 포항시청이 위치한 행정시설과 대형 의료시설인 포항 성모 병원, 그리고 상업시설이 위치해 재난 대응 거점으로서 활용도가 높은 지역이다. 따라서, 재난 발생 후 장기적 관점에서 해당 지역의 도로를 복구하는 것이 중요하다.

결과적으로 6가지 유형의 복구 우선순위는 재난 발생 직후 복구와 남구를 중심에서 관통하는 삼흥로와 중앙로, 동해안로, 중흥로의 연결성을 확보해야 하며, 시간이 지남에 따라 포항의 인구 및 재난회복력 자원이 풍부한 남구 대이동 복구 양학동 등의 지역과의 연결성을 확보하기 위해 새천년대로의 도로 기능을 유지하는 것이 중요함을 나타낸다. 주요 도로는 Fig. 1에 나타난다.

## 6. 결론 및 고찰

본 연구는 포항시를 대상으로 지진재난 발생 후 중요 도로의 기능을 유지하기 위한 복구 우선순위 지수를 개발하였다. 재난 상황에서 활용도가 높은 도로의 기능을 신속하게 복구한다면 재난으로 인한 피해를 줄이고 재난으로부터 빠른 회복을 기대할 수 있다. 기존의 도로 평가 및 방재도로 선정 연구를 보완하여 재난회복력을 반영한 도로 복구 우선순위 기술을 개발했다는 점에서 정책적 함의를 가진다. 개발한 복구 우선순위 지수는 재난 상황 시 피해 유형과 장·단기적 관점에서의 도로의 기능에 따라 중요한 도로를 신속하게 복구하여 재난회복력을 높이는 데 활용될 것으로 기대한다.

그러나 본 연구는 몇 가지 한계점을 가진다. 본 연구는 재난 발생 이후 기능을 상실한 도로의 복구 우선순위를 산정하기 때문에 지역별 재난 취약성에 따른 재난 피해 규모를 고려하지 않았다. 이에 따라 재난 대응 인력과 물자 풍부한 도심지와 신시가지 인근의 도로를 중심으로 복구 우선순위가 높게 나타나 재난 피해 위험이 높은 주거 취약 계층과 낙후 지역 인근의 도로의 복구 우선순위가 낮게 평가될 수 있다. 이후 연구에서는 재난 피해 규모를 고려한 복구

우선순위 지수 개발 연구가 수행 될 필요가 있다.

또한, 포항시 외부 지역과의 연결성을 고려하지 못한 한계점이 있다. 복구 우선순위에서 대구와 같은 포항시 인근 광역 지역으로의 도로에 대한 복구 우선순위가 낮게 나타났다. 또한, 네트워크 중심성 산출에 있어 도로의 길이나 교통정체 등의 도로 환경을 고려하지 않았다. 향후 이와 같은 점을 보완하여 실질적인 도로 환경이 반영된 복구 우선순위 선정 연구가 수행되어야 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2022년 전국 대학원생 재난위험경감 및 지역사회복원력 논문 공모전에서 최우수상을 수상한 논문을 수정·보완하였음.

## References

- Aldrich, D.P. (2011). The power of people: social capital's role in recovery from the 1995 Kobe earthquake. *Natural Hazards*, Vol. 56, No. 3, pp. 595-611.
- Alshehri, S.A., Rezgui, Y., and Li, H. (2015). Disaster community resilience assessment method: A consensus-based Delphi and AHP approach. *Natural Hazards*, Vol. 78, No. 1, pp. 395-416.
- Bidwell, S., and Dell, R. (2011). *Long term planning for recovery after disasters: Ensuring health in all policies (HiAP): Information sheet 6, Mental health*. Community and Public Health (CPH). Retrieved November 26, 2011, from <http://www.cph.co.nz/Files/LTPRecoverySheet-06-mentalheal.pdf>
- Bruneau, M., and Reinhorn, A. (2007). Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No. 1, pp. 41-62.
- Chung, Y.S., Lee, J., Lee, H.S., Ahn, H.R., and Park, T.U. (2015). *A preliminary study on selection criteria of disaster operation routes considering disaster types and roadway characteristics*. Report of The Korea Transport Institute, RR-15-01. pp. 1-208.
- Cooper, E. (2016). First look - Quake-damaged Wellington port riddled with cracks and liquefaction (November 20, 2016). *One News Now*. Retrieved from <https://www.1news.co.nz/2016/11/20/first-look-quake-damaged-wellington-port-riddled-with-cracks-and-liquefaction/>
- Cox, R.S., and Hamlen, M. (2015). Community disaster resilience and the rural resilience index. *American Behavioral Scientist*, Vol. 59, No. 2, pp. 220-237.
- Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E.,

- Tate, E., and Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, Vol. 18, No. 4, pp. 598-606.
- Freeman, L.C. (1979). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social Networks*, Vol. 1, No. 3, pp. 215-239.
- Haasnoot, M., Middelkoop, H., Van Beek, E., and Van Deursen, W.P.A. (2011). A method to develop sustainable water management strategies for an uncertain future. *Sustainable Development*, Vol. 19, No. 6, pp. 369-381.
- Holling, C.S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-23.
- Hong, E., and Lee, I. (2018). Effectiveness of disaster training for community residents: A systematic review. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 7, pp. 205-212.
- Kim, C.J., No, E.K., and Yang, G.G. (2021). Disaster-safety vulnerable class derivation of priority factors for disaster resilience. *Crisisonomy*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-20.
- Kim, H.J., Lee, C.Y., Go, Y.S., Kim, J.H., and Kim, H.R. (2012). The efficient for national transport infrastructure using network index: Focusing on interchanges of expressway. *Korea Research Institute for Human Settlements*, Vol. 35, pp. 1-147.
- Kim, K.J., Hwang, J.G., Kim, G.H., and Jung, D.J. (2021). A review of the possibility of assessment indicators for natural disaster risk analysis through expert survey. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 1, pp. 47-55.
- Kim, K.Y. (2019). Development of real-time seismic risk assessment system. *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 20, No. 4, pp. 885-890.
- Koo, W.H., Park, S.Y., and Beak, M.H. (2017). A study for securing the disaster management task function of local governments in the event of earthquake and tsunami. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 3, pp. 87-95.
- Kwon, O.K., Kim, B.S., and Jung, S.K. (2021). A study on traffic impact by heavy rain using betweenness centrality analysis. *Journal of the Korean Data & Information Science Society*, Vol. 32, No. 1, pp. 49-61.
- Martin-Breen, P., and Anderies, J.M. (2011). *Resilience: A literature review*. Bellagio Initiative, Brighton: IDS.
- Newman, M.E. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, Vol. 45, No. 2, pp. 167-256.
- Noh, H.S., Lee, J., Lee, H.J., Kye, D.M., and Hur, S.H. (2017). *Evacuation and relief logistics on disasters: Focused on earthquake disaster*. Report of The Korea Transport Institute, RR-17-06. pp. 1-296.
- Noh, Y.S., and Do, M.S. (2014). Determination of emergency evacuation roads considering road network function and connectivity. *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 13, No. 6, pp. 34-42.
- Norris, F.H., Stevens, S.P., Pfefferbaum, B., Wyche, K.F., and Pfefferbaum, R.L. (2008). Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American Journal of Community Psychology*, Vol. 41, No. 1-2, pp. 127-150.
- Orencio, P.M., and Fujii, M. (2013). A localized disaster-resilience index to assess coastal communities based on an analytic hierarchy process (AHP). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 3, pp. 62-75.
- Ostadtaghizadeh, A., Ardalan, A., Paton, D., Khankeh, H., and Jabbari, H. (2016). Community disaster resilience: A qualitative study on Iranian concepts and indicators. *Natural Hazards*, Vol. 83, pp. 1843-1861.
- Park, J.S., and Kang, S.C. (2010). Measuring the connectivity of nodes in road networks. *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 28, No. 4, pp. 129-139.
- Patel, D.A., Lad, V.H., Chauhan, K.A., and Patel, K.A. (2020). Development of bridge resilience index using multicriteria decision-making techniques. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 25, No. 10, 04020090.
- Ruth, M., and Coelho, D. (2007). Understanding and managing the complexity of urban systems under climate change. *Climate Policy*, Vol. 7, No. 4, pp. 317-336.
- Timmerman, P. (1981). *Vulnerability, resilience and the collapse of society: A review of models and possible climatic applications*. Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto.
- Yoon, D.K., Kang, J.E., and Brody, S.D. (2016). A measurement of community disaster resilience in Korea. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 59, No. 3, pp. 436-460.

---

Received	March 27, 2023
Revised	March 30, 2023
Accepted	July 13, 2023