

재난·재해 상황을 대비한 클러스터링 분석 기반의 도로링크별 취약성 평가 연구

Vulnerability Evaluation by Road Link Based on Clustering Analysis for Disaster Situation

탁 지훈* · 홍 정 열** · 박 동 주***

* 주저자 : 서울시립대학교 교통공학과 박사수료

** 공저자 : 계명대학교 교통공학과 조교수

*** 교신저자 : 서울시립대학교 교통공학과 교수

Jihoon Tak* · Jungyeol Hong** · Dongjoo Park***

* Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul

** Dept. of Transportation Eng., Keimyung Univ.

*** Dept. of Transportation Eng., Univ. of Seoul

† Corresponding author : Dongjoo Park, djpark@uos.ac.kr

Vol. 22 No.2(2023)
April, 2023
pp.29~43

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2023.22.2.29>

Received 14 February 2023
Revised 15 February 2023
Accepted 20 February 2023

© 2023. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요 약

재난 및 재해 상황시 이동관리전략을 신속히 마련하기 위해서는 특정 도로구간을 통행하는 교통류의 특징과 도로의 위상학적 구조 등을 사전에 파악해야 할 필요성이 있다. 이는 도로관리자가 미시적 도로단위별로 취약성을 평가한 후 재난·재해 상황에 대비한 적절한 모니터링과 관리방안을 설정하는데 중요한 근거가 될 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 도시부 도로링크별 취약성 평가를 위하여 공간밀도, 시간점유율, 네트워크 매개중심성 지표를 제시하였으며, 거리 및 밀도기반 클러스터링 분석을 통하여 각 링크그룹별로 가지고 있는 시공간 및 위상학적 취약성을 정의하였다. 본 연구를 통해 제시된 결과는 도로 링크를 집단별로 특성화하여 취약성을 관리하는 것에 활용될 수 있으며, 재난·재해 시 우선 통제지점 선정 및 최적경로 제시를 위한 기초자료로도 활용 가능할 것으로 기대된다.

핵심어 : 도로취약성, 공간밀도, 시간점유율, 매개중심성, 클러스터링

ABSTRACT

It is necessary to grasp the characteristics of traffic flow passing through a specific road section and the topological structure of the road in advance in order to quickly prepare a movement management strategy in the event of a disaster or disaster. It is because it can be an essential basis for road managers to assess vulnerabilities by microscopic road units and then establish appropriate monitoring and management measures for disasters or disaster situations. Therefore, this study presented spatial density, time occupancy, and betweenness centrality index to evaluate vulnerabilities by road link in the city department and defined spatial-temporal and topological vulnerabilities by clustering analysis based on distance and density. From the results of this study, road administrators can manage vulnerabilities by characterizing each road link group. It is expected to be used as primary data for selecting priority control points and presenting optimal routes in the event of a disaster or disaster.

Key words : Vulnerability, Density, Time occupancy, Betweenness centrality, Clustering

I. 서론

과거 자연재해를 지칭하는 의미로만 사용되었던 ‘재난·재해’는 건물붕괴, 대규모 화재, 테러 등 그 성격이 다양해지고 복잡해짐에 따라 사회적 재난을 포함하며 그 의미가 확대되었다. 1995년 일본의 고베(kobe)에서 지진이 발생된 이후 교통 분야의 취약성에 대한 관심은 증가하였으며, 2001년 9월 11일 뉴욕에서 발생한 테러사건을 계기로 급부상하게 되었다(The Korea Transport Institute, 2011). 뿐만 아니라 재난 취약성에도 불구하고 재난 발생 시 도로 인프라의 역할은 긴급 구호·복구 관련 물자 및 인력의 동원을 비롯하여 이동경로의 제공과 동시에 해당 지역 주민의 피난경로제공 등 중요한 역할을 수행하고 있다(Lee, 2013).

재난·재해 상황 시 신속하고 안전한 대피에 대한 사람들의 관심 또한 높아지고 있으나 현재는 거시적 측면에서의 방재 및 대피 정책방안만 마련되어 있을 뿐, 차량·보행자 이동성과 같은 미시적 측면의 관리대책은 미흡한 상황이다. 따라서 재난·재해 상황 시 이동관리전략과 도로 이용자의 신속한 대피를 위한 의사결정 솔루션과 같은 실질적 대책 방안이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 재난·재해 시 이동관리전략을 마련하기 위해 도시부 도로의 링크별 취약성 특성을 사전적으로 분석하고자 하였다. 재난·재해는 특별한 상황으로 일상적인 도로의 통행패턴 및 도로 링크별 특성을 활용한 이동관리전략은 무의미하다. 그리고 재난·재해 상황 시 도로 링크별 위험노출의 취약성과 취약정도에 따른 이동관리전략이 달리 마련되어야 한다.

기존의 연구들에서도 다각적인 측면에서의 도로 취약성에 대한 연구가 수행되어 왔다. 도로의 취약성을 평가하기 위하여 통행시간에 따른 취약성 지표를 활용한 연구, 공간적 측면에서의 접근성, 통행거리를 취약성 지표로서 활용한 연구, 도로 네트워크의 위상학적 측면을 고려한 연구들이 수행되어 왔으나 해당 연구들은 각각의 단면적인 지표에 초점을 맞추어 시·공간과 네트워크의 위상학적 측면을 모두 고려한 연구로서는 한계가 있는 것으로 보인다.

이에 본 연구에서는 재난 및 재해시 교통상황을 시간적, 공간적 측면 모두 고려한 공간밀도(Spatial Index) 지표와 점유시간(Temporal Index) 지표, 도로네트워크의 위상학적 측면을 고려한 네트워크 매개중심성(Betweenness Centrality) 지표를 함께 고려하여 도시부 도로 링크별 취약성 특성을 분석하고자 한다. 이어서 이들 3가지 취약성 지표 분석결과를 활용하여 클러스터링 분석을 수행하고, 그룹별로 도로 링크별 취약성 특색이 어떻게 차별화되는지 도출하고자 하였다.

본 연구를 통해 생성된 취약성 지표를 활용해 재난 및 재해 상황이 발생하기 전에 미리 도로 링크별 위험노출 정도를 파악하여 모니터링 및 제어 등에 반영할 수 있으며, 군집분석 결과를 통해 유사한 특성을 가진 도로 링크별 집단을 효율적으로 관리할 수 있을 것이다. 또한 재난·재해 시 우선 통제지점 선정 및 최적경로 제시를 위한 기초자료로 활용 가능하며, 재난·재해 상황에서 차량·보행자의 대피를 위한 이동관리전략 마련을 위한 자료로도 활용될 수 있다.

II. 선행연구고찰

도로 링크별 취약성분석을 수행하기 앞서 취약성 지표에 대한 선행연구 고찰을 수행하였다. 기존 연구에서는 다양한 측면에서의 도로 취약성에 대한 연구가 수행 중이었으며, 크게 시간적 측면, 공간적 측면, 네트워크 위상학적 측면을 고려한 연구를 고찰하였다.

시간적 측면을 고려한 취약성 지표분석의 경우, Jenelius(2009)는 지리적 불균형이 도로망 구조와 통행패턴

에 미치는 영향을 통행시간 및 네트워크 위상학적 측면에서 분석하였고, Chikaraishi et al.(2020)의 연구에서는 재해와 같은 비상상황시 혼잡정도를 파악하기 위해 시간점유율 지표를 활용하였다. 공간적 측면에서의 도로 취약성 연구는 Cantillo et al.(2019)가 대표적이며 해당 연구에서는 접근성 및 경제성 지표를 활용하여 재난재해시 중요한 링크를 식별할 수 있는 교통망 취약성 평가 모델을 제안하였다. Bono and Gutiérrez(2011)의 연구에서는 통행거리 및 경제성 지표를 활용하여 그래프 이론 개념과 GIS 기반의 공간분석을 결합하여, 재난·재해로 인한 도로망이 훼손시 도시공간 접근성이 어떻게 감소하는지를 평가하였다. Dehghani et al.(2014)는 통행거리 지표를 활용하여 도로망 상태에 따른 취약성에 미치는 영향을 설명하기 위한 알고리즘 프레임워크 개발하였고, Scott et al.(2006)은 도로용량 및 네트워크 토폴로지를 활용하여 중요 링크 식별 및 네트워크 성능을 평가하기 위한 시스템 차원의 접근방식을 제시하였다.

네트워크 위상학적 측면에서 도로 취약성 연구는 네트워크 토폴로지 및 경제성 비용을 활용하여 도시 네트워크의 다양한 취약성을 식별하고, 도시부 도로 링크의 서비스수준을 고려한 새로운 네트워크 취약성 분석을 수행하였다. Chen et al.(2012)의 연구에서는 네트워크 토폴로지 및 경제성 비용을 활용하여 링크 폐쇄의 결과를 평가하기 위한 "impact area"를 활용하여 취약성 분석 접근방식을 제안하였다. Hong et al.(2016) 보도를 이용하는 시민들의 시공간적 위험노출을 평가하기 위해 공간밀도와 시간점유율을 지표로 사용하였다. 또한 El-Rashidy and Grant-Muller(2014)은 고속도로망의 취약성에 대한 평가방법 제시를 위하여 교통류에 기반한 네트워크 취약성 지수를 제안하였다. 그 외 Yin and Xu(2010), Dong et al.(2020)의 연구에서는 네트워크 연결성 측면을 고려한 취약성 분석, Jenelius et al.(2006), Dalziell and Nicholson(2001)의 연구에서는 통행비용 측면에서의 취약성 분석을 수행하였다.

이처럼 기존의 연구들은 여러 지표들을 제시함으로써 도로 취약성을 평가하는 연구를 시도하였으나 본 연구에서 제시하는 바와 같이 시간적·공간적 측면과 네트워크의 위상학적 측면을 모두 고려한 연구로서는 미흡한 것으로 보인다. 이렇게 세 측면의 지표를 고려할 경우 재해 및 재난상황에서 발생하는 동적 교통류의 변화를 다각적으로 추적하고 평가 가능하다는 장점이 있다. 이에 본 연구에서는 시공간 측면을 고려한 공간 밀도(Spatial Index) 지표, 점유시간(Temporal Index) 지표, 도로네트워크의 위상학적 측면을 고려한 네트워크 매개중심성(Betweenness Centrality) 지표를 제시하였다. 각각의 취약성 지표들의 특성을 기반으로 클러스터링 분석을 수행한 후 분석결과를 토대로 도로 링크별 취약성을 평가하고 가장 취약한 도로 링크를 판단하고자 하였다.

<Table 1> Summary of literature reviews

Authors	Key finding	Vulnerable index	Methods
Berdica(2002)	Framework for Analysis of Vulnerabilities in Road Traffic Systems	Accessibility, availability, risk probability	-
Dalziell and Nicholson (2001)	Investigate potential hazards to close road sections on Desert Road, New Zealand	probability of closure, closure duration, economic cost	benefit-cost ratio, Monte Carlo simulation
Cantillo et al.(2019)	Development of a transportation network evaluation model that can identify important road links in preparation for disasters	social costs, deprivation costs, accessibility, resilience, vulnerability	economic analysis
Balijepalli and Oppong (2014)	Network Vulnerability Analysis Considering Serviceability of Urban Road Link	generalized cost, Network efficiency, importance, Network Robustness Index, Network Vulnerability Index	multiple routes based on user equilibrium principle

Authors	Key finding	Vulnerable index	Methods
Bono and Gutiérrez(2011)	An evaluation of road network damage caused by disasters and disasters by combining graph theory concept and GIS-based spatial analysis	Cost distance, accessibility	GIS Network analysis, graph cluster analysis
Chen et al.(2012)	Development of vulnerability analysis methodology for impact area	demand variations, travelers' risk-taking behavior	reliability-based user equilibrium (RUE) model
Dehghani et al.(2014)	An algorithmic framework for explaining the effects of road network conditions on vulnerabilities	network efficiency, vehicle miles of travel	condition-based vulnerability assessment (CBVA)
Jenelius et al.(2006)	Based on the increase in travel costs when the link is closed, importance indicators and site exposure indicators are derived from two perspectives: "equal operations" and "social efficiency"	travel cost, importance indices, site exposure indices	user equilibrium model
Scott et al.(2006)	A system-wide approach to identifying critical links and evaluating network performance	network flow, link capacity, network topology	user equilibrium assignment model
El-Rashidy and Grant-Muller(2014)	Proposal of the evaluation method for vulnerability of highway network and the physical characteristics of road link and network vulnerability index based on traffic flow	physical and operational vulnerability indices	fuzzy logic, exhaustive search optimization
Jenelius(2009)	An Analysis of the Effect of Geographical Unbalance on Road Network Structure and Traffic Patterns	link redundancy, network scale, road density, population density, user travel time, traffic load	regression models
Yin and Xu(2010)	Measurement of Vulnerability in Road Network Structure and Proposal of Improvement Model	connectivity, efficiency, distance	Network topology, graph theory
Dong et al.(2020)	A framework for integrating network theory into infrastructure network assessment for safety evaluation of transportation networks	connectivity	network theory
Chikaraishi et al.(2020)	Applying machine learning models for non-recurring congestion such as disasters	traffic volume, time occupancy	random forest, XGBoost, deep neural network

Ⅲ. 데이터 수집

본 연구를 수행하기 위해 ViewT 2.0에서 제공하고 있는 2017년 기준 링크별·시간대별 평균속도 및 평균교통량 정보, KTDB(Korea Transport DataBase)에서 제공하고 있는 2017년 기준 전국 도로망 GIS DB 자료, 서울시 교통정보시스템(TOPIS)에서 제공하고 있는 서울시 교통량 조사자료, 그리고 내비게이션 궤적정보를 활용하였다. <Fig. 1>에서 보여주는 ViewT 2.0 데이터는 실제 차량의 통행이력 자료와 각 시도별 교통량 조사 자료를 활용하여 링크별, 시간대별 평균속도 및 평균교통량을 추정한 데이터로서 표준노드링크와 전국 도로망 GIS DB에 매칭 가능하도록 제공하고 있다.

KTDB에서 제공하고 있는 2017년 기준 전국 도로망 GIS DB는 총 471,810개의 노드와 605,498개의 링크로 구축되어 있다. 노드에는 교차로 명칭, 좌표 등 정보를 포함하고 있으며, 링크에는 도로등급, 도로번호, 차로 수 등의 정보를 포함하고 있다. 전국 도로망 GIS DB는 실제 내비게이션 데이터를 활용하여 구축되기 때문에

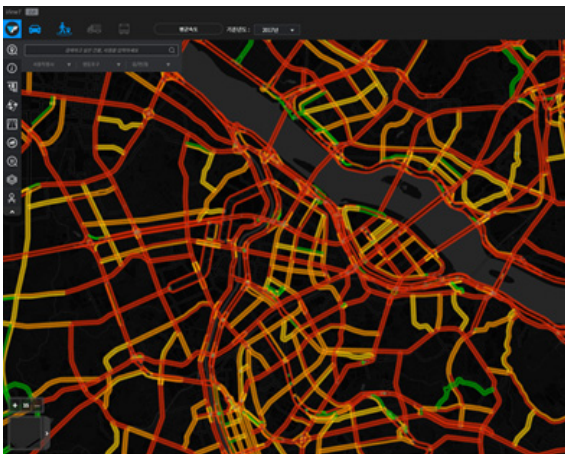
링크의 길이는 실제 도로연장과 같으며 링크의 분할은 차로수의 변경, 신호교차로 지점, 신호등 및 교통시설물 등에 의해 분할되고 있다.

<Table 2> Data descriptions

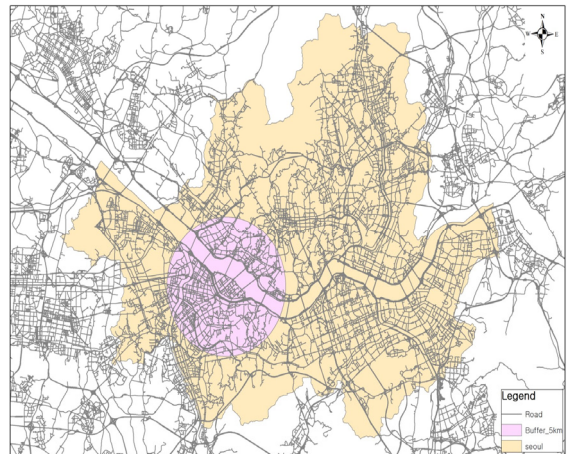
Type		Data component
Road network GIS Database	Node	· Node ID, Intersection ID, Signal type, X/Y coordinate
	Link	· Link ID, Link length, Number of lanes, Number of signal, Road ID 등
ViewT 2.0 Database		· Link ID, Travel time, Average traffic volume, Average speed 등

서울시 교통정보시스템(TOPIS)에서 제공하고 있는 서울시 교통량 조사 자료는 주요간선도로 및 도시고속도로 등 총 145개 조사지점에서 차량검지기(Loop)를 활용하여 도로별·지점별·방향별·시간대별로 수집된다. 내비게이션 데이터는 개별 차량의 이동궤적(Trajectory)에 대해 시간의 연속성과 공간의 연결성이 동시에 수집되는 입체적인 형태의 데이터이다. 내비게이션 궤적정보는 point to point(P2P) 형태로 차량의 이동에 따라 3초마다 시간과 위치정보를 수집한다. 본 연구를 위하여 2017년 12월 6일 데이터를 활용하였으며, 총 1,716대의 차량, 6,067,628개의 궤적정보를 활용하여 분석을 수행하였다.

연구의 수행을 위하여 시간적·공간적 범위를 다음과 같이 설정하였다. 도시교통의 특성상 주중과 주말의 통행패턴이 다르고, 첨두시간과 비첨두시간의 통행패턴이 다르기 때문에 이를 모두 고려하여 주중/주말 및 첨두/비첨두시간을 시간적 범위로 설정하였다. 또한 연구의 재해 및 재난 상황을 교량의 불능상태로 고려하여 시나리오를 구성하기 위해 <Fig. 2>와 같이 공간적 범위는 서울특별시 여의도 일대로 선정하였다. 여의도는 교량을 통하여 진입 및 진출하기 때문에 교량의 불능상황이 발생시 대피를 위한 교통류의 이동에 제약사항이 있는 공간이라 할 수 있다. 분석은 여의도를 중심으로 반경 5km를 공간적 범위로 선정하였으며, 이는 노드 7,578개, 링크 9,624개에 해당한다.



<Fig. 1> ViewT 2.0 web service



<Fig. 2> Spatial scope of the study

본 연구에서는 분석의 현실성을 반영하기 위해 내비게이션 궤적정보, 서울시 교통량 조사자료, 도로망 GIS DB 데이터, ViewT 2.0의 링크별·시간대별 평균 교통량 자료를 활용하여 연구대상지인 여의도의 링크별·

시간대별 교통량을 추정하였다.

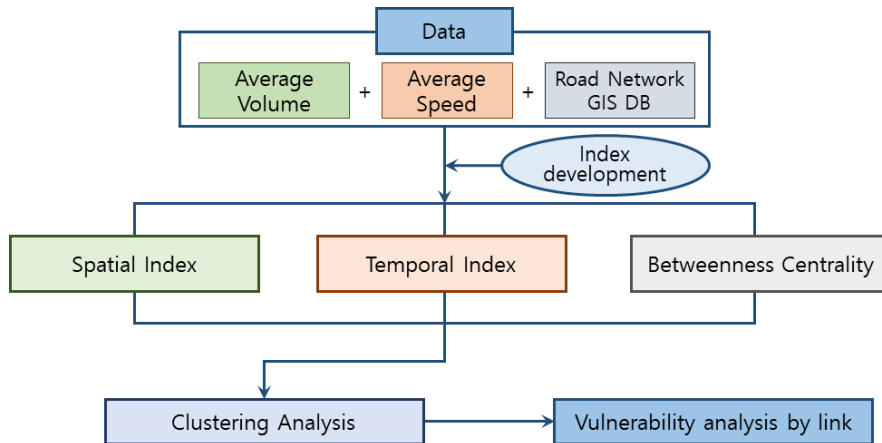
우선 내비게이션 궤적정보와 도로망 GIS DB를 활용하여 여의도가 기종점인 내비게이션 개별 차량, 여의도 내를 통행하는 개별 차량, 여의도를 통과하는 개별 차량을 GIS 공간분석을 통해 추출하였다(㉔). 또, 같은 방법으로 여의도와 서울시를 연결하는 주요 교량 중 서강대교, 마포대교, 원효대교, 여의2교, 서울교, 여의교를 통과하는 개별 차량을 추출하였다(㉕). 그리고, 내비게이션을 활용하여 추출한 개별 차량(㉔, ㉕)을 시간대별로 구분하였다.

두 번째로 서울시 교통량 조사자료 중 서강대교, 마포대교, 원효대교, 여의2교, 서울교, 여의교의 시간대별 교통량 조사자료와(㉖) 교량을 통과하는 내비게이션 개별 차량 자료를(㉕) 활용하여 여의도 전체 내비게이션 개별 차량 자료를(㉔) 보정하였으며, 이를 활용하여 시간대별 여의도 교통량을 추정하였다(㉗).

마지막으로 ViewT 2.0 데이터의 링크별·시간대별 평균 교통량 자료를 활용하여 여의도 링크별 교통량 비율을 산정하였고(㉘), 산정된 비율과 시간대별 여의도 추정 교통량을(㉗) 활용하여 여의도 링크별·시간대별 교통량을 추정하였다. 추정된 시간대별 교통량은 서울시 교통정보시스템(TOPIS)에서 제공하는 CCTV 정보를 활용하여 링크별 교통량을 검증하였다.

IV. 연구 방법론

본 연구는 재난·재해 상황 시 도로 링크별 위험노출의 취약성을 평가하기 위하여 2가지 분석단계를 수행하였으며 전체적인 연구과정은 <Fig. 3>과 같다. 첫 번째는 도로 링크의 평균속도, 평균교통량, 링크의 속성 정보 등을 활용하여 도로 링크의 취약성을 평가할 수 있는 지표를 개발하였고, 두 번째는 개발된 취약성 지표를 활용하여 군집분석을 수행한 후 이를 활용하여 도로 링크별 위험노출의 취약성 평가를 수행하였다.



<Fig. 3> Process diagram for the study

1. 취약성 지표 개발

전술한 바와 같이 취약성 지표생성을 위해 KTDB의 전국 도로망 GIS DB와 ViewT 2.0(평균속도, 평균교통량)자료를 수집하였으며, 이를 활용하여 공간밀도(Spatial Index), 점유시간(Temporal Index), 네트워크 매개중

심성(Betweenness Centrality) 3가지 지표값을 산정하였다.

1) 공간밀도(Spatial Index)

공간밀도(Spatial Index)는 식 (1)과 같이 교통량을 링크길이와 차로수의 곱으로 나눈 값으로 정의하였다. 해당 링크에 교통량이 많으면 밀도가 높고, 차로수가 많거나 링크길이가 길면 밀도는 낮아진다. 앞에서 설명한 바와 같이 전국 도로망 GIS DB는 교차로, 신호등, 차로수 변경에 의해 링크가 분할되고, 특히 비연속류 도로(시내도로) 중 신호교차로에 해당하는 도로 링크의 길이는 짧아진다. 반면 연속류 도로의 경우 도로 링크 길이는 길어진다. 신호교차로에 해당하는 도로 링크는 신호등, 좌회전 전용차로 및 우회전 차로에 의한 차로수 변경 등으로 링크가 분할되어 링크 길이가 짧아지고, 연속류 도로는 진출입 도로에 의한 링크 분할이 이뤄지기 때문에 상대적으로 링크의 길이가 길어지는 것이다. 이러한 특성을 고려할 때 비연속류의 도로는 짧은 링크길이와 많은 교통량으로 재난·재해 시 공간밀도를 높여 링크의 취약성을 높일 수 있는 반면, 신호교차로에서의 회전차로 등으로 경로변경의 선택 수가 많아져 링크의 취약성을 낮추는 원인이 되기도 한다.

$$SI_i = \frac{wk_V_{ti}}{L_i \times NL_i} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, SI_i : 공간밀도(veh/h · m · lane)
 wk_V_t : 평일 시간대별 교통량(veh/h)
 i : 개별링크
 L : 링크길이(m)
 NL : 차로수(lane)

2) 점유시간(Temporal Index)

공간밀도만 활용하여 재난·재해 시 도로 링크의 위험노출 취약성을 평가하게 되면 통행시간에 의해 위험노출이 무한대로 길어지는 현상을 간과하게 되기 때문에 본 연구에서는 점유시간(Temporal Index)을 함께 고려하였다. 지난 2020년 8월 서울의 집중호우로 한강수위가 높아져 연속류 도로에 해당하는 강변북로, 올림픽대로, 동부간선도로가 침수되는 일이 발생하였으나, 교통통제 및 안내가 제대로 이뤄지지 않아 차량이 고립되는 일이 벌어졌다. 이처럼 연속류 도로는 링크의 길이가 길어짐에 따라 공간밀도는 낮을 수 있으나 점유시간이 높아져 재난·재해 상황 시 위험노출의 취약성을 보이기도 했다. 이에 본 연구에서는 재난·재해 상황 시 도로 링크의 취약성을 평가하기 위해 공간밀도(Spatial Index) 뿐만 아니라 점유시간(Temporal Index)도 함께 고려하여 점유시간(Temporal Index) 지표를 제시하였다. 점유시간(Temporal Index)은 식 (2)와 같이 링크길이를 평균속도로 나눈 값의 제곱에 교통량을 곱하는 것으로 정의하였다.

도로링크 통과시간이 길거나 교통량이 많은 경우 점유시간은 높아지는 것을 의미하며, 특히 연속류 도로와 같이 링크의 길이가 길수록 점유시간은 높아지고, 해당 링크를 통과하는 것 외에는 경로변경이 어렵기 때문에 재난·재해 상황에서 위험노출에의 취약성이 높다고 할 수 있다.

$$TI_i = \left(\frac{L_i}{wk_S_{it}}\right)^2 \times wk_V_{it} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, TI_i : 점유시간(veh · hour)
 wk_V_t : 평일 시간대별 교통량(veh/hr)
 wk_S_t : 평일 시간대별 평균속도(km/hr)
 t : 시간대(hr)
 i : 개별링크
 L : 링크길이(km)

3) 네트워크 매개중심성(Betweenness Centrality)

재난·재해 상황 시 도로 링크의 취약성을 평가하기 위해 네트워크 매개중심성(Betweenness Centrality)을 살펴 보았다. 네트워크 매개중심성은 전체 네트워크에서 위상구조학상 어느 링크가 가장 중심성을 띄고 있는지를 분석하는 것으로 일정 링크가 모든 최단경로 상에서 중복되는 횟수에 따라 결정된다. 네트워크 매개중심성이 높다는 것은 위상구조학상 중요한 링크라는 것을 의미하며, 이는 재난·재해 상황 시 많은 차량들이 대피를 위해 중요한 링크로 집중될 수 있으므로 위험노출에 취약하다는 것으로 해석할 수 있다.

$$C_B(L_i) = \sum_{O \neq D} \frac{g_{OD}(L_i)}{g_{OD}}, \quad i \neq O \neq D \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서, $C_B(L_i)$: 링크 i 의 매개중심성
 g_{OD} : 링크 O 와 D 간의 최단경로의 개수
 $g_{OD}(L_i)$: 링크 O 와 D 간의 최단경로 가운데 링크 i 를 포함하는 경로의 개수

2. 군집분석 및 성능평가

재난·재해 상황 시 도로 링크별 위험노출의 취약성을 그룹별로 평가하기 위해 앞서 개발한 취약성 지표들을 활용하여 군집분석을 수행하였고, 군집분석결과를 토대로 군집별로 특색있게 나타나는 링크별 취약성을 분석하고 평가를 수행하였다. 군집분석 방법 중 거리기반 분석인 Hierarchical, K-means과 밀도기반 분석방법인 DBSCAN을 수행하였으며, 모형의 성능평가를 위한 Silhouette 분석을 수행하여 최종모형을 도출하였다.

1) k-means 클러스터링

k-means 클러스터링은 군집의 중심점(centroid)을 기준으로 가장 가까운 데이터를 선택하여 군집화하는 것이다. 군집 중심점은 선택된 데이터들의 평균 중심점으로 중심점이 이동하며 다시 가까운 데이터를 선택, 다시 중심점을 평균 지점으로 이동하는 프로세스를 반복 수행한다. 모든 데이터에서 더 이상 중심점의 이동이 없을 때 반복을 멈추고 해당 중심점에 속하는 데이터를 군집화 하는 기법이다. k-means 클러스터링은 쉽고 간단결하여 일반적으로 가장 많이 활용되는 알고리즘이지만, 거리 기반 알고리즘으로 데이터의 개수가 많을 경우 군집 정확도가 떨어질 수 있다. 또한 군집의 수(k)를 미리 정해주어야 하며, 초기값에 따라 군집의 결과가 달라질 수 있다(Kwon, 2020). 본 연구에서는 k-means 클러스터링을 수행하기 위해 유클리디안 알고리즘(Euclidean algorithm)을 기본 가정으로 수행하였고, 식 (4)에서 d 는 거리이며, x 와 y 는 데이터 지점 위치이다.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

2) Hierarchical 클러스터링

Hierarchical 클러스터링은 개별 대상 간의 거리에 의하여 유사성이 큰 데이터끼리 순차적으로 병합 및 분할함으로써 계층구조를 형성해가는 방법이다. Hierarchical 클러스터링은 Agglomerative 방법과 Divisive 방법으로 나뉜다. Agglomerative 방법은 bottom-up 방식으로 가까운 군집들끼리 계속적으로 군집화하여 모든 개체들이 하나의 군집에 속할때까지 진행하는 것이다. Divisive 방법은 top-down 방식으로 모든 개체들을 하나의 군집으로 군집화하여 가장 먼 군집들부터 차례로 분할시킨다(Nielsen, 2016). Hierarchical 클러스터링은 덴드로그램(Dendrogram)을 통하여 군집이 형성되는 과정을 정확히 파악할 수 있고, 군집의 수를 미리 결정하지

않아도 된다. 그러나, 데이터가 크면 연산시간이 오래걸리고, 분석하기 어렵다. 본 연구에서는 일반적으로 가장 많이 활용되는 Agglomerative hierarchical 클러스터링 분석방법을 활용하여 분석을 수행하였다.

3) DBSCAN

DBSCAN은 밀도 기반의 클러스터링 알고리즘으로 간단하고 직관적이며, 데이터의 분포가 기하학적으로 복잡한 데이터도 군집화가 가능하다. DBSCAN을 구성하는 가장 중요한 파라미터는 입실론(epsilon)과 최소 데이터 개수(min points)이다. 입실론(epsilon은 개별 데이터를 중심으로 입실론 반경을 가지는 원형의 영역을 의미하며, 최소 데이터 개수(min points)는 개별 데이터의 입실론 주변 영역에 포함되는 타 데이터의 개수이다. DBSCAN은 밀도가 높은 지역을 군집하는 방법으로 불규칙한 형태의 군집을 찾을 수 있으나, 조절 파라미터에 민감하게 반응하며, 군집 별 밀도가 서로 다를 때 적용하기 어렵다(Kwon, 2020).

4) Silhouette 분석

본 연구에서는 다양한 방법의 clustering 분석을 수행하고, Silhouette 분석을 통해 가장 적합한 분석방법을 선별하였다. Silhouette 분석은 데이터 군집에서 일관성 및 유효성을 검증하는 방법으로 -1에서 1까지 범위의 값으로 나타낸다. 식 (5)에서 $a(i)$ 는 작을수록, $b(i)$ 와 $s(i)$ 값이 클수록 성능이 좋다는 것을 의미한다.

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, \quad (-1 \leq s(i) \leq 1) \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $b(i)$: i 번째 데이터와가까운 이웃 군집에 속한 데이터 간거리의 평균
 $a(i)$: i 번째 데이터가속한군집의 데이터간거리의 평균

V. 분석결과

1. 취약성 지표 분석 결과

본 연구에서는 재난·재해 상황 시 도로 링크별 위험노출의 취약성을 평가하기 위하여 취약성 지표를 생성하고 이를 활용하여 군집분석을 수행하였으며, 분석결과를 토대로 도로 링크별 취약성을 평가하였다.

1) 공간밀도(Spatial Index) 지표분석 결과

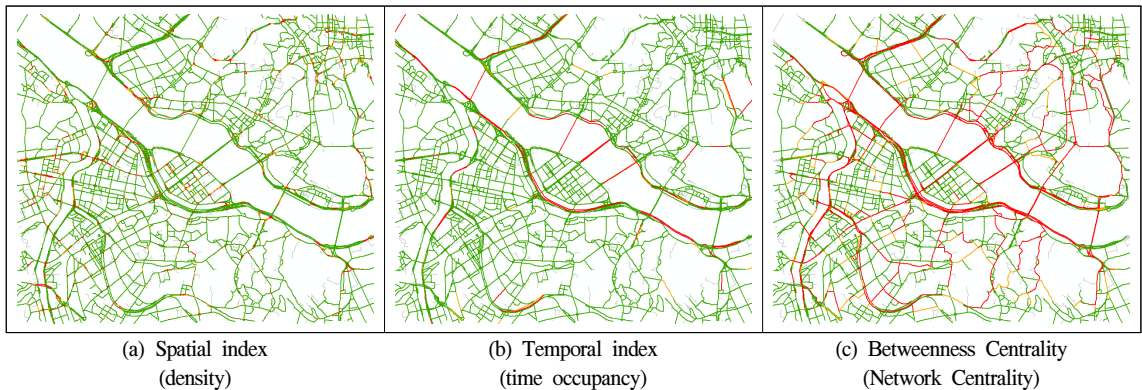
공간밀도(Spatial Index) 분석결과 <Fig. 4>의 (a)와 같이 신호교차로 및 입체교차로(IC/JC)에서 밀도가 높은 것으로 분석되었다. 일반적으로 도로 링크별 교통량이 많으면 밀도가 높고, 차로수가 많거나 링크길이가 길면 밀도는 낮아진다. 이러한 링크의 특성으로 볼 때, 신호교차로에서 밀도가 높은 이유는 주요 교차로일수록 교통량이 많고, 신호교차로의 링크는 회전차로(좌회전/우회전) 등에 의해 링크가 분할되어 링크길이가 짧아지기 때문이다. 입체교차로(IC/JC)에서 밀도가 높은 것은 분기점인 도로일수록 교통량이 많고, 대부분의 IC 또는 JC의 차로수가 1차로이기 때문인 것으로 분석되었다. 재난·재해 상황에서 밀도가 높은 링크는 위험노출의 취약성이 높다고 할 수 있으나, 링크 길이가 짧고 회전차로(좌회전/우회전)이 존재할 경우 다른 경로로의 전환이 용이하여 취약성을 상쇄시킬 수 있는 이점도 존재한다. 이렇듯 공간밀도만으로는 재난·재해 상황 시 위험노출의 취약성을 평가하는데 한계가 있다고 판단하여 이를 보완하기 위해 점유시간(Temporal Index) 및 네트워크 매개중심성(Betweenness Centrality) 분석을 수행하였다.

2) 점유시간(Temporal Index) 지표분석 결과

점유시간(Temporal Index) 분석결과 <Fig. 4>의 (b)와 같이 주요교량 및 도시고속도로 등과 같이 연속류 도로에서 점유시간이 높은 것으로 분석되었다. 링크 통과시간에 영향을 주는 요소는 교통량과 링크 길이로 교통량이 많거나 링크 길이가 길수록 점유시간은 증가한다. 즉 교통량이 많을수록 교통 혼잡이 발생하여 통행 시간 증가의 원인이 되고, 해당 도로 링크가 길수록 링크 통과하는데 걸리는 시간 또한 증가하기 때문이다. 이러한 점을 감안할 때 주요교량 및 도시고속도로 등과 같은 연속류 도로에서 점유시간이 높게 분석된 이유는 비연속류 도로에 비해 도로 링크 길이가 길고, 도로 링크별 교통량이 많아 해당 링크를 통과하는데 걸리는 시간이 상대적으로 오래 걸리기 때문이다. 특히 연속류 도로는 해당 링크를 통과하는 것 외에는 경로변경이 불가능하므로 링크가 길수록 점유시간이 길어지고, 이는 재난·재해 상황 시 위험노출의 취약성이 높다는 것을 의미한다.

3) 네트워크 매개중심성(Betweenness Centrality) 지표 분석 결과

네트워크 매개중심성(Betweenness Centrality) 분석결과 <Fig. 4>의 (c)와 주요교량 및 도시고속도로를 비롯하여 주요 간선도로의 중심성이 높은 것으로 분석되었다. 전술한 바와 같이 네트워크 매개중심성은 위상구조학 상 어느 링크가 가장 중심성을 띄고 있는지를 분석하는 것으로 모든 최단경로 상에서 중복되는 횟수에 따라 결정된다. 특히 네트워크 매개중심성이 높게 분석된 주요 교량, 도시고속도로, 주요 간선도로망은 실제 서울시 도로 교통망에서 중요한 역할을 담당하는 도로로써 높은 교통량으로 인한 상시혼잡구간에 해당한다. 이렇듯 네트워크 매개중심성이 높은 도로는 위상구조학 상 중요한 링크라는 것을 의미하며, 네트워크 매개중심성(Betweenness Centrality) 지표 값이 클수록 재난·재해 상황에서 위험노출에 취약하다고 할 수 있다.



<Fig. 4> Results of vulnerability index analysis

2. 군집분석 및 성능평가 결과

1) 성능평가 분석결과

이상에서는 재난·재해 상황 시 도로 링크별 위험노출의 취약성을 평가하기 위하여 세가지 지표를 제시하고, 각 지표에 따라 도로 링크별 취약성 특성을 분석하였다. 분석결과 도로 취약성은 지표에 따라 링크별 다양한 특성을 가지는 것으로 분석되었고, 개별 지표를 활용하여 링크의 취약성을 특성화하기에는 한계가 있는 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 재난·재해 상황 시 도로 링크별 취약성을 특성화하기 위해 복수의 지표를

고려한 링크별 취약성 분석이 수행되어야 할 것으로 판단하였고, 클러스터링 분석을 통해 도로 링크별 취약성 특성이 어떻게 차별화되는지 도출하고자 하였다. 군집분석 방법은 k-means, Hierarchical, DBSCAN clustering을 모두 수행하였으며, Silhouette 분석을 통해 가장 적합한 모형을 선별하였다. 또 도시교통의 특성상 주중과 주말의 통행패턴이 상이하고, 첨두시간과 비첨두시간의 통행패턴이 다르기 때문에 이를 분석 그룹단위로 분류하여 군집분석을 수행하였다. <Table 3>에서 나타나는 바와 같이 군집분석 방법 중 성능평가 결과가 가장 우수한 것은 k-means 클러스터링 분석이었으며 클러스터(k)의 개수가 8개일 때 Silhouette coefficients 값이 가장 커 모형의 성능이 타 모형들보다 높은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 k-means 클러스터링 모형을 통해 각 링크를 8개로 군집화하고 군집별 도로취약성 특징을 <Table 4>와 같이 정의하였다.

<Table 3> Results of performance evaluation by clusters

Temporal scope		Number of clusters	K-means	HC	DBSCAN
Weekday	Peak time	5	0.47	0.32	0.03
		6	0.55	0.33	0.12
		7	0.53	0.37	0.14
		8	0.63	0.35	0.2
	Non-peak time	5	0.5	0.34	0.08
		6	0.53	0.37	0.09
		7	0.58	0.36	0.17
		8	0.64	0.42	0.22
Weekend	Peak time	5	0.55	0.32	0.08
		6	0.57	0.36	0.09
		7	0.63	0.42	0.17
		8	0.67	0.42	0.23
	Non-peak time	5	0.47	0.27	0.03
		6	0.56	0.3	0.11
		7	0.57	0.38	0.19
		8	0.64	0.41	0.21

<Table 4> Vulnerability evaluation by clusters

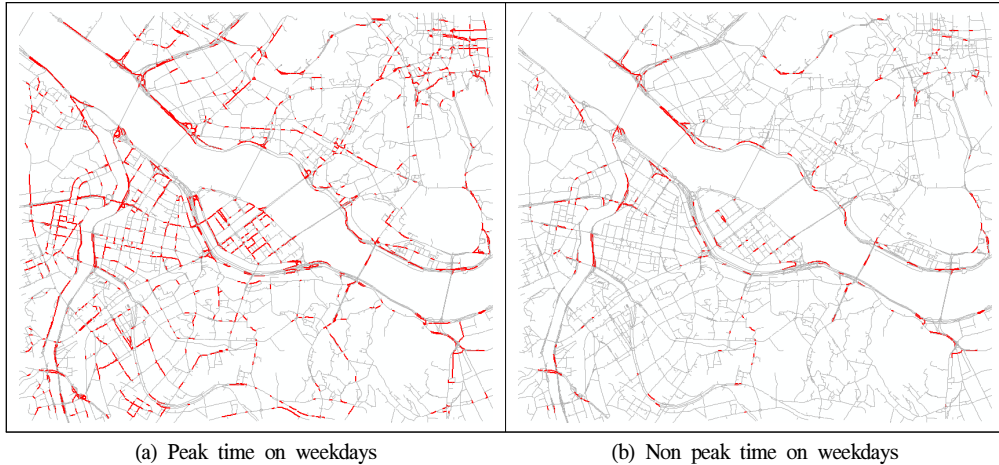
Cluster	Vulnerability evaluation
1	Spatial index, Temporal index, and Betweenness Centrality: Low
2	Spatial index: High
3	Temporal index: High
4	Betweenness Centrality: High
5	Spatial index, Temporal index: High
6	Spatial index, Betweenness Centrality: High
7	Temporal index, Betweenness Centrality: High
8	Spatial index, Temporal index, and Betweenness Centrality: High

2) k-means 클러스터링 분석결과

전술한 바와 같이 k-means 클러스터링 분석을 수행하기 위해 수집된 데이터를 주중 및 주말로 구분하였

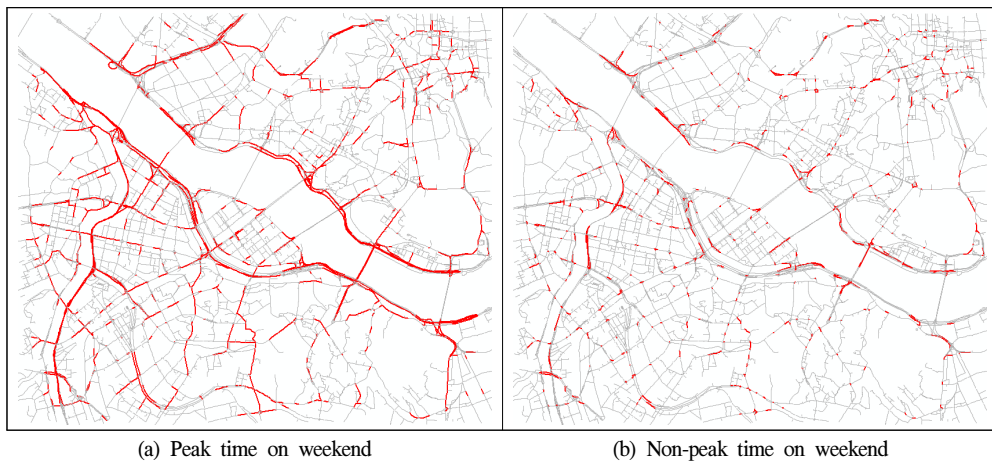
고, 이를 다시 첨두시간과 비첨두시간으로 구분하여 분석을 수행하였다. 또 공간밀도, 점유시간, 네트워크 매개중심성 값이 모두 높을 경우, 재난·재해 상황 시 위험노출의 취약성이 가장 높은 것으로 정의하였다.

주중 k-means 클러스터링 분석결과 <Fig. 5>와 같이 첨두시간/비첨두시간 모두 신호교차로 및 입체교차로(IC/JC)의 공간밀도, 점유시간, 네트워크 중심성이 모두 높았다. 이는 주중의 높은 출퇴근 교통량에서 기인한 것으로 판단된다. 특히 여의도는 국회의사당, 방송국, 금융기관 등 업무시설이 밀집된 지역으로 여의도 내 신호교차로에서 재난·재해 상황 시 위험노출에 취약한 것으로 도출되었고, 서강대교, 마포대교, 원효대교 등 여의도로 접근하기 위한 주요 교량의 입체교차로 지점에서 재난·재해 상황 시 위험노출에 취약한 것으로 나타났다.



<Fig. 5> Results of K-means clustering analysis: Weekdays

주말 k-means 클러스터링 분석결과 <Fig. 6>과 같이 공간밀도, 점유시간, 네트워크 매개중심성이 모두 높은 도로 링크는 첨두시간의 경우 서부간선도로, 내부순환로, 강변북로, 올림픽대로 등 주요 간선도로 및 도시고속도로인 것으로 분석되었다. 주중과 달리 주말의 경우 연속류 도로가 가장 취약한 것으로 나타난 것은 도시부 내의 연속류 도로의 경우 고속도로와 직접 연결되는 도로로서 주말의 통행 특성상 장거리 이동이 많



<Fig. 6> Results of K-means clustering analysis: Weekend

기 때문인 것으로 판단된다. 주말 비침두시간의 경우 주중 분석결과와 유사하게 신호교차로 및 입체교차로(IC/JC)에서 높은 것으로 분석되었으며, 주말 비침두시간은 일반적인 도시부 내 통행패턴을 보이기 때문으로 판단된다.

VI. 결 론

본 연구에서는 재난·재해 상황 시 도로 링크별 위험노출의 취약성 특성을 분석하기 위해 시공간적 측면에서 공간밀도(Spatial Index) 지표와 점유시간(Temporal Index) 지표, 도로네트워크의 위상학적 측면에서 네트워크 매개중심성(Betweenness Centrality) 지표를 활용하여 도로 링크별 취약성 특성을 분석하였다. 분석결과 도시부 내 신호교차로 및 입체교차로(IC/JC)에서 공간밀도가 높은 특징을 보였고, 주요 교량 및 도시고속도로와 같은 연속류 도로에서 점유시간이 높게 나타났다. 또한 서울시에서 주요 교통축에 해당하는 간선도로 및 연속류 도로에서 네트워크 매개중심성이 높은 것으로 분석되었다.

또한 제시된 세 가지 지표별 도로 링크의 취약성 특성 분석결과 값을 기반으로 군집분석을 수행하였고, 분석결과를 토대로 도로 링크 그룹별로 특징적인 취약성을 평가하였다. 군집분석을 위하여 거리 및 밀도기반의 hierarchical, k-means, DBSCAN 분석방법들이 수행되었으며, 성능평가 결과 클러스터 개수가 8개일 때 k-means 클러스터링이 가장 도로링크별 특성을 잘 분류하는 것으로 나타났다.

또한 도시부의 통행패턴은 주중과 주말, 침두시간과 비침두시간에 따라 통행패턴이 달라지기 때문에 이를 구분하여 클러스터링 분석을 수행하였다. 분석결과 주중의 침두시간/비침두시간 모두 신호교차로 및 입체교차로에서 위험노출의 취약성이 높은 것으로 분석되었다. 이러한 이유는 주중의 도시부 내 출퇴근 통행패턴이 반영됨에 따른 것으로 판단된다. 주말 침두시간의 경우 주요 간선도로 및 도시고속도로에서 위험노출의 취약성이 높은 것으로 나타났으며, 이는 주말의 통행 특성상 장거리 이동이 많기 때문인 것으로 보인다. 주말의 비침두시간은 주중과 유사하게 신호교차로 및 입체교차로(IC/JC)에서 높은 것으로 분석되었다.

지금까지의 수행되어온 많은 기존 연구들의 도로 취약성 평가는 시공간적 측면만을 고려한 것이 대부분이었으며, 시공간과 더불어 네트워크 위상구조학 측면을 고려하여 물리학적 교통류 예측에 기반한 취약성 평가는 미흡한 실정이다. 따라서 기존 연구에서 확장된 개념의 본 연구의 분석결과를 재난·재해 상황 시 이동관리전략을 마련하기 위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 주중과 주말, 침두시간과 비침두시간의 통행패턴 변화에 따른 재난·재해 상황 시 도로 링크별 취약성을 평가하고자 하였다. 분석결과 주중과 주말의 통행패턴에서 뚜렷한 차이를 보이고 있었으며, 도로 링크별 취약성 평가 또한 다르게 나타났다. 그러나 침두시간과 비침두시간의 통행패턴은 유사하게 분석되었다. 이는 ViewT 2.0에서 제공하는 시간대별 평균교통량 및 평균속도가 내비게이션 이력자료를 활용하여 추정된 값으로, 시간대별 통행패턴이 유사하게 나타났기 때문이다. 따라서 데이터 활용상의 문제로 침두시간 및 비침두시간의 통행패턴을 제대로 반영하지 못한 연구의 한계가 있으므로 향후 침두시간과 비침두시간의 통행패턴을 반영한 분석이 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 사용된 분석 도구는 과거의 예측자료를 토대로 한 것이지만 향후 실시간 교통정보를 반영할 경우, 실시간 교통상황에 맞는 도로 링크별 취약성 특성 분석 및 취약성 평가도 가능할 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 2019년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었음

REFERENCES

- Balijepalli, C. and Oppong, O.(2014), “Measuring vulnerability of road network considering the extent of serviceability of critical road links in urban areas”, *Journal of Transport Geography*, vol. 39, pp.145-155.
- Berdica, K.(2002), “An introduction to road vulnerability: What has been done, is done and should be done”, *Transport Policy*, vol. 9, no. 2, pp.117-127.
- Bono, F. and Gutiérrez, E.(2011), “A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster: The case of the seismically damaged Port Au Prince and Carrefour urban road networks”, *Journal of Transport Geography*, vol. 19, no. 6, pp.1443-1455.
- Cantillo, V., Macea, L. F. and Jaller, M.(2019), “Assessing vulnerability of transportation networks for disaster response operations”, *Networks and Spatial Economics*, vol. 19, pp.243-273.
- Chen, B. Y., Lam, W. H., Sumalee, A., Li, Q. and Li, Z. C.(2012), “Vulnerability analysis for large-scale and congested road networks with demand uncertainty”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 46, no. 3, pp.501-516.
- Chikaraishi, M., Garg, P., Varghese, V., Yoshizoe, K., Urata, J., Shiomu, Y. and Watanabe, R.(2020), “On the possibility of short-term traffic prediction during disaster with machine learning approaches: An exploratory analysis”, *Transport Policy*, vol. 98, pp.91-104.
- Dalziell, E. and Nicholson, A.(2001), “Risk and impact of natural hazards on a road network”, *Journal of Transportation Engineering*, vol. 127, no. 2, pp.159-166.
- Dehghani, M. S., Flintsch, G. and McNeil, S.(2014), “Impact of road conditions and disruption uncertainties on network vulnerability”, *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 20, no. 3, pp.04014015(1-8).
- Dong, S., Mostafizi, A., Wang, H., Gao, J. and Li, X.(2020), “Measuring the topological robustness of transportation networks to disaster-induced failures: A percolation approach”, *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 26, no. 2, pp.04020009(1-17).
- El-Rashidy, R. A. and Grant-Muller, S. M.(2014), “An assessment method for highway network vulnerability”, *Journal of Transport Geography*, vol. 34, pp.34-43.
- Hong, J., Shankar, V. N. and Venkataraman, N.(2016), “A spatially autoregressive and heteroskedastic space-time pedestrian exposure modeling framework with spatial lags and endogenous network topologies”, *Analytic Methods in Accident Research*, vol. 10, pp.26-46.
- Jenelius, E.(2009), “Network structure and travel patterns: Explaining the geographical disparities of road network vulnerability”, *Journal of Transport Geography*, vol. 17, no. 3, pp.234-244.
- Jenelius, E., Petersen, T. and Mattsson, L. G.(2006), “Importance and exposure in road network vulnerability analysis”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 40, no. 7, pp.537-560.

- Kwon, C.(2020), *The Perfect Guide of Python Machine Learning*, Wikibooks, pp.409-410, pp.441-442.
- Lee, J.(2013), “A Study on the Establishment of Disaster Prevention Road Network in Korea through Analysis of Disaster Prevention System in Japan”, *International Journal of Highway Engineering*, vol. 15, no. 4, pp.5-8.
- Nielsen, F.(2016), *Introduction to HPC with MPI for Data Science*, Springer, pp.221-239.
- Scott, D. M., Novak, D. C., Aultman-Hall, L. and Guo, F.(2006), “Network robustness index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks”, *Journal of Transport Geography*, vol. 14, no. 3, pp.215-227.
- The Korea Transport Institute(2011), *A Preliminary Study on National Traffic Forecasting System Development to Cope with Transportation Vulnerability*, pp.1-4.
- Yin, H. Y. and Xu, L. Q.(2010), “A model for identifying vulnerable links of road networks based on Bayesian networks”, *Journal of Systems & Management*, vol. 19, no. 6, pp.656-661.