

# 재난 강도에 따른 도로 네트워크의 성능 및 회복력 산정 방안

## Estimation of Road-Network Performance and Resilience According to the Strength of a Disaster

정호용	Jung, Hoyong	정회원 · 한밭대학교 도시공학과 석사과정 (E-mail : hyjung513@naver.com)
최승현	Choi, Seunghyun	정회원 · 한밭대학교 도시공학과 박사수료 (E-mail : elflie@naver.com)
도명식	Do, Myungsik	정회원 · 한밭대학교 도시공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : msdo@hanbat.ac.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** This study examines the performance changes of road networks according to the strength of a disaster, and proposes a method for estimating the quantitative resilience according to the road-network performance changes and damage scale. This study also selected high-influence road sections, according to disasters targeting the road network, and aimed to analyze their hazard resilience from the network aspect through a scenario analysis of the damage recovery after a disaster occurred.

**METHODS :** The analysis was conducted targeting Sejong City in South Korea. The disaster situation was set up using the TransCAD and VISSIM traffic-simulation software. First, the study analyzed how road-network damage changed the user's travel pattern and travel time, and how it affected the complete network. Secondly, the functional aspects of the road networks were analyzed using quantitative resilience. Finally, based on the road-network performance change and resilience, priority-management road sections were selected.

**RESULTS :** According to the analysis results, when a road section has relatively low connectivity and low traffic, its effect on the complete network is insignificant. Moreover, certain road sections with relatively high importance can suffer a performance loss from major damage, for e.g., sections where bridges, tunnels, or underground roads are located, roads where no bypasses exist or they exist far from the concerned road, including entrances and exits to suburban areas. Relatively important roads have the potential to significantly degrade the network performance when a disaster occurs. Because of the high risk of delays or isolation, they may lead to secondary damage. Thus, it is necessary to manage the roads to maintain their performance.

**CONCLUSIONS :** As a baseline study to establish measures for traffic prevention, this study considered the performance of a road network, selected high-influence road sections within the road network, and analyzed the quantitative resilience of the road network according to scenarios. The road users' passage-pattern changes were analyzed through simulation analysis using the User Equilibrium model. Based on the analysis results, the resilience in each scenario was examined and compared. Sections where a road's performance loss had a significant influence on the network were targeted. The study results were judged to become basic research data for establishing response plans to restore the original functions and performance of the destroyed and damage road networks, and for selecting maintenance priorities.

### Keywords

*Resilience, network performance, total travel time cost, performance restoration, scenario analysis*

Corresponding Author : Do, Myungsik, Professor  
Dept. of Urban Engineering, Hanbat National University,  
125, Dongseodae-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34158, Korea  
Tel : +82.42.821.1192 Fax : +82.42.821.1185  
E-mail : msdo@hanbat.ac.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (Print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Nov. 13, 2017 Revised Nov. 21, 2017 Accepted Feb. 02, 2018

## 1. 서론

도로, 교량, 터널, 지하철도 등의 교통부문에서의 라이프라인(Life line)은 우리들의 일상적인 경제활동을 지원하는 연결성이 강한 사회기반시설 네트워크로 매우 중요한 자산이라고 할 수 있다. 이러한 라이프라인에 재난이 발생할 경우 1차 피해로만 그치는 것이 아니라 그 피해가 주위로 확산되어 네트워크 전체를 마비시키게 되어 큰 혼란을 야기해 대규모 인적·물적 피해를 초래하게 된다. 한편 도로 네트워크(도로망)는 실제 재난 상황에서 단·장기적인 측면에서 대피, 구조·구출 등을 위한 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 이러한 도로 네트워크에 대해 그 성능을 지속적으로 유지할 수 있도록 하여야 하며 사전적 교통방재 대책 수립을 통해 재난에 대비할 필요가 있다.

해외 선진국에서는 재난으로 인한 피해를 최소화하고 재난 발생 후, 일상으로 신속하게 회복시키기 위해 회복력(Resilience) 강화에 관한 연구와 정책이 활발하게 진행되고 있는 추세이다. 특히 미국의 경우 2005년 발생한 허리케인 katrina 등 자연재난으로 막대한 피해를 입은 후, 교통시뮬레이션 등을 활용한 연구를 진행하고 있으며 이를 통해 다양한 방재정책을 수립 및 운영을 통해 재난에 대비하고 있다(Duanmu et al., 2011).

한편 국내 방재계획의 경우 홍수, 산사태 등 재난의 유형에 초점을 두고 있어 선진국과는 차이가 있다고 할 수 있다. 특히 국내에서는 도시나 일부지역을 대상으로 시뮬레이션을 통해 재난 상황을 반영하여 도로 네트워크에 미치는 피해정도를 가정하고 이에 따른 네트워크에 미치는 성능 변화와 회복력을 고려한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 세종특별자치시(이후, 세종시)를 대상으로 재난 강도에 따른 도로 네트워크의 성능 변화를 살펴보고 도로의 성능과 피해규모에 따른 회복력 산정방안을 제시하고자 한다. 나아가 세종시 내의 일반 국도 1호선을 중심으로 도시 내 우선적으로 집중관리가 필요한 우선관리도로구간을 선정하고 복구시켰을 때의 효과를 살펴보는 것을 목적으로 한다.

## 2. 네트워크의 성능 및 회복력

### 2.1. 선행연구 고찰

전 세계적으로 기후변화와 도시화로 인해 대규모 자연적·인적재난의 발생빈도는 증가하고 있는 추세이며

재난의 잠재적 요인은 다양하기 때문에 이러한 요인들을 완벽하게 예방하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이로 인해 도로 네트워크의 성능을 유지한다는 것은 어려운 일이라 할 수 있다. 이에 UK DfT(2014)는 이상기후로 인해 기상 이변 횟수가 증가할 것이라는 예측을 고려해 기상 이변 등의 돌발 상황에 의한 교통 부문에서 성능 저하가 발생할 확률이 높아질 것으로 예측한 바 있다. 또한 이러한 재난·재해에 영향을 최소화하기 위해 해외 선진국에서는 이미 재난에 대한 교통시스템의 흡수 및 회복과정을 준비단계, 충격, 대응단계, 회복단계의 4가지로 구분하고 충격발생 전·후에 대한 회복력 향상 전략을 제시하였다(US DoT, 2009).

한편, 해외 선진국에서는 교통시뮬레이션을 활용한 방재대책에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Bahaaldin(2016)은 대도시의 대피 상황에서 교통사고의 위치가 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 교통사고가 병목 현상의 하류 부분에 발생하는 것이 상류에서 발생하는 것보다 재난 대피상황에서 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났는데 지체현상으로 인해 전체 대피 시간이 15분 정도 증가하는 것으로 분석되었다. 이를 통해 긴급 대피상황에서 교통관리자는 교통사고관리에 대한 우선순위를 결정할 수 있다고 제시하였다. 또한 Zhang et al.(2014)은 과거 미국 걸프만 해안에 발생한 허리케인 이동경로를 기반으로 한 대규모 대피 시나리오 분석을 수행하였다. TRANSIMS S/W를 활용하여 시나리오에 따른 대규모 지역 도로망의 성능 변화를 살펴보았으며 역방향 차로를 이용한 대피 전략이 전체 시스템의 효율성을 증가시키는 방법이라고 밝혔다. 나아가 Takeshita et al.(2007)은 지역의 수해상황에 대한 방재능력향상을 위하여 Multi Agent Model을 이용한 홍수 피난 시뮬레이터를 개발하였다. 사례분석으로서 일본 쿠마모토시를 대상으로 분석을 수행하였으며 피난 상황에서의 시간경과 특히, 주민의 대피상황에서의 경로선택에 대하여 실제로 수행된 주민의 대피행동을 GPS분석결과를 통해 반영하여 실제와 동일한 파라미터 값으로 시뮬레이션을 수행하였다.

한편 국내에서는 교통시뮬레이션 S/W를 활용하여 도로네트워크의 기능 및 특성을 고려한 네트워크 분석과 재난으로 인해 네트워크 연결성이 저하될 경우에 도로 이용객의 통행패턴을 고려하여 긴급대피교통로를 선정하고 이를 통한 대피 효과에 대해 살펴보았다(Do and Noh, 2016). 또한 Kim et. al.(2013)은 인간활동기반 교통수요분석 프로그램인 MATSim을 활용하여 신월지

하차도를 대상으로 도로 침수를 가정한 시나리오 분석을 통해 도로 침수로 도로의 기능을 상실하였을 경우 우회교통패턴 및 최적 대피경로를 분석하였다.

이처럼 돌발 상황을 극복하는 방법의 중요성을 강조하며 이러한 과정을 아우르는 회복력의 개념과 전략에 관한 연구와 시뮬레이션을 활용하여 재난 상황을 가정하고 최적의 대피경로 선정방안을 제시하는 연구는 많이 진행되고 있는 상태이다.

하지만 재난 상황의 시간 경과에 따라 도로 네트워크의 상태에 따른 성능 변화와 회복력을 고려한 사전 방재 대책 수립에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 재난 등의 발생 이후 도로 네트워크의 성능을 회복시켜야 하는 경우, 복구효과를 극대화하기 위한 방법에 관한 연구도 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 도로 네트워크를 대상으로 재난의 강도를 고려하여 도로의 파손 정도를 가정하였으며 시뮬레이션 분석을 통해 도로 네트워크의 성능 변화를 살펴보고 도로의 성능과 피해규모를 고려한 회복력 산정방안을 제시하고자 한다.

## 2.2. 성능 변화에 따른 통행시간비용 및 회복력

재난 등의 돌발 상황의 발생으로 도로 네트워크의 일부가 단절되거나 피해를 입어 그 성능을 유지하지 못할 경우, 기존의 운전자들은 새로운 이동경로를 고려하게 된다. 즉, 재난 발생으로 도로 네트워크의 연결성이 저하되면 이동성과 접근성 등의 성능이 크게 저하되면서 도로 이용자들의 통행패턴변화로 주변 지역까지 영향을 받아 전체 네트워크에 부정적인 영향을 미치게 된다.

따라서 재난 발생으로 도로 네트워크가 파손되어 네트워크 내 도로망(링크)이 단절되거나 손실될 경우, 성능 변화로 인한 도로운전자의 통행패턴 및 통행시간변화를 통해 사회적 비용을 추정하고 영향력이 큰 도로구간을 살펴보았다.

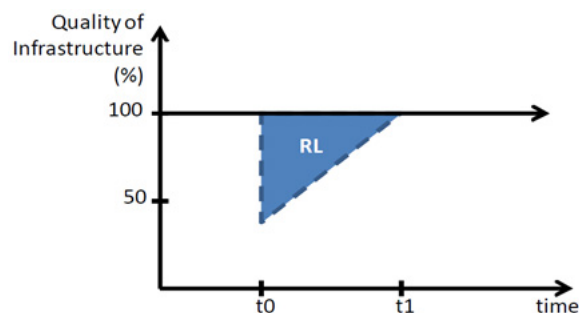
나아가 시간의 경과에 따른 도로 네트워크의 정량적인 회복력을 산정함으로써 향후 집중적인 관리가 필요한 도로구간을 선정함에 있어 도로 네트워크의 성능 변화가 전체 네트워크에 미치는 영향력(피해의 크기)을 비교하여 상대적으로 중요한 구간(링크)을 선정하고자 하였다.

회복력(Resilience)은 시스템이 어떠한 사건 등의 발생으로 인해 내·외부 충격으로 인해 발생하는 불안정성을 극복하여 시스템 기능을 회복하는 능력을 의미한다.

회복력에 관한 정의는 분야마다 매우 다양하게 존재하지만 공학적인 관점에서의 회복력은 기능의 복구 및 지속성에 초점이 맞춰져 있으며 복구 기간과 효율성의 특성을 통해 안정적 균형을 유지하고자 하는 개념이라 할 수 있다(Folke, 2006).

나아가 Bruneau et al.(2003)은 지진으로 인한 지역 사회의 회복력을 정의하고 회복력을 정량적으로 측정하는 개념을 제시한 바 있다. 또한 Rose(2007)는 회복력을 정적 회복력(static resilience)과 동적 회복력(dynamic resilience)으로 구분하고 재난 등으로 인해 네트워크의 성능 변화를 경제적 관점에서 비교함으로써 정량화하는 방법론을 제시하였다.

따라서 본 연구에서의 회복력은 재난 등의 돌발 상황의 발생으로 도로 네트워크가 충격을 받아 원래의 성능을 상실하였다가 다시 안정된 상태로 성능을 유지하거나 혹은 원래의 상태로 회복하는 속도로 정의하였다. 또한 도로 네트워크가 충격을 받아 원래의 성능을 상실하였다가 시간이 지나 원래의 성능으로 회복되었을 때 손실된 면적을 손실된 회복력으로 보았으며, 이를 정량적으로 산정한 손실된 회복력 면적이 넓을수록 상대적으로 중요한 도로구간으로 선정하였다(Fig. 1).



source : Bruneau et al.(2003); Eric D. Vugrin et al.(2010)

Fig. 1 Conceptual of Resilience Loss

재난 발생으로 도로 네트워크의 성능 저하에 따른 손실된 성능면적을 추정하기 위해 시나리오 분석기법을 통해 정량적인 회복력은 Eq. (1)에 근거하여 산정하였다.

$$Resilience\ Loss = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (1)$$

여기서,  $t_i$  : 시간

$Q(t)$  : 네트워크의 성능

한편, 본 연구에서는 네트워크 성능 변화에 따른 통행

시간비용과 회복력을 산정하기 위한 재난의 강도를 고려하여 시나리오 분석을 수행하였다. 재난의 강도는 매우 강하여 도로 네트워크(도로, 교량 등)가 완전히 단절되어 차량의 통행이 금지된 상태에서 점차 도로 네트워크가 복구되는 경우(차량의 통행 가능한 상태)로 가정하였다.

### 2.3. 회복력과 한계효용체감

재난 등의 발생 이후 도로 등 네트워크의 성능을 회복하기 위한 공공기관의 의사결정도 매우 중요하다. 특히 도로, 철도, 통신, 전기 등 네트워크로 형성된 기반시설물인 경우 이용자의 통행 및 수요가 많은 상대적 중요도로 및 구간(critical path or link)이 존재한다.

즉, 대상 도로 및 구간을 한 방향으로 복구할 경우 네트워크의 기능은 서서히 회복되겠지만 공공기관이 동일한 노력(복구에 필요한 예산과 시간 등)을 투입하더라도 상대적으로 효용이 큰 대안을 마련하는 것이 중요하다.

경제학의 개념으로 설명하면 공공기관이 사회기반시설의 복구를 위해 재화(즉, 비용 혹은 시간)를 소비함으로써 얻게 되는 것을 효용(즉, 네트워크의 성능 회복)이라 하면, 총 효용(TU: Total Utility)은 일정기간에 일정량의 재화를 투입하여 얻을 수 있는 효용의 총량을 의미하며, 투입되는 재화의 양(Q)과 총 효용의 관계는 Eq. (2)와 같다.

여기서, 한계효용(MU: Marginal Utility)은 재화를 한 단위 추가로 투입함에 따라 얻게 되는 총 효용의 증가분을 의미한다. 즉, 한계효용은 총 효용의 변화분을 그 재화의 소비량의 변화분으로 나눈 값이며 또한 총 효용함수를 소비량(Q)으로 1차 미분을 하면 한계효용이 되며 Eq. (3)과 같다.

$$TU = f(Q) \quad (2)$$

$$MU = \frac{dTU}{dQ} = f'(Q) \quad (3)$$

여기서, TU : 총 효용

Q : 재화의 투입량

한편 어떤 재화의 투입량을 증가하면 총 효용은 증가하게 되나 투입량이 증가해감에 따라 추가단위가 가져오는 총 효용의 증분인 한계효용은 점차 감소해가고, 어느 소비량수준에 도달하면 0이 된다. 그 때 총 효용은 극대가 되고, 그 이상의 투입량 증가에서는 한계효용이

음(-)의 값이 되어 총 효용도 감소하게 된다(Fig. 2). 이와 같이 한 재화의 투입량이 증가할수록 그 재화의 효용이 점점 감소하는 것을 한계효용체감의 법칙(law of diminishing marginal utility)이라 한다.

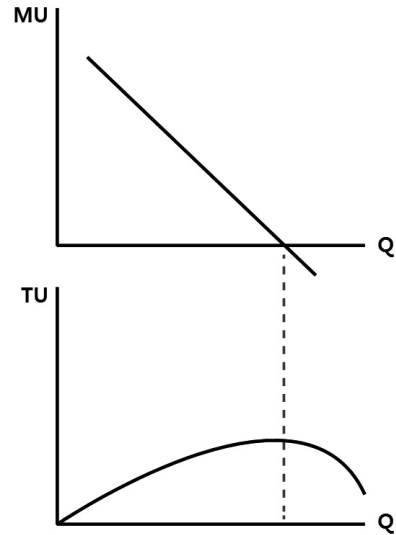


Fig. 2 Law of Diminishing Marginal Utility

본 연구에서는 도로 등 네트워크의 복구 등 성능을 회복하기 위해 투입되는 예산과 회복량(resilience)과의 관계에도 한계효용체감의 법칙이 성립하는지 실제 네트워크의 규모와 성능, 용량 등의 자료를 기반으로 살펴보기로 한다.

## 3. 도로파손 정도에 따른 영향력 분석

### 3.1. 분석대상지역 선정

본 연구에서는 세종특별자치시(세종시)와 인근 지역을 대상으로 분석을 수행하였다. 세종시는 2012년 7월 국가균형발전을 위한 목적으로 출범하였으며 현재 주요 행정기관 및 연구기관들이 위치하고 있어 국가의 주요 행정 및 연구의 기능을 수행하고 있는 중심지역이라 할 수 있다.

한편, 본 연구에서는 세종시를 통과하는 도로 네트워크 중 일반국도 1호선을 중심으로 도로 파손이 이루어질 경우에 미치는 네트워크의 성능 변화와 회복력을 산정하고자 하였다. Do and Noh(2016)은 일반국도 1호선이 1차 방재도로의 역할을 하는 도로로서 재난 발생 시 대피로 및 긴급교통로의 역할을 위한 주요 축이 된다고 밝힌 바 있다.

일반국도 1호선은 도시의 주요 골격을 이루는 노선으로 도시 내 주요생활권을 관통하며 외부도시와 연결된

도로라 할 수 있어 이러한 지역과 네트워크에 관한 사전적(ex ante) 방재대책이 수립되지 않는다면 실제 재난이 발생할 경우 대규모 사회적 손실이 예상된다고 할 수 있다.

분석을 위해 거시적 교통시뮬레이션 S/W인 TransCAD를 활용하여 국가교통DB센터(KTDB)에서 제공하는 대전광역권 네트워크 및 O/D자료를 기초로 분석을 수행하였다. 이 때 분석대상지역의 위성지도와 GIS자료 등을 활용하여 도로망 네트워크가 상세히 반영되지 않은 경우 수정·보완을 통해 분석대상지역의 자료를 구축하였다.

나아가 이용자 균형(User Equilibrium) 모형을 기반으로 하는 Multi-Class Assignment 기법을 적용하여 교통 분야에서 주로 사용하는 BPR(Bureau of Public Roads)함수를 통해 통행시간비용과 구간통행료를 합하여 산출하였다.

이러한 시뮬레이션 상의 통행배정이 실제 도로의 통행패턴을 반영하기 위해 정산(calibration)과정을 수행하였다.

는 하루 평균적인 교통량 변화 패턴이 서로 유사하면서 정량적인 교통특성이 거의 같은 인근 검지기들로 이루어진 구간이라 밝혔다.



Fig. 3 Target Area

$$TC_i = t_0 [1 + \alpha (\frac{V}{C})^\beta] VTC + EC_i \quad (4)$$

여기서,  $TC_i$  : 링크 i의 통행비용

$t_0$  : 링크 i의 자유속도일 때 통행시간

$V$  : 링크 통행량,  $C$  : 링크용량

$\alpha, \beta$  : BPR함수 파라미터(Parameter)

$VTC$  : 도로이용자의 시간가치 비용(원/시)

$EC_i$  : 링크 i의 통행료(통행료가 없는 구간 0)

한편 현재의 도로 상황을 반영한 최종 정산된 도로 네트워크를 기준으로 세종시를 통과하는 일반국도 1호선의 동질구간(homogeneous road section)을 선정하여 분석하고자 하였다. 동질구간은 교통류를 대상으로 유사한 교통 특성을 가지는 구간이다. 통행속도에 영향을 미치는 변수들이 일정한 구간을 구분할 때 적용되는데 도로 주변 개발현황, 교통량, 신호교차로, 도로 조건 등이 구분 기준에 포함된다(Do et al., 2004). 또한 Do et al.(2004)는 국도의 단속교통류의 특성을 고려하여 동질구간을 정의하였는데 도로의 공급측면에서는 주요 신호교차로의 분기,  $g/C$  비율(0.6 기준), 신호교차로간 거리(3.0km) 등으로 분할하였으며 교통수요측면에서

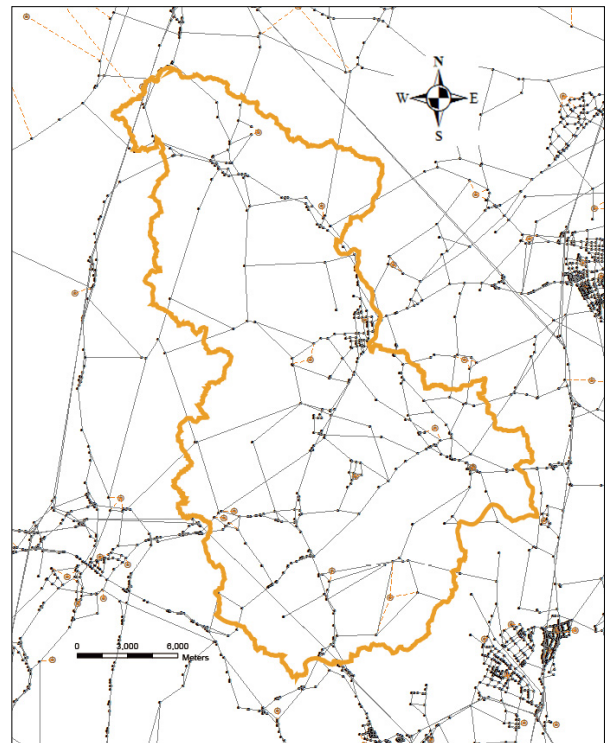


Fig. 4 Target Network

따라서 본 연구에서는 기존의 연구 성과를 활용하여 구간별 통과교통량 수준이 유사하고 차로 수가 동일하며, 주변에 우회도로가 존재하지 않는 경우에는 동질구간으로 정의하였으며 일반국도 1호선을 총 17개의 구간

으로 구분하여 분석을 수행하였다.

Table 1. Road Network Facilities in Analysis area

ID	Length(km)	Lanes	Volume(per hour)	Facilities
1	1.06	3	1,534	road
2	0.48	3	1,377	road
3	1.71	3	652	road
4	2.68	2	986	road
5	0.79	2	1,234	bridge
6	0.51	2	1,598	road
7	0.26	2	439	road
8	0.55	2	1,286	road
9	0.42	2	1,307	road
10	0.38	2	2,831	road
11	2.15	3	1,667	road
12	1.68	3	997	underground
13	0.7	3	1,910	underground
14	0.67	3	2,371	bridge
15	0.85	4	1,134	road
16	0.41	4	1,293	road
17	1.58	2	159	bridge

### 3.2. 통행시간비용 산정방법

재난이 발생하여 도로가 파손된다면 도로 네트워크의 성능은 저하되며 기존의 도로 이용자들은 다른 경로를 고려하게 된다. 따라서 본 연구에서는 재난의 발생으로 인해 통행배정단계에서의 변화하는 도로 이용자의 통행 패턴과 통행시간비용을 분석하고자 하였다.

분석을 위해 교통시뮬레이션 S/W인 TransCAD를 활용하여 분석을 수행하였으며 실제 재난이 발생할 경우 큰 피해가 예상되는 침두시간 O/D를 기준으로 차종별 시간 가치(2013년 기준)를 반영하여 통행배정을 수행하였다. 또한 MOLIT(2013)에서 제시된 통행시간 가치 및 침두시간O/D 비율을 적용하여 분석을 수행하였으며, 이용자 균형 모형(User Equilibrium)을 이용한 해당 링크의 통행량과 통행시간은 Eq. (5)에 근거하여 산정하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z(X) &= \text{Min} \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \\
 \text{s.t. } \sum_k f_k^{rs} &= q_{rs}, \quad f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (5) \\
 x_a &= \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{ak}^{rs} \quad \forall a
 \end{aligned}$$

여기서,  $x_a$  : 링크 a의 통행량

$t_a$  : 링크 a의 통행시간

$f_k^{rs}$  : 출발지 r와 목적지 s간의 통행경로 k의 통행량

$q_{rs}$  : 노드 i, j 간의 차로 당 도로용량

$\delta_{ak}^{rs}$  : 만약 링크 a가 출발지 r와 목적지 s간의 통행 경로 k상에 있으면 1, 그렇지 않으면 0

한편, 통행시간비용을 산정하기 위한 도로 파손정도 시나리오는 1)도로가 완전히 단절된 경우와 2)도로구간의 용량이 50%만 남아 있는 경우로 구분하여 통행배정을 수행하였으며, 2가지 시나리오를 통해 발생한 통행시간비용의 합을 최종결과로 활용하였다. 이는 구간별로 용량, 차선 수, 교통량 수준이 다양하며 파손정도에 따라 우선관리가 필요한 도로구간의 순위가 달라질 수 있어 본 연구에서는 시나리오별로 통행패턴의 변화에 따라 발생하는 비용의 합을 활용하여 분석을 수행하였다.

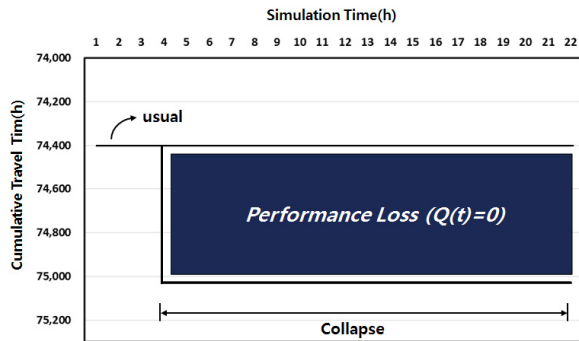
### 3.3. 회복력 산정방법

회복력은 재난발생으로 인한 도로 네트워크의 성능을 회복하여 재난으로 인한 피해와 영향을 경감하도록 복구 활동을 수행하는 능력을 의미한다. 회복력 강화의 목적은 인명·재산 피해 등의 경제적 손실을 최소화하는 것이라 할 수 있으며, 재난 발생으로 도로 네트워크의 피해 규모가 크다는 것은 큰 사회적 혼란을 야기할 확률이 높다는 의미이며 상대적으로 많은 교통량이 통과하는 도로구간이나 서로 연결성이 많은 교차로는 그 성능이 유지되도록 관리해 줄 필요가 있다.

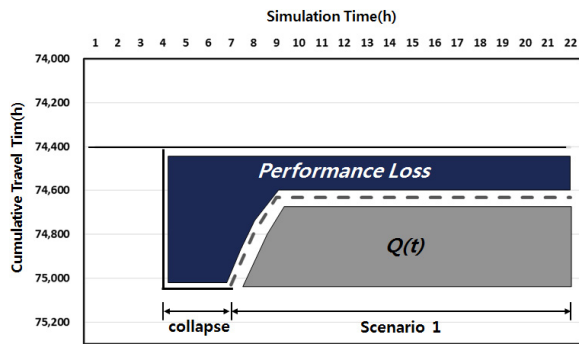
본 연구에서는 정량적인 회복력을 산정하기 위해 도로 네트워크의 파손정도를 시간의 흐름에 따라 반영할 수 있는 미시적 교통시뮬레이션을 활용하여 분석을 수행하였다. 분석을 위한 자료는 국가교통DB센터(KTDB)의 대전광역권 O/D를 기초로 발생교통량을 산출하였다.

본 연구에서 재난발생을 가정한 도로 네트워크의 회복력을 정량적으로 산정하기 위해 도로의 파손정도에 따라 시나리오 분석을 수행하였으며, 해당 도로구간의 완전한 파손 상태를 기준 값으로 설정하고 시나리오 1은 재난이 발생하여 도로가 단절되고 일정시간이 지난 후에 도로구간의 1개 차로만 복구하는 경우와 시나리오 2는 일정시간 후에 도로구간의 전 차로가 복구되는 경우로 구분하였다.

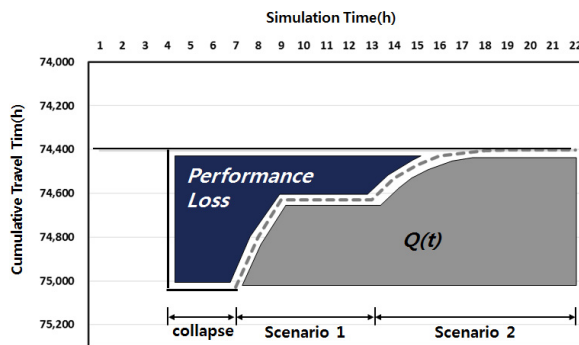
Fig. 5에는 대상구간의 O/D 교통량의 평상 시 총 통행시간을 기반으로 시뮬레이션 시작 후 4시간이 경과한 시점에 ID 14번 구간을 대상으로 시뮬레이션을 적용한 결과를 나타내고 있다.



(a) Collapse



(b) Scenario 1



(c) Scenario 2

Fig. 5 Computation Process of Performance Loss

ID 14번 구간이 단절되었을 경우, 대상 네트워크를 통행하는 교통량의 기존 통행시간에 비해 약 680시간 증가하며 단절이 계속되는 상황(a)의 성능 손실을 확인할 수 있다. 즉, 도로구간이 단절되어 통행이 불가능해 다른 도로로 우회하게 되어 발생하는 추가적인 통행시간의 증가를 본 연구에서는 해당 도로의 성능 손실이라 해석하였다.

한편 (b)는 일정시간 후, 1개의 차로가 복구되어 차량

통행이 가능해지는 시나리오로 도로 네트워크의 성능이 크게 손실되었던 (a)에 비해 도로 성능이 점차 회복되어 성능 손실의 면적이 감소함을 확인할 수 있다.

마지막으로 (c)의 경우, 일정시간 후 점진적으로 전차로가 완전히 복구가 되는 경우를 가정한 것으로 도로 네트워크가 점차 안정을 되찾으면서 최종적으로 손실된 성능이 완전히 회복되는 과정을 확인할 수 있으며, 시간에 따른 회복력과 성능 손실은 면적을 측정함으로써 정량적으로 산정할 수 있다.

나아가 도로의 용량의 차이에 따른 도로의 성능 회복 정도를 살펴보기 위해 도로 기능의 차이(우회 도로의 유무와 연결성 등)를 세 그룹으로 분류하여 동일한 시뮬레이션을 실시하였다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 언급한 ID 14번 구간과의 비교를 위해 ID 13번과 ID 17번 구간을 대상으로 한 분석 결과를 보여주고 있다. 여기서 ID 14번 구간의 경우 인근 광역도시로의 진·출입을 위해 통과교통량이 상대적으로 많은 교량구간이며, ID 13번 구간은 국도 1호선 상의 지하차도 구간으로 중간 규모의 교통량이 통과하는 구간이다. 마지막으로 ID 17번 구간의 경우는 외곽에 위치하며 인근에 우회도로가 있으며 통과교통량이 상대적으로 적은 구간에 해당한다.

세 그룹의 서로 상이한 도로 용량과 기능을 수행하는 도로구간을 대상으로 재난이 발생했을 때 성능의 감소의 크기와 복구 시나리오에 따른 회복 정도를 살펴보면 그룹별로 확연한 차이를 확인할 수 있다.

Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이 해당 도로구간이 단절되었을 경우 구간별로 성능의 감소와 회복에 소요되는 속도 및 시간(restoration time)도 큰 차이가 존재함을 확인할 수 있다.

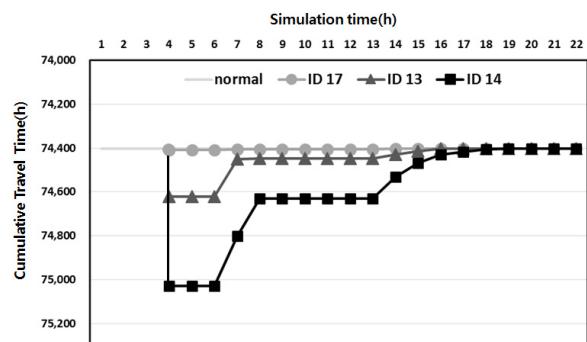


Fig. 6 Comparing Performance Loss of Sample Path

### 3.4. 통행시간비용 및 회복력 산정결과

본 절에서는 재난 상황의 발생으로 도로 네트워크의

성능이 손상되었을 때 통행패턴변화로 발생하는 통행시간비용과 회복력을 일반국도 1호선을 중심으로 산정해 보기로 한다.

Table 2는 국도 1호선을 대상으로 각 구간의 특성과 교통수요, 성능 손실 및 복구에 필요한 시간 등을 정리한 결과이다. 여기서 상대적으로 연결성이 낮고 통행수요가 많지 않은 도로의 경우 네트워크에 미치는 영향이 크지 않지만 상대적으로 중요도가 높은(통행수요가 높고 연결성이 높은) 도로구간의 경우 성능 손실로 인한 피해 규모가 크고 회복에도 많은 시간이 필요함을 알 수 있다.

Fig. 7에서 보면 성능 손실이 상대적으로 두껍게 나타난 구간이 재난 발생 시 네트워크의 통행시간에 미치는 영향이 큰 구간이라 할 수 있으며 이러한 도로구간은 사전에 성능 손실이 발생하지 않도록 집중적인 관리가 필요한 도로구간이라 할 수 있다. Fig. 7에서도 앞 절에서의 결과와 마찬가지로 성능 손실이 상대적으로 큰 도로구간을 살펴보면 통과 교통량이 많거나 교량, 지하차도 등 기능적 중요도가 높은 구간이 대부분 여기에 해당함을 알 수 있다.

이와 같이 상대적으로 중요한 도로(critical path or link)는 재난 상황 발생 시 네트워크의 성능이 크게 저하될 가능성이 존재하며 지체 혹은 고립현상이 발생할 위험이 높아 2차 피해로 이어질 우려가 있기 때문에 도로의 성능을 유지할 수 있도록 관리되어야 할 필요성이 있다고 판단되며, 만약 심각한 성능 저하가 발생했을 경

우 우선적으로 복구시킬 필요가 있다고 판단된다.

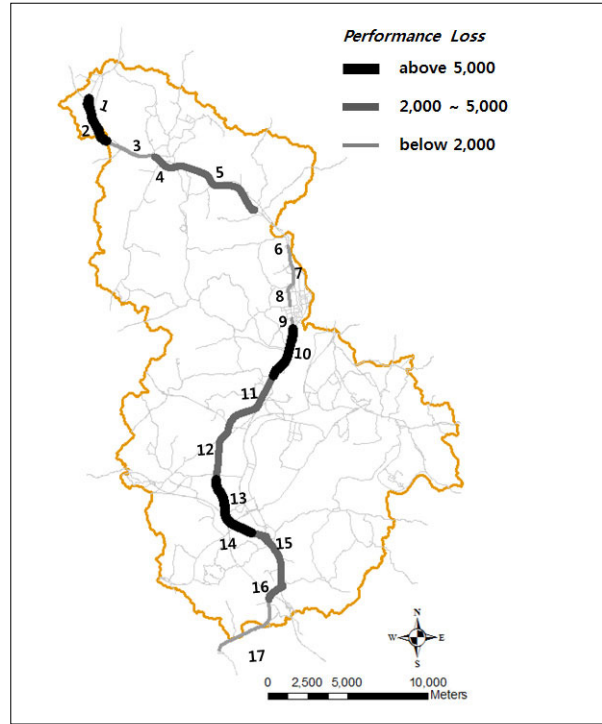


Fig. 7 Result of Performance Loss

#### 4. 우선관리도로 복구효과와 한계효용체감

본 절에서는 재난으로 피해를 입어 파손된 도로를 복

Table 2. Result of Travel Time Cost and Performance Loss

Rank	ID	Length (km)	Lanes	Traffic volume (per hour)	Increasing travel time(h)	Travel time cost(KRW)	Restoration time(h)	Performance loss	Facilities
1	14	0.67	3	2,371	680	11,139,405	19	14,280	bridge
2	1	1.06	3	1,534	425	7,057,754	17	8,925	road
3	10	0.38	2	2,831	313	4,805,589	16	6,573	road
4	13	0.70	3	1,910	262	4,185,657	15	5,502	underground
5	2	0.48	3	1,377	250	4,101,475	15	5,250	road
6	16	0.41	4	1,293	220	3,563,296	15	4,620	road
7	12	1.68	3	1,997	192	2,833,714	14	4,092	underground
8	11	2.15	3	1,667	184	2,684,721	14	3,864	road
9	15	0.85	4	1,234	170	1,883,786	14	3,570	road
10	5	0.79	2	1,134	122	1,733,507	14	2,415	bridge
11	4	2.68	2	986	111	1,366,477	13	2,331	road
12	6	0.51	2	1,598	90	984,761	13	1,890	road
13	8	0.55	2	1,286	63	962,469	13	1,323	road
14	3	1.71	3	652	61	820,588	13	1,281	road
15	9	0.42	2	1,307	39	579,900	12	819	road
16	7	0.26	2	439	18	275,009	12	378	road
17	17	1.58	2	159	4	61,073	12	84	bridge



구시킨다고 가정할 때 어느 도로구간을 우선적으로 복구시키는 것이 전체 네트워크에 미치는 피해를 최소화하는 방안인지 분석하고자 한다.

국도 1호선을 대상으로 앞 절에서 언급한 우선관리가 필요한 도로구간 중에서 성능 손실이 상대적으로 큰 3개 구간과 작은 3개 구간을 우선적으로 복구시키는 경우 복구에 따른 효과를 비교해 보기로 한다.

먼저 국도 1호선의 해당 도로구간의 용량이 0%(완전 차단)부터 100%(완전 복구)로 점차 성능이 회복됨에 따라 전체 통행수요의 통행시간의 변화를 나타내면 Fig. 8과 같다.

분석결과, 모든 시나리오에서 상대적으로 중요한 구간들을 우선적으로 복구시키는 경우에 통행시간 절감효과가 큰 것으로 나타났다.

마지막으로 재난 등의 발생 이후 도로 네트워크의 성능을 회복하기 위한 공공기관의 의사결정 가운데 투자비용 대비, 네트워크의 통행시간 감소효과를 극대화하는 방안 마련은 매우 중요한 과제이다.

즉, 상대적으로 중요한 도로구간을 우선적으로 복구하는 것이 어느 정도의 효과가 있는지와 공공기관이 동일한 노력(복구에 필요한 예산과 시간 등)을 일정기간 투입할 경우 네트워크의 복원력에 어느 정도의 효과가 존재하는지를 분석하고자 한다.

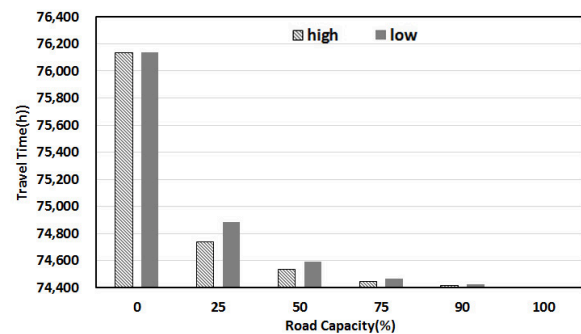


Fig. 8 Result of Restoration Scenario

Fig. 9는 국도 1호선을 대상으로 전 구간이 재난으로 완전 차단된 경우를 기반으로 도로의 중요도의 차이가 네트워크의 효용에 미치는 영향을 분석하기 위해 복구의 정도에 따라 감소된 통행시간을 나타내고 있다.

여기서, 도로의 용량을 증가시키기 위해 투입되는 비용이 증가하면 통행시간 절감이라는 효용은 양의 값을 가지지만, 투입되는 비용이 늘어남에 따라 총 효용의 증가분은 점차 감소함을 확인할 수 있다. 또한 동일한 규모(정도)의 복구비용의 투입이 통행시간 절감에 미치는

크기는 도로구간의 중요도에 따라 큰 차이가 있으며, 초기에는 높은 편이나 갈수록 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이는 동일한 단위의 복구비용의 투입에 따른 효용의 증가에 차이가 있다는 것을 의미하며 즉, 한계효용체감의 법칙이 성립함을 알 수 있다.

이는 도로 이용자의 관점에서 보면 도로구간이 크게 파손되어 통행이 심각한 상황에서 초기 복구가 이루어져 상태가 조금이라도 개선된다면 큰 만족감을 얻을 수 있지만, 거의 복구가 이루어진 상태에서의 추가적인 비용의 투입에 따른 만족도의 증가폭은 감소할 수 있음을 의미한다.

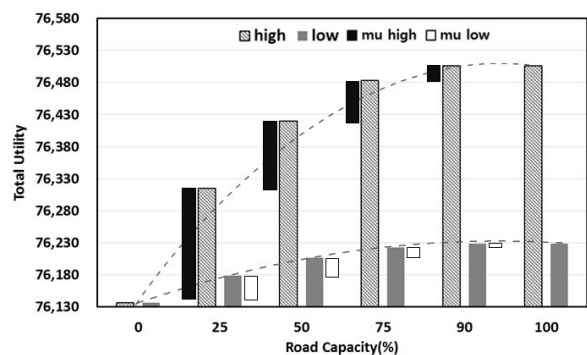


Fig. 9 Total Utility and Marginal Utility

$$TU_{high} = -0.0401x^2 + 7.6469x + 76,141 \quad (6)$$

$$TU_{low} = -0.0096x^2 + 1.872x + 76,137 \quad (7)$$

Table 3. Result of Total Cost and Marginal Utility

Capacity(%)	Total utility		Marginal utility	
	High	Low	High	Low
0	76,141	76,137	-	-
10	76,213	76,155	72.5	17.8
20	76,278	76,171	64.4	15.8
30	76,334	76,185	56.4	13.9
40	76,383	76,197	48.4	12.0
50	76,423	76,207	40.4	10.1
60	76,456	76,215	32.3	8.2
70	76,480	76,221	24.3	6.2
80	76,497	76,225	16.3	4.3
90	76,505	76,228	8.3	2.4
100	76,505	76,228	0	0

따라서 향후 도로의 효율적인 관리 및 성능 회복을 위해서 교량, 터널 그리고 교통수요가 상대적으로 많거나 연결성이 높은 중요 도로를 우선적으로 복구하는 것이

도로 이용자의 만족도를 증가시킬 뿐만 아니라 도로 관리자의 입장에서 네트워크 전체의 성능을 빨리 회복시킬 수 있는 방안임을 확인하였다.

## 5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 세종시와 인근 지역의 도로 네트워크를 대상으로 재난 강도에 따른 네트워크의 성능 변화를 살펴보고 도로의 성능과 피해규모를 고려한 회복력 산정방안을 제시하였다.

나아가 일반국도 1호선을 중심으로 도시 내 우선적으로 집중관리가 필요한 우선관리 도로구간을 대상으로 재난발생 시 성능 저하와 복구시켰을 때의 효과를 정량적으로 분석하는 방안을 제시하였다. 이 때 정량적인 성능 손실은 해당 도로 네트워크에 발생한 피해로 인해 추가적으로 발생하는 통행시간의 증가로 산정하였으며, 복구로 인한 통행시간의 회복도 동일한 방법으로 산정하였다.

분석결과, 각 구간의 특성과 교통수요, 성능 손실 및 복구에 필요한 시간 등을 분석한 결과 상대적으로 연결성이 낮고 통행수요가 많지 않은 도로의 경우 네트워크에 미치는 영향이 크지 않지만 상대적으로 중요도가 높은(통행수요가 높고 연결성이 높은 도로구간(critical path or link))의 경우 성능 손실로 인한 피해 규모가 크고 회복에도 많은 시간이 필요함을 확인하였다. 재난의 발생에 따른 도로의 성능 손실이 상대적으로 큰 도로구간은 통과 교통량이 많거나 교량, 지하차도 등 기능적 중요도가 높은 구간과 우회 도로가 존재하지 않는 도로 등이 대부분 여기에 해당함을 알 수 있었다.

따라서 상대적으로 중요한 도로는 평상 시 도로의 성능을 유지할 수 있도록 관리되어야 할 필요성 뿐만 아니라 심각한 성능 저하가 발생했을 경우 우선적으로 복구시킬 필요가 있음을 확인하였다.

또한 재난 등의 발생 이후 도로 네트워크의 성능을 회복시켜야 하는 공공기관의 입장에서 투자비용 대비, 네트워크의 통행시간 감소효과를 극대화하기 위해 상대적으로 중요한 도로구간을 우선적으로 복구하는 것이 바람직하지만 투입되는 비용이 늘어남에 따라 총 효용의 증가분은 점차 감소함을 확인하였다. 이는 동일한 단위의 복구비용의 투입에 따른 효용의 증가에 차이가 있다는 것을 의미하며 즉, 한계효용체감의 법칙이 성립함을 알 수 있다.

다만 본 연구에서는 세종시를 대상으로 한 도로 네트워크에 한정하였다는 한계가 있으며, 도로의 성능 손실

과 회복력에 대한 정량적인 평가도 통행시간에 한정하였다는 한계가 있음을 밝힌다.

향후, 다양한 교통 특성 변수를 고려한 재난상황 시나리오 분석이 필요하다고 판단된다. 나아가 본 연구에서는 우선관리도로를 선정하기 위해 네트워크의 회복력만을 고려하였으나 인프라의 자산적인 가치를 동시에 고려한 추가적인 연구도 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1D1A1A01058764)

## REFERENCES

- Bruneau, Michel., et al. (2003). "A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities." *Earthquake Spectra*, Vol. 19, No.4, pp.733-752.
- Bahaaldin, K., Fries, R. N., Williamson, M. R., and Chowdhury, M. (2016). "The impact of traffic incident locations on a metropolitan evacuation." *International journal of transportation*, Vol. 4, No. 2, pp.81-96.
- Do, M. S., and Noh, Y. (2016). "Comparative analysis of informational evacuation guidance by lane-based routing." *International J. of Urban Sciences*, Vol. 20, No. 1, pp.60-76.
- Do, M. S., Kim, S. H., Bae, H. S., and Kim, J. S. (2004). "Development of Homogeneous Road Section Determination and Outlier Filter Algorithm." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 22, No. 7, pp.7-16.
- Duanmu, J., Chowdhury, M., and Taaffe, K. (2011). "A Simulation Modeling Framework for Community-wide Evacuation Planning." *Journal of Transportation Security*, Vol. 4, Issue 1, pp.1-18.
- Eric D. Vugrin., Drake E. Warren., Mark A. Ehlen., and R. Chris Camphouse. (2010). "A Framework for Assessing the Resilience of Infrastructure and Economic Systems, Sustainable and resilient critical infrastructure systems." *Sustainable and resilient critical infrastructure systems*, Springer Berlin Heidelberg, pp.77-116.
- Folke, Carl. (2006). "Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses." *Global environmental change*, Vol. 16, No. 3, pp.253-267.
- Kim, J., Yu, Y., and Lee, S. (2013). "A Study on the Evacuation Route of Areas Prone to Floods Using Disaggregate Behavioral Model." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 3, pp.61-67.
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (MOLIT) (2013). *Traffic facility investment evaluation guideline 5th revision*.
- Rose, Adam. (2007). "Economic Resilience to Natural and Man-Made Disasters; Multidisciplinary Origins and Contextual Dimensions." *Environmental Hazards*, Vol 7. No. 4, pp.383-398.

UK Department for Transport(UK DfT) (2014). *Transport Resilience Review: A review of the resilience of the transport network to extreme weather events.*

US Department of Transportation (US DoT) (2009). *Recovering from Disasters: The National Transportation Recovery*

*Strategy.*

Zhang, Z., Spansel, K., Dixit, V., and Wolshon, B. (2014). "Performance characteristics of megaregion traffic networks during mass evacuations." *International journal of transportation*, Vol. 2, No. 3, pp.53-72.