

A Robustness Analysis of Korea Expressway Network

Sung-Geun Lee*, Chi-Geun Han*

*Professor, Dept. of Computer Engineering, Kyung Hee University, Seoul, Korea

*Professor, Dept. of Computer Engineering, Kyung Hee University, Seoul, Korea

[Abstract]

Some sections of the highway are closed due to disasters and accidents. In this situation, it analyzes what kind of situation occurs due to functional failure in the highway network. The domestic highway network can be expressed as a graph. Blocking some sections of the highway can turn into a national disaster. In this paper, we analyze the robustness of the domestic highway network. The robustness of expressways refers to the degree to which the traffic conditions of the domestic expressway network deteriorate due to the blockage of some sections. The greater the robustness, the smaller the effect of some blocking appears. This study is used to evaluate the congestion level of one section of the transportation network, and a value obtained by dividing the section traffic volume (V) by the section traffic volume (C) is used. This study analyzes the robustness of highways by using the actual traffic volume data of the departure and arrival points of domestic highways, and analyzes the changes in traffic volume due to partial blockage through experimental calculations. Although this analysis cannot reflect the exact reality of domestic highways, it is judged to be sufficient for the purpose of confirming the basic robustness of the overall network.

▶ **Key words:** graph, highway, robustness, blocking, traffic volume

[요 약]

재난과 사고로 인해 고속도로 일부 구간이 폐쇄되는 경우가 발생한다. 이런 상황에서 고속도로 망에 기능적으로 어떠한 상황이 발생하는지를 분석한다. 국내의 고속도로 망은 하나의 그래프로 표현할 수 있다. 고속도로의 일부 구간의 차단은 국가적인 재앙으로 변질 수 있다. 본 논문에서는 국내 고속도로 망의 강건성을 분석한다. 고속도로의 강건성은 일부 구간의 차단에 따라 국내 고속도로 망의 교통 통행 상황이 어느 정도 나빠지는지를 말한다. 강건성이 클수록 일부 차단의 효과가 작게 나타난다. 교통망의 하나의 구간의 혼잡도를 평가하기 위해 사용하는 방법으로 구간교통량(V)을 구간의 교통용량(C)으로 나누는 값을 사용한다. 본 연구는 국내 고속도로의 출발지점, 도착지점의 실제 교통량 데이터를 이용하여 고속도로의 강건성을 분석하고, 일부 차단에 따른 교통량의 변화를 실험계산을 통해 분석한다. 본 분석이 실제 국내 고속도로의 정확한 실상을 반영할 수는 없지만, 전체적인 망의 기초적인 강건성을 확인하는 목적으로 충분할 것으로 판단된다.

▶ **주제어:** 그래프, 고속도로, 강건성, 차단, 교통량

-
- First Author: Sung-Geun Lee, Corresponding Author: Chi-Geun Han
 - *Sung-Geun Lee (sglee00@khu.ac.kr), Dept. of Computer Engineering, Kyung Hee University
 - *Chi-Geun Han (cghan@khu.ac.kr), Dept. of Computer Engineering, Kyung Hee University
 - Received: 2020. 11. 06, Revised: 2021. 03. 08, Accepted: 2021. 03. 10.

I. Introduction

현대의 사회생활은 고속도로에 많이 의존하고 있다. 국내에서는 1968년 서울-인천간 고속도로가 최초로 건설되었고, 고속도로의 총길이는 2019년 기준 총 4,767km에 달하고 있다[1]. 전국을 1일 생활권으로 묶어주는 고속도로는 사람의 이동뿐만 아니라, 물자의 이동에 많은 비중을 차지하고 있다. 경제활동의 중요한 인프라시설인 고속도로 망은 항상 정상 운영되는 것을 기반으로 하여 사회생활이 영위되고 있다. 그러나, 간혹 예상치 못한 또는 예상 가능한 재난 또는 사고에 의해 고속도로의 일부 구간이 폐쇄되는 경우가 발생할 수 있다. 본 논문은 이러한 상황에서 우리의 고속도로 망에는 기능적으로 어떠한 상황이 발생하는지를 분석한다. 예를 들어, 일부 구간의 폐쇄에 따라 전국적인 통행시간이 증가가 어느 정도 증가하는지를 분석하게 된다.

도로는 그래프로 표시할 수 있고, 도로의 기능을 분석하기 위해 도로망 연구가 많이 진행되어 왔다. 도로의 강건성(robustness)은 재난 발생 시 도로의 기능을 수행하는 정도로 정의한다[2]. [3]은 교통망을 그래프로 표현한 후, 그래프의 연결성을 분석하여 도로망의 회복탄력성(resilience)과 취약성(vulnerability)에 대한 많은 연구를 정리하였다.

2장에서는 관련된 연구를 설명하고, 3장에서는 연구 방법을 설명한다. 4장에서는 일부 구간의 폐쇄가 국내 고속도로 망에 미치는 영향을 분석하게 된다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. Related works

도로의 기능이 항상 정상적으로 작동되기를 희망하지만, 간혹 예상치 못한 또는 예상 가능한 상황에 의해 도로가 제 기능을 수행하지 못할 때가 있다. 새로운 도시 설계를 위해 주민의 분포, 주민의 이동, 상업도시의 기능 등을 고려하여 도로망을 설계하게 된다. 현재의 도로망에서 어느 부분이 전체 도시의 교통에 중요한 역할을 수행하는지 분석하게 된다. [4]는 기존의 중요 도로를 확인하는 방법인 교통량을 도로의 용량으로 나누는 지수보다는 전체 교통망의 구조를 확인하여 중요 도로를 결정하는 방법으로 망 강건성 지수(Network Robustness Index)를 제안하였다. [5]는 망 강건성 지수를 이용하여 교통망 전체에서 취약구간을 확인하고, 전체 망의 강건성을 설명할 수 있다는 것을 실제 도로망에 적용하여 설명하였다. 도로망을 그래프로 표현하는 방법을 사용하여 회복탄력성과 취약성에 대

한 많은 연구들이 진행되었고, 이 들 연구를 분류한 연구가 있다[3]. 이 연구는 많은 연구자들이 다양한 단어로 비슷한 개념을 설명하는 것을 상호비교를 통해 연구들의 특징과 유사성을 정리하였다.

김경태 외는 평균경로시간 변화를 이용하여 서울시 도로의 강건성을 분석하였다[2]. 여기에서는 서울시를 9개의 권역으로 나누어, 자연재해 발생 시 전체 교통망에 영향을 많이 주는 위치는 교통망의 매개 중심성(betweenness centrality)임을 보여 주었다. [6]은 세종시를 대상으로 재난 발생 시 도로 이용자 패턴과 통행시간 변화를 분석하여 우회도로 신설 지점을 결정하였다.

그래프로 표시된 교통망은 그래프 이론에서 제공하는 다양한 네트워크 분석 기법을 이용하여 망을 평가할 수 있다. [7]은 그래프의 중심성을 이용하여 대도시의 교통 흐름과 교통량을 예측하였다. 28개의 대규모 도시에 대해 교통망을 그래프로 표시한 후 매개중심성의 성질을 분석한 연구가 있다[8]. 그래프에서 각 노드의 중요도를 나타내는 중심성에는 여러 척도가 있는데, 교통망에서 중요한 위치(노드, 교차로)를 나타내기 위해 매개 중심성이 사용되고 있다. 매개 중심성은 특정 노드가 다른 두 노드 사이의 최단 거리에서 사용되는 빈도로 정의된다[9].

본 연구는 [4]에서 제안한 망 강건성 지수를 이용하여 국내 고속도로 망에서 취약한 구간을 분석하였다. 그리고, 일부 구간의 폐쇄가 전체 망에 미치는 영향 및 구간별 교통량 증가를 연구하였다.

III. Methods

교통망의 하나의 구간의 혼잡도를 평가하기 위해 사용하는 방법으로 구간교통량(V)을 구간의 교통용량(C)으로 나누는 지수가 있다[10]. 이 방법을 사용하게 되면 V/C 값이 작을수록 구간의 혼잡도가 적은 것으로 판단하게 된다. 다음 Fig.1은 두 개의 노드 a, b 와 a 에서 b 로 가는 두 개의 링크 e_1, e_2 가 있는 가상의 교통망이다. 여기서 e_1 의 혼잡도는 $V_1/C_1=1$ 되고, e_2 의 혼잡도 $V_2/C_2=1/3$ 이 된다.

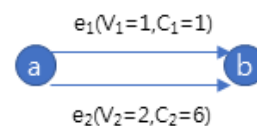


Fig. 1. A simple network

따라서, e_1 이 e_2 보다 혼잡한 구간으로 평가된다. 그런데, 만일 교통망에 사고가 발생하여 e_1 이 폐쇄될 경우에

e_1 의 교통량은 e_2 가 수용할 수 있다. 왜냐하면, e_2 의 여유 교통용량이 있으므로 가능하게 된다. 그러나, e_2 가 폐쇄될 경우에는 전체 교통망의 심각한 문제가 발생하게 된다. e_2 가 수용하고 있던 2만큼의 교통량은 e_1 이 수용할 수 없게 되므로, 전체교통망은 마비와 같은 상황이 발생하게 된다.

그러므로, [4]는 전체 교통망에서 취약한 구간을 확인하기 위해 링크 a 가 삭제될 경우 링크 a 의 교통망 강건성 지수 NRI_a 를 다음과 같이 정의하였다.

$$NRI_a = T_a - T \quad (식 1)$$

여기서 T 는 교통망의 총 운행거리, T_a 는 링크 a 가 폐쇄된 경우의 교통망의 총 운행거리이다. T 는 각 '링크의 길이' \times '해당 링크의 교통량'으로 다음과 같이 표시 가능하다.

$$T = \sum_{e \in E} l_e t_e \quad (식 2)$$

여기서 E 는 교통망을 그래프로 표현했을 때 링크(길)의 집합을 나타내고, t_e 는 링크 e 의 교통량, l_e 는 링크 e 의 길이이다. 현재 교통망에서 특정 링크 a 가 사고에 의해 활용이 불가능할 경우의 총 운행거리 T_a 는 다음과 같다.

$$T_a = \sum_{e \in E'} l_e t_e \quad (식 3)$$

여기서 E' 는 특정 링크 a 가 제거된 교통망의 링크 집합이다. 링크의 통과 시간은 링크의 길이에 비례한다고 가정하면, 링크 길이는 해당 링크를 통과하는데 소요되는 시간으로도 해석할 수 있다. 교통망 강건성 지수는 일부 링크가 교통망에서 삭제되었을 때 총 운행거리의 증가폭으로 정의된다. 그러므로, 강건성 지수의 값이 클수록 해당 링크의 폐쇄가 전체 교통망에 나쁜 영향을 크게 준다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 교통망 강건성 지수를 Fig. 2의 국내 고속도로 구간에 적용하여 어느 구간이 취약성이 있는지를 확인하고, 특정 구간의 폐쇄가 전체 망에 어떤 영향을 미치는지 분석한다.



Fig. 2. Korea Expressway

고속도로 망은 그래프로 표현되고, 그래프의 노드의 개수 $n=537$, 링크의 개수 $m=582$ 이다. 각 링크의 길이는 [11][12]의 자료를 활용하였다. 특정 링크의 폐쇄에 따른 교통망의 영향을 분석하기 위해서는 각 링크의 교통량 정보를 사용하게 되면 분석을 수행할 수 없다. 왜냐하면, 특정 링크의 폐쇄에 따라 기존의 링크를 사용하던 교통량은 다른 우회로를 찾아 운행될 것이므로, 단순히 각 링크의 교통량 정보는 분석에 충분하지 않다. 따라서, (출발지, 도착지) 별 운행 대수 정보가 필요하게 된다. 이 정보를 이용하여 특정 링크의 폐쇄 상황을 가정하여 전체 망의 교통흐름이 어떻게 바뀌는지를 분석하게 된다.

(출발지, 도착지) 별 운행 대수 정보를 이용하여 각 링크의 교통량을 계산하는 방법을 설명하기 위해 간단한 교통망을 구성한다 (Fig. 3).

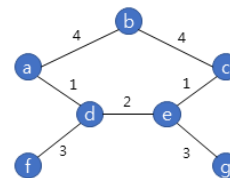


Fig. 3. A sample traffic network

총 7개의 지점(노드)이 있고, 7개의 링크가 있다. 링크에 있는 숫자는 링크의 길이 또는 링크를 운행하는데 소요되는 시간을 나타낸다. 본 논문에서는 길이로 표현하기로 한다. 하나의 링크는 양방향으로 나타낸다고 가정하고, 양방향의 링크 길이는 같다고 가정한다. 다음 Table 1은 이 교통망의 (출발지, 도착지) 별 운행 대수이다.

Table 1. (origin, destination) traffic

origin	destination	traffic
a	c	2
c	a	1
f	g	3
g	f	4

도착지에 도달하는 경로가 여러 개 있을 경우, 최단경로를 선택한다고 가정한다. 그래서, a를 출발하여 c에 도달하려는 자동차는 a를 출발하여 a-b-c가 아닌, a-d-e-c의 경로를 이용하여 이동하게 된다.

링크의 교통량은 각 방향의 교통량의 합으로 정의한다. 예를 들어, 출발지 a, 도착지 c의 교통량에 의해 링크 a→d의 교통량은 2가 추가되고, 출발지 c, 도착지 a의 교통량에 의해 링크 d→a의 교통량은 1이 추가되어, 링크(a,d)의 총 교통량은 3이 된다. 이와 같은 방법으로 각 링크의 교

통량을 구할 수 있다. 각 링크의 교통량을 계산한 후, 링크의 교통량에 길이를 곱하게 되면 총 운행거리를 구할 수 있다. 이 예에서는 총 운행거리는 68이 된다 (Table 2)

Table 2. Total traffic distance

link	length	traffic	distance
(a,d)	1	3	3
(d,e)	2	10	20
(e,c)	1	3	3
(f,d)	3	7	21
(e,g)	3	7	21
total distance			68

만일 이 교통망에서 링크 (a,d)가 폐쇄된다면 출발지 a 도착지 c인 차량과 출발지 c 도착지 a인 차량들은 a-b-c의 경로를 사용해야만 한다. 따라서 교통망은 다음과 같은 상황이 된다.

Table 3. Total traffic distance after deleting (a,d)

link	length	traffic	distance
(a,b)	4	3	12
(b,c)	4	3	12
(d,e)	2	7	14
(f,d)	3	7	21
(e,g)	3	7	21
total distance			80

따라서, $T_{(a,d)}=80$, $NRI_{(a,d)}=80-68=12$ 가 된다. 이와 같은 방법을 사용하여 교통망의 각 링크를 삭제한 후 교통망 강건성 지수를 계산하게 된다.

출발지, 도착지 차량대수 정보는 한국고속도로공사의 TCS 영업소간 교통량 2019년 1월, 4월, 7월, 10월 123일 간의 데이터를 사용하였다[13]. 계절적인 변동을 고려하여 사계절에 속하는 월의 정보를 사용하였다. (출발지, 도착지) 별 차량 대수 정보는 출발지가 394개가 되고, 도착지도 394개가 되어 총 394×394 행렬 형태로 주어져서, 정보의 개수는 총 15만5천개가 넘게 된다. 그런데, 이 행렬의 많은 원소들이 0에 가까운 값을 갖고 있어서, 본 연구에는 800대 이상의 값만을 고려하였다. 즉, 4달 동안의 총 교통량이 800대 이상, 즉 1달에 200대 이상의 차량이 운행한 기록이 있는 (출발지, 도착지) 간의 차량 대수 정보를 활용하였다. 이에 해당하는 총 원소의 개수는 23,847건 이었다.

IV. Experimental Results

본 장에서는 3장에서 설명한 교통망 강건성 지수를 국내 고속도로 망에 어떻게 적용하여 결과를 도출하였는지

설명한다. 국내 고속도로 망을 연결된(connected) 비방향(undirected)그래프 $G=(V,E)$ 로 나타내는데, V 는 노드들의 집합, E 는 링크들의 집합이다. 고속도로 망에서 노드는 고속도로가 서로 교차하는 지점(JC: junction) 또는 진출입로가 있는 인터체인지를 나타낸다. E 는 두 노드 간의 연결구간을 나타낸다. 본 연구에서 $|V|=537$, $|E|=582$ 이다.

본 연구에서 대상으로 한 고속도로 망은 출발지와 도착지의 정보를 얻을 수 있는 고속도로 부분만을 대상으로 하고 있다. 예를 들어, 서울외곽순환고속도로 인 경우는 출발지와 무관하게 구간의 부분 부분에서 요금을 받고 있다. 따라서, 요금을 납부한 차량의 실제 출발지와 도착지를 확인할 수 없게 된다. 그러므로, 본 연구가 실제 국내 고속도로의 정확한 실상을 반영할 수는 없지만, 전체적인 망의 기초적인 강건성을 확인하는 목적으로는 충분할 것으로 판단된다.

한 개의 특정 링크 a 를 삭제했을 때의 강건성을 계산하기 위해서는 (식 1)을 사용한다. 원래의 그래프에서 링크 한 개씩 삭제해 보는 순서는 링크의 양방향 교통량의 합이 큰 순서로 진행하여, 상위 100개의 링크에 대해 실험하였다. 링크의 교통량이 많더라도, 그 링크를 삭제하였을 때 그래프가 하나의 연결그래프가 되지 않을 경우는 삭제하지 않고, 다음 순서의 링크에 대해 진행하였다. 예를 들어, 서울 요금소와 신갈JC 사이의 링크를 삭제하게 되면 서울 요금소 노드가 전체 고속도로 망에서 분리되므로, 이 경우 해당 링크 삭제에 대한 강건성 지수를 계산하지 않았다. 하나의 링크를 삭제하여 NRI_a 를 얻은 후, 다시 원래의 그래프에서 링크 b 를 삭제하여 NRI_b 를 얻는 방법으로 진행하였다.

다음 Table 4는 100개의 링크를 대상으로 하여 1일을 기준으로 NRI_a 를 계산하여 얻은 상위 5개의 값과 해당 구간들이다. 증가율은 $\frac{T_a - T}{T}$ 로 정의한다. 즉, 특정 에지의 삭제에 따라 원래의 총 운행거리가 증가하는 비율로 정의한다.

Table 4. top 5 NRI_a values

rank	section	NRI_a	rate of increase
1	Dongchangwon-Jinyoung JC	14,952,825	0.106
2	Singal JC-SuwonSingal	14,648,745	0.104
3	Changwon JC-Dongchangwon	14,437,088	0.102
4	Seopyungtaek JC-Seopyungtaek	12,534,676	0.088
5	SuwonSingal-Kiheung	11,359,482	0.081

다음 Fig. 4는 교통량 상위 100위에 속하는 링크들에 대해 (a)는 1일 교통량과 NRI_u 의 값을 나타낸 것이고, (b)는 NRI_u 값의 증가율 순서대로 나타낸 것이다. (a)로부터 교통량이 클수록 해당 링크의 폐쇄가 전체 교통망에 전반적으로 나쁜 영향을 준다는 것을 알 수 있다. (b)에서 링크 3개에 대해서는 10% 이상의 증가를 보였고, 증가율 10위 이후의 링크들에 대해서는 일정하게 증가율이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

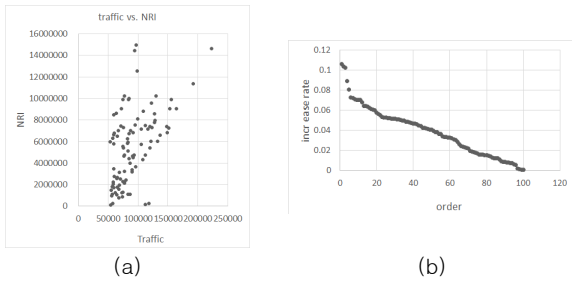


Fig. 4. Traffic and NRI_u

다음 Fig 5는 증가율 1위, 2위의 위치를 나타내고 있다.

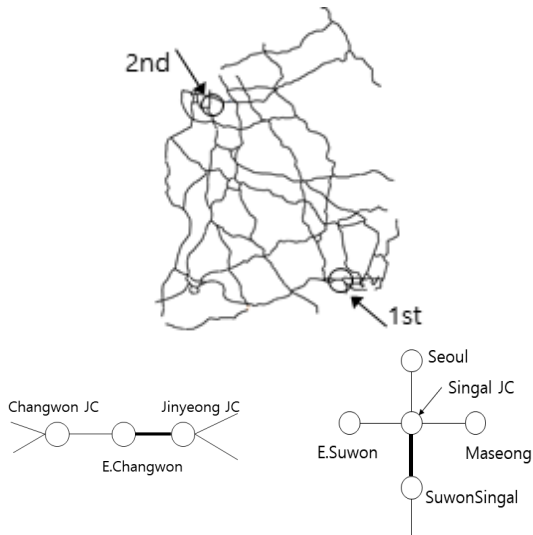


Fig. 5. 1st and 2nd increasement rate in the highway network

Table 4를 보면, 증가율 1위, 2위의 구간과 인접한 구간의 증가율도 매우 높은 것으로 나타난 것을 알 수 있다.

다음 Fig. 6은 강건성 지수가 1위인 동창원-진영C 링크를 삭제함에 따라 교통량이 증가한 순서와 감소한 순서로 표시한 링크들의 1일 교통량 증가량(a), 감소량(b) 그래프이다. (c)와 (d)는 강건성 지수가 2위인 신갈C-수원신갈 링크를 삭제할 경우의 1일 교통량 증가, 감소를 나타낸다.

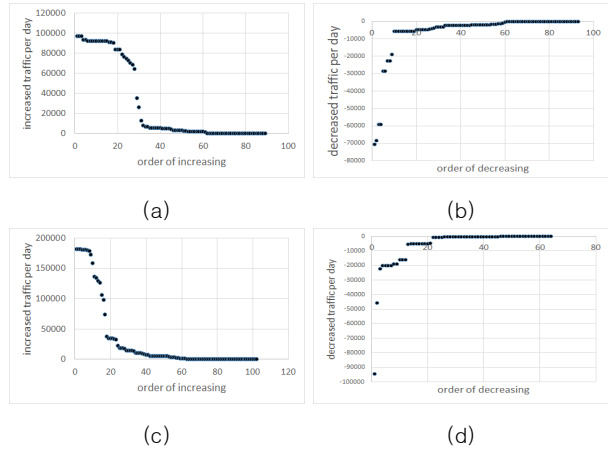


Fig. 6. Increased traffic and decreased traffic due to a link deletion

동창원-진영C 링크의 폐쇄는 89개 링크, 총길이 722km에서 교통량 증가, 93개 링크, 총길이 673km에서 교통량 감소를 관찰할 수 있다(a)(b). 신갈C-수원신갈 링크의 폐쇄는 102개 링크, 총길이 761km에서 교통량 증가, 64개 링크, 총길이 501km에서 교통량 감소를 야기하였다(c)(d). (c)는 (a)보다 매우 큰 교통량 증가가 상위 링크에서 관찰되었다. 그리고, (b)는 (d) 보다 많은 수의 링크들에서 교통량이 감소되었고, (d)에서는 교통량이 많이 감소된 8개의 링크를 제외하고는 1일 교통량의 감소가 그리 크지 않은 것을 알 수 있다. 다음 Fig. 7은 (a) 동창원-진영C가 폐쇄되었을 경우 (b) 신갈C-수원신갈 구간이 폐쇄되었을 경우, 교통량이 1일 8만대 이상이 증가되는 구간을 진하게 표시하였고 감소폭이 하루 2만대 이상인 구간을 진한 두 선으로 표시하였다.

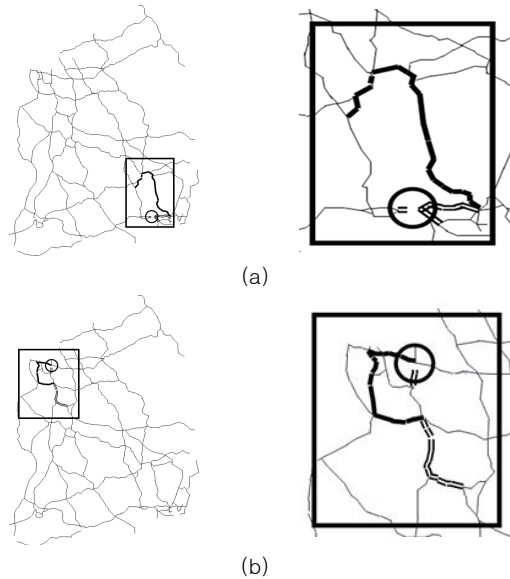


Fig. 7. Link whose traffic is increased by >80,000 (thick single line) and decreased by <20,000 (double line) in a day for 1st NRI (a) and 2nd NRI (b)

Fig.8은 (a) 동창원-진영JC가 폐쇄되었을 경우 (b) 신갈 JC-수원신갈 구간이 폐쇄되었을 경우, 1일 교통량의 변화가 있는 구간의 길이 합을 표시하고 있다. 가로축의 숫자 10,000은 1일 교통량의 변화가 0부터 9,999대 까지를 나타내는 숫자이다. 대부분의 교통량 변화는 1일 10,000대 미만이라는 것을 알 수 있고, 그 구간 길이는 400~600km로 부분적인 폐쇄가 국내 고속도로의 많은 부분에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. (a)의 최대 교통량 증가는 일부 구간의 90,000대였으나, (b)에서는 180,000대로 나타나고 있다. 이는 수도권권의 폐쇄에 따라 많은 교통량이 우회하여 도착지에 도달하여야 한다는 것을 알 수 있다.

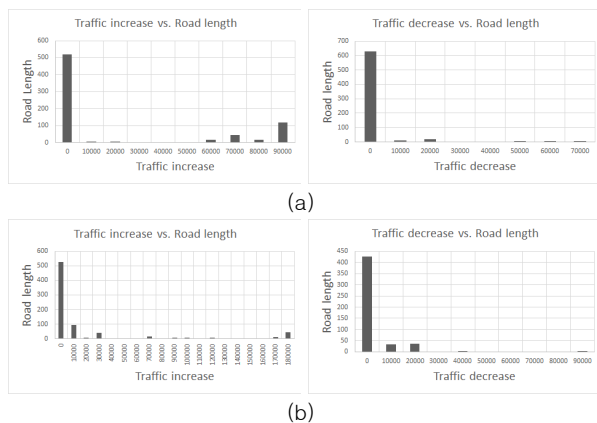


Fig. 8. Traffic vs. Road length

링크의 강건성 지수를 이용하여 국내 교통망의 취약구간을 확인할 수 있다. 신갈JC-수원신갈 구간의 폐쇄는 수도권권의 물류, 사람의 이동에 큰 영향을 주게 된다. 다행히, 용서고속도로(용인-서울)가 서울 강남으로 부터 기흥주변까지 운영되고 있다. 이 구간의 교통정보는 (출발지, 도착지) 정보가 존재하지 않고, 직접 경부고속도로와 연결되어 있지 않으므로, 본 연구에서는 포함되어 있지 않다. 강건성 측면에서는 용서고속도로와 경부고속도로의 연계 방안이 필요하다고 할 수 있다.

남해고속도로의 동창원-진영JC 구간은 가장 취약한 구간으로 나타났고, 이웃 구간인 창원JC-동창원 구간도 매우 취약한 것으로 나타났다. 이 구간은 국토 남동권의 매우 중요한 구간이므로, 이 구간이 폐쇄되었을 경우를 대비한 우회도로의 확보가 매우 중요하다 할 수 있다.

본 연구는 통행료를 출발지, 도착지에 따라 지불하는 고속도로 구간에 대해서만 수행하였다. 고속도로의 일부 구간의 폐쇄가 발생할 경우 우회하는 고속도로 구간을 사용한다는 가정을 하였으나, 실제로는 우회하는 국도를 사용하는 경우가 발생하여, 실제의 교통량 변화는 본 연구 결

과와 다를 수 있다. 그러나, 이론적으로 망의 폐쇄가 어떤 영향을 주는 지를 파악하여, 우회 고속도로, 우회 국도의 건설 등의 기초 연구자료로 본 연구를 활용할 수 있다.

V. Conclusions

본 연구에서는 교통망의 강건성을 이용하여 국내 고속도로망의 취약구간을 분석하였다. 두 지점간의 교통량을 이용하여 특정 구간이 폐쇄되었을 때 국내 교통망의 총 운행거리가 어떻게 변화되는지 분석하였다. NRI_i 값이 가장 큰 구간과 두 번째로 큰 구간을 확인하였다. 이 구간에 대해서는 우회할 수 있는 경로를 별도로 확보하는 것이 안정적인 국내 고속도로 운영을 위해 필요할 것이다. 추가적으로, 특정 구간의 폐쇄에 따라 영향을 받는 구간을 교통량이 증가하는 구간과 교통량이 감소하는 구간으로 나누어 분석하였다.

추후 연구로는 특정 링크가 부분적으로 폐쇄될 경우, 예를 들어 원래 용량의 p%가 감소될 경우 교통망에 어떤 영향을 미치는지 연구와 해결책을 제안할 예정이다.

REFERENCES

- [1] Korean Statistical Information Service, <https://kosis.kr/>.
- [2] Kyung Tae Kim, Jaemin Song, "Robustness Assessment of the Road Network in Seoul Using Changes in Average Path Time", Research of Seoul City, Vol. 18, No. 2, 81-93. Aug. 2017.
- [3] Aura Reggiani, Peter Nijkamp, Diego Lanzi, "Transport resilience and vulnerability: The role of connectivity", Transportation Research Part A, 4-15, 2015.
- [4] Darren Scott, David Novak, Lisa Aultman-Hall, Lisa Aultman-Hall, "Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks", Journal of Transport Geography, 14(3), 215-227, 2016.
- [5] James L. Sullivan, David Novak, L. Aultman-Hall, Darren M Scott, "Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach", Transportation Research Part A Policy and Practice 44(5), 323-336, 2010.
- [6] Yunseung Noh, Myungsik Do, "Determination of Emergency Evacuation Roads Considering Road Network Function and Connectivity", The Korea Institute of ITS Journal, Vol. 13, No. 6, 34-42, 2014.
- [7] Amila Jayasinghe, Kazushi Sano, Hiroaki Nishiuchi, "Explaining Traffic Flow Patterns Using Centrality Measures", International

- Journal for Traffic & Transport Engineering, Vol. 5, Issue 2, 134-149, 2015.
- [8] Sybil Derrible, "Network Centrality of Metro Systems", PLOS One, Vol.7 No.7. 2012.
- [9] Tae-Soo Cho, Chi-Geun Han, and Sang-Hoon Lee. "Measurement of graphs similarity using graph centralities." JKCSI, 57-64, 23. Dec. 2018.
- [10] Daniela Bremmer, Keith C. Cotton, Dan Cotey, Charles E. Prestrud, Gary Westby, "Measuring Congestion: Learning from Operational Data", Transportation Research Record 1895, pp.188-196, 2004.
- [11] Gilbert, Edgar N. "Random graphs." The Annals of Mathematical, Vol. 30, No. 4. pp. 1141~1144, Dec. 1959.
- [12] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Pre-Publication Information Board, <http://www.molit.go.kr/>.
- [13] Korea Expressway Corporation Highway Public Data Portal, <http://data.ex.co.kr/>

Authors



Sung-Geun Lee received the B.S., M.S. and PhD in Computer Engineering from Kyung Hee University, Korea 2004, Department of Computer Engineering at Kyung Hee University, Korea, in 2017.

He is interested in Financial and Reinforcement Learning.



Chi-Geun Han received the B.E. and M.E. degrees in Industrial Engineering from Seoul National University and Ph.D. degree in Computer Science from the Pennsylvania State University, USA 1991.

Dr. Han joined the faculty of the Department of Computer Engineering at Kyung Hee University, Korea, in 1992. He is currently a Professor in the Department of Computer Engineering, Kyung Hee University. He is interested in Graph Theory and Network Analysis.