

An Analysis of the Ripple Effect of Congestion in a Specific Section Using the Robustness Sensitivity of the Traffic Network

Chi-Geun Han*, Sung-Geun Lee*

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

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

[Abstract]

In this paper, we propose a robustness sensitivity index (RSI) of highway networks to analyze the effect of congestion in a specific section on the entire highway. The newly proposed RSI is defined as the change in the total mileage of the transportation network per extended unit length when the length of a particular section is extended. When the RSI value is large, traffic congestion in the section has a worse effect on the entire network than in other sections. The existing network robustness index (NRI) simply observes changes in transportation networks with and without specific sections, but the RSI proposed in this study is a kind of performance indicator that allows quantitative analysis of the ripple effect of the entire network according to the degree of congestion in a specific section. While changing the degree of congestion in a particular section, it is possible to calculate how the traffic volume increases, decreases, and the size and location of the congestion section change. This analysis proves the superiority of RSI as it cannot be analyzed with NRI. Various properties of RSI are analyzed using data from the domestic highway network. In addition, using the RSI concept, it is shown that the ripple effect on other sections in which a change in the degree of congestion of a specific section occurs can be analyzed.

▶ **Key words:** graph, highway, robustness, sensitivity, traffic network

[요 약]

본 연구는 특정 구간의 정체가 전체 고속도로에 미치는 영향을 분석하기 위한 고속도로 망의 강건성 민감도 지수(RSI: robustness sensitivity index)를 제안한다. 새로 제안된 RSI는 특정 구간의 길이가 연장되었을 때, 연장된 단위 길이 당 교통망의 총 운행거리 변화량으로 정의한다. RSI 값이 클 경우, 해당 구간의 교통 정체는 다른 구간에 비해 전체 망에 나쁜 영향을 미치게 된다. 기존의 망 강건성 지수(NRI: network robustness index)는 단순히 특정 구간이 있을 때와 없을 때의 교통망 변화를 관찰하지만, 본 연구가 제안한 RSI는 일종의 성능 지표로 특정 구간의 정체 정도에 따른 망 전체의 과급효과를 정량적으로 분석할 수 있게 해준다. 특정 구간의 정체 정도를 변화시키면서, 그 정체가 발생시키는 다른 구간들의 교통량 증가, 감소, 정체 구간의 크기 및 위치 등이 어떻게 변화하는지를 계산할 수 있다. 이 분석은 NRI로는 분석 불가능한 것으로 RSI의 우수성을 입증하는 것이다. 국내 고속도로 망의 데이터를 이용해 RSI의 다양한 성질을 분석한다. 그리고 RSI 개념을 이용하면 특정 구간의 정체 정도 변화가 발생시키는 다른 구간들에 대한 과급효과를 분석할 수 있음을 보인다.

▶ **주제어:** 그래프, 고속도로, 강건성, 민감도, 교통망

-
- First Author: Chi-Geun Han, Corresponding Author: Chi-Geun Han
 - *Chi-Geun Han (cghan@khu.ac.kr), Dept. of Computer Engineering, Kyung Hee University
 - *Sung-Geun Lee (sglee00@khu.ac.kr), Dept. of Computer Engineering, Kyung Hee University
 - Received: 2022. 12. 19, Revised: 2023. 01. 20, Accepted: 2023. 01. 26.

I. Introduction

고속도로 망은 국내의 인적, 물적 자원의 이동에 중요한 수단이다. 따라서 교통망이 항상 원활하게 운영되어야 한다. 그러나, 자연재해 또는 사고에 의해 고속도로 망의 일부 구간의 폐쇄 또는 차선 수의 감소가 발생할 수 있고, 결과적으로 해당 구간의 교통에 많은 지장을 주게 된다. 교통망의 설계, 분석 등을 위해 많은 연구가 진행됐다 [2]. 새로운 도시를 건설할 때 인구분포를 고려하여 도로 망을 설계하고, 출퇴근 인구수를 고려하여, 병목현상을 발생시킬 수 있는 구간들을 예측할 수 있다. 그리고, 도로 망에 문제가 발생하였을 때, 우회로의 확보 계획 등의 연구를 진행했다.

그중에 망의 강건성(robustness)을 정의하여 구간의 폐쇄가 전체 교통망에 미치는 영향을 측정한 연구가 있다 [3]. 망의 구조와 교통량에 따라 망 일부의 폐쇄가 전체에 미치는 영향이 달라지는데, 그 영향을 예상할 수 있는 강건성은 그 값을 제공하였다. 교통망을 그래프로 표시하게 되면, 고속도로의 진출입 지점과 고속도로가 서로 교차하여 차량이 다른 고속도로로 옮겨 갈 수 있는 지점은 그래프의 노드로 표시되고, 구간들은 에지로 표시된다. 그래프로 표시된 고속도로 망은 그래프 이론에서 제공하는 다양한 분석 도구를 사용하여 분석할 수 있는데, 그중 그래프의 중심성(centrality)을 이용한 다양한 분석이 있다[4].

본 연구에서는 망 일부의 지연, 즉 특정 구간의 정체가 전체 망에 미치는 영향을 정량적으로 분석한다. 우리는 이것을 특정 구간의 강건성 민감도(robustness sensitivity)라고 정의한다. 강건성 민감도는 특정 구간이 사고에 의해 교통의 흐름이 원활하지 않을 경우, 단위 길이 당 전체 교통망에 미치는 영향으로 정의한다. 민감도가 큰 구간은 민감도가 작은 구간에 비해, 해당 구간의 정체가 전체 망에 큰 영향을 미치게 된다.

2장에서는 관련 연구들을 소개하고, 3장에서는 본 연구의 방법을 설명한다. 4장에서는 다양한 실험계산 결과를 설명하고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. Related Works

도로망은 인간의 활동에 많은 영향을 주는 사회간접자본의 하나이다. 항상 원활하게 운영되는 것을 기대하고 있지만, 간혹 예상치 못한 사고 또는 자연재해 등에 의해 원활한 교통에 지장을 초래할 수 있다. 도로망의 효율성

과 강건성에 관한 많은 연구가 수행됐다[2]. 도로가 수용 가능한 교통용량 중 사용하는 비율을 활용하는 단순한 방법은 장애 발생 시 교통량의 분산을 고려할 수 없으므로, 이 문제를 해결하기 위해 망 강건성 지수(Network Robustness Index)가 제안되었다[1].

망 강건성 지수는 각 도로의 구간이 폐쇄되었을 때 증가하는 전체 운행거리로 정의된다. 운행거리는 모든 차량이 운행하는 총거리의 합으로 정의한다. 이 방법을 사용하면, 각 도로 구간이 폐쇄될 경우, 전체 교통망에 가장 나쁜 영향을 주는 구간을 확인할 수 있다. 그 구간을 중점적으로 관리하여 폐쇄가 발생하지 않도록 대비한다든지 또는 우회로를 확보하는 방법으로 전체 교통망을 안전하게 관리할 수 있다.

그래프 이론에는 그래프에서 노드의 중요도를 측정하는 중심성(centrality)이 활용되고 있다. 중요한 역할의 노드는 다른 노드들 보다 그래프의 중심에 위치할 것이라는 가정에서 출발하여, 최단 거리, 연결도 등의 정보를 이용하여 중심성을 정의하였다. 이러한 개념을 교통망에도 적용하였다. [5]는 대도시의 교통흐름과 교통량을 교통망의 중심성을 활용하여 예측하였다. 그리고, [6]은 28개의 도시 교통망을 매개중심성(betweenness centrality)을 이용하여 분석하였다. 그래프의 중심성을 이용하여 중요 노드를 확인하는 방법으로는 교통망의 (출발지, 도착지)의 교통 수요를 반영하기 어려우므로, 현실적으로 교통망의 분석에 활용하기에는 한계가 있다.

[2],[7]은 교통망의 취약성(vulnerability)과 복원력(resilience)에 대한 연구들을 조사했다. 취약성은 교통망의 취약한 구간을 파악하는 것이고, 복원력은 장애 발생 시 교통망에 발생한 정체를 회복하는데 어느 정도의 시간이 소요되는지를 나타낸다. 다양한 측면을 고려하여 교통망에 미치는 홍수의 영향을 분석하고, MRI(Multi-scale Robustness Index)를 제안한 연구가 있다[8]. [9]는 도로를 운행하는 자동차의 속도를 이용하여 도로의 정체를 나타내는 단순한 척도를 제안하였다. [3]은 망 강건성 지수를 이용하여 NTR(Network Trip Robustness)를 정의하였다. 본 연구를 통해 특정 구간의 정체가 전체 망에 미치는 영향, 즉 구간의 강건성 민감도를 측정할 수 있다.

본 연구는 망 강건성 지수를 이용하여 망의 취약한 구간을 파악하는 방법에 기반을 두고 있다[1]. 교통망 상의 자동차들의 총 운행거리를 L 이라고 하면

$$L = \sum_e l_e \times t_e \quad (\text{식 1})$$

이 된다. 여기서 e 는 고속도로의 한 구간(그래프의 에지, 이후부터 에지로 표현), t_e 는 에지 e 의 교통량, 즉 자동차

대수이고, l_e 는 에지 e 의 길이이다. 모든 에지가 정상일 때의 총 운행거리 L 과 에지 k 가 폐쇄되었을 때의 총 운행거리 L_k 와의 차이, 즉

$$\Delta L_k = L_k - L \quad (\text{식 2})$$

을 k 의 망 강건성 지수(NRI)라고 한다[1].

$$\Delta L_p = \max_{e \in E} \{ \Delta L_e \} \quad (\text{식 3})$$

를 정의할 수 있는데, 에지 p 는 교통망에서 가장 취약한 에지가 된다. 즉, 에지 p 가 폐쇄될 경우, 교통망 전체에 다른 어떤 에지보다 가장 나쁜 영향을 미치게 되는 것이다. [13]은 한국의 고속도로 망에 대해 강건성 지수를 계산하여, 취약 에지를 파악하였다.

본 연구의 주요 기여 내용은 우선 [1]에 소개된 망 강건성 지수 NRI를 확장하여 새로운 지수인 강건성 민감도 지수(RSI: robustness sensitivity index)를 정의한 것이다. RSI는 NRI가 제공하지 못하는 특정 에지의 정체 정도가 전체 망의 교통에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 성능 지표가 된다. 그리고 RSI 개념을 이용하여 특정 에지의 정체 변화 정도가 발생시키는 전체 교통망에 대한 파급효과(각 에지의 교통량 증가, 감소, 정체 구간의 크기 및 위치 등)를 분석할 수 있음을 보였다. 이로서 RSI가 NRI보다 우수한 지표임을 보인다.

III. Methods

본 장에서는 본 연구가 제안한 RSI를 설명한다. 특정 에지 k 의 길이가 l_k 라고 하면, 에지 k 에 정체가 발생하여 해당 에지의 운행시간이 정상 운행시간의 r 배가 된다고 가정하자. 자동차가 동일한 속도로 운행한다고 가정하면, 운행시간의 r 배는 에지 k 의 길이가 rl_k 가 된 것과 같은 결과가 된다. 에지 k 의 망 강건성 민감도 RSI $rsi(k)$ 를

$$rsi(k) = \frac{L_k^d - L}{L} \times \frac{1}{rl_k - l_k} \quad (\text{식 4})$$

로 정의한다. 여기서 L_k^d 는 에지 k 의 정체에 따라 그 에지의 길이가 연장되었을 때의 총 운행거리이다. L 은 모든 에지가 정상일 때의 총 운행거리이다. 강건성 민감도 $rsi(k)$ 는 에지 k 의 정체에 따른 총 운행거리 증가 비율을 연장된 길이로 나눈 것이다. 여기서 총 운행거리 증가 비율을 이용한 이유는 교통망에 따라 총 운행거리는 달라지므로, 추후 교통망 간의 특정 에지의 민감도를 비교하기 위해서는 상대적인 척도가 유리하기 때문이다. 그리고, 에지의 연장된 길이 $rl_k - l_k$ 로 나눈 이유는 특정 에지의

정체율 r 에 따라 추가로 운행해야 하는 길이가 늘어나게 되는데, 늘어나게 된 단위 길이 당의 민감도를 계산하기 위해서이다. 이를 통해 각 에지별로 정체 에지의 단위 길이 증가가 어떠한 영향을 주는지를 비교 분석할 수 있다. (식 1)에 의해

$$L_k^d = \sum_e l_e^d \times t'_e \quad (\text{식 5})$$

인데, 여기서 t'_e 는 에지 e 의 변경된 교통량이다, 에지 k 의 정체는 에지 k 의 길이를 연장하는 것으로 반영하고, 나머지 에지들은 모두 동일한 길이가 된다. 즉, $l_k^d \neq l_k$, $l_e^d = l_e \forall e \in E, e \neq k$. 에지 e 의 교통량 정보는 데이터베이스에서 제공하지 않으므로 다음과 같은 방법으로 계산하여 사용한다. 먼저 각 (출발지, 도착지) 정보를 이용하여 (출발지, 도착지) 간의 최단경로를 파악한다. 최단경로를 구성하는 각 에지에 (출발지, 도착지)의 교통량 정보를 누적하게 된다. 다른 모든 (출발지, 도착지)에 대해 동일한 계산을 수행하여 교통량을 누적하면 에지 e 의 t'_e 와 t_e 를 계산할 수 있다. 일반적으로 에지의 거리가 증가하게 되면(즉, 해당 에지의 운행 속도가 느려지면), 그 에지의 교통량은 감소하게 된다. 즉, 다른 빠른 경로를 찾게 되면서 장애 또는 정체가 발생하는 에지를 피하게 되는 것이다.

다음 Fig. 1.과 같은 단순한 교통망을 이용하여 제한하는 RSI를 설명한다. 에지에 표시된 숫자는 에지의 길이를 나타낸다. 이 교통망에 대해 가상의 (출발지, 도착지) 자동차 운행정보 Table 1.을 이용하여 RSI를 계산한다. 여기서 (a,c)는 출발지 a, 도착지 c를 나타내고, [b,e]는 에지 b-e를 나타낸다.

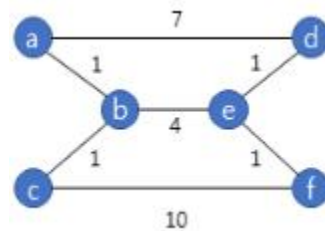


Fig. 1. A Sample Network

Table 1. Traffic on Fig p Network

(origin, destination)	traffic for a day	the shortest path	length X traffic
(a,f)	3	a-b-e-f	18
(c,e)	4	c-b-e	20
(c,d)	2	c-b-e-d	12
total distance			50

(출발지, 도착지) 정보를 이용하여 최단 거리를 계산하여, 각 (출발지, 도착지) 별 운행거리를 계산할 수 있다. 각 운행거리의 합은 총 운행거리가 된다. 만일 [b,e]의 거리가 4에서 8로 변한다면, 즉, [b,e] 에지의 통행속도가 1/2로 된다면, 새로운 최단경로를 계산한 후, 변경된 총 운행거리를 계산하게 된다.

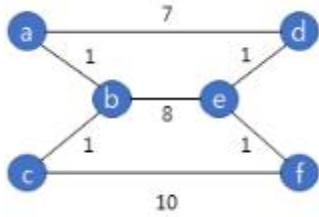


Fig. 2. Modified Sample Network

Fig. 2.에서 (a,f)의 최단경로는 [b,e]의 길이가 4에서 8로 연장되면서, a-d-e-f가 된다. 그리고, (c,e)의 최단경로는 [b,e]의 연장에도 불구하고 c-b-e로 같게 된다. 또한, (c,d)의 최단경로는 c-b-a-d가 된다. 새로운 최단경로 정보를 이용하여 총 운행거리를 계산하면 Table 2.와 같이 된다.

Table 2. New Traffic on Fig q Network

(origin, destination)	traffic for a day	the shortest path	length X traffic
(a,f)	3	a-d-e-f	27
(c,e)	4	c-b-e	36
(c,d)	2	c-b-a-d	18
total distance			81

[b-e]의 강건성 민감도 $rsi([b,e])$ 는 $\frac{81-50}{50} \times \frac{1}{8-4} = 0.155$

가 된다. 위의 단순한 예에서 본 것처럼 (출발지, 도착지)의 교통량을 알 수 있으면, 에지별 강건성 민감도를 계산할 수 있다.

(식 4)에서 제안한 망 강건성 민감도 지수를 상세하게 정의한다. 그래프 G 는 연결된(connected) 비방향(undirected) 그래프라고 가정한다. V 는 노드들의 집합, E 는 에지들의 집합이다.

$$G = (V, E), V = \{v_1, \dots, v_n\}, E = \{e_1, \dots, e_m\}$$

l_e : length of edge e

t_e : traffic on edge e

$\sum_{e \in E} l_e \times t_e$: 총 운행거리

l'_e : modified length of edge e

t'_e : changed traffic on edge e

$\sum_{e \in E} l'_e \times t'_e$: 새로운 총 운행거리

$rsi(k)$: l_k 가 l^k 로 연장되었을 때의 에지 k 의 강건성 민감도, where $l^k = r \times l_k, r > 0, r$ 은 연장률

$$rsi(k) = \frac{\sum_{e \in E} l'_e \times t'_e - \sum_{e \in E} l_e \times t_e}{\sum_{e \in E} l_e \times t_e} \times \frac{1}{l'_k - l_k} \quad (식 6)$$

= '총 운행거리 변화량' / '이전의 총 운행거리' / '거리(시간)변화량'

if $t'_e \neq t_e, \forall e \in \Phi, \Phi \subseteq E, e \neq k$

$$\begin{aligned} rsi(k) &= \frac{(\sum_{e \in \Phi, e \neq k} l_e t'_e + l'_k t'_k + \sum_{e \in \Phi, e \neq k} l_e t_e) - \sum_{e \in E} l_e t_e}{\sum_{e \in E} l_e t_e} \times \frac{1}{l'_k - l_k} \\ &= \frac{\sum_{e \in \Phi, e \neq k} (t'_e - t_e) l_e + l'_k t'_k - l_k t_k}{\sum_{e \in E} l_e t_e} \times \frac{1}{(r-1)l_k} \\ &= \frac{\sum_{e \in \Phi, e \neq k} (t'_e - t_e) l_e + r l_k t'_k - l_k t_k}{\sum_{e \in E} l_e t_e} \times \frac{1}{(r-1)l_k} \\ &= \frac{\sum_{e \in \Phi, e \neq k} (t'_e - t_e) l_e + l_k (r t'_k - t_k)}{\sum_{e \in E} l_e t_e} \times \frac{1}{(r-1)l_k} \\ &= \frac{\sum_{e \in \Phi, e \neq k} (t'_e - t_e) l_e}{\sum_{e \in E} l_e t_e \times (r-1)l_k} + \frac{r t'_k - t_k}{\sum_{e \in E} l_e t_e (r-1)} \quad (식 7) \end{aligned}$$

(식 7)로부터 에지 e 의 교통량이 동일한 특별한 경우, 즉 만일 $t'_e = t_e, \forall e \in E,$

$$rsi(k) = \frac{(r-1)t_k}{\sum_{e \in E} l_e t_e (r-1)} = \frac{t_k}{\sum_{e \in E} l_e t_e} \quad (식 8)$$

즉, 에지 k 의 길이가 바뀌어도 해당 에지의 교통량이 바뀌지 않으면, 기존의 에지별 거리 정보와 교통량 정보만 있으면 해당 에지의 강건성 민감도 $rsi(k)$ 를 구할 수 있다는 것이다. 그러므로 에지의 연장률 r 값과 관계없이 항상 일정한 민감도를 갖게 된다. 일반적으로 에지의 길이가 바뀌게 되면, 그 에지를 사용하는 것보다 다른 에지를 이용하는 것이 최단 거리를 보장한다면, 에지의 교통

량은 바뀌게 된다. 그러나 그래프에서 특정 에지를 삭제하였을 때 그래프가 연결그래프의 성질을 유지하지 못하게 되는 에지인 경우, 그 에지의 길이가 길어져도 해당 에지를 지나는 교통량은 변화가 없게 된다. 다음 그림 Fig B는 이와 같은 상황의 에지를 보여 주고 있다.

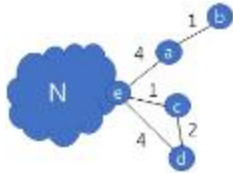


Fig. 3. A simple network

Fig. 3.에서 b로부터 교통망 N으로 이동하는 차량은 [b,a] 에지를 반드시 거쳐야 한다. 그래서 [b,a] 에지의 길이가 아무리 길어져도 해당 에지를 이용하여야 한다. 그러나, d로부터 교통망 N의 한 지점으로 이동하는 차량은 d-c-e로 가는 것이 d-e로 이동하는 것보다 최단 거리가 된다. 그러나, [d,c]의 길이가 2배가 되어 4가 되면 상황이 바뀌게 된다. d에서 출발하여 e로 직접 이동하는 것이 d-c-e로 이동하는 것보다 망 N으로 진입하는데 최단 거리를 보장한다. 이러한 이유로 에지의 길이가 연장되면, 그 에지를 통과하는 교통량이 변화하게 된다. 따라서 어떤 에지의 교통량은 증가하고, 또한 어떤 에지의 교통량은 감소하게 되는 것이다.

본 연구에서는 하나의 에지를 삭제할 때 그래프가 연결그래프가 되지 않는 에지들에 대해서는 민감도 분석을 수행하지 않았다. 이유는 이러한 에지는 해당 도로에 교통 정체가 있다고 하여도 우회로를 찾을 수 없으므로, 교통량의 변화가 발생하지 않는다. 참고로 [서울, 신갈]C인 경우 노드 서울은 고속도로의 끝에 있으므로, 이 에지의 민감도 값은 정체에 따라 변하지 않으며, rsi 값은 0.0014130이었다. 고속도로 이외의 국도 사용은 없다고 가정한다.

IV. Experimental Results

본 연구에서는 다음 Fig. 4.와 같은 국내 고속도로 망에 대해 연구를 수행하였다.



Fig. 4. Korea Expressway

그래프 $G=(V,E)$ 로 국내 고속도로 망을 표시한다. 여기서 그래프 G 는 연결된 비방향 그래프이고, V 는 노드들의 집합, E 는 에지들의 집합이다. V 는 고속도로의 시작점, 끝점, 진출입 지점, 교차점(JC: junction)을 나타낸다. E 는 두 지점 간의 고속도로 구간(에지)을 나타낸다. 본 연구에서 고속도로 망의 자료는 [10],[11]을 사용하였고, $|V|=537$, $|E|=582$ 이다.

(출발지, 도착지)의 교통량 정보는 한국도로공사의 데이터베이스 자료를 활용하였다[12]. 사용 데이터는 2019년 1월, 4월, 7월, 10월의 총 123일간의 교통량을 누적하여 계절적인 교통량의 변화를 모두 포함할 수 있도록 하였다. [12]에서 제공한 (출발지, 도착지) 교통량의 정보에서 출발지와 도착지의 개수는 동일하게 394개였다. 따라서 총 (출발지, 도착지) 교통량 정보의 개수는 $394 \times 394 = 155,236$ 개이다. 그런데, (출발지, 도착지) 교통량 정보에서 많은 항목이 작은 값을 갖고 있거나 0의 값이다. 본 연구에서는 4개월의 총 교통량이 800대 이상 (6.5대/1일)인 항목만을 활용하였다. 이러한 조건을 만족하는 데이터양은 23,847건이었다.

고속도로 공사의 데이터베이스에는 에지의 특정 지점에서 측정된 교통량 데이터가 있다. 본 연구에서는 이러한 데이터는 고려하지 않고, (출발지, 도착지)를 식별할 수 있는 교통량만을 대상으로 하고 있다. 예를 들어, 서울 외곽고속도로, 용인-서울 고속도로, 제2경인고속도로 등은 구간별로 요금을 받고 있다. 이들 고속도로에서는 (출발지, 도착지) 교통량을 확인할 수 없으므로, 본 연구에서는 고려하고 있지 않다. 따라서, 본 연구의 완전성을 저해하는 요소로 작용하지만, 본 연구를 통해 전체적인 고속도로 구간의 민감성을 확인할 수 있다.

2장에서 망 강건성 지수를 설명하였다. 특정 에지 a 의 강건성 지수 NRI_a 는 (식 2)로 정의되는데, 이 척도는 특

정 에지가 폐쇄되었을 때 전체 망에 미치는 영향의 정도를 나타낸다. [13]은 국내 고속도로 망에 (식 2)를 적용하여 에지별로 강건성 척도를 계산하였다. 그 결과는 다음 Table 3.에 기술되어 있다[13].

Table 3. top 5 NRI_a values

rank	section	NRI_a
1	Dongchangwon-Jinyoung JC	14,952,825
2	Singal JC-SuwonSingal	14,648,745
3	Changwon JC-Dongchangwon	14,437,088
4	Seopyungtaek JC-Seopyungtaek	12,534,676
5	SuwonSingal-Kiheung	11,359,482

[13]의 결과를 보면 NRI_a 는 에지 a 의 교통량의 영향을 받고 있고, 교통량이 큰 에지일수록 큰 값의 NRI_a 를 갖는다.

지금부터는 강건성 민감도의 실험 결과를 설명한다. 에지 길이의 연장률은 해당 에지의 길이를 증가시키는 비율로 정의한다. 예를 들어, 에지의 길이가 5km인 경우, 연장률 2는 그 에지의 길이가 10km가 된다는 것을 의미하고, 운행 자동차의 속도가 일정하다고 하였을 때, 그 에지를 통과하는데 소요되는 시간이 2배 되는 것을 의미한다. 즉, 연장률은 해당 에지의 교통량이 증가하여 통행이 지체되는 현상을 모의 실험할 수 있는 환경을 제공한다. 다음 Fig. 5.는 교통량 상위 100개에 대한 연장률 2일 때의 RSI를 보여 주고 있다.

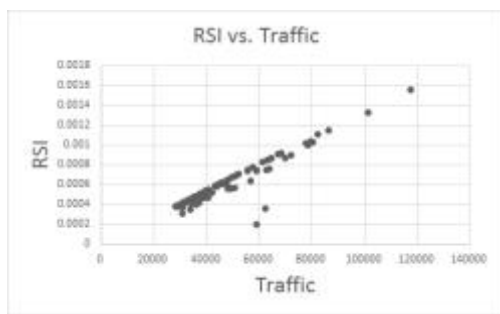


Fig. 5. Traffic vs. Sensitivity for top 100 link of traffic with extend ratio 2

이 결과로부터 강건성 민감도도 에지의 교통량에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 다음 테이블은 연장률 2일 때 국내 상위 5위의 RSI 에지와 값을 보여 주고 있다.

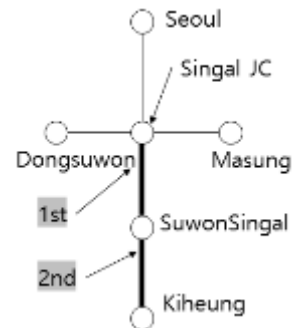
Table 4. top 5 RSI

rank	section	RSI
1	Singal JC-SuwonSingal	0.0015525
2	SuwonSingal-Kiheung	0.0013261
3	Kiheung-KiheungDongtan	0.0011512
4	Buksuwon-Dongsuwon	0.0011035
5	Dongtan JC-Ohsan	0.0010365

다음 Fig. 6.은 연장률 2일 때 강건성 민감도 상위 5개의 위치와 1위, 2위 에지를 보여 주고 있다.



(a) top 5 links of RSI



(b) top 2 links of RSI

Fig. 6. Location of top 5 link and top 2 of RSI

[동창원-진영]C 에지의 강건성 지수 NRI_a 는 국내 고속도로망에서 1위였으나, 강건성 민감도의 값이 0.0006884로 순위로 28위이었다. Fig H는 연장률 2일 때 교통량 상위 100개의 강건성 민감도를 큰 순서로 나열한 것이다. 상위의 몇 개에서는 민감도가 감소하다가 많은 에지에서 민감도가 완만하게 감소하는 것을 알 수 있다.

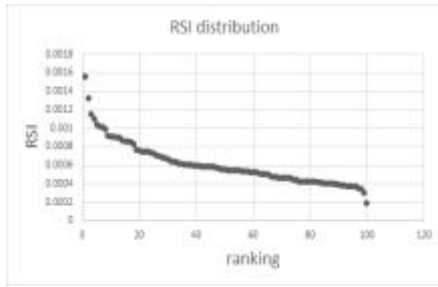


Fig. 7. RSI ranking

Fig. 8.은 교통량 상위 100개의 에지에 대해 연장률을 2,3,4,5로 하였을 때의 평균 강건성 민감도를 표현한 것이다. 연장률이 증가할수록 평균 RSI는 감소한다.

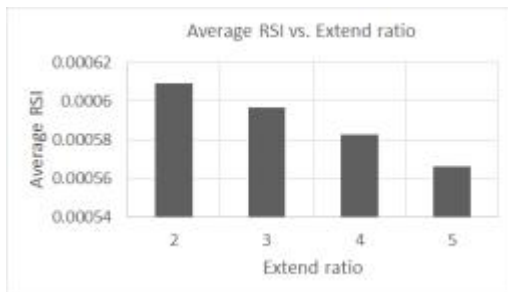


Fig. 8. Extend ratio vs. Average RSI for top 100 link of traffic

지금부터는 강건성 민감도가 1위인 [신갈]C, 수원신갈] 에지의 길이가 연장되었을 때, 즉 정체가 발생할 때 국내 고속도로 망에 대한 파급효과를 RSI의 개념을 이용하여 분석한다. Fig. 9.는 에지 [신갈]C, 수원신갈]의 길이가 연장될 때 연장률에 따라 민감도가 어떻게 변하는지 보여 준다. 연장률이 증가하면서 민감도는 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

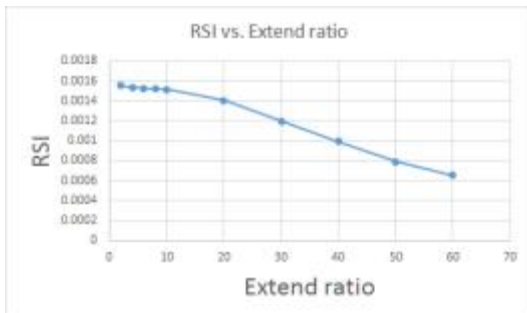


Fig. 9. RSI vs. Extend ratio

다음 Fig. 10.은 에지 [신갈]C, 수원신갈]의 연장률을 2,4,6,8,10, 20,...,60으로 설정할 때 전체 교통망에서 교통량의 변화(증가, 감소)가 발생하는 에지들의 총거리 (km)를 나타낸다. 교통량이 증가하는 에지의 길이가 교

통량의 감소가 발생하는 길이보다 큰 것을 알 수 있다. 연장률이 2,4,6,8로 증가하게 되면, 해당 에지를 통과하는 것보다, 다른 경로를 선택하는 것이 유리한 차이는 해당 에지를 우회하게 되므로, 일부 에지는 교통량이 감소하고, 일부 다른 에지들은 교통량이 증가하게 된다.

증가인 경우는 연장되는 에지의 길이가 어느 수준이 되면, 연장률의 추가 증가에 의한 영향을 주는 에지의 길이는 더 이상 증가하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이유는 연장된 에지를 완전히 우회하는 경로의 길이보다 연장된 에지의 길이가 길어지게 되면, 그 길이를 사용하는 자동차는 더 이상 존재하지 않게 되기 때문이다. 교통량이 감소하는 에지의 길이는 연장률이 증가함에 따라 증가하다가 다시 약간 감소하는 것을 관찰하였다. 이것은 교통망의 구조에 따라 달라진다. 연장률이 증가함에 따라 사용하는 도로가 달라지면서 나타나는 현상이다.

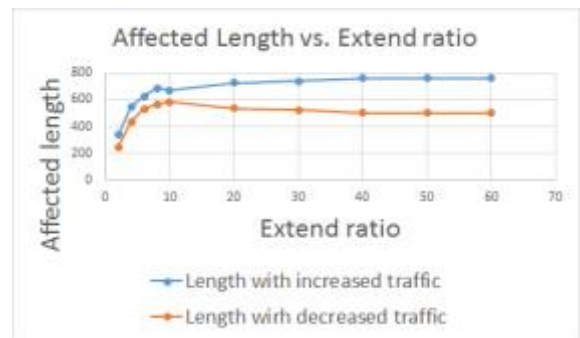


Fig. 10. Affected Length vs. Extend ratio

특정 에지의 연장률에 따라 전체 교통망에서 에지별 교통량의 변화가 발생하게 된다. Fig. 11.은 에지 [신갈]C, 수원신갈]의 연장률에 따라 각 에지에 나타난 교통량의 변화(증가, 감소) 중 1일 최대 교통량 변화 크기를 나타낸다. 연장률이 일정한 값(여기서는 40)에 도달하면, 최대 교통량 증가는 멈추게 되고, 교통량이 감소하는 에지에서 최대 감소는 늘어나다가 연장률이 20에 되면 값이 변하지 않는 것을 관찰할 수 있다.

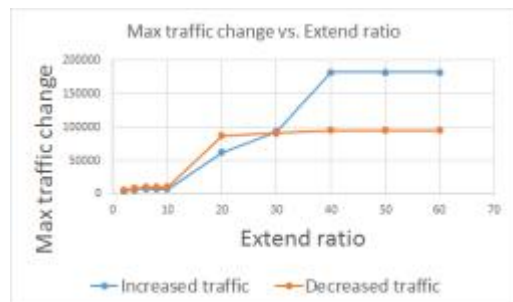


Fig. 11. Max traffic change vs. Extend ratio

다음 Fig. 12.는 에지 [신갈]C, 수원신갈]의 연장률에 따라 전체 교통망에서 교통량이 증가하는 에지의 길이, 1 일 교통량의 변화를 보여 주고 있다. 많은 경우에 작은 교통량의 증가를 관찰할 수 있다.



Fig. 12. Affected length vs. traffic increase vs. extend ratio

Fig. 13.은 에지 [신갈]C, 수원신갈]의 연장률에 따라 교통량의 변화가 하루 10,000대 미만인 경우의 교통량 증가를 관찰할 수 있는 에지의 길이를 표시하고 있다. 연장률에 따라 그 값이 증가하다가 감소 후 일정하게 변하고 있다.

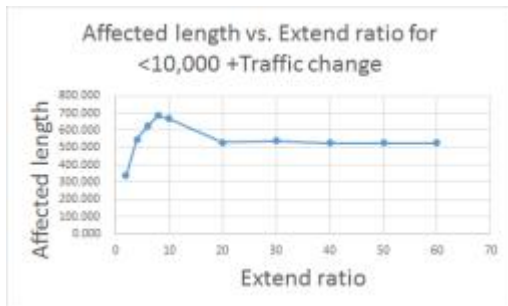


Fig. 13. Affected length vs. Extend ratio for traffic increase is less than 10,000.

다음 Fig. 14.는 에지 [신갈]C, 수원신갈]의 연장률에 따라 교통량이 감소하는 에지의 길이, 1일 교통량의 변화를 보여 주고 있다. 많은 경우에 작은 교통량의 감소를 관찰할 수 있다.



Fig. 14. Affected length vs. traffic decrease vs. extend ratio

Fig. 15는 에지 [신갈]C, 수원신갈]의 연장률에 따라 교통량의 변화가 하루 10,000대 미만인 경우의 교통량감소를 관찰할 수 있는 에지의 길이를 표시하고 있다. 연장률에 따라 그 값이 증가하다가 감소 후 일정하게 변하고 있다.

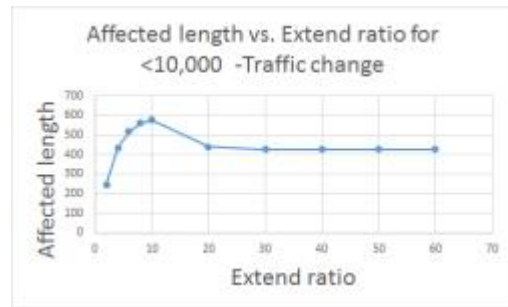


Fig. 15. Affected length vs. Extend ratio for traffic decrease is less than 10,000.

다음 Fig. 16.은 [신갈]C, 수원신갈]의 연장률 2,4,10,20인 경우 교통량이 하루 5,000대 이상 증가(진한 단선으로 표시)/감소(두 겹의 실선으로 표시)하는 에지를 표시하였다.

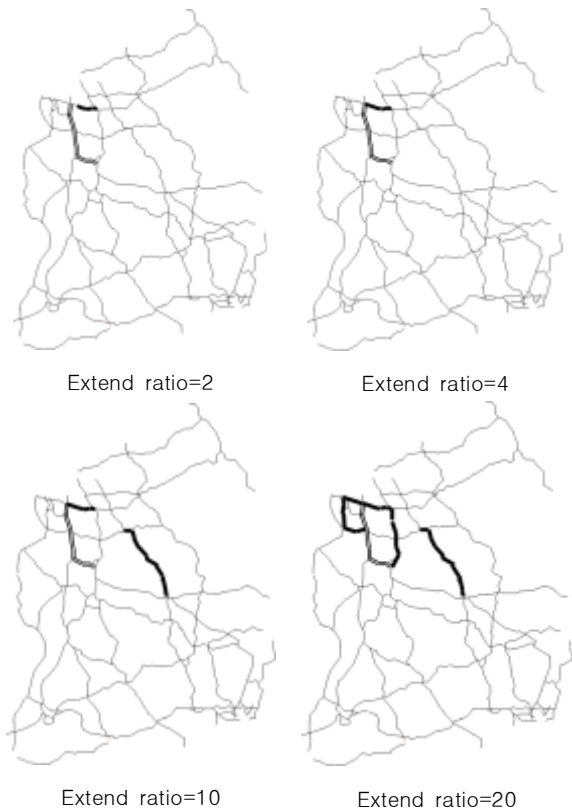


Fig. 16. Traffic change region for extend ratio=2,4,10,20

이상의 결과로 RSI를 이용한 분석을 통해 특정 에지의 정체가 만들어 내는 파급효과를 분석할 수 있었다.

V. Conclusion

본 연구에서는 기존의 NRI로는 분석하기 어려운 특정 에지의 정체 정도가 전체 교통망에 미치는 영향을 정량적으로 나타내는 성능 지표인 강건성 민감도 RSI를 정의하였다. 그리고 RSI의 개념을 활용하면 특정 에지의 연장을 변화에 따른 망의 교통량과 경로들의 정량적 변화를 분석할 수 있다는 것을 보여 RSI 개념의 실제적인 우수성을 보였다. 고속도로 망 데이터를 이용하여 RSI 성질을 다양하게 분석하였고, 에지 정체의 파급효과를 다른 에지들의 교통량 변화, 정체 구간의 변화 측면에서 정량적으로 분석하였다.

추후 연구로는 특정 에지에서 교통상의 문제가 발생하였을 때 전체 망에 미치는 영향을, 도로의 용량(차선 수)를 고려한 혼잡도 측면에서 분석할 예정이다. 본 연구에서는 모든 에지의 용량은 같다고 가정하였다.

REFERENCES

- [1] Darren Scott, David Novak, 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, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2005.10.003>
- [2] Aura Reggiani, Peter Nijkamp, Diego Lanzi, "Transport resilience and vulnerability: The role of connectivity", *Transportation Research*", 4-15, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.12.012>
- [3] 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. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.02.003>
- [4] Tae-Soo Cho, Chi-Geun Han, and Sang-Hoon Lee. "Measurement of graphs similarity using graph centralities", *JKCSI*, 23.12, 12, 2018. <https://doi.org/10.9708/jksci.2018.23.12.057>
- [5] 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. [https://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2015.5\(2\).05](https://dx.doi.org/10.7708/ijtte.2015.5(2).05)

- [6] Sybil Derrible, "Network Centrality of Metro Systems", *PLoS One*, Vol.7 No.7, 2012. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040575>
- [7] Lars-Göran Mattsson and Erik Jenelius, "Vulnerability and Resilience of transport Systems - A Discussion of Recent Research", *Transportation Research Part A*, No. 81, 16-34, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002>
- [8] Ning Zhang and Alice Alipour, "Multi-Scale Robustness Model for Highway Networks Under Flood Events", *Transportation Research Part D*, Vol. 83, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102281>
- [9] Feifei He, Xuedong Yan, Yang Liu, and LuMa, "A Traffic Congestion Assessment Method for Urban Road Networks Based on Speed Performance Index", *Procedia Engineering*, 137, 423-433, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.277>
- [10] <http://www.roadplus.co.kr/> Gilbert, Edgar N. "Random graphs." *The Annals of Mathematical*
- [11] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Pre-Publication information, 2017.
- [12] Korea Express Corporation Highway Public Data Portal, <http://data.ex.co.kr/>
- [13] Sang-Hoon Lee and Chi-Geun Han, A Network Robustness Analysis of Korea Expressway, working paper (2020).

Authors



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.



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. He is currently C.E.O in iContact Co.