

데이터 수집의 이산적 특성을 고려한 네트워크 센서 위치 모형

A Network Sensor Location Model Considering Discrete Characteristics of Data Collection

양재환* · 고승영** · 김동규***

* 주저자 : 서울대학교 건설환경공학부 박사과정
** 공저자: 서울대학교 건설환경공학부, 건설환경종합연구소 교수
*** 교신저자 : 서울대학교 건설환경공학부 조교수

Jaehwan Yang* · Seung-Young Kho** · Dong-Kyu Kim***

* Dept. of Civil and Environmental Eng., Seoul National University
** Dept. of Civil and Environmental Eng., Institute of Construction and Environmental Eng., Seoul National University
*** Dept. of Civil and Environmental Eng., Seoul National University

† Corresponding author : Dong-Kyu Kim, dongkyukim@snu.ac.kr

Vol.16 No.5(2017)

October, 2017

pp.38~48

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

<https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.5.38>

2017.16.5.38

Received 19 September 2017

Revised 14 October 2017

Accepted 17 October 2017

© 2017. The Korea Institute of
Intelligent Transport Systems. All
rights reserved.

요약

속도, 점유율, 교통량 등의 링크 속성은 교통계획 및 운영에 필수적인 요소이다. 따라서 링크 속성 정보를 수집하기 위한 센서들의 최적 위치를 결정하는 것은 지능형교통시스템(ITS)의 중요한 의사결정 중 하나이다. 본 연구는 전체 네트워크 교통정보의 변동성을 최소화하기 위한 네트워크 센서의 최적 입지를 결정하는 모형을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 데이터 수집의 이산적 특성을 반영한 네트워크 센서 위치 모형(NSLM)이 개발된다. 교통 정보의 변동성 지표는 분산-공분산 행렬의 대각요소의 합을 통해 계산된다. 개발된 모형의 적용가능성을 평가하기 위해, 대구광역시 도로에서 단거리 전용 통신(DSRC)으로 수집되는 속도 자료가 이용된다. 본 연구는 지능형교통시스템(ITS)의 투자 효율성을 제고하고 정보 정확도를 개선하는 데에 기여할 것으로 기대된다.

핵심어 : 지능형교통시스템(ITS), 네트워크 센서 위치 모형(NSLM), 교통정보 변동성, 데이터 수집의 이산적 특성, 단거리 전용통신(DSRC)

ABSTRACT

Link attributes, such as speed, occupancy, and flow, are essential factors for transportation planning and operation. It is, therefore, one of the most important decision-making problems in intelligent transport system (ITS) to determine the optimal location of a sensor for collecting the information on link attributes. This paper aims to develop a model to determine the optimal location of a sensor to minimize the variability of traffic information on whole networks. To achieve this, a network sensor location model (NSLM) is developed to reflect discrete characteristics of data collection. The variability indices of traffic information are calculated based on the summation of diagonal elements of the variance-covariance matrix. To assess the applicability of the developed model, speed data collected from the dedicated short range communication (DSRC) systems were used in Daegu metropolitan area. The developed model in this study contributes to the enhancement of investment efficiency and the improvement of information accuracy in intelligent transport system (ITS).

Key words : Intelligent Transport System (ITS), Network Sensor Location Model (NSLM), Variability of traffic information, Discrete Characteristics of Data Collection, Dedicated Short Range Communication (DSRC)

I. 서론

속도, 점유율, 교통량 등 링크가 가지고 있는 교통 속성 정보는 교통시스템을 계획하고 운영하는 데 있어 필수적인 요소이다. 따라서 교통정보를 수집하고 이를 관리하는 기관들은 다양한 센서와 방법론을 활용하여 주어진 예산 범위 내에서 양질의 교통정보를 효율적으로 수집하기 위한 노력을 경주하고 있다.

이 중 공공부문에서 주로 활용되고 있는 방식으로 한국도로공사와 대구광역시에서 적용 중인 단거리 전용 통신(dedicated short range communication: DSRC)과 경찰청과 지방자치단체가 합동으로 구축한 도시교통정보시스템(urban traffic information system: UTIS)이 있다. 이러한 장치들은 프로브 차량이 노변기지국(roadside equipment: RSE)과 실시간으로 정보를 주고받음으로써 지점소통정보가 아닌 구간소통정보를 수집할 수 있다. 반면 RSE 부근의 150m 내외의 정보만을 수집할 수 있어 진입·진출로가 많은 단속류 도로의 교통정보를 정확하게 추정하기 위해서는 충분히 많은 수의 RSE 설치가 요구되나 비용 상의 제약으로 설치 대수가 제한되어 수집되는 정보의 정확도가 저하될 우려가 있다(Korea Transport Institute, 2010). 따라서 설치 대수의 제약 하에서 가장 효과적으로 정보를 수집하기 위한 최적의 정보수집 센서 위치 결정이 필요하다.

본 연구에서는 전체 네트워크 교통 정보의 변동성을 최소화하는 네트워크 센서의 최적 입지를 결정하는 것을 목적으로 한다. 기존에 널리 활용되는 네트워크 센서 위치 모형(network sensor location model: NSLM)의 경우 정보 수집이 연속적으로 이루어질 수 있음을 가정하여 최적 위치를 선정하는 반면, 실제 RSE로부터 수집되는 교통정보는 각 구간 및 단위시간으로 나뉘어져 이산적으로 수집되는 특성을 가진다. 따라서 본 연구에서는 이산적으로 수집되는 속도 정보를 기반으로 하는 네트워크 센서 위치 모형을 개발한다. 교통정보의 변동성 지표는 RSE가 설치된 위치의 교통정보를 고정하였을 경우의 모든 시나리오에 대한 교통정보의 분산-공분산 행렬의 대각요소의 합으로 계산된다. 대구광역시 도로 상의 DSRC로부터 수집되는 속도 자료를 이용하여 개발된 모형의 적용가능성을 평가한다.

다음 절에서는 본 연구에서 적용하는 센서 최적 위치 결정 모형에 관한 기존 연구를 검토한다. 이후 실제 수집된 이산적 교통데이터에 적용가능한 다변량 이산확률 분포 기반의 네트워크 센서 위치 모형을 개발한다. 이어서 본 연구에서 활용한 데이터 및 알고리즘에 대한 설명을 기술한 후, 실제 수집된 DSRC 데이터를 적용하여 분석 결과를 제시한다. 마지막으로 본 연구의 결과를 요약하고, 향후 연구과제를 정리한다.

II. 기존 연구 고찰

교통정보 수집의 정확도를 제고하기 위한 연구는 다양한 분야에서 광범위하게 수행되었다. 본 연구에서는 네트워크 센서의 위치 개선을 통해 정확도를 제고하는 연구들을 중심으로 검토를 수행하였다. 이러한 연구들은 교통정보의 추정 정확도를 제고하기 위한 연구와 교통정보의 변동성을 저감하기 위한 연구로 대분할 수 있다.

먼저 교통정보의 추정 정확도를 제고하기 위한 연구로서, basic link method는 예산 제약 하에서 미관측된 교통정보를 추정할 수 있도록 하는 검지기의 위치를 결정하는 방법이다(Hu et al., 2009). 이는 링크-경로 행렬을 가우스-조던 소거법을 통해 기약행 사다리꼴 행렬(reduced row echelon form: RREF)로 변환하여 행렬의 기저해를 구해 기저행렬이 되는 링크를 선택하는 방법이다.

Yu et al.(2015)는 속도를 기반으로 통행시간을 추정하는 모형을 제안하였는데, 이 연구는 시뮬레이션을 통해 전 구간의 추정통행시간과 실제통행시간 차이의 MARE(Mean Absolute Relative Error) 값을 최소화하는 것

을 목적으로 하였다. 연구 결과를 토대로 차량 대기 행렬 발생 구간이 아닌 교차로 내 정지선에 설치하는 것을 제안하였다.

Li and Ouyang(2011)은 검지기의 확률적 오검지율을 고려하여 교통정보 수집에 따른 편익을 최대화하는 모형을 수리적으로 공식화하고, 이를 해결하기 위한 알고리즘으로 customized greedy algorithm과 Lagrangian relaxation algorithm을 제안하였다. 연구 결과를 통해 센서 위치에 따라 편익이 다양하게 변할 수 있으며, 편익 최대화를 위해 검지기 위치를 분산하여 설치할 것을 제안하였다. Cho(2008)는 이용자 평형상태를 이용하여 미관측 링크의 교통량을 실측값에 근접하도록 추정하는 알고리즘을 제안하였다.

교통정보의 변동성을 저감하기 위한 연구들은 대부분 센서가 설치된 링크의 정보를 고정하였을 때 다른 링크의 정보 변동성을 측정하여 이를 최소화하는 방식으로 목적함수를 구축하였다. Zhu et al.(2014)은 교통량의 분포가 표준 다변량 정규분포를 따르는 것으로 가정한 후, 특정 링크의 정보를 고정하였을 때 다른 링크들의 분산-공분산 행렬의 대각 요소의 합을 교통정보의 변동성으로 설정하였다. 이 연구는 또한 정보변동성을 최소화하는 NSLM의 일반식을 제시하였다. 저자들은 또한 NSLM의 일반식에 확률적 이용자 평형(stochastic user equilibrium: SUE)식을 이용하여 OD 기반 데이터 대신 링크 기반 및 경로 기반 데이터에 적용 가능한 모형을 제안하였다(Zhu et al., 2015). 이외에도 Xu et al.(2016)은 강건 최적화 모형(robust optimization model)을 이용하여 비관측 링크에 전파되는 관측오차의 최대치를 최소화하는 방법을 제시하였다.

III. 교통정보의 변동성

1. 교통정보 변동성의 정의

이 절에서는 본 논문에서 제시된 개념 및 모형을 구체화하기 위하여 본 연구에서 설정한 교통정보의 변동성을 정의한다. 우선 교통정보의 변동성은 Simonelli et al.(2012)에서 제시된 개념을 적용한다. 이 연구에서는 네트워크에서 수집된 교통정보의 무작위 벡터 X 의 분산-공분산 행렬을 \sum_V 라 할 때 그 행렬의 대각요소(trace)의 합인 $Tr(\sum_V)$ 을 해당 상태에 대한 네트워크 교통정보의 변동성의 척도로 표현한다.

어떤 하나의 링크에 네트워크 센서가 설치될 경우를 가정하자. 이 때 해당 센서로부터 수집되는 교통정보는 무작위값이 아닌 상수값으로 고정되며, 무작위 벡터 중 하나의 행렬 요소(element)는 단일한 값으로 설정된다. 따라서 네트워크 센서를 설치했을 때의 교통정보의 변동성은 $Z=z$ 의 조건부 확률로 표현할 수 있으며, 네트워크 정보의 변동성은 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$Tr\left(\sum_{V|Z=z}\right) \tag{1}$$

이처럼 교통정보의 변동성은 센서의 설치를 통해 전체 네트워크에서 수집되는 정보의 분산 정도를 얼마나 줄여줄 수 있는지를 측정하는 척도가 된다. 또한 교통상태는 시시각각 변화하기 때문에, 다양한 교통상태에서의 변동성을 반영할 수 있어야 한다. 따라서 특정 위치 Z 에 센서를 설치한 경우의 네트워크 정보의 변동성 크기는 각 교통상태의 확률에 따라 적분한 값인 대각합의 기댓값으로 표현할 수 있으며 이를 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$E[Tr(\sum_{V|Z=z})] = \int_{\Omega_z} Tr(A \sum_{V|Z=z}) \varphi_Z(z) \partial z \tag{2}$$

따라서 교통정보의 변동성 지표는 RSE가 설치된 위치의 교통정보를 고정하였을 경우의 모든 시나리오에 대한 교통정보의 분산-공분산 행렬의 대각요소의 합으로 계산된다. 다음 절에서는 전술한 교통정보 변동성의 정의를 토대로 본 연구에 적용 상황에 적합하도록 모형식을 수정하는 과정을 제시하도록 한다.

2. 모형식 수정

네트워크 센서의 최적 위치를 결정하는 것은 식 (2)의 값을 최소화하는 Z^* 를 찾는 것이므로, 이를 수식화 하면 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Z^* = \operatorname{argmin}_Z \int_{\Omega_z} Tr(A \sum_{V|Z=z}) \varphi_Z(z) \partial z \tag{3}$$

여기서 Z^* 는 최적화된 링크의 위치를 나타내며 하나의 최적 센서 위치를 선정할 경우 스칼라로, 최적 센서 위치의 조합을 설정할 경우 벡터로 표기된다. 본 연구에서는 우선 1개의 링크에 최적 센서 위치를 결정하는 기본적인 NSLM을 적용한다. φ_Z 는 전체 링크의 변수에 대한 확률변수이고, V 는 전체 링크의 교통량 벡터를 의미하며 A 는 기존의 OD flow를 통한 링크의 가중치를 의미한다.

프로브 차량을 이용하여 구간교통정보를 수집하는 경우 교통량이나 점유율 대신 속도를 수집하기 때문에, 본 연구에서 링크 속성 벡터 V 는 해당 링크의 차량 수집 속도로 설정한다. 또한 구간교통정보 수집 시 프로브 차량이외의 전체 교통량을 수집할 수 없기 때문에 OD flow를 추정하는 데에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서 링크 가중치 $A = E$ 로 설정된다.

Zhu et al.(2014)에서는 교통속성 정보 V 가 다변량 정규확률분포를 따르는 것으로 가정하였다. 선형적인 분포의 가정은 모형 추정 결과의 오차를 야기하기 때문에 본 연구에서는 실제 측정 속도 분포를 적용한다. 이 때 DSRC나 UTIS에서 수집되는 데이터는 1분 단위의 각 링크의 속도자료로서 이산적 특성을 가진다. 이산적으로 수집된 교통정보의 모든 경우에 대해 $Z = z$ 인 확률은 다음과 같다.

$$\frac{n(Z=z)}{n(V)} \tag{4}$$

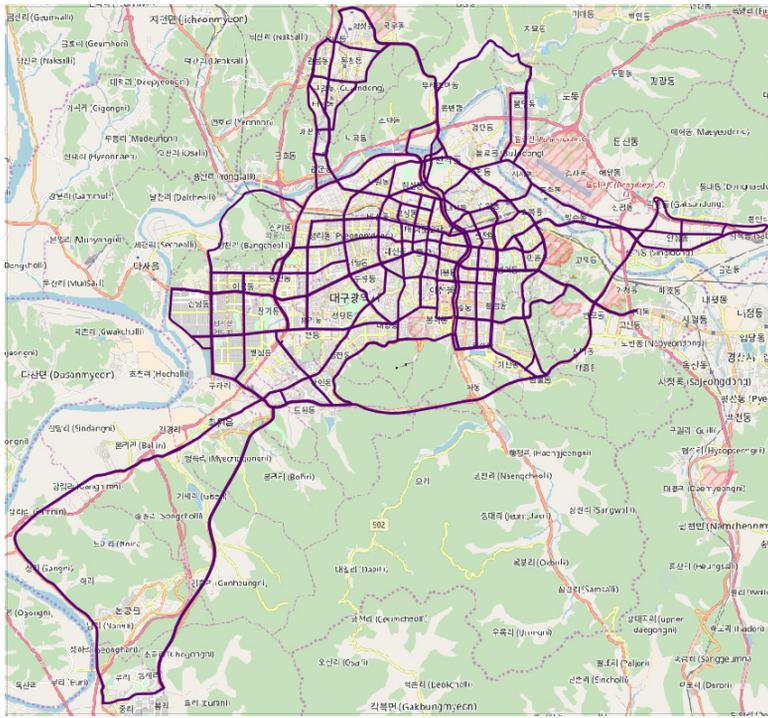
전술한 내용을 토대로 본 연구에서 제안한 네트워크 교통정보 변동성은 식(5)와 같이 측정할 수 있다.

$$E[Tr(\sum_{V|Z=z})] = \frac{\sum_V \sum_z [n(Z=z) \cdot Tr(\sum_{V|Z=z})]}{n(V)} \tag{5}$$

IV. 모형의 적용

1. 사용 자료

본 연구에서는 대구권 광역 도시네트워크의 2016년 7월 21일부터 23일까지 3일간의 DSRC 속도자료를 사용하였다. 자료는 1분 단위로 수집된 4,320개의 표본을 이용하였다. 대상이 되는 링크는 정보가 수집되는 대구광역권의 주요 도로 중 총 612개의 링크로서 이를 지도¹⁾상에 도시한 결과는 <Fig. 1>과 같다. 해당 링크의 도시는 QGIS Ver. 2.18.7이 사용되었다.



<Fig. 1> DSRC Links of Daegu Metropolitan Area

2. 전처리 및 알고리즘

본 연구는 교통정보의 변동성을 최소화하는 센서의 위치를 결정하기 위하여 전술한 네트워크의 링크 별로 센서가 위치할 경우의 변동성 변화를 분석하였다. 본 연구에서 사용된 모든 자료와 함수는 R Ver. 3.4.1을 통해 코딩되었으며 프로그래밍에는 RStudio Ver. 1.0.143이 사용되었다. 사용된 함수 패키지로 readr, reshape2, imputeTS, foreach, plyr 등을 포함한다. 본 연구에서 사용한 소스 코드는 Google Docs에 공개되어 있으므로 본 논문에서는 상세한 소스 코드에 대한 설명은 생략하고 자료 전처리 과정 및 알고리즘 흐름도를 중심으로 설명하고자 한다.²⁾

1) Naver Corp., <http://map.naver.com>

2) JaeHwan Yang, <https://goo.gl/QAHXhR>

1) 대상 자료 전처리

대상 자료 전처리는 다음의 세 가지 단계를 통해 수행된다.

첫째, 각 시계열 자료를 시계열-링크의 2차원 행렬 자료로 재배치한다.

둘째, 정보수집률이 낮은 링크를 대상에서 제거한다. DSRC 자료의 특성상 차량 내부의 장비(OBE)와의 통신을 통해 자료를 주고받아야 기록되며, 각 RSE 지점 간을 통과한 차량이 없을 경우 해당 시점의 통행속도 정보가 수집되지 않는다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013). 정보가 수집되지 않은 결측치(missing value)는 교통정보의 변동성 지표에 영향을 줄 수 있기 때문에, 본 연구에서는 총 612개의 링크 중 정보수집률이 75% 이하, 즉 정보수집건수가 3,240개 이하인 링크 295개를 제거하였다.

셋째, 결측치에 대한 보정 과정을 수행한다. 결측치의 보정을 위해서는 다양한 방법이 활용될 수 있으나 본 연구에서는 가장 널리 활용되는 단순 평균값을 활용하여 해당 결측 구간의 전 5분, 후 5분 자료를 평균하여 결측치를 보정하였다.

이러한 과정을 통해 317개 링크의 4,320개의 표본값을 구하였다. 이는 $4,320 \times 317$ 행렬로서 총 1,369,440개 값을 가지는 행렬이다.

2) 알고리즘

변동성을 최소화 하는 센서 위치 선정은 상기한 식(5)의 값을 구하는 알고리즘으로 이루어졌으며 다음과 같은 프로세스를 통해 이루어졌다.

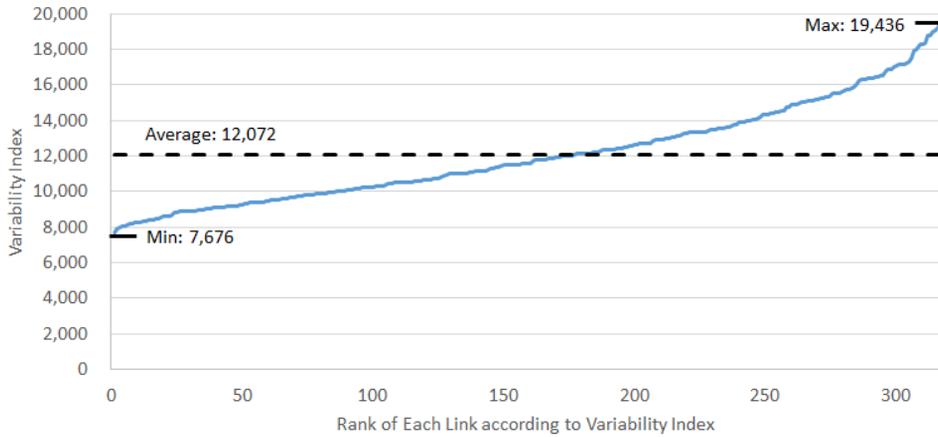
- ① 첫 번째 링크의 모든 속도의 경우의 수를 기록
 - ex) 1번 링크의 속도자료가 55, 57, 59, 61일 경우에 이 4가지를 모두 기록함
- ② 각 경우의 수에 대해 표본 수 기록
 - ex) 55가 20개, 57이 40개, 59가 50개, 61이 60개일 경우 이 각각을 모두 기록
- ③ 첫 번째 링크의 첫 번째 경우의 수인 표본만을 모아 $Z_{L_1} = z_{V_1}$ 인 경우의 공분산 행렬 생성
 - ex) 1번 링크의 속도가 55인 경우의 표본을 모두 모아 각 링크 속도의 공분산 행렬 생성
- ④ 공분산 행렬의 대각합 $Tr\left(\sum_{V|Z_{L_1}=z_{V_1}}\right)$ 를 구함
- ⑤ 첫 번째 링크의 전체 경우의 수에 대해 반복
 - ex) 첫 번째 링크의 속도가 57, 59, 61인 경우에 대해 ②~④ 반복
- ⑥ 첫 번째 링크의 전체 경우의 수의 총 대각합의 구하여 이를 전체 표본 수(4320)로 나눔
 - ex) 55, 57, 59, 61일 경우의 ⑤값을 총합한 후 전체 표본 수(예시의 경우 170)로 나눔

이러한 과정을 통해 첫 번째 링크의 값이 측정된 경우의 정보 변동성을 구할 수 있으며, 이를 전체 링크에 대해 반복함으로써 각 링크에 대해 정보 변동성을 측정할 수 있다.

3. 결과

전술한 알고리즘을 이용하여 317개의 링크 별로 센서가 위치할 경우의 변동성 지표를 계산하였다. <Fig. 2>는 센서 위치가 변화함에 따른 변동성 지표의 변화를 보여준다. 변동성 지표의 최소값은 7,676, 최대값은 19,436, 평균값은 12,072인 것으로 계산되었으며, 변동성 지표를 감소시킬수록 센서를 설치하는 것이 적절한 것이므로 최소값을 가지는 효신사거리-MBC사거리 링크가 최적의 위치인 것으로 도출되었다. 최대값은 북비

산사거리-원대오거리 링크로 나타났다. 센서의 위치에 따라 변동성의 크기가 약 2.5배 이상 차이가 나타날 수 있으며, 이는 본 연구의 필요성 및 중요성을 뒷받침한다고 볼 수 있다.

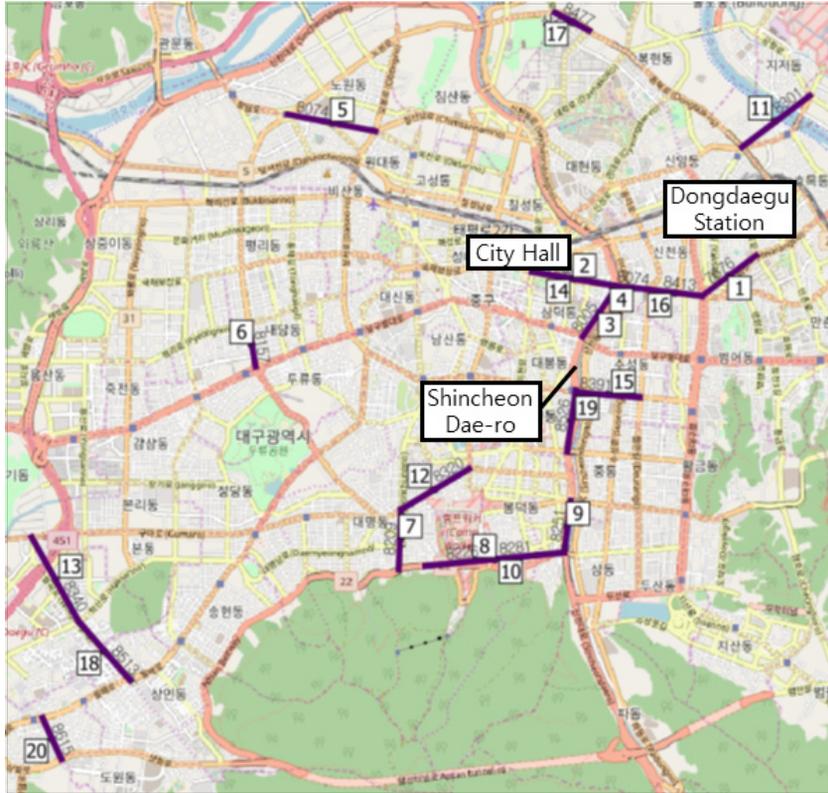


(Fig. 2) Change of the Variability Indices according to the Change of Sensor Location

변동성 지표를 최소화할 수 있는 링크의 특성을 분석하기 위하여 지표값의 상위 20개 링크 위치 및 목록을 <Table 1>에 제시하였다. 각 링크 별 센서 위치 특성 분석을 위하여 차로 수, 도로 위계, 중앙분리대 설치 여부 등을 별도로 조사하였다.

<Table 1> List of Top 20 Ranked Sensor Locations

Link ID	Link Location	Variability Index	Rank	Lanes	Hierarchy	Median Strip
566	Hyosin - MBC	7,676	1	4	Arterial	Y
430	Gongpyeong - Dongsin Br.	7,884	2	3	Arterial	N
1067	Dongsin Br. South - Susung Br. South	8,005	3	3	Express	Y
362	Dongsin Br. - Chungu	8,074	4	3	Arterial	N
304	Manpyeong - Wondae	8,074	4	3	Arterial	Y
390	Nambyeong - Duryu	8,157	6	3	Arterial	N
178	Apsan - Hyeonchung	8,209	7	2+1	Collector	N
633	Chunghon Pagoda - Sangdong Br.	8,226	8	3	Arterial	Y
59	Jungdong Br. - Sangdong Br.	8,251	9	3	Express	Y
632	Sangdong Br. - Chunghon Pagoda	8,281	10	3	Arterial	Y
576	Ipeok - Keungogae	8,301	11	4	Arterial	N
182	Apsan - Yeongdae Hospital	8,320	12	3+1	Arterial	N
617	Namdaegu IC - Wolseong	8,340	13	3	Arterial	N
429	Dongsin Br. - Gongpyeong	8,382	14	3	Arterial	N
517	Daebong Br. - Suseong Market	8,391	15	3	Arterial	N
590	Cheonggu - MBC	8,413	16	3	Arterial	N
314	Gongsan - Sangyeok Middle School	8,477	17	3	Arterial	N
1395	Wolseong - Sangin	8,513	18	3	Arterial	N
63	Daebong Br. - Heumang Br. South	8,526	19	3	Express	Y
168	Jincheon St. - Jincheon South	8,615	20	2	Collector	N



<Fig. 3> Top 20 Ranked Sensor Locations

상위 20개 링크 위치를 QGIS를 통해 실제 지도상에 표시한 결과는 <Fig. 3>과 같다. 지도상에 도시한 링크 위치의 특성을 분석한 결과, 상위 20개 링크 중 7개의 링크가 동대구역 및 시청 부근에 위치하고 있으며, 신천대로 및 그 부근에도 다수의 링크가 존재하는 것으로 확인되었다.

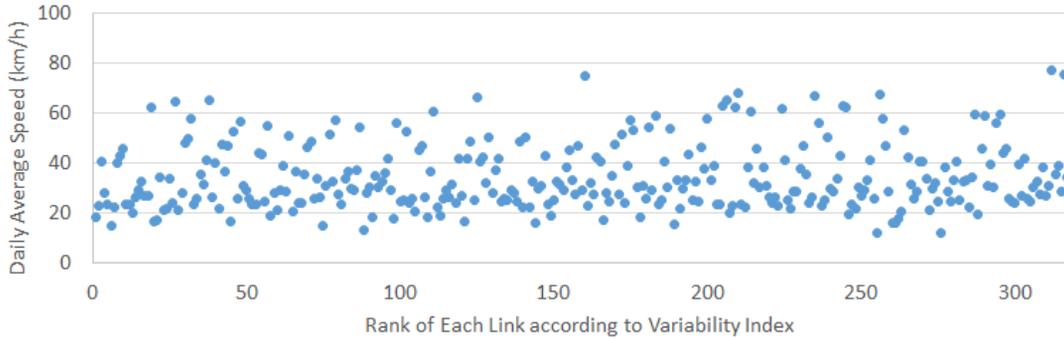
위 20개 도로의 입지적 특성을 살펴본 결과 주로 3차로 이상의 간선도로 또는 도시고속도로인 것으로 나타났다. 입지면에 있어선 먼저 도시고속도로(신천대로) 구간인 1067, 59, 63번 링크 구간과 순위가 높으며 중앙분리시설로 인해 중앙 공간이 확보된 간선급 도로인 566, 304, 633번 링크 구간이 설치에 적합하다고 볼 수 있다. 이는 정책결정자의 판단에 따라 다른 기준을 통해 우선순위를 결정할 수 있다.

대구광역시의 경우 DSRC와 UTIS를 활용하여 소통정보를 제공하고 있기 때문에 링크 별 교통량을 확인하는 것은 불가능하나, 공항을 연결하는 아양교, 평소 혼잡이 빈번하게 발생하는 동서축의 국채보상로와 남북축의 동북로 및 신천대로, 달서구청 부근 등이 중요한 위치인 것으로 판단된다.

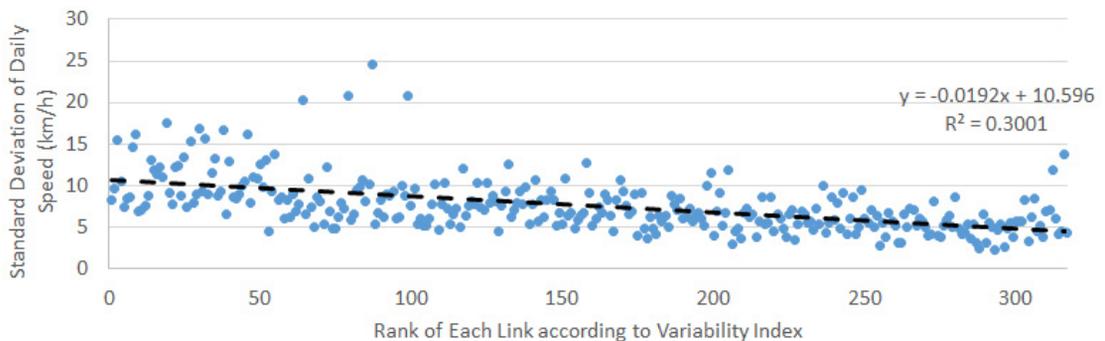
구간소통정보를 수집하는 센서의 위치를 결정하기 위하여 일반적으로 활용되는 개별 링크의 평균 속도 및 속도 표준편차가 전체 네트워크의 통행정보 변동성을 반영할 수 있는지를 비교하였다. <Fig. 4>는 변동성 지표 변화에 따른 각 링크의 평균 속도의 변화를 보여준다. 그래프에서 알 수 있듯이, 링크의 평균속도와 변동성 지표 간에는 상관관계가 없는 것으로 분석되어 링크의 평균 속도를 기준으로 센서의 위치를 결정하는 것은 불가능하다는 것을 알 수 있다.

<Fig. 5>는 변동성 지표 변화에 따른 각 링크의 속도 표준편차의 변화를 보여준다. 링크의 평균속도와는 달리 통행정보 변동성 지표와 센서가 위치한 링크의 속도 표준편차는 음의 상관관계를 가지는 것으로 분석

되었다. 즉 해당 링크의 속도 표준편차가 큰 경우, 센서의 최적 위치에 포함될 가능성이 높다고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 통행정보 변동성 지표와 속도 표준편차 간의 R^2 값이 0.30으로 매우 낮은 반면, 속도 표준편차 간의 차이가 크지 않아 속도 표준편차만으로 센서의 최적 위치를 결정하는 데에는 한계가 있는 것으로 확인되었다. 이상의 분석에서 알 수 있듯이 교통정보를 수집하는 센서의 최적 위치를 결정하기 위해서는 개별 링크의 속성 정보만으로는 한계가 있으며, 센서 설치 위치에 따른 전체 네트워크의 변동성 지표의 변화를 파악함으로써 결정할 필요가 있는 것으로 판단된다.



〈Fig. 4〉 Change of Average Speeds of Each Link according to the Change of the Variability Indices



〈Fig. 5〉 Change of Standard Deviations of Speed of Each Link according to the Change of the Variability Indices

IV. 결 론

본 연구에서는 전체 네트워크 교통 정보의 변동성을 최소화하기 위한 네트워크 센서의 최적 입지를 결정하기 위하여, 구간소통정보의 수집 특성을 반영하기 위한 속도 이산확률분포 기반의 네트워크 센서 위치 모형을 개발하였다. 교통정보의 변동성 지표는 RSE가 설치된 위치의 교통 정보를 고정하였을 경우의 모든 시나리오에 대한 교통정보의 분산-공분산 행렬의 대각요소의 합으로 계산함으로써 전체 네트워크 소통정보의 정확도를 제고하는 효과를 정량화하였다. 대구광역시 도로에서 수집되는 3일 간의 DSRC 데이터를 활용하여

개발된 모형의 적용가능성을 평가하였다. 또한 개별 링크로부터 수집된 속도 표준편차 및 평균속도 지표와의 비교를 통해, 교통정보 수집 센서의 최적 위치 선정은 전체 네트워크의 변동성 지표의 변화를 파악함으로써 결정할 필요가 있음을 확인하였다. 본 연구는 지능형교통시스템의 투자 효율성을 제고하고 정보 정확도를 개선하는 데에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 개발된 모형은 몇 가지 향후 연구를 통해 개선된 성과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 첫째, 본 연구에서는 센서의 최적 위치를 선정함에 있어 1개의 링크에만 센서를 설치할 경우의 변동성 지표를 검토하였다. 반면 분석 결과에서 알 수 있듯이, 최적 위치들은 특정 지역 주변에서 발생하거나 또는 같은 도로 상의 다른 링크들에서 발견되는 특성이 나타났다. 따라서 센서의 최적 위치를 결정할 때 1개의 링크 대신 예산이 허락하는 범위 내에서의 위치 조합 최적해를 구하는 것이 보다 적절할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이를 위해서는 조합에 대한 변동성 지표를 계산해야 하며, 따라서 훨씬 많은 경우의 수가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 전수의 경우를 검토하는 대신 최적해를 탐색할 수 있는 효율적인 알고리즘이 추가적으로 개발될 필요가 있다.

둘째, 방법론에서 전술하였듯이 구간소통정보에서 수집되는 링크 속성은 프로브 차량의 속도이기 때문에, 전체 교통량에 대한 정보를 구득하는 데에 한계가 있으며, 음영지역이 불가피하게 발생하는 경우가 생길 수 있다. 따라서 민간에서 활용되는 프로브 차량의 수집 정보를 통합함으로써 최대한 수집 가능한 구간소통정보의 규모와 범위를 확대할 필요가 있다. 이외에도 검지기 기반 위치 정보, 영상검지기 기반 차종 정보 등이 포함될 경우 지역 특성을 보다 잘 반영할 수 있는 결과를 도출하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 이 경우 서로 다른 수집 장비에서 데이터가 구득됨에 따라 정보 정확도의 차이가 발생할 수 있는데, 링크 가중행렬을 변화시킴으로써 수집 장비의 정확도를 반영할 수 있을 것으로 기대된다.

셋째, 본 연구의 데이터의 전처리 과정에서 교통정보 변동성에 영향을 줄 수 있는 결측치가 25% 이상인 링크들을 제외하여 분석하였고, 결측치 처리에 있어 해당 구간의 전후 5분 통행시간에 대한 단순평균법을 적용하여 분석에 활용하였다. 강건한 분석 결과를 도출하기 위해서는 결측 데이터에 대한 전처리 과정을 상세히 분석하여 기준값 및 보정방법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

마지막으로 제약조건을 추가하고 목적함수에 대한 변경을 통해, 신규 센서의 위치 결정뿐만 아니라 기존 센서의 유지관리 우선순위를 결정하거나, 센서의 정확도를 제고해야 하는 위치를 결정하는 데에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비지원(과제번호 17RDRP-B076268-04)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Cho S. K.(2008), "A Study on Synthetic OD Estimation Model based on Partial Traffic Volumes and User-Equilibrium Information," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 7, no. 5, pp.180-183.
- Hu S. R., Srinivas P. and Chu C. H.(2009), "Identification of Vehicle Sensor Locations for Link-based Network Traffic Applications," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 43, no. 8-9, pp.873-894.
- Li X. and Ouyang Y.(2011), "Reliable Sensor Deployment for Network Traffic Surveillance," *Transportation research part B: methodological*, vol. 45, no. 1 pp.218-231.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2013), *Research To Advanced ITS Of National Road With ITS Detection Improve*, pp.220-227.
- Senlai Z., Lin C., Zhaoming C., Anthony C. and Jingxu C.(2014), "Identification of Network Sensor Locations for Estimation of Traffic Flow," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2443, pp.32-39.
- Simonelli F., Marzano V., Papola A. and Vitiello I.(2012), "A Network Sensor Location Procedure Accounting for O-D matrix estimate variability," *Transportation Research Part B*, vol. 46, no. 10, pp.1624-1638.
- The Korean Transport Institute(2010), *Research For Transportation Information Collection And Provide Method of Urban Arterial*, p.43.
- Yu Q., Ning Z., Geng L. and Shoufeng M.(2015), "Simulation-Based Sensor Location Model for Arterial Street," *Discrete Dynamics in Nature and Society* vol. 2015.
- Zhu S., Lin C., Chao S. and Jingxu C.(2015), "Network Sensor Location Models Accounting for Variability of Traffic Flow Estimation," *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, no. 15-0352.