

교통 및 도로특성을 고려한 DSRC 교통정보 신뢰성 향상에 관한 연구

정연탁* · 정헌영**

Jeong, Yeon Tak*, Jung, Hun Young**

A Study on Improving the Reliability of DSRC Traffic Information Considering Traffic and Road Characteristics - Focusing on Busan Urban Expressway -

ABSTRACT

This study aims at improving the Reliability of DSRC Traffic information considering Traffic and Road Characteristics. First of all, this study analyzed the characteristics of DSRC data on urban expressway and problems of outlier data occurrence. After then, this study produced reliable traffic information by using an optimal method of the Outlier-Filtering. After Outlier-Filtering, this study performed accuracy evaluation and appropriateness check for the number of samples per confidence level. As a result, it showed that the MAPE was between 2.2% and 9.7% and RSME was between 2.2 and 7.5 which are very similar figures to the actual average traffic speed. Also, The samples of both Am peak and Pm peak periods were analyzed to be appropriate at the confidence level of 95%, and 90% within the allowable error range of 5kph.

Key words : DSRC, Traffic information, Minimum sampling number, Reliability improvement, Outlier

초록

본 연구는 교통 및 도로의 특성을 고려하여 DSRC 교통정보의 신뢰성을 향상시키는 것을 목표로 하고 있다. 먼저, 본 연구에서는 도시고속도로에서의 DSRC 수집 데이터의 특성과 이상치 데이터 발생의 문제점을 분석하였다. 그 다음으로, 이상치 제거의 최적 방안을 적용하여 신뢰성 있는 교통정보를 생성하였다. 이상치를 제거한 후, 정확성 평가와 신뢰수준별 표본수의 적정성 여부에 대해서도 수행하였다. 그 결과, 평균절대오차백분율(MAPE)은 2.2%~9.7%이고, 평균제곱근오차(RSME)는 2.2~7.5로 분석되어, 실제 평균 통행속도와 매우 유사한 값으로 나타났다. 또한, 오전·오후 첨두시간대의 표본수는 신뢰수준 95%, 90%, 허용오차 5kph 범위에서 매우 적절한 것으로 분석되었다.

검색어 : DSRC, 교통정보, 최소 표본수, 신뢰성 향상, 이상치

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

우리나라는 1990년대부터 도로 및 교통관리 분야에 있어 도로 이용의 효율을 증대시키고, 교통사고를 예방하며, 환경오염도 저감시키기 위하여 IT 기술을 접목한 지능형 교통체계(ITS, Intelligent Transport System)를 도입, 시행하고 있다.

이에 부산광역시도 다양한 교통문제 해결과 교통운영의 효율성을 도모하기 위하여 1998년 이후부터 교통카드시스템을 도입하는

* 정회원·부산광역시 교통정보서비스센터 주무관 (Busan Metropolitan City Transportation Information Center · spulse@korea.kr)

** 정회원·교신저자·부산대학교 도시공학과 교수 (Corresponding Author · Pusan National University · huyjung@pusan.ac.kr)

Received May 14, 2014/ revised May 20, 2014/ accepted August 21, 2014

등 지능형 교통체계(ITS) 구축사업을 꾸준히 추진하고 있다.

특히 2010년 10월에 개최된 '제17회 부산 ITS세계대회'를 계기로, 부산 교통정보서비스센터를 건립하여 자체적으로 교통정보를 수집하는 한편 유관기관과 연계하여 버스, 택시 프로브를 활용한 교통정보도 수집하여 빅 데이터(Big Data)를 구축하고 이를 가공하여 시민이 체감할 수 있는 통합 교통정보를 제공함으로써 과학적이고 효율적인 교통정책 수립을 위한 기반을 마련하게 되었다.

또한 DSRC (Dedicated Short Range Communication) 교통정보수집시스템은 부산의 도로 특성을 감안하여 도시고속도로 진출입부, 고속도로 및 국도의 연계지점, 시내 주요 교차로 등에 설치하여 하이패스 장차 차량의 검지를 통한 구간 통행속도도 생성하고 있다.

하지만 부산광역시의 도시고속도로는 특정 구간과 시간대에 발생하고 있는 극심한 정체로 인하여 택시 이용승객이 없는 이유로 새벽 시간대를 제외하고는 택시 프로브 차량이 거의 다니고 있지 않기 때문에 교통정보 수집은 DSRC 검지기에 절대적으로 의존하고 있는 실정이다.

더욱이 DSRC 수집 데이터를 가공하여 제공하고 있는 도시고속도로 구간의 통행속도는 해당 도로가 항만물류 수송을 담당하고 고속도로와도 연결기능을 하는 등 부산광역시의 핵심 중추도로임을 감안할 때 정책 결정을 위한 기반자료로 신뢰성이 높아야 할 것이다.

아울러 최근 공공데이터의 민간 활용 활성화를 통한 일자라신성장 동력 창출을 목표로 하는 「정부 3.0」 추진 기본계획에 따라 공공데이터의 일종인 교통정보에 대한 신뢰성을 확보하는 것에 그 무엇보다도 중요성이 요구되고 있다.

이에 본 연구는 부산광역시 도시고속도로인 변영로를 대상으로 DSRC 교통정보의 신뢰성을 높이기 위하여 DSRC 검지기로부터 수집된 구간별 원시 데이터의 특성을 분석하고, 이를 기반으로 이상치 발생 시의 최적 제거 방안을 도출, 이를 적용하여 가공한 교통정보에 대한 정확성과 신뢰 수준별 최소 표본수의 만족 여부 등을 평가하고자 하였다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위는 부산광역시의 대표적 도시고속도로인 변영로를 대상으로 하였다.

연구방법은 먼저 기존 이론에 대해 살펴보고, DSRC 교통정보수집시스템의 프로세스에 대해 고찰하였다. 다음으로는 변영로에서 수집된 DSRC 원시 데이터의 특성을 분석하여 문제점을 도출하고, 이를 해결할 수 있는 방안을 검토, 적용하여 구간 통행속도를 생성하였다.

이렇게 생성된 구간 통행속도를 실 주행차량의 관측치와 오차의

크기를 비교 분석하였으며, 이 과정에서 정확도를 평가하기 위하여 평균절대오차백분율(MAPE : Mean Absolute Percentage Error) 과 평균제곱근오차(RMSE : Root Mean Square Error)를 사용하였다.¹⁾ 또한 신뢰수준 95%와 90%에서의 허용오차를 5kph로 설정하여 최소 표본수도 산정하여, 이상치 제거 후의 표본수에 대한 적정성 여부에 대해서도 평가를 수행하였다.

2. 이론적 고찰 및 사례 연구

2.1 DSRC 관련 연구

Kwon (2009)은 근거리 무선통신을 이용한 교통정보처리시스템을 개발하였고, 이를 여주폐도 시험도로와 경부고속도로 서울~수원 구간에서 DSRC 성능평가와 가공 알고리즘을 통해 생성된 교통정보에 대한 정확도 검증, DSRC 설치간격 등에 대한 연구하였다.

그 결과, 수집주기는 5분, 신뢰수준은 5%범위를 제거한 경우와 표준편차 범위 내의 데이터만 가공하는 것이 오차가 가장 적다고 제시하였다. 또한 대표값은 중앙값이 가장 정확하고, DSRC 설치간격은 약 3.37km 간격으로 설치한 경우 교통정보의 오차비율이 적게 나타나는 것으로 분석하였다.

Shim (2011)는 경부고속도로 서울TG~안성IC 구간에서 수집된 DSRC 교통자료의 특성을 분석하여 이에 적합한 이상치 제거 적용 방안 및 시간집계간격을 수립하고 최종적으로 경로통행시간 추정기법을 개발하였다.

또한 버스전용차로 존재 시 버스와 승용차를 분리할 필요가 있음을 제시하였고, 신뢰수준 95%의 적정 표본수를 만족시키는 시간 집계간격을 5분으로 설정하여 대표치를 산출하였다. Off-line 경로통행시간 추정모형에서는 95% 신뢰수준에서 TCS (Toll Collection System) 통행시간과 동일한 결과가 나타났으며, On-line 경로통행시간 추정 모형에 마지막 링크통행시간을 추정하는 방안을 적용한 결과, 오차는 감소하는 것으로 분석하였다.

Jeon (2012)은 서울TG~오산IC 구간의 DSRC 자료와 VDS (Vehicle Detection System) 자료의 통행속도를 기반으로 생성된 정체 맵을 분석하였다. 그 결과, 지점별로는 VDS, 구간별로는 DSRC가 정체를 먼저 검지함을 밝혔고, 교통정보 제공 및 정체상황 판정에 있어서는 DSRC 자료를 이용하는 것이 적절하다고 판단하였다.

Shim et al. (2013)은 경부고속도로 서울~대전 구간에서 수집된 승용차 원시 데이터를 활용하여 경로기반방식(PBM : Path-based Method)과 링크기반방식(LBM : Link-based Method)을 비교 분석하였다. 그 결과 PBM과 LBM의 통계적 검정 결과는

1) MAPE는 오차의 정도를 백분율로 비교하기 위함이며, RMSE는 오차의 정량적 정도를 평가하기 위해 사용하였다.

동일하였으나, 교통상황이 변화하는 시간대에서는 집계주기 내에 통행시간 변화가 일어나, LBM의 경로통행시간이 약간 우측으로 이동하여 PBM에 비해 통행시간이 증가하는 시점이 다소 늦게 나타났다고 분석하였다.

2.2 최소 표본수 관련 연구

Shrinivasan and Jovanis (1996), Lee and Lee (2002), Shim (2011)는 중심극한정리에 의한 통계적 표본수 결정식을 이용하여 미리 결정된 허용오차와 신뢰수준을 만족하는 구간별 최소 표본수를 산정하였다. Chen and Chien (2000)은 최소 프로브 차량 결정식은 중심극한정리를 이용한 통계적 방법을 사용하였으나, 정규분포를 따르지 않는 구간의 표본수 결정에 대해서는 Heuristic 방법을 제시하였다. Lee and Lee (2002)는 정규분포의 형태를 가진 올림픽 대로의 각 구간별 적정 표본수는 중심극한정리를 이용하였으나, 신호운영에 영향을 받는 영동대교의 적정 표본수 분석에서는 Chebyshev의 식을 이용하였다.

2.3 정확성 평가 관련 연구

Kwon (2009), Song (2010)은 DSRC 성능평가 시 MAPE를 이용하여 정확성을 분석하였으며, Ki et al. (2011)은 UTIS (Urban Traffic Information System) 구간 통행속도의 현장실험 평가지표로 MAPE를 사용하고, 그 결과값은 국토교통부 VDS 성능 평가 척도와 비교하여 정확성을 평가하였다.

Shim et al. (2013)는 링크기반 경로통행시간 추정 방식의 적용 가능성을 평가하기 위한 비교 지표로 평균절대오차(MAE : Mean Absolute Error)와 MAPE를 사용하였으며, 경로기반의 경로통행시간을 참값으로 가정하여 적용하였다.

Oh et al. (2004)는 DSRC를 이용한 첨단교통정보시스템 구축 사례 연구에서 RMSE를 평가지표로 한 대덕대로의 실측 통행속도와 계공 속도를 비교 분석한 결과를 인용하였으며, Lee and Lee (2002)도 현장 적용성 평가를 위해 실측 통행속도와 추정 통행속도, 시스템별 통행속도 간 오차를 RMSE를 사용하여 비교 분석하였다.

2.4 기존 연구의 한계 및 시사점

기존 DSRC 연구가 대부분 시스템 설치 여건 및 통신환경 구성이 양호하고 프로브 대수가 충분한 고속도로 위주로 연구가 진행된 반면, 본 연구는 유출입 램프가 짧은 간격에 다수 존재하여 이들 램프를 유출입하는 차량과 하부 연결도로의 신호교차로를 인하여 직접적인 영향을 받는 도시부에 위치한 도시고속도로를 대상으로 DSRC 원시 데이터의 특성을 분석하고, 이상치를 제거한 후의 구간 통행속도를 시험차량 측정값과 비교하였다.

또한 기존 연구와 달리 본 연구에서는 5분 수집 주기 동안 충분한 프로브 수가 수집되지 않으면서 개별 차량 간 속도 편차가 매우 심한 새벽 시간대에 대한 추가적인 연구가 수행되어 그 의의가 크다고 하겠다.

하지만 최소 표본수 산정은 기존 연구를 통해 널리 이용된 중심극한정리가 적합한 것으로 판단되며, 정확성 평가는 MAPE 뿐만 아니라 RMSE를 통해서도 평가할 필요가 있다고 판단된다.

3. DSRC 교통정보 수집 시스템 고찰

DSRC 검지기를 통해 수집된 교통정보 데이터를 분석하기에 앞서 부산광역시 DSRC 교통정보 수집 시스템의 구성부터 살펴보고자 한다.

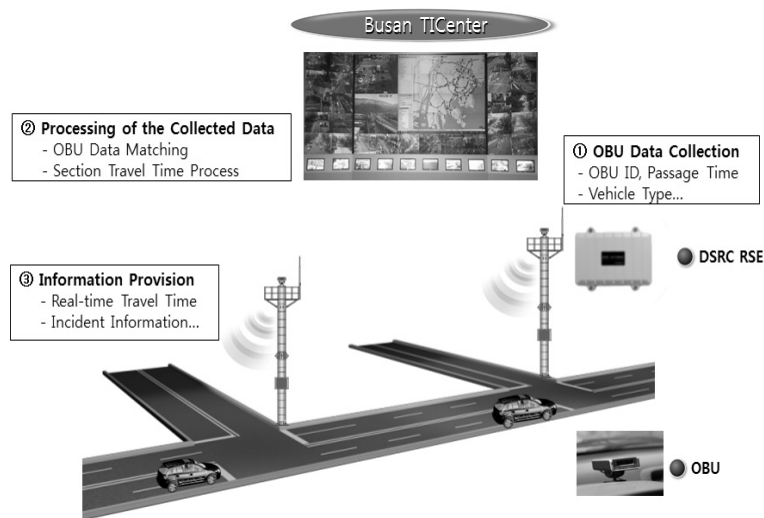


Fig. 1. Process of DSRC

DSRC 교통정보 수집 시스템은 크게 OBU (On Board Unit, 일명 하이패스) 데이터 수집, 가공, 제공의 3단계로 구성되어 있으며 Fig. 1과 같다. 먼저, DSRC 검지기 영역을 OBU를 장착한 차량이 통과할 때 DSRC RSE (Road Side Equipment)는 OBU의 기본정보 및 트랜잭션 정보를 수집하여 DSRC MCU (Main Control Unit)를 통해 교통정보 서비스 센터 내 DSRC 수집 서버로 전송한다.

센터의 DSRC 수집 서버에서는 수집된 데이터를 디코딩(Decoding), 유효성 검증, DBMS에 저장한 후, DSRC 가공서버로 전송한다. DSRC 가공서버에서는 OBU별 수집정보를 매칭하여 DSRC 구간별 통행시간을 산출한 후 구간 통행속도를 생성한다.

$$T_{abi} = T_{bi} - T_{ai} \quad (1)$$

$$V_{abi} = \frac{D_{ab}}{T_{abi}} \quad (2)$$

where, D_{ab} : a, b 검지기 사이의 거리
 T_{ai} : 차량 i가 a 검지기를 통과한 시간
 T_{bi} : 차량 i가 b 검지기를 통과한 시간
 T_{abi} : 차량 i가 a, b 검지기 구간을 통행한 시간
 V_{abi} : 차량 i의 a, b 검지기 사이의 구간 통행속도

이렇게 생성된 구간 통행속도는 DBMS에 저장한 후 통합 가공

Table 1. Traffic Volume Survey (as of Nov 2013)

Survey Site	Direction	Traffic volume	Total
Gwangang Tunnel	Going up	36,181	77,337
	Going down	41,156	

Table 2. Sectional Travel Speeds (as of Nov 2013)

Direction	Dist (km)	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	avg.
MunHyeon→Gwangang	2.7	88.5	90.5	91.2	90.2	88.2	87.6	78.9	58.7	54.8	60.4	45.2	30.3	43.9	54.6	29.9	18.5	15.4	14.7	14.9	16.3	36.6	60.8	73.1	83.7	55.3
Gwangang→Mangmi	3.8	84.0	87.7	90.2	90.1	87.5	86.5	72.8	56.3	54.3	57.8	55.1	54.4	56.2	57.3	52.3	52.6	52.5	51.0	50.9	51.2	51.0	58.0	65.2	77.0	64.7
Mangmi→Wondong	1.7	89.8	93.5	93.8	94.8	89.6	89.1	80.0	50.2	56.0	72.5	72.1	69.9	71.6	73.8	72.7	73.0	72.7	70.5	68.5	67.7	71.1	73.1	76.4	85.7	76.2
Wondong→Seokdae	2.7	93.7	94.5	94.0	94.0	93.1	91.7	76.3	43.8	51.2	74.0	72.5	72.3	74.0	76.4	75.6	74.5	76.8	76.4	77.0	79.7	81.4	83.3	86.0	92.6	79.4
Seokdae→Hoedong	1.8	84.7	86.1	86.4	84.5	83.6	82.2	68.3	56.5	61.6	67.4	66.1	67.3	69.5	68.8	68.4	68.6	69.4	67.3	66.9	70.7	73.2	74.2	76.4	81.6	72.9
Hoedong→Guseo IC	3.6	96.3	95.8	96.3	95.4	95.6	100.0	96.0	90.2	88.5	92.1	92.2	93.5	94.6	95.1	93.1	94.0	94.1	91.5	88.3	91.0	93.4	94.3	95.8	96.3	93.9
Guseo IC→Hoedong	3.6	95.5	92.4	90.8	92.4	93.5	96.5	95.9	91.6	90.1	91.2	91.1	91.7	92.8	92.6	91.8	91.1	90.3	84.2	56.9	67.3	90.9	92.1	95.2	96.4	89.8
Hoedong→Seokdae	1.8	80.3	82.2	82.3	82.5	82.6	81.6	79.2	72.0	63.2	67.8	68.7	68.4	69.9	68.3	65.5	63.7	64.3	50.4	21.7	32.9	62.2	69.2	73.1	80.2	68.0
Seokdae→Wondong	2.7	83.6	84.7	85.0	84.3	86.4	80.5	76.2	44.4	18.9	42.7	54.8	60.3	67.9	62.4	56.4	52.8	56.4	39.2	23.9	33.3	62.0	70.5	74.7	81.5	61.8
Wondong→Mangmi	1.7	89.7	91.3	91.2	92.3	92.3	88.5	72.9	26.0	17.9	21.8	33.0	55.9	72.1	66.8	56.5	52.6	59.3	37.2	28.9	54.7	75.1	80.1	83.6	89.1	63.7
Mangmi→Gwangang	3.8	82.3	84.4	85.4	84.4	86.2	81.4	63.5	43.1	42.0	42.3	41.2	48.0	60.3	53.6	47.3	46.9	49.5	43.5	42.3	50.4	63.9	68.7	71.8	78.0	60.8
Gwangang→MunHyeon	2.7	93.7	93.5	94.6	92.8	93.0	94.4	80.3	71.5	75.0	74.9	74.5	76.6	80.6	78.3	76.3	74.4	73.6	73.8	73.3	77.0	83.1	85.8	88.4	92.6	82.2

서버로 전송되어 버스, 택시 등 유관기관의 교통정보와 통합 가공한 후 다시 DSRC 제어 서버로 전송되어 교통정보 수신이 가능한 OBU 장착 차량의 운전자들에게 제공된다.

4. DSRC 교통정보 수집 데이터 분석

4.1 도시고속도로 통행특성 분석

본 연구의 공간적인 범위는 도시고속도로인 변영로로 부산광역시 동구 중앙 고가도로에서 부산광역시 금정구 구서IC까지 총 15.7km 구간의 도로이며, 경부 고속도로, 국도 7호선, 중앙대로, 충렬대로 등 시내 주요 도로와 접하면서 부산광역시의 남북축의 교통을 담당하고 있다.

특히 상행과 하행 구간에는 각각 3개의 진입 램프가 있어서 남구, 수영구, 동래구, 해운대구, 금정구 등 지역의 많은 차량이 이들 램프를 통해 변영로를 이용하고 있으며, 2013년 11월 중 광안터널의 방향별 1일 평균 교통량은 Table 1과 같다.

Table 2은 2013년 11월 중 평일의 변영로에 대한 각 구간별 1시간 단위의 구간 평균속도 자료이다.

먼저 문현→구서 IC 방면 상행의 경우, 오전 침두시에는 양방향 전 구간에 걸쳐 소통은 원활하나, 오후 2시대부터 오후 8시대까지의 문현→광안 구간은 매우 혼잡한 것을 알 수 있으며, 오후 9시대부터 60km/h대를 회복하는 소통 흐름을 나타내고 있다. 이는 상행 방면의 차량 증가와 이 구간 내 위치한 진입 램프(문현램프, 대연램프)를 통해 변영로 상행 방면으로 합류하는 차량으로 인한 정체로 판단된다.

반면 구서 IC→문현 방면 하행의 경우, 석대→원동 구간이 오전 6시대에서 7시대에 급격하게 통행속도가 감소(76.2km/h→44.4km/h)한 후 8시대에는 18.9km/h로 가장 정체가 심한 상태이며, 다음



Fig. 2. Location of DSRC in Beonyoungro

구간인 원동→망미 구간은 7시대에서 10시대까지 평균 24.7km/h로 정체를 보이고 있다. 이는 출근시간대 차량 증가는 물론 석대→망미의 짧은 4.4km 구간 내에 진입 램프(석대램프, 원동IC, 부산환경공단)가 다수 존재하고, 이들 램프를 통해 번영로 하행 방향으로 합류하는 차량으로 인한 정체로 판단된다.

4.2 DSRC 교통정보 수집 현황

현재 번영로에는 하이패스 장차 차량을 검지하여 구간 통행속도를 생성하기 위해 총 7개의 DSRC 검지기가 주요지점에 설치되어 있으며, 설치 지점은 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 2013.11.05(화) 번영로 DSRC 검지기를 통해 수집된 하이패스 차량 수집 데이터를 분석하였다.

Table 3은 DSRC 검지기별 하이패스 장차 차량을 검지한 수집 건수이다. 오전 첨두/비첨두/오후 첨두시간대에 5분 수집 주기 동안 평균 91대, 59대, 83대의 프로브가 검지되었으며, 전일동안의 5분

Table 3. The Number of Probes (as of Nov 5, 2013)

Classification		7AM ~ 9AM		12PM ~ 2PM		6PM ~ 8PM		24H	
		Total	5min	Total	5min	Total	5min	Total	5min
1	MunHyeon	1,234	51	868	36	1,187	49	18,257	63
2	Gwangan	1,668	70	1,153	48	1,716	71	27,184	94
3	Mangmi	1,510	63	1,129	47	1,438	60	22,980	80
4	Wondong	2,102	88	1,574	66	2,071	86	32,470	113
5	Seokdae	3,047	127	1,911	80	2,623	109	40,285	140
6	Hoedong	3,190	133	1,797	75	2,653	111	39,612	138
7	Guseo	2,584	108	1,430	60	2,271	95	32,312	112
Average		2,191	91	1,409	59	1,994	83	30,443	106

Table 4. Counts of Travel Time for Each Section (as of Nov 5, 2013)

Direction	7AM ~ 9AM		12PM ~ 2PM		6PM ~ 8PM	
	Total	5min	Total	5min	Total	5min
MunHyeon→Gwangan	913	38	738	31	979	41
Gwangan→Mangmi	1,329	55	1,015	42	1,240	52
Mangmi→Wondong	1,042	43	841	35	898	37
Wondong→Seokdae	1,546	64	934	39	776	32
Seokdae→Hoedong	2,913	121	1,314	55	1,196	50
Hoedong→Guseo IC	2,190	91	477	20	804	34
Guseo IC→Hoedong	803	33	674	28	2,568	107
Hoedong→Seokdae	1,485	62	1,224	51	2,544	106
Seokdae→Wondong	894	37	851	35	1,340	56
Wondong→Mangmi	1,081	45	766	32	1,117	47
Mangmi→Gwangan	1,075	45	635	26	1,078	45
Gwangan→MunHyeon	1,013	42	490	20	691	29

수집 주기에서는 106대가 검지되었다.

Table 4는 앞서 DSRC 검지기별로 수집된 자료를 기반으로 DSRC 구간별 구간 통행시간을 생성한 건수이다.

지점별 수집 건수에 비해 구간 통행시간 생성 건수도 매우 유사한 결과가 나타났으나, 석대와 회동의 경우에는 지점별 수집건수가 많음에도 구간 통행시간 생성 건수는 적게 나타났다. 이는 해당 지점에 검지된 프로브 차량이 DSRC 설치 지점 중간의 진출램프로 유출된 경우와 무선통신 기반인 DSRC 특성상의 이유로 인하여 하부도로 주행차량도 일부 검지되어 구간 통행시간이 생성되지 않은 경우로 판단되었다.

4.3 DSRC 원시 데이터 특성 분석 및 문제점

DSRC 교통정보수집시스템을 통해 수집된 원시 데이터를 분석한 결과 및 문제점은 다음과 같다.

Fig. 3는 광안→문현 구간에서 수집된 프로브 차량의 구간 통행시간 분포로서 Table 2에서 살펴본 바와 같이 전일 평균 구간 통행속도가 82.2km/h에 달할 정도로 매우 소통이 원활한 구간이다. 그러나 이 구간에는 운전자 휴게시설이 존재하여 Fig. 3에서처럼 지연시간을 보이는 차량의 분포가 다수 존재하고 있음을 알 수 있다.

이러한 지연차량의 구간 통행시간은 이상치로서 전체 흐름에 영향을 끼칠 수 있고, 그 결과로 해당구간의 구간 통행속도가 낮게 나타날 수 있다.

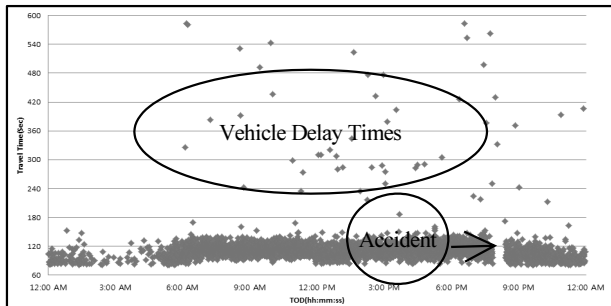


Fig. 3. Distribution of Sectional Travel Times (Gwang-an→MunHyeon)

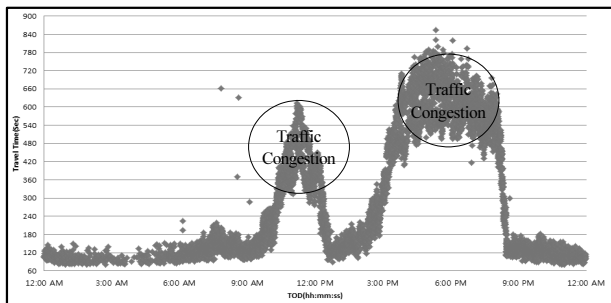


Fig. 4. Distribution of Sectional Travel Times (MunHyeon→Gwang-an)

그 밖에 오후 8시경 표본수가 없는 것은 사고로 인하여 3주기 동안 표본수가 수집되지 않았기 때문이다.

반면, Fig. 4의 문현→광안 구간의 구간 통행시간 분포를 살펴보면, 앞서 Table 2에서 살펴본 바와 같이, 오전 11시대와 오후 2시대에서 오후 8시대까지 매우 혼잡한 교통흐름을 보이고 구간이다.

이 혼잡시간대에는 이상치로 판단되는 지연차량이 크게 나타나지 않을 것을 알 수 있다.

Fig 5는 번영로 전체 12개 구간에 대한 5분 수집주기별 표본수의 분포이다.

전체 3,456개의 수집주기 동안 평균 31.7대의 표본수가 수집되었으나, 447개 수집주기(12.9%)에서 3대 이하의 표본수가 수집되었고, 0사-5시에 집중되어 있는 것으로 나타났다. 이처럼 표본수가 충분하지 않은 경우에는 해당 수집주기 내의 최고치와 최저치에 따라 대표값이 결정되고, 이로 인해 잔후 수집주기의 대표값과 편차가 커져, 교통상황이 급변하는 흐름으로 나타날 수 있다.

Fig. 6은 석대→원동 구간에서 수집된 프로브 차량의 구간 통행시간 분포로서 출퇴근 시간대에는 교통 혼잡으로 인해 구간 통행시간이 증가하는 추세를 보이고 있다.

그러나 이 구간에는 운전자 휴게시설, 임시정차대 등이 없음에도 불구하고, 전반적인 구간 통행시간 분포와 다른 지연차량이 매우 많이 존재하고 있음을 알 수 있다.

이는 DSRC 검지가 무선 통신기반의 검지기이고, 석대 DSRC

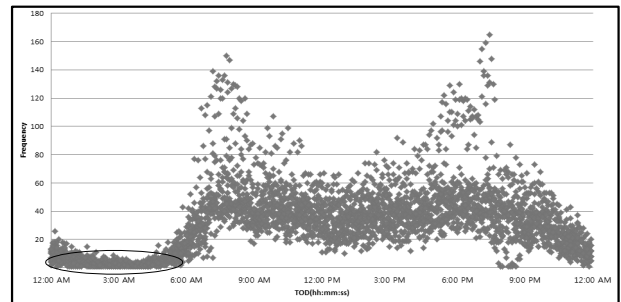


Fig. 5. Distribution of Probe Counts for each 5min Collection Period

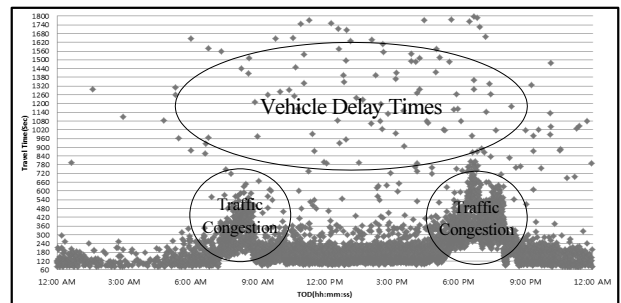


Fig. 6. Distribution of Sectional Travel Times (Seokdae→Wondong)

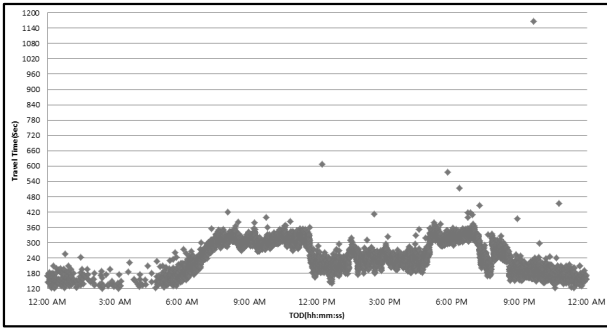


Fig. 7. Distribution of Sectional Travel Times (Mangmi→Gwangan)

가 석대고가도로의 CCTV 상부에 설치되어 있기 때문에, 하부도로의 차량이 번영로 진입 전에 검지되어 지연시간을 보이는 것으로 분석되었다.

반면, Fig. 7의 망미→광안 구간에서 수집된 프로브 차량의 구간 통행시간은 매우 일정하게 분포되어 나타나고 있으며, 이상치로 판단되는 지연차량도 적게 나타났다.

이 구간에서 이러한 분포가 나타난 것은 약 3.8km의 긴 구간임에도 불구하고, 이 구간 내에는 2개의 터널(수영터널, 광안터널)이 존재하나, 진·출입 램프와 운전자 휴게시설이 없는 평면도로이기 때문이다.

지금까지 DSRC 교통정보수집시스템을 통해 수집된 원시 데이터의 특성 분석을 통해 나타난 문제점을 요약해 보면 다음과 같다.

첫째, Figs. 3 and 4를 비교한 결과, 비 혼잡시간대에는 전체 구간 통행시간과 달리 지연차량이 다수 발생되었다. 이러한 지연차량으로 인한 결과로서 해당구간의 구간 통행속도가 낮게 나타날 수 있는 문제가 있음을 파악하였다. 반면 혼잡시간대에는 이상치로 판단되는 지연차량이 크게 나타나지 않은 것을 알 수 있었다.

둘째, 번영로 전체 12개 구간에 대한 5분 수집주기 중 표본수가 3대 이하인 수집주기가 12.9%로 나타났다.

이 때 수집된 표본수가 적은 경우, 구간의 교통상황을 대표하는 값이 수집된 관측치 중 최고치와 최저치에 따라 급변할 수 있는 문제가 있었다.

셋째, 석대→원동 구간에서처럼 고가도로와 하부도로가 존재하는 구간에 설치된 DSRC 검지기의 경우, DSRC의 무선 환경으로 인해 하부도로에서부터 검지되어 전반적인 구간 통행시간 분포와 다른 지연차량이 매우 많이 나타났다.

4.4 신뢰성 향상 방안

앞서 살펴본 바와 같이 DSRC 원시 데이터를 통해 구간 통행속도를 생성할 경우, 다수의 운전자가 느끼는 속도와 많은 차이가 발생할 수 있음을 알았다.

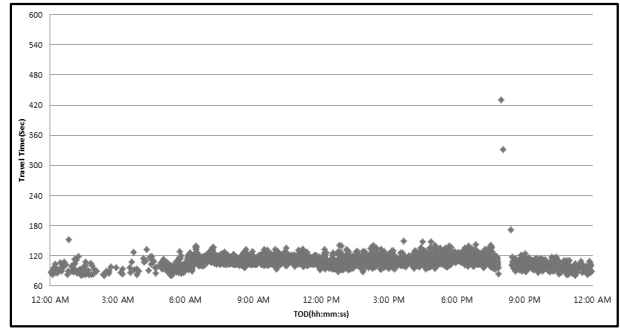


Fig. 8. Distribution of Sectional Travel Times After Filtering Out Outliers

이에 본 연구에서는 실제 체감속도와 유사한 신뢰성 있는 구간 교통정보를 생성하기 위하여 다음과 같이 제안하고자 한다.

첫 번째, 번영로의 최고제한속도와 구간별 통행속도를 고려하여 최대값(최고제한속도의 1.5배)과 최소값을 상수값으로 설정하여 극단적인 프로브 차량의 통행속도는 제거한다.

$$V_{abi} > 140km/h \text{ or } V_{abi} < 5km/h \quad (3)$$

여기에서 최소값 이하의 구간 통행속도가 관측될 수 있으나, 이와 같은 교통상황이 도시고속도로 구간에 발생할 가능성은 매우 낮으므로 최소값 이하 개별 차량의 통행속도는 제거하여야 한다. 그렇지 않을 경우, 도시고속도로 내 휴게시설에서 휴식한 차량이나 고장 차량의 통행속도까지 교통정보로서 과다하게 포함될 수 있기 때문이다.

다음으로 평균과 표준편차를 고려한 신뢰구간을 설정하고 그 범위를 벗어난 값은 이상치로 판단하여 이를 제거한다.

$$X - S \leq V_{abi} \leq X + S \quad (4)$$

where, X : 표본 평균, S : 표준편차

Fig. 8은 위의 2가지 조건을 광안→문현 구간에 적용한 결과로서, 앞서 Fig. 3에서 지연차량으로 보인 프로브 차량이 효과적으로 제거된 것을 알 수 있다.

두 번째, 새벽시간대와 같이 표본수가 충분하지 않는 경우(3대 이하), 기존 수집 주기의 관측치를 평균한 것과 달리 관측치를

2) 번영로는 자동차 전용도로로서 2013년 1월~10월 중 구간별 1시간 평균 구간 통행속도의 최대값은 약 07.1km/h로 관측되었고, 도로교통법 시행규칙 제19조의 자동차 전용도로에서의 최고제한속도(90kph)를 참고하여 최고제한속도의 1.5배 수준인 140kph가 최대값으로 적절한 것으로 판단된다.

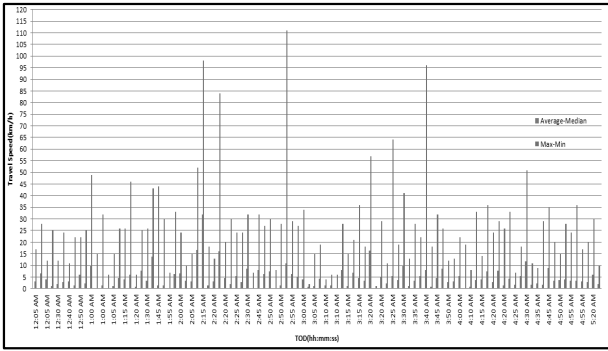


Fig. 9. Comparison of Sectional Travel Speeds

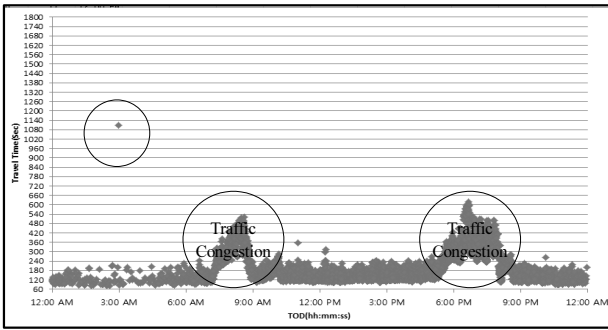


Fig. 10. Distribution of Sectional Travel Times After Filtering Out Outliers

크기 순서대로 배열했을 때, 중앙에 위치하게 되는 값인 중앙값 (Median)을 대표값으로 산출하여 구간 통행속도를 생성한다.

이는 표본수가 1개 또는 2개인 경우 평균값과 중앙값은 동일하나, 표본수가 3개인 경우 2개의 유사한 관측치와 극단적으로 다른 관측치가 1개 존재할 때 평균값보다 중앙값이 대표값으로 우수하기

때문이다.

Fig. 9은 전 구간에 대한 표본수가 3개인 수집주기의 최대값-최소값, 평균값-중앙값의 분포를 비교한 것으로, 각각 26.0km/h, 4.5km/h의 편차를 보였다. 이러한 편차는 표본수 3개 중 극단적으로 크거나 낮은 값이 관측되었기 때문이며, 이러한 편차를 줄이기 위해서는 중앙값을 대표값으로 하는 것이 바람직하다.

특히 앞서 살펴본 바와 같이 5분 수집 주기별 표본수가 3대 이하일 경우는, 새벽시간대에 발생할 확률이 높고, 도로소통상황이 매우 원활한 관계로 고속 주행하는 일부 차량이 존재할 수 있어 중앙값을 대표값으로 산출하는 것이 적정한 것으로 판단된다.

세 번째, DSRC 설치 지점은 진입램프가 있는 경우에는 본선과 합류한 지점 이후에 설치하고, 진출램프가 있는 경우에는 분류되기 이전 지점에 설치하여야 한다.

이를 통해 본선 주행 차량과 램프 진출입 차량과의 속도 편차를 줄일 수 있다. 또한 DSRC 통신반경을 튜닝(tuning)하여 과도한 범위의 차량이 검지되는 오류를 제거하여야 한다.

Fig. 10은 석대→원동 구간의 이상치를 제거한 결과이다. 앞서 Fig. 6과 비교했을 때, 이상치로 보여진 지연차량이 효과적으로 제거되었고, 교통정체를 확연히 확인할 수 있으나, 새벽시간대에 5분 수집주기 중 1개의 주기에서는 표본수가 적은 이유로 지연차량이 대표값으로 나타난 것을 알 수 있다.

4.5 원시 데이터와 가공 데이터 간 비교 분석

본 연구에서는 원시 데이터와 가공 데이터로 산출된 구간 통행속도가 통계적으로 동일한지 여부를 확인하기 위해 대응표본 T검정 (Paired Sample T-test)을 수행하였으며, 이때의 가설은 다음과 같다.

Table 5. Result of Paired Sample T-test for Each Section

Direction	Coefficient of correlation	Paired differences		t	df	p-value
		Mean	Std. Deviation			
MunHyeon→Gwangan	.998	0.23	2.16	1.82	283	.070
Gwangan→Mangmi	.995	-0.42	1.57	-4.52	285	.000
Mangmi→Wondong	.979	-0.27	2.26	-1.98	282	.049
Wondong→Seokdae	.401	-5.91	13.94	-7.13	282	.000
Seokdae→Hoedong	.514	4.48	9.63	7.82	282	.000
Hoedong→Guseo IC	.941	-1.35	1.98	-11.35	276	.000
Guseo IC→Hoedong	.996	-1.18	1.78	-10.98	274	.000
Hoedong→Seokdae	.988	-0.83	2.74	-5.13	285	.000
Seokdae→Wondong	.973	-2.27	4.60	-8.29	282	.000
Wondong→Mangmi	.996	-0.07	2.37	-0.52	275	.606
Mangmi→Gwangan	.996	-0.11	1.65	-1.12	278	.262
Gwangan→MunHyeon	.953	-1.40	3.58	-6.45	272	.000

$$\text{귀무가설 } H_0 : \mu_{\text{raw-data}} = \mu_{\text{filtering-data}} \quad (5)$$

$$\text{대립가설 } H_1 : \mu_{\text{raw-data}} \neq \mu_{\text{filtering-data}} \quad (6)$$

where, $\mu_{\text{raw-data}}$: 원시 데이터로 산출된 구간 통행속도
 $\mu_{\text{filtering-data}}$: 가공 데이터로 산출된 구간 통행속도

Table 5의 대응표본 T검정 결과를 살펴보면, 문현→광안, 원동→망미, 망미→광안 구간의 3개 구간은 유의수준 0.05보다 크게 나타나 원시 데이터와 가공 데이터로 산출된 구간 통행속도가 동일하다는 귀무가설 H_0 가 채택되었다. 이는 앞서 DSRC 원시 데이터의 특성 분석에서 살펴본 바와 같이, 이들 구간은 프로브 차량의 구간 통행시간의 분포가 매우 일정하였기 때문으로 판단된다.

그러나 나머지 9개 구간에 대해서는 유의수준 0.05보다 작아 귀무가설 H_0 를 기각하게 되어 이상치 제거로 인하여 새로운 구간 통행속도가 생성되었음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 가공 데이터로 생성된 구간 통행속도에 대한 정확성 평가와 신뢰수준별 최소 표본수 산정을 통하여 적합성 여부를 수행하였다.

4.6 정확성 평가

가공 데이터로 생성된 구간 통행속도에 대한 정확성 평가를 위하여 실 주행차량의 관측치와 비교 분석하였다.

이 때 실 주행차량은 번영로의 기종점인 문현→구서 구간을 주행한 차량 중 구간 내 설치된 모든 DSRC 검지기에서 검지된 프로브 차량으로서 평균속도로 운영하였다고 가정하였으며, 이 때 실 주행차량의 구간 통행속도를 참값으로 하였다.

정확성 평가의 지표는 MAPE와 RMSE를 이용하였다.

$$MAPE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - X_i|}{Y_i}}{n} \times 100$$

where, Y_i : 실 주행차량의 구간 통행속도(참값)
 X_i : 가공 데이터로 생성된 구간 통행속도(비교값)
 n : 분석단위시간 개수

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - Y_t^*)^2}{n}} \quad (8)$$

where, Y_t : 실 주행차량의 구간 통행속도(참값)

Table 6. Result of MAPE(%), RMSE for Each Section

Direction	Distance (km)	MAPE (%)	RMSE
MunHyeon→Gwangan	2.7	5.9	4.6
Gwangan→Mangmi	3.8	4.1	3.2
Mangmi→Wondong	1.7	5.9	5.2
Wondong→Seokdae	2.7	5.2	6.7
Seokdae→Hoedong	1.8	5.4	5.4
Hoedong→Guseo IC	3.6	2.2	3.2
Guseo IC→Hoedong	3.6	4.8	6.3
Hoedong→Seokdae	1.8	9.7	7.5
Seokdae→Wondong	2.7	7.9	5.1
Wondong→Mangmi	1.7	4.7	3.3
Mangmi→Gwangan	3.8	2.4	2.2
Gwangan→MunHyeon	2.7	3.4	4.1
Average	2.7	5.1	4.7

Y_t^* : 이상치 제거 후 생성된 구간 통행속도(비교값)
 n : 분석단위시간 개수

Table 6은 구간별 정확성 평가의 결과이다.

MAPE는 최소 2.2%, 최대 9.7%, 평균 5.1%이었고, RMSE는 최소 2.2, 최대 7.5, 평균 4.7로 나타나 실 주행 차량과 매우 유사한 구간 통행속도로 평가되었다.

4.7 최소 표본수 산정

원시 데이터에 대한 이상치를 제거한 후, 표본수가 적정한가에 대해 신뢰수준별 허용오차에 대한 최소 표본수를 산정하였다.

사용된 산출식은 Shrinivasan and Jovanis (1996), Lee and Lee (2002), Shim (2011) 등의 기존 연구들에서 적용된 중심극한 정리를 이용하였으며, 신뢰수준은 95%, 90%, 허용오차는 5kph로 설정하였다.

$$n \geq \left\{ \frac{\Phi^{-1} \left\{ \frac{(1+r)}{2} \right\} \cdot \frac{\sigma}{\mu}}{e_{\max}} \right\}^2 \quad (9)$$

where, n : 최소 표본수
 r : 신뢰수준
 σ : 모집단의 표준편차
 μ : 모집단의 평균 통행속도
 e_{\max} : 최대 허용 오차율

Table 7은 오전·오후 첨두시간대의 이상치로 판단된 개별 차량

Table 7. Confidence Level of Minimum Sample Size for Each Section

Direction	Am peak period (7 AM ~ 9 AM)			Pm peak period (6 PM ~ 8 PM)		
	vol	95%	90%	vol	95%	90%
MunHyeon→Gwangsan	26	8	6	29	4	3
Gwangsan→Mangmi	42	3	2	37	4	3
Mangmi→Wondong	32	8	6	27	8	5
Wondong→Seokdae	57	6	5	27	11	8
Seokdae→Hoedong	98	12	8	40	12	8
Hoedong→Guseo IC	69	4	3	23	2	2
Guseo IC→Hoedong	23	3	2	71	10	7
Hoedong→Seokdae	43	18	13	77	29	21
Seokdae→Wondong	28	26	18	36	47	33
Wondong→Mangmi	31	3	2	35	5	3
Mangmi→Gwangsan	32	1	1	33	2	1
Gwangsan→MunHyeon	32	3	2	23	6	4

을 제외한 표본수와 신뢰수준 95%, 90%, 허용오차 5km/h에서의 최소 표본수를 산정한 결과이다.

전체 12개 구간 중 11개 구간에서 신뢰수준 95%, 허용오차 5kph 범위 내에서 매우 적절한 것으로 분석되었다.

특히 망미→광안 구간은 적은 표본수에도 매우 신뢰성 있는 교통정보를 수집할 수 있는 것으로 분석되었다. 이는 Fig. 7에서 살펴본 바와 같이, 이 구간 내에는 2개의 터널(수영터널, 광안터널)이 존재하나, 진·출입 램프와 운전자 휴게시설이 없는 평면도로로서 오전·오후 침두시에도 주행하는 차량의 통행시간 분포가 매우 일정하기 때문이다.

그러나 석대→원동 구간의 경우에는 오후 침두시간대에 신뢰수준 90%, 허용오차 5kph에서 최소 표본수를 만족하는 것으로 나타났다.

이는 해당 구간이 고가도로와 하부도로가 존재하는 구간이고, DSRC의 무선 환경으로 인하여 하부도로의 프로브 차량이 지연차량으로 분류되었기 때문이다.

5. 결론 및 향후과제

5.1 결론 및 연구의 요약

최근 일자리·신성장 동력 창출을 목표로 하는 「정부 3.0」기본계획에 따라 공공데이터를 적극 개방공유하고, 정부와 국민간의 소통과 협력을 확대하여 국가보다 국민 개개인의 행복에 초점을 둔 맞춤형 서비스를 제공하기 위한 공공데이터의 민간 개방이 추진되고 있다.

이러한 정부 기조에 맞추어 부산광역시도 공공데이터인 교통정보를 적극 개방할 계획이며, 개방에 앞서 교통정보에 대한 신뢰성 향상 방안을 모색하고 있다.

이에 본 연구에서는 부산광역시 도시고속도로인 변영로를 대상으로 DSRC 교통정보의 신뢰성을 높이기 위하여 DSRC 검지기로 부터 수집된 구간별 원시 데이터의 특성 분석과 이상치 발생 시의 최적 제거 방안을 도출, 이를 적용하여 가공한 교통정보에 대해 정확성 평가, 신뢰 수준별 최소 표본수의 만족 여부를 평가하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 비 혼잡 및 혼잡시간대를 비교한 결과, 비 혼잡시간대에 전체 구간 통행시간과 달리 지연차량이 다수 발견되었고, 이러한 지연차량으로 인하여 해당구간의 구간 통행속도가 낮게 나타날 수 있는 문제가 있었다.

이에 본 연구에서 제안한 방안 즉, 1단계 최대값과 최소값을 이용한 이상치 제거, 2단계 평균과 표준편차를 고려한 신뢰구간으로 이상치를 제거 방안을 적용한 결과, 실 주행 차량의 관측치와 매우 유사한 결과를 얻었으며, 최소 표본수도 확보되는 것으로 나타나 매우 적절한 이상치 제거 방안임을 알 수 있었다.

둘째, 전체 수집주기 중 표본수가 3대 이하인 수집주기가 12.9%로, 주로 새벽시간대(0시~05시)에 발생하여 도로소통상황이 매우 원활한 관계로 고속 주행하는 일부 차량이 존재할 수 있어, 이때 수집된 관측치 중 최고치와 최저치에 따라 해당 주기의 대표값이 달라질 수 있다.

따라서 표본수가 3대 이하인 경우, 중앙값을 대표값으로 산출하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

셋째, 고가도로와 하부도로가 존재하는 구간에 설치된 DSRC 검지기의 경우, DSRC의 무선 환경으로 인하여 차량이 본선 진입 전에 하부도로에서부터 검지되어 지연차량으로 분류되는 문제가 있었다.

이러한 도로 환경에서의 DSRC 설치 지점은 진입램프가 있는 경우에는 본선과 합류한 지점 이후에 설치하고, 진출램프가 있는 경우에는 분류되기 이전 지점에 설치하여야 한다. 이를 통해 본선 주행 차량과 램프 진출입 차량과의 속도 편차를 줄일 수 있다. 또한 DSRC 통신반경을 튜닝(tuning)하여 과대한 범위의 차량이 검지되는 오류를 제거하여야 한다.

넷째, 망미→광안 구간처럼 DSRC 검지기 구간 내에 유출입 램프가 존재하지 않고 터널이 존재하는 경우에는 매우 적은 표본수에도 신뢰성 있는 교통정보를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 아울러 이러한 도로환경에서는 수집주기만을 고려하여 최소한의 DSRC 검지기를 설치해도 무방할 것이다.

다섯째, DSRC 설치간격이 짧은 경우에는 적은 통행속도 차이로도 오차비율이 커질 가능성이 있으며, 긴 경우에는 운전자 성향에

큰 차이를 보이는 경향이 일반화 되어 있으나, 본 연구를 통해 살펴본 결과에서는 도로형태 즉, 터널, 유출입램프의 유무에 따라서도 다를 수 있음을 알았다.

끝으로 DSRC 교통정보수집시스템은 특정 프로브 차량에 대해 서만 교통정보 수집원으로 사용하는 단점을 가지고 있으므로, 이를 보완하기 위해서는 루프 검지기 데이터의 활용, AVI (Automatic Vehicle Identification) 설치가 필요한 것으로 판단된다.

그러나 앞서 살펴본 바와 같이, 모든 이상치를 완벽하게 제거하는 방안은 없으며, 해당도로의 특성과 수집 데이터를 분석한 후 최적의 방안을 모색하여 적용하는 것이 바람직하다 할 것이다.

최근 DSRC 교통정보수집시스템의 구축이 고속도로에서 전국 지자체로 확산되고 있음을 감안해 볼 때, 본 연구가 도시부 도로에 설치 운영 중인 DSRC 검지기로부터 수집된 원시 데이터의 특성 분석을 통해 최적의 이상치 제거 방법을 도출, 이를 적용한 후 정확성 평가, 최소 표본수 선정 등을 수행하여 타 지자체의 해당 시스템 구축 및 운영에 실질적인 도움이 되리라 판단된다.

또한 고속도로를 대상으로 한 DSRC 교통정보수집시스템에 대한 연구가 대부분인 것을 감안할 때, 본 연구는 도시부의 도로를 대상으로 교통 및 도로특성을 고려하였다는 점에서 본 연구의 의의가 매우 크다고 하겠다.

5.2 연구의 한계점 및 향후 연구과제

현재 DSRC 검지기는 한국도로공사 6개 차종을 기준으로 1, 2, 3, 6종의 차량을 수집되고 있다. 특히 3종은 버스로서 다른 차종과 통행특성이 다를 수 있으나, 본 연구의 대상도로가 도시고속도로이고 버스전용차로가 존재하지 않아 차종별 통행특성은 분석하지 않았다.

향후 단속류 도로의 DSRC 분석 시에는 신호운영에 큰 영향과 더불어 버스전용차로가 존재하는 경우, 차종별 통행특성을 추가로 분석할 필요가 있으며, 다양한 이상치 제거 방안을 적용하여 최적의 이상치 제거 방안을 도출할 필요가 있다. 또한 최근 화두가 되고 있는 빅 데이터 분석의 일환으로 DSRC 수집 데이터와 기상정보, 사고정보 등을 융합한 실시간 통행시간 예측기법 개발 연구가 필요하다.

References

- Chen, M. and Chien, S. I. J. (2000). "Determining the number of probe vehicles for freeway travel time estimation by microscopic simulation." *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, Vol. 1719, pp. 61-68.
- Jeon, S. M. (2012). *A congestion detection algorithm based on expressway DSRC data*, Master's Thesis, AJOU University (in Korean).
- Ki, Y. K., Ahn, G. H., Kim, E. J. and Bae, K. S. (2011). "Imputation model for link travel speed measurement using UTIS." *Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, The Korea Institute of Intelligent Transport Systems, Vol. 10, No. 6, pp. 63-73 (in Korean).
- Kwon, H. J. (2009). *The traffic information processing system using dedicated short range communication*, Ph.D. Dissertation, AJOU University (in Korean).
- Kwon, H. J., Lee, J. J., Lee, S. W., Lee, J. K. and Kim, Y. D. (2009). "A study on the traffic information system development using DSRC." *Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, The Korea Institute of Intelligent Transport Systems, Vol. 8, No. 6, pp. 13-22 (in Korean).
- Lee, Y. I. and Lee, J. H. (2002). "A study on link travel time estimating methodology for traffic information service." *Journal of Korean Society of Transportation*, Korean Society of Transportation, Vol. 20, No. 3, pp. 55-67 (in Korean).
- Oh, G. D., Park, E. M. and Kim, S. Y. (2004). "Implementing advanced traffic information system using dedicated short range communication." *Journal of Korean Society of Transportation*, Korean Society of Transportation, Vol. 22, No. 2, pp. 165-175 (in Korean).
- Shim, S. W. (2011). *An expressway path travel time estimation model using DSRC travel data*, Ph.D. Dissertation, AJOU University (in Korean).
- Shim, S. W., Choi, K. C., Lee, S. S. and Namkoong, S. (2013). "An expressway path travel time estimation using hi-pass DSRC Off-Line travel data." *Journal of Korean Society of Transportation*, Korean Society of Transportation, Vol. 31, No. 3, pp. 45-54 (in Korean).
- Song, H. J. (2010). *Traffic information processing algorithm using electronic toll collection system*, Master's Thesis, AJOU University (in Korean).
- Srinivasan, K. K. and Jovanis, P. P. (1996). "Determination of number of probe vehicles required for reliable travel time measurement in urban network." *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, Vol. 1537, pp. 15-22.
- The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. (2008). *Traffic information engineering*, Cheongmoongak (in Korean).