

실시간 교통정보 정확도 향상을 위한 이질적 교통정보 융합 연구

김종진* · 정연식**

Kim, Jong-Jin*, Chung, Younshik**

Fusion Strategy on Heterogeneous Information Sources for Improving the Accuracy of Real-Time Traffic Information

ABSTRACT

In recent, the number of real-time traffic information sources and providers has increased as increasing smartphone users and intelligent transportation system facilities installed at roadways including vehicle detection system (VDS), dedicated short-ranged communications (DSRC), and global positioning system (GPS) probe vehicle. The accuracy of such traffic information would vary with these heterogeneous information sources or spatiotemporal traffic conditions. Therefore, the purpose of this study is to propose an empirical strategy of heterogeneous information fusion to improve the accuracy of real-time traffic information. To carry out this purpose, travel speed data collection based on the floating car technique was conducted on 227 freeway links (or 892.2 km long) and 2,074 national highway links (or 937.0 km long). The average travel speed for 5 probe vehicles on a specific time period and a link was used as a ground truth measure to evaluate the accuracy of real-time heterogeneous traffic information for that time period and that link. From the statistical tests, it was found that the proposed fusion strategy improves the accuracy of real-time traffic information.

Key words : Heterogeneous traffic information, Travel speed, Accuracy, Fusion strategy, Empirical method

초 록

최근 높은 스마트폰 보급율과 ITS (intelligent transportation systems) 인프라 확충 등 정보통신기술(information and communications technology, ICT) 이용 활성화로 실시간 교통정보의 수집원이 증가하였다. 이렇게 다양하게 수집되는 실시간 교통정보의 정확도는 VDS (vehicle detection system), DSRC (dedicated short-range communications), GPS (global positioning system) probe와 같은 다양한 교통정보 수집원별 시공간 혹은 교통상황 등 다양한 환경에 따라 다르게 나타날 수 있다. 본 연구의 목적은 이질적 교통정보가 동시에 수집될 경우, 실시간 교통정보의 정확도를 향상시키기 위한 융합 전략의 제시에 있다. 이를 위해 고속국도(892.2 km, 227개 링크), 일반국도(937.0 km, 2,074개 링크)를 대상으로 주행 조사를 실시하였으며, 해당 링크 및 시간대에 probe 차량 5대의 평균 통행속도는 실시간 교통정보 수집원별 (VDS or DSRC, GPS-based A, B) 정확도 평가의 기준 혹은 참값으로 활용되었다. 결과적으로 제시된 융합 전략에 대한 정확도 개선 효과는 일반국도에서 1개 수집원을 제외하고 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 향후 다양한 기관으로부터 서비스되는 실시간 교통정보가 동시에 연계되는 환경에서 보다 정확한 교통정보 서비스의 가능성을 확인하였다.

검색어 : 이질적 교통정보, 통행속도, 정확도, 융합 전략, 경험적 방법

* 영남대학교 도시공학과 박사과정 (Yeungnam University · ngenie@yu.ac.kr)

** 중신회원 · 교신저자 · 영남대학교 도시공학과 부교수 (Corresponding Author · Yeungnam University · tpgist@yu.ac.kr)

Received May 20, 2021/ revised June 4, 2021/ accepted June 17, 2021

1. 서론

최근 높은 스마트폰 보급율과 ITS (intelligent transportation systems) 인프라 확충 등 정보통신기술(information and communications technology, ICT) 이용 활성화로 실시간 교통정보 수집원이 증가하였다. 이에 따라 국토교통부, 한국도로공사, 경찰청 등 공공 기관과 더불어 T map, 원내비, 카카오내비 등 민간 기관에서도 실시간 교통정보를 서비스하고 있다. 이렇게 다양하게 수집되는 실시간 교통정보는 VDS (vehicle detection system)와 같은 지점 기반 수집 방식과 DSRC (dedicated short-range communications) 혹은 GPS (global positioning system) 기반 probe 차량과 같은 구간 기반 수집 방식으로 구분된다. 지점 기반 VDS의 경우 특정 도로 지점을 통과하는 모든 차량의 통행 속도를 측정하는 반면, 도로 중간에 지정체 유무, 다른 도로로 이동 등의 파악이 불가능한 단점이 있다. 구간 기반 probe 차량의 경우 도로 구간을 통과하는 차량의 정확한 통행 속도를 측정하는 반면, 수집 기관별 probe 차량 수가 달라 모든 차량의 통행 속도 파악이 불가능한 단점이 있다. 이와 같이 다양한 방식에 의해 수집되는 교통정보는 사공간 혹은 교통상황 등 다양한 환경에 따라 정확도가 다르게 나타날 수 있으며, 결과적으로 특정 수집 방식은 다른 수집 방식에 비해 항상 우수할 수 없다는 것을 의미한다. 이로 인해 정확도 높은 교통정보를 서비스하기 위해 상당수의 연구들이 이질적 교통정보의 융합 방안을 제시하였다(Kim et al., 2005; Kong et al., 2009; Liu et al., 2016; Soriguera and Robusté, 2011; Xia et al., 2013).

현재 국토교통부, 한국도로공사, 경찰청 등과 같은 공공 기관의 경우 VDS와 DSRC를 기반으로 교통정보를 수집·서비스하고 있으며, T map, 원내비, 카카오내비 등과 같은 민간 기관의 경우 GPS probe 기반으로 교통정보를 수집·서비스하고 있다. 한편 이러한 이질적 특성을 가진 교통정보가 동시에 수집될 경우, 실시간 교통정보의 정확도 향상을 위해 어떠한 방식으로 융합하여 서비스할

것인가의 문제는 향후 주요한 연구 대상이 될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 이질적 교통정보가 함께 연계되었다고 가정하여 국가표준노드링크 단위로 가공된 자료를 기반으로 다중 교통정보의 융합 전략을 제시하고자 한다. 이를 위해 고속국도(892.2 km, 227개 링크), 일반국도(937.0 km, 2,074개 링크)를 대상으로 주행 조사를 실시하였으며, 해당 링크 및 시간대에 probe 차량 5대의 평균 통행속도를 참값으로 활용하여 실시간 교통정보 수집원별(VDS or DSRC, GPS-based A, B) 제곱속도와 비교분석하였다. 또한 정확도 높은 실시간 교통정보 서비스를 위해 이질적 교통정보 융합 전략을 제시하였으며, 이를 평가하였다.

2. 문헌고찰

2.1 교통정보 융합 관련 선행연구 사례

교통정보 정확도 향상을 위한 이질적 교통정보 융합에 관한 연구는 국내외적으로 다양하게 진행되어왔다(Table 1 참조). 국내의 경우, Choi and Chung(2002)은 링크별 최적 통행시간 추정을 위해 VDS와 GPS probe 차량 정보 기반 가중평균, 퍼지회귀, 베이지안 기법 적용 융합 알고리즘을 제시하였다. 평가 결과, 소통 상황이 원활하지 않은 경우에는 단순 산술평균 보다 융합 알고리즘의 효과가 우수한 것으로 나타났다. Lee et al.(2005)은 단속류 통행시간 예측을 위해 VDS와 AVI (automatic vehicle identification) 자료 기반 융합 기법을 제시하였으며, 시간차(time-lag) 현상을 고려하여 칼만필터 활용 다주기 예측 모형을 적용하였다. 여기서, 융합 모형은 AVI 자료에 의한 구간 통행시간을 VDS 자료를 통해 추정된 링크별 통행시간의 비율로 나누어 각 링크의 통행시간을 산출한 것이다. 평가 결과, VDS 보다 융합 자료가 실측 값과 유사한 경향을 보였으며, 다주기 예측을 적용한 경우에도 융합 자료가 더 좋은 것으로 나타났다. Kim et al.(2005)은 일반국도 통행시간 추정을 위해 VDS와 AVI 자료 기반 최적화 및 비례화

Table 1. Examples of Prior Studies on Data Fusion

Author (Year)	Data source	Data type	Study site
Choi and Chung(2002)	GPS probe / VDS	Disaggregated data	Urban networks (about 0.9 km)
Lee et al.(2005)	VDS / AVI	Disaggregated data	National highway (about 11 km)
Kim et al.(2005)	VDS / AVI	Disaggregated data	National highway (about 11 km)
Shin et al.(2014)	TCS / DSRC	Aggregated data	Freeway (about 350 km)
El Faouzi et al.(2009)	VDS / TCS	Disaggregated data	Freeway (about 7 km)
Kong et al.(2009)	GPS probe / VDS	Disaggregated data	Urban networks (8 arteries and 10 branches)
Soriguera and Robuste(2011)	VDS / TCS	Disaggregated data	Freeway (about 17 km)
Bhaskar et al.(2011)	GPS probe / VDS	Disaggregated data	Urban networks (about 0.5 km)
Xia et al.(2013)	GPS probe / VDS	Disaggregated data	Urban networks (393 roads)
Liu et al.(2016)	GPS probe / VDS	Disaggregated data	Urban networks in VISSIM simulation (18 links and 8 intersections)

융합 모형을 제시하였다. 여기서, 최적화 융합 모형은 실시간 오차 패턴의 변동을 고려하여 오차를 최소화하는 동적 융합 기준치를 적용한 것이고, 비례화 융합 모형은 개별 링크 차원에서 융합한 후 칼만필터 활용 다주기 예측을 적용한 것이다. 평가 결과, 제시된 2가지 융합 모형은 모두 다주기 예측 모형을 적용한 개별 검지기보다 추정력이 좋게 나타났으며, 이 중 최적화 융합 모형이 가장 우수한 추정력을 나타내는 것으로 나타났다. Shin et al.(2014)은 고속도로 통행시간 예측을 위해 TCS (toll collection system)와 DSRC 자료 기반 KNN (K-Nearest neighborhood), 가중평균 기법 적용 융합 알고리즘을 제시하였다. 평가 결과, 실시간 교통상황 변화를 잘 반영하는 DSRC 자료의 가중치가 증가할수록 정확도가 증가하는 것으로 나타났다.

국외의 경우, El Faouzi et al.(2009)은 고속도로 통행시간 추정을 위해 VDS와 TCS 자료 기반 D-S 이론(Dempster-Shafer Theory) 적용 융합 알고리즘을 제시하였다. 평가 결과, 대부분 개별 검지기보다 융합 알고리즘의 추정력이 좋게 나타났다. Kong et al.(2009)은 도시부 도로망 통행속도 추정을 위해 VDS와 택시 GPS probe 차량 정보 기반 연합형 칼만필터, D-S 이론 적용 융합 알고리즘을 제시하였다. 평가 결과, 융합 알고리즘이 개별 검지기보다 추정력이 좋게 나타났다. Soriguera and Robusté(2011)는 고속도로 통행시간 예측을 위해 VDS와 TCS 자료 기반 퍼지회귀, 베이저안 기법 적용 융합 알고리즘을 제시하였다. 평가 결과, 융합 알고리즘이 개별 검지기보다 추정력이 좋게 나타났다. Bhaskar et al.(2011)은 신호가 있는 도시부 도로망(signalized urban networks)의 통행시간(평균 및 사분위수)을 추정하기 위해 VDS와 GPS probe 차량 정보 기반 CUPRITE (CUmulative plots and PRobe Integration for Travel timE estimation) 기법을 제시하였다. 여기서, CUPRITE 기법은 VDS와 신호 운영 방법(signal timing)을 통합한 누적 플롯(cumulative plots)과 GPS probe 차량 정보를 통합한 것이다. 평가 결과, CUPRITE 기법을 활용한 통행시간 추정 값이 실측 값과 통계적으로 동일한 것으로 나타났다. Xia et al.(2013)은 도시부 도로망 통행속도 추정을 위해 VDS와 GPS probe 차량 정보 기반 계층적 D-S 이론 적용 융합 알고리즘을 제시하였다. 평가 결과, 융합 알고리즘의 정확도가 개별 검지기보다 더 높게 나타났다. Liu et al.(2016)은 도시부 간선도로 통행시간 추정을 위해 VDS와 GPS probe 차량 정보 기반 반복 베이저안 기법 적용 융합 알고리즘을 제시하였다. 평가 결과, 융합 알고리즘이 개별 검지기 및 단일 베이저안을 활용한 융합 보다 추정력이 좋게 나타났다. 또한 최근에는 ICT의 발달로 mobile phone을 지닌 사람이 직접 수집원이 되는 mobile phone probe를 활용한 교통정보 융합에 관한 연구들도 진행되고 있다(He et al., 2016; Zhang et al., 2015; Zhu et al., 2018).

2.2 시사점

전술한 바와 같이, 이질적 교통정보 융합에 관한 연구는 교통정보 정확도 향상을 위해 국내외적으로 다양하게 진행되었으며, 대부분 다양한 수집원(VDS, DSRC, GPS probe 등)의 원시 자료(raw data) 활용과 더불어 다양한 알고리즘(가중평균, 퍼지회귀, 베이저안, 칼만필터 등)을 적용하였다. 또한 대부분 연구들에서 단일교통정보보다 다중교통정보를 융합하여 활용한 경우 정확도가 더 높은 것으로 나타났다. 한편 다양한 도로 유형(고속국도, 일반국도, 도시부 도로 등)을 대상으로 진행되었으나, 대부분 국소적 지역(특정 지역 혹은 특정 도로 구간)을 대상으로 융합 알고리즘을 적용하였다.

반면, 본 연구는 개별 수집원들의 원시 자료를 대상으로 융합 알고리즘을 적용한 기존 연구들과는 달리, 이질적 특성을 가진 교통정보가 동일한 구간 단위로 가공되어 함께 연계되었다고 가정하여 실시간 교통정보의 정확도 향상을 위한 다중교통정보의 융합 전략을 제시하고자 하였다. 이에 따라 국가표준노드링크 단위로 가공된 다양한 교통정보를 기반으로 다중교통정보의 융합 전략을 제시하였으며, 이를 평가하였다. 또한 국내 5대 광역권(경기, 강원, 충청, 전라, 경상) 고속국도(892.2 km, 227개 링크) 및 일반국도(937.0 km, 2,074개 링크)를 대상으로 하였다.

3. 자료 수집 및 분석

3.1 현장 조사

본 연구는 공공과 민간 실시간 교통정보가 동시에 수집되는 고속국도 및 일반국도 구간 중 반복적 발생 정체가 예상되는 구간을 조사 대상으로 하였다. 조사는 2020년 8월 24일부터 9월 25일까지 약 5주간 평일(월~금)을 대상으로 진행되었다. 반복적 발생 정체를 대상으로 제한한 이유는 비정체 보다 과속, 저속 등과 같은 운전자의 운행 패턴이 제한적이고, 비반복적 발생 정체와 달리 예상 구간 파악이 가능하기 때문이다. 반복적 발생 정체 구간은 세가지 기준에 의해 선정되었다. 첫째, 정체 속도는 국가교통정보센터에서 제시한 고속국도 40 km/h 미만, 일반국도 30 km/h 미만이고(ITS National

Table 2. Data Collection Site

Regions	Freeway		National highway	
	Number of links	Length (km)	Number of links	Length (km)
Gyeonggi	211	378.1	1,233	314.1
Gangwon	-	-	15	7.3
Chungcheong	2	12.8	258	79.9
Jeolla	6	6.7	76	26.8
Gyeongsang	8	7.4	492	173.5
Total	227	405.0	2,074	601.6

Transport Information Center, 2020), 둘째, 정체 지속 시간은 25분 이상(Chen et al., 2004)이며, 마지막, 정체 발생 횟수는 동일시간대 연중 10회 이상(Song, 2019) 정체가 발생한 경우이다. Table 2에 제시된 현장 조사 구간은 2019년 국가교통정보센터의 교통정보를 활용하여 선정되었으며, 2,301개 링크(고속국도 227개, 일반국도 2,074개), 1,829.2 km(고속국도 892.2 km, 일반국도 937.0 km)로 파악되었다.

통행속도의 측정은 GPS 로그 자료(위치, 시간 등) 수집이 가능한 장비가 설치된 조사 차량을 활용하였다(Fig. 1 참조). 또한 해당 구간의 교통류 흐름에 맞게 평균 속도로 주행하는 평균속도방법(average car technic)을 적용하였다. 또한 ITE(Schroeder et al., 2010)가 제시한 최소 주행 수 기준에 따라 신뢰수준(95%), 허용오차(± 4 km/h), 최대/최소 통행속도 차(6 km/h 이내)를 적용하여, 최소 주행 수는 5대로 선정되었다. 참고로 최소 주행 수는 Eq. (1)과 같이 산출된다(Quiroga and Bullock, 1998). 이에 따라 총 11,505개(probe 차량 5대 \times 2,301개 링크)의 통행속도를 측정하였으며, 해당 링크 및 시간대에 probe 차량 5대의 평균 통행속도를 참값(ground truth)으로 활용하였다.

$$n = \left[\frac{t_{\alpha} R}{d\epsilon} \right]^2 \quad (1)$$

여기에서 n 은 최소 주행 수, t_{α} 는 신뢰수준($1 - \alpha$)에 대한 t -통계량, R 은 조사 차량의 평균속도, ϵ 는 허용오차를 나타낸다. R 값은 다양한 방식, 즉 최대속도와 최소속도의 차이를 활용하거나(Oppenlander, 1976), 이동평균(Douglas Robertson et al., 1994)을 사용하는 방법을 제안하였다. 본 연구는 Oppenlander(1976)가 제안한 방식을 적용하여 R 을 산정하였다. 마지막으로 d 는 R 과 속도의 표준편차 σ 의 비율을 나타낸다.

3.2 수집원별 실시간 교통정보 정확도 분석

본 연구는 해당 링크 및 시간대에 probe 차량 5대의 평균 통행속도를 참값으로 활용하여 실시간 교통정보 수집원별(VDS or DSRC, GPS-based A, B) 제공속도와 비교분석하였다. 현재 고속국도는 DSRC, GPS-based A, B로부터 실시간 교통정보 서비스를 받고 있으며, 일반국도의 경우 VDS, GPS-based A, B로부터 실시간 교통정보 서비스를 받고 있다. 이 중 GPS-based A, B의 경우, 해당 스마트폰 어플리케이션 사용자들의 GPS 정보를 수신하여 실시간 교통정보를 수집하고 있으며, 자체 산출 과정(수집 샘플 수, 맵 매칭, 내부 알고리즘 등)을 통해 실시간 교통정보를 제공하고 있다. 한편 probe 차량을 활용하여 조사 구간 전체에 대한 교통정보를 측정하였으나, 수집원별 교통정보 단절 구간(missing link)이 존재하였다. 이러한 경우 해당 수집원의 교통정보는 정확도 분석 대상에서 제외되었다. 본 연구는 이들의 교통정보를 활용하여 권역, 도로 유형 등 다양한 조건에 따라 정확도를 분석하였으며, FHWA(Feiqe et al., 2004)에서 제시한 평균절대백분율오차(mean absolute percentage error, MAPE)를 활용한 1-MAPE를 정확도 분석 지표로 활용하였다. MAPE는 Eq. (2)와 같다.

$$MAPE = \frac{100}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - Y_i}{Y_i} \right| \quad (2)$$

여기에서 n 은 전체 링크 수, X_i 는 i 링크의 수집원별 제공속도, Y_i 는 i 링크의 현장실측 통행속도(5대의 평균 통행속도)를 나타낸다.

분석 결과, 고속국도의 경우 수집원별(DSRC, GPS-based A, B) 실시간 교통정보의 정확도는 대부분 80% 대로 나타났다(Table 3, Fig. 2 참조). 다만 DSRC가 GPS-based에 비해 다소 정확도가 낮은 이유는 수집원별 교통정보 수집 방식의 차이로 판단된다. DSRC 기반의 노드·링크체계는 국가표준노드링크보다 링크 단위



Fig. 1. Probe Vehicle and Equipment used for Data Collection

Table 3. Accuracy Comparison of Collected Travel Speed Data as a Function of Regions, Traffic Information Providers and Road Types

Regions	Freeway			National highway		
	DSRC	GPS-based A	GPS-based B	VDS	GPS-based A	GPS-based B
Gyeonggi	77.9 %	83.0 %	83.4 %	69.4 %	60.7 %	64.0 %
Gangwon	-	-	-	-44.1 %	61.8 %	87.9 %
Chungcheong	96.8 %	98.7 %	96.7 %	55.3 %	64.4 %	72.3 %
Jeolla	87.1 %	85.1 %	83.2 %	55.1 %	62.8 %	59.6 %
Gyeongsang	51.7 %	70.5 %	74.7 %	65.3 %	65.6 %	72.7 %
Total	77.8 %	82.7 %	83.2 %	62.2 %	62.4 %	67.2 %

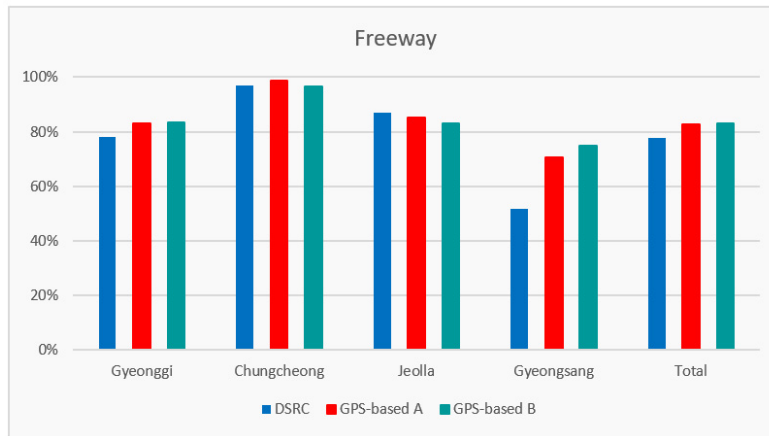


Fig. 2. Accuracy Comparison of Collected Travel Speed Data for Freeways as a Function of Regions and Traffic Information Providers

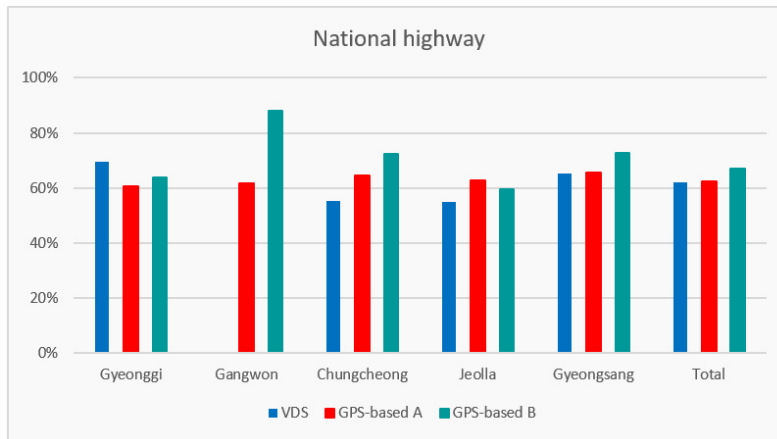


Fig. 3. Accuracy Comparison of Collected Travel Speed Data for National Highways as a Function of Regions and Traffic Information Providers

길이가 길어, 이를 국가표준노드링크로 세분화 시 실시간 교통정보의 오차가 발생할 수 있다. 반면, GPS-based 기반의 노드 링크체계는 국가표준노드링크보다 링크 단위 길이가 짧아, 보다 세분화된 실시간 교통정보를 수집하여 국가표준노드링크 단위로 가공하기 때문에 DSRC에 비해 정확도가 높은 것으로 판단된다.

일반국도의 경우 수집원별(VDS, GPS-based A, B) 실시간

교통정보의 정확도는 대부분 60 % 대로 나타났다(Table 3, Fig. 3 참조). 다만 VDS가 GPS-based에 비해 다소 정확도가 낮은 이유는 고속국도와 마찬가지로 수집원별 교통정보 수집 방식의 차이로 판단된다. VDS 지점 정보의 경우 국가표준노드링크 구간 정보로 변환 시 오차가 발생할 수 있다. 특히 강원권 일반국도의 VDS는 오차율이 144.1 %로 높게 나타나(정확도 -44.1 %), Fig. 3에서

관련 그래프가 표시되지 않았다. 강원권 일반국도 VDS의 경우, 전체 15개의 링크 중 9개의 링크가 단절 구간(missing link)으로 나타났으며, 이에 따라 나머지 6개의 링크를 대상으로 분석하였다. 그러나 이들 6개의 링크는 한 지점에 설치된 VDS를 활용하여 동일한 교통정보를 제공함에 따라 개별 링크의 교통상황(속도의 변이 구간, 변이 시점 등)을 충분히 반영하지 못하였으며, 이로 인해 높은 오차율이 발생된 것으로 파악되었다. 반면, GPS-based의 경우 고속국도와 마찬가지로 보다 세분화된 실시간 교통정보를 수집하여 국가표준노드링크로 가공하기 때문에 VDS에 비해 정확도가 높은 것으로 판단된다. 이는 단속류 구간에서 VDS보다 GPS-based의 정확도가 낮은 것으로 나타난 기존 연구(Kong et al., 2009; Liu et al., 2016; Xia et al., 2013)와는 상반된 결과이나, 본 연구의 경우 반복적 발생 정체 예상 구간을 대상으로 하기 때문에 GPS probe 기반의 약점인 probe 차량 수를 상당히 확보한 것으로 판단된다.

한편 고속국도 보다 일반국도에서 실시간 교통정보의 정확도가 더 낮은 것으로 나타났다. 이는 고속국도와 일반국도의 교통류 특성 차이로 판단된다. 고속국도는 연속류인 반면, 일반국도는 대부분 단속류로서 교차로, 신호 등의 설치를 통해 연속적인 교통 흐름을 단절하여 지체가 발생한다. 또한 신호 운영에 따른 이동류별(직진, 좌회전, 우회전 등) 통행속도의 편차가 크게 나타나고, 통행속도도 낮게 형성된다(Lomax et al., 2012; Zhang and Chen, 2015). 본 연구의 주행 조사는 직진 차량에 대해서만 진행하였으나, 공공과 민간의 경우 직진, 좌회전, 우회전 차량을 모두 통행속도 산정에 활용되었을 가능성이 있기 때문에 일반국도의 교통정보 정확도가 더 낮은 것으로 판단된다.

분석 결과를 통해 실시간 교통정보의 정확도는 수집원, 권역,

도로유형 등 다양한 조건에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 특정 수집 방식이 다른 수집 방식에 비해 항상 우수할 수 없다는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 GPS-based 수집 방식인 경우에도 수집 기관별 probe 차량 수, 맵 매칭, 내부 알고리즘 등 산출 과정 차이에 따라 정확도가 다르게 나타난 것으로 보인다.

4. 융합 전략

4.1 융합 전략 설정

실시간 교통정보의 정확도 향상을 위해 다음과 같은 이질적 교통정보의 융합 전략을 제시하였다. 첫째, 모든 수집원들의 평균 속도 오차 내에 수집원(들)의 교통정보가 존재하는 경우, 해당 수집원(들)의 평균을 교통정보로 활용한다. 둘째, 모든 수집원들의 평균 속도 오차 내에 수집원(들)의 교통정보가 존재하지 않은 경우, 평균 속도 대비 오차가 가장 낮은 수집원의 교통정보를 활용한다. 또한 제시된 융합 전략의 적정 오차를 선정하기 위해 전체 2,308개 링크 중 3개 수집원(VDS or DSRC, GPS-based A, B)의 교통정보가 모두 수집된 731개 링크(고속국도 190개, 일반국도 541개)의 수집원별 제공속도 자료를 활용하였으며, 0 ~ 20 %까지 5 % 단위로 오차를 적용하여 비교분석한 결과 10 %를 적정 오차로 선정하였다. Fig. 4는 10 %를 적용한 이질적 교통정보의 융합 전략을 제시한 것이다.

4.2 융합 전략 평가

제시된 융합 전략과 개별 수집원의 정확도 차이를 판단하기 위해 대응표본 t검정(paired sample t-test)을 실시하였으며, 전체 2,308개 링크 중 3개 수집원의 교통정보가 모두 수집된 731개

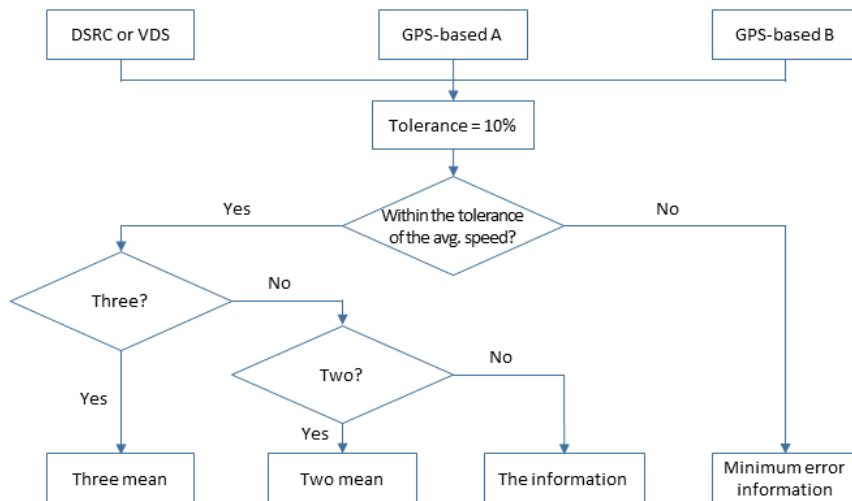


Fig. 4. Fusion Strategy for Improving Accuracy of Heterogeneous Travel Speed Information

링크(고속국도 190개, 일반국도 541개)의 수집원별 정확도 자료를 활용하였다. 대응표본 t검정은 동일 집단 내 2개의 연속형 변수 간 평균 차이를 비교하는 통계적 검정 방법이다. Table 4, Table 5는 각각 고속국도, 일반국도에 대해 융합 전략과 개별 수집원의 정확도 차이를 분석한 결과이다.

분석 결과, 고속국도의 경우 융합 전략과 개별 수집원들의 정확도 차이는 DSRC 7.6 % (t=3.69, p-value=0.00), GPS-based A 1.9 % (t=2.06, p-value=0.04), GPS-based B 1.7 % (t=1.69, p-value=0.09)로 유의수준 10 %를 기준으로 유의하게 나타났다 (Table 4 참조). 이는 제시된 융합 전략과 개별 수집원들(DSRC, GPS-based A, B)의 정확도 차이가 있다고 할 수 있으며, 결과적으로 융합 전략 적용 시 3가지 개별 수집원들 보다 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 또한 DSRC의 경우 GPS-based 수집원들 보다 융합에 의한 정확도 향상 효과가 훨씬 더 높은 것으로 나타났다.

일반국도의 경우 융합 전략과 개별 수집원들의 정확도 차이는 VDS 10.2 % (t=8.15, p-value=0.00), GPS-based A 4.7 % (t=7.00, p-value=0.00)로 유의수준 10 %를 기준으로 통계적으로 유의하게 나타났으며, GPS-based B 2.2 % (t=0.83, p-value=0.41)는 유의수준 10 %를 기준으로 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다(Table 5 참조). 이는 제시된 융합 전략과 개별 수집원들 (VDS, GPS-based A)의 정확도 차이가 있다고 할 수 있으며, 결과적으로 융합 전략 적용 시 2가지 개별 수집원들 보다 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 반면, GPS-based B의 경우에도 정확도가 향상되는 것으로 나타났으나, 통계적으로는 유의하지 않은 것으로 나타났다. 또한 VDS의 경우 GPS-based 수집원들 보다 융합에 의한 정확도 향상 효과가 훨씬 더 높은 것으로 나타났다.

한편 일반국도의 경우 고속국도 보다 융합 전략 적용 시 정확도는 크게 향상되는 것으로 나타났으나, 융합 전략을 적용한 정확도는 고속국도(85.5 %)가 일반국도(72.1 %) 보다 더 높은 것으로 나타났

다. 이는 전술한 바와 같이, 일반국도는 신호 운영에 따른 이동류별 (직진, 좌회전, 우회전 등) 통행속도가 크게 상이하여 개별 수집원들의 정확도가 전반적으로 낮게 산정되기 때문에 융합 전략을 적용하여도 고속국도 보다 정확도가 낮게 형성된 것으로 판단된다. 결과적으로 제시된 융합 전략 적용에 대한 정확도 개선 효과는 대부분 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 이질적 교통정보가 함께 연계되었다고 가정하여 국가 표준노드링크 단위로 가공된 자료를 기반으로 다중교통정보의 융합 전략을 제시하였다. 이를 위해 고속국도(892.2 km, 227개 링크), 일반국도(937.0 km, 2,074개 링크)를 대상으로 주행 조사를 실시하였으며, 해당 링크 및 시간대에 probe 차량 5대의 평균 통행속도를 참조하여 실시간 교통정보 수집원별 제공속도와 비교분석하였다. 분석 결과를 통해 실시간 교통정보의 정확도는 수집원, 권역, 도로유형 등 다양한 조건에 따라 다르게 나타날 수 있으며, 특정 수집 방식이 다른 수집 방식에 비해 항상 우수할 수 없다는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 GPS-based 수집 방식인 경우에도 수집 기관별 probe 차량 수, 맵 매칭, 내부 알고리즘 등 산출 과정 차이에 따라 정확도가 다르게 나타난 것으로 보인다.

아울러 실시간 교통정보의 정확도 향상을 위해 이질적 교통정보의 융합 전략을 제시하였다. 첫째, 모든 수집원들의 평균 속도의 ±10 % 오차 내에 수집원(들)의 교통정보가 존재하는 경우, 해당 수집원(들)의 평균을 교통정보로 활용한다. 둘째, 모든 수집원들의 평균 속도의 ±10 % 오차 내에 수집원(들)의 교통정보가 존재하지 않은 경우, 평균 속도 대비 오차가 가장 낮은 수집원의 교통정보를 활용한다. 대응표본 t검정(paired sample t-test)을 통해 융합 전략과 개별 수집원의 정확도 차이를 분석한 결과, 고속국도와 일반국도

Table 4. Paired t-test for Freeway

Freeway	diff					t-value	d.f.	p-value
	Mean	Std. Dev.	Std. Err.	95 % Conf. Interval				
DSRC	0.076	0.284	0.021	0.035	0.117	3.691	189	0.000
GPS-based A	0.019	0.124	0.009	0.001	0.036	2.064	189	0.040
GPS-based B	0.017	0.138	0.010	-0.003	0.037	1.693	189	0.092

Table 5. Paired t-test for National Highway

National highway	diff					t-value	d.f.	p-value
	Mean	Std. Dev.	Std. Err.	95 % Conf. Interval				
VDS	0.102	0.292	0.013	0.078	0.127	8.146	540	0.000
GPS-based A	0.047	0.155	0.007	0.034	0.060	6.996	540	0.000
GPS-based B	0.022	0.626	0.027	-0.031	0.075	0.830	540	0.407

에서 융합 전략 적용 시 개별 수집원들 보다 대부분 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 따라서 향후 이질적 교통정보가 함께 수집·서비스될 경우 제시된 융합 전략을 활용한다면 실시간 교통정보의 정확도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 한편 본 연구는 개별 수집원의 원시 자료 및 산출 과정(수집 샘플 수, 맵 매칭, 내부 알고리즘 등) 특성 파악이 제한적인 가공 자료를 활용하여 정확도 분석 및 다중교통정보 융합 전략을 제시하였다. 따라서 향후 개별 수집원의 특성 파악이 용이한 원시 자료를 활용한다면, 더욱 구체적인 분석과 융합 전략 도출이 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 반복적 발생 정체 구간을 대상으로 연구가 수행되었지만, 비교적 운전자의 운행 행태가 다양하고 GPS probe 차량 수가 부족할 가능성 높은 비정체 구간에 대해서도 해당 융합 전략 적용 및 평가가 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

This work was supported by the 2021 Yeungnam University research grant.

References

- Bhaskar, A., Chung, E. and Dumont, A. G. (2011). "Fusing loop detector and probe vehicle data to estimate travel time statistics on signalized urban networks." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 26, No. 6, pp. 433-450.
- Chen, C., Skabardonis, A. and Varaiya, P. (2004). "Systematic identification of freeway bottlenecks." *Transportation Research Record*, Vol. 1867, No. 1, pp. 46-52.
- Choi, K. C. and Chung, Y. S. (2002). "A data fusion algorithm for estimating link travel time." *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 7, No. 3-4, pp. 235-260.
- Douglas Robertson, H., Hummer, J. E., Nelson, D. C. and Institute of Transportation Engineers. (1994). *Manual of transportation engineering studies*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., United States.
- El Faouzi, N. E., Klein, L. A. and De Mouzon, O. (2009). "Improving travel time estimates from inductive loop and toll collection data with dempster-shafer data fusion." *Transportation Research Record*, Vol. 2129, No. 1, pp. 73-80.
- Feiqe, B., Margiotta, C., Margiotta, R. and Turner, S. (2004). *Traffic data quality measurement*, Final report, FHWA-JPO-05-001, United States.
- He, S., Zhang, J., Cheng, Y., Wan, X. and Ran, B. (2016). "Freeway multisensor data fusion approach integrating data from cellphone probes and fixed sensors." *Journal of Sensors*, Vol. 2016, No. 7269382.
- ITS National Transport Information Center (2020). Available at: <https://www.its.go.kr/map/traffic> (Accessed: July 28, 2020).
- Kim, S. H., Lim, K. W. and Lee, Y. G. (2005). "Estimation algorithm based on point and interval detection data over the national highway section." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 23, No. 5, pp. 135-146 (in Korean).
- Kong, Q. J., Li, Z., Chen, Y. and Liu, Y. (2009). "An approach to urban traffic state estimation by fusing multisource information." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 10, No. 3, pp. 499-511.
- Lee, Y. I., Kim, S. H. and Yoon, J. H. (2005). "Multi-step ahead link travel time prediction using data fusion." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 23, No. 4, pp. 71-79 (in Korean).
- Liu, K., Cui, M. Y., Cao, P. and Wang, J. B. (2016). "Iterative bayesian estimation of travel times on urban arterials: Fusing loop detector and probe vehicle data." *Plos One*, Vol. 11, No. 6, pp. e0158123.
- Lomax, T., Turner, S., Eisele, B., Schrank, D., Geng, L. and Shollar, B. (2012). *Refining the real-timed urban mobility report*, UTCM 11-06-73, Texas, United States.
- Oppenlander, J. C. (1976). "Sample size determination for travel time and delay studies." *Traffic Engineering*, Vol. 46, No. 9, pp. 25-28.
- Quiroga, C. A. and Bullock, D. (1998). "Determination of sample sizes for travel time studies." *Institute of Transportation Engineers Journal*, Vol. 68, pp. 92-98.
- Schroeder, B. J., Cunningham, C. M., Findley, D. J., Hummer, J. E. and Foyle, R. S. (2010). *Manual of transportation engineering studies, 2nd edition*, Institute of Transportation Engineers, Washington, D.C., United States.
- Shin, K. W., Shim, S. W., Choi, K. C. and Kim, S. H. (2014). "Expressway travel time prediction using k-nearest neighborhood." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 34, No. 6, pp. 1873-1879 (in Korean).
- Song, T. J. (2019). "Recurrent congestion impact based on spatiotemporally historic congested information - case study: Separating collision-induced congestion." *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 23, No. 11, pp. 4875-4885.
- Soriguera, F. and Robusté, F. (2011). "Highway travel time accurate measurement and short-term prediction using multiple data sources." *Transportmetrica*, Vol. 7, No. 1, pp. 85-109.
- Xia, Y., Li, X. and Shan, Z. (2013). "Parallelized fusion on multisensor transportation data: A case study in cyberits." *International Journal of Intelligent Systems*, Vol. 28, No. 6, pp. 540-564.
- Zhang, J., He, S., Wang, W. and Zhan, F. (2015). "Accuracy analysis of freeway traffic speed estimation based on the integration of cellular probe system and loop detectors." *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 19, No. 4, pp. 411-426.
- Zhang, X. and Chen, M. (2015). "Determining reference speed for urban arterials using gps-based speed data." *Proceedings of the Transportation Research Board 94th Annual Meeting*, Washington DC, United States.
- Zhu, L., Guo, F., Polak, J. W. and Krishnan, R. (2018). "Urban link travel time estimation using traffic states-based data fusion." *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 12, No. 7, pp. 651-663.