

## 개별차량 통행기반 고속도로 혼잡 속도 지표 연구

## Indicator of Motorway Traffic Congestion Speed Based On Individual Vehicular Trips

장현호<sup>1</sup> · 백준혁<sup>2\*</sup>Hyunho Chang<sup>1</sup>, Junhyeck Baek<sup>2\*</sup><sup>1</sup>Research Specialist, Urban Science Institute, College of Urban Science, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea<sup>2</sup>Doctorial student, Department of Urban Engineering, College of Urban Science, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

\*Corresponding author: Junhyeck Baek, wonderland@inu.ac.kr

## ABSTRACT

**Purpose:** A reliable indicator of congested traffic speed is essential in providing the information of traffic flow states about motorway sections. The aim of this study is to propose an adaptive indicator of congested speed which is employed for deciding the traffic flow states for individual motorway sections using disaggregated section-based speed data. **Method:** Typically, the state of traffic flow is categorized into the three: uncongested, mixed, congested states. A method, presented in this study, was developed for identifying boundary speed values of road sections through categorizing the three traffic flow states with individual vehicular speed values. The boundary speed state of each road segment is determined using the speed distributions of mixed and congested traffic states. **Result:** Analysis results revealed that boundary speed values between mixed and congested states for road sections were similar to those of US and EU criteria (i.e., 48.28~66.0 kph). This indicates that boundary speed values could be different according to road sections. **Conclusion:** It is expected that the method and indicator, proposed in this study, could be efficaciously used for providing ad-hoc real-time traffic states and computing traffic congestion costs for motorway sections in the era of big data.

**Keywords:** Big data, Motorway Section, Congestion Speed Indicator, Disaggregated Approach, Separation of Speed States

## 요약

**연구목적:** 고속도로 구간의 소통상태 정보제공에 있어 신뢰성 있는 혼잡속도 지표는 핵심이다. 본 연구는 비집계 구간속도 자료를 이용하여 개별 고속도로 구간의 소통상태를 결정하기 위한 순응형 혼잡속도 지표를 제시하는데 그 목적이 있다. **연구방법:** 교통류의 상태는 전형적으로 비혼잡 상태, 혼재 상태, 혼잡 상태로 구분된다. 개별 차량의 속도를 이용하여 교통류 상태를 계층화함으로써 도로구간별 혼잡속도 지표를 산정하는 방법론을 개발하였다. 도로구간별 혼잡속도는 혼재상태와 혼잡상태의 차량 속도분포를 이용하여 결정된다. **분석결과:** 도로구간별 혼잡속도는 미국과 유럽의 혼잡속도 기준인 48.28~66.0 kph와 유사하게 분석되었다. 이는 도로구간별로 혼잡 경계속도가 다를 수 있음을 의미한다. **결론:** 본 연구에서 제시된 방법론과 혼잡지표는 빅 데이터 시대의 고속도로 구간별 맞춤형 실시간 소통정보 제공 및 교통혼잡 비용의 산정에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어:** 빅 데이터, 고속도로 구간, 혼잡속도 지표, 비집계 접근법, 속도상태 분할

Received | 6 August, 2021

Revised | 15 September, 2021

Accepted | 15 September, 2021

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 배경 및 목적

국내 자동차 보급대수는 2,470만대(2021년)로서 추계 인구수 5,168(2021년)의 약 50%에 달하고 있다. 그리고 행정수도 이전, 공공기관 지방 이전, 삶의 질 향상에 따른 여가통행과 물류통행의 증가 등으로 자동차 통행량은 폭발적으로 증가하고 있는 추세이다. 실례로, 고속도로의 총 일평균 교통량은(2015년 대비 2019년) 36.88% 증가하였다(MOLIT, 2020). 이러한 급격히 증가된 자동차 통행수요를 수용하기 위한 고속도로 망의 확충은(2015년 대비 2019년) 13.69% 확충되었다(MOLIT, 2020). 또한 인구의 대도시 집중현상이 급격히 증가하고 있다. 따라서 대도시권의 고속도로의 경우, 자동차 통행의 수요를 공급이 수용하지 못함으로써 반복적인 교통혼잡이 발생하고 있는 실정이다. 국가별로 차이는 있겠지만, 교통혼잡의 약 60%까지 도시권 고속도로에서 발생하기도 한다(Binglei, 2008). 국내의 경우, 도로교통 혼잡비용은 약 67조원(2018년)으로서, 우리나라 국가예산 558조의 12%에 달한다(2021년). 따라서 도로교통 혼잡비용은 국가경쟁력 향상을 위해서 해결해야할 시급한 사회적 비용이라 할 수 있다.

도로교통 혼잡비용을 감소시키기 위한 노력으로서 실시간 도로구간 소통정보제공, 혼잡 도로구간 선정 및 개선 사업, 지속적인 도로교통 혼잡비용 모니터링이 수행되고 있다. 특히, 실시간 도로구간 소통정보 제공(예, 원할, 지체, 정체)과 도로교통 혼잡비용의 산정을 위해서는 도로구간 소통상태(예, 혼잡, 비혼잡)를 결정해야 한다. 소통상태 결정을 위해서는 기준 속도 값 즉, 경제속도가 필연적이며, 고속도로 혼잡 경제속도에 대한 연구는 다음과 같다.

Neudirff et al.(2003)은 혼잡발생 빈도를 기준으로 도로구간의 혼잡여부를 정의하였다. 혼잡발생의 정도는 서비스 수준(Level of Service) F인 상태가 주중 80% 이상의 경우 혼잡도로로 판정하였으며, 이때 혼잡이 발생한 기준은 56.3kph(35.0mph)을 적용하였다. Christidis et al.(2012)은 자유교통류속도(Free Flow Speed)를 기준으로 관측된 평균 속도를 3단계(50kph 미만, 80~100kph, 100kph 이상)로 분류·분석하였다. Qu et al.(2010)은 혼잡의 요인으로 마일 당 통행지체(Travel Delay per Mile), 통행 시간 지표(Travel Time Index) 및 계획 시간 지표(Planning Time Index)를 제시하였다. 이때 각 요인들은 최소 48.28-96.56kph(30.0~60.0mph)에서 유의미한 결과를 나타냈으며, 48.28kph(30.0mph)이하의 교통류 상태에서는 해당 요인들의 영향이 급감한다고 언급하였다. Sujin et al.(2020)은 도로 이용자가 체감하는 혼잡 속도에 대한 설문조사 자료, 교통량-속도 자료를 이용한 클러스터링 분석을 수행한 결과, 서행과 정체의 경제속도로써 50.0kph가 적절함을 제시하였다.

도로구간 소통상태의 정의는 국가별 그리고 도로운영 기관별로 차이를 보이고 있다. 미국의 연방고속도로관리국(FHWA; Federal Highway Administration)을 포함한 10개 주(State)가 구축한 실시간 도로구간 소통정보제공 사이트인 TravelMidwest는 Table 1과 같이 자유교통류속도 그룹별로 4개의 소통상태로 구분하고 있다. 국내의 경우, 자동차 성능 향상과 시민 생활 환경의 증대로 인한 이동시간의 감축 욕구에 부응하기 위하여, 기존의 교통정체 기준속도와 도로 이용자가 느끼는 정체와의 괴리를 축소하기 위하여 정체 기준을 Table 2와 같이 개선하였다(KECRI, 2019). 도시부와 지방부 도로, 교통 특성과 요일에 따른 정체 상태의 차이를 고려하였으며, 2011년 4월 이후 30kph에서 40kph로 상향 조정되었다. 따라서 실시간 고속도로 소통정보제공에 대한 도로구간 소통상태는 Table 3과 같이 원할, 서행 및 혼잡 상태의 3단계로 구분하고 있다. 이상과 같이, 우리나라 고속도로 구간의 혼잡기준 즉, 혼잡경제속도는 미국과 유럽의 비혼잡과 혼잡의 경제속도는 48.28 kph에서 66.0kph 보다 하향 관리되고 있다. 추가로, 우리나라 인당 GDP와 삶의 질을 고려할 때, 혼잡경제속도는 선진국과 유사하게 상향조정 될 필요가 있다고 판단된다.

**Table 1.** Level of traffic congestion for free-flow speed groups

(unit: kph)

Congestion Level	Free-Flow Speed			
	104.60	88.51	72.42	56.33
Uncongested	104.6≤	88.51≤	72.42≤	56.33≤
Light congestion	66.0≤	56.33≤	46.67≤	35.41≤
Medium congestion	29.0≤	24.14≤	19.31≤	16.09≤
Heavy congestion	<29.0	<24.14	<19.31	<16.09

**Table 2.** Traffic congestion criteria for motorway sections

Category	Travel Speed(kph)	Duration(hours/day)	Frequency(days/month)
1996.01 ~ 2011.04	-	< 30.0	2.0 ≤
2011.04 ~	Weekdays	< 40.0	1.0 ≤
	Weekends		2.0 ≤

**Table 3.** Traffic status classification by speed

(unit: kph)

Organization	Uncongested	Acceptable delay	Congested
Korea Highway Corporation	80.0≤	40.0≤	<40.0
Gyeonggi Traffic Information Center	80.0≤	40.0≤	<40.0

기존연구 고찰 결과, 현행의 도로의 소통상태에 대한 연구와 기준은 다음의 한계를 가지는 것으로 판단된다. 첫째, 도로구간의 특성을 고려하지 않는 획일적인 기준을 적용하고 있다. (차량 신호등이 운영되는 도시부 도로와 같은) 단속류와 (설치되지 않은 고속도로와 같은) 연속류의 혼잡기준은 다르며, 동일 등급의 도로라도 선형, 본선, 연결로, 최고제한속도 등에 따라 혼잡의 기준은 다르다. 둘째, 국내의 경우 3단계로 소통정보(원활, 혼잡, 정체)를 제공하고 있다. 그러나 운전자가 통행시간의 관점에서 체감하는 정체와 극심한 정체는 다르다. 따라서 4단계(원활, 혼잡, 정체, 극심한 정체)로 소통상태를 구분할 필요가 있다. 셋째, 기존의 방법론은 지능형교통체계(ITS, Intelligent Transport System)에서 수집되는 5분 또는 1시간 간격 지점검지기(예, Loop 검지기, 영상검지기, 지자기검지기 등) 기반 대표속도(예, 평균속도)를 이용하였다. 따라서 개별차량의 소통정보를 반영할 수 없었다. 예를 들어, 신호등이 설치된 도로구간의 경우 신호를 경험한 차량과 경험하지 않은 차량의 구간통행속도는 큰 차이를 보이지만, 대푯값의 기준으로는 정체상태이다. 또한 고속도로의 경우, 시간적으로 국부적인 혼잡은 검지기에 검지되지 않는 경우가 있으며, 버스전용차로가 운영되는 시간동안의 차종별 소통상태를 고려할 수 없기 때문에 대표속도는 과대평가된다. 넷째, ITS의 DSRC(Dedicated Short-Range Communication)기반 구간검지체제와 차량 내비게이션의 급속한 보급으로 대용량 개별차량 구간속도 자료가 수집되고 있다. 그러나 현행의 방법론은 집계자료 기반으로 개발되었기 때문에, 대용량 구간통행속도 자료를 이용하여 소통상태 경계속도를 결정하는데 한계가 있다.

본 연구에서는 이상의 한계를 극복하기 위하여, 대용량 개별차량 구간통행속도 자료를 이용한 순응형 교통 소통상태 결정 방법론을 제시하도록 한다. 본 연구의 방법론은 5단계의 소통상태(원활, 서행, 지체, 정체, 극심한 정체)를 판별할 수 있도록 개발된다. 또한 대용량 자료의 연산속도를 고려함과 더불어 대상 도로구간별로 차별화된 경계속도를 결정하도록 설계된다.

## 방법론

### 개요

도로구간 속도검지를 DSRC 차량 단말기(즉, IR기반 Hi-Pass 단말기)의 보급률은 45% 이상으로써, 다 차종(6개 차종)에 대한 상-하류부 노변장치(RSE, Road Side Equipment)간 대용량 개별 구간통행속도 자료가 수집되고 있다. 또한 GPS 궤적을 수집하는 차량 및 스마트폰 내비게이션은 데이터의 규모를 축소시키기 위하여 도로구간별 개별 차량의 통행시간 또는 속도가 수집되고 있다. 따라서 대용량 개별 구간통행속도 자료를 이용할 경우, 도로구간별로 차별화된 신뢰성 있는 소통상태별 경계속도의 결정이 가능하다.

본 연구에서 제시되는 소통상태 경계속도 결정방법론은 비집계 자료기반으로 개발되며, ①(비집계 자료기반의 구간통행시간) 이상치 제거, ②(혼잡상태의 경계속도 결정을 위한) 소통상태의 단계 설정, ③(소통상태 단계별) 혼잡상태의 분리 즉, 경계속도의 결정으로 구성된다. 또한 개발되는 분석 방법론은 대용량 개별 통행시간 또는 속도 자료에 적합하도록 설계되며, 데이터의 검색과 동시에 혼잡상태의 결정이 수행되도록 설계된다. 이는 소통상태 정보제공의 실시간성 확보에 있어 주요한 기능이다.

### 이상치 제거

(Loop, 영상, 지자기, 레이더 등의) 지점검지기와 달리 DSRC와 같은 구간검지방식으로 수집되는 속도자료의 특성은 다르다. 지점검지기 기반 지점속도(Spot Speed)를 수집하게 되며, 측정오차, 기계오차 등 다양한 오차를 수반한다. 반면에 구간검지기 기반 속도자료는 RSE와 차량 단말기간의 통신시간을 이용하여 구간통행시간(Link Travel Time)을 측정하기 때문에 구간 통행시간 또는 속도 정보에 대한 신뢰성은 매우 높다. 두 데이터의 차이는 지점 속도와 구간 속도의 상이하게 다른 정보이다. 즉, 수집되는 통행시간 또는 속도의 특성은 다르게 나타난다. 따라서 개별 구간속도자료의 이상치 제거에 적합한 방법론이 요구된다.

DSRC 구간통행 속도 또는 시간 자료는 도로구간을 통과한 차량의 운행에 발생한 다양한 운전자의 행위에 소요된 시간을 포함한다. 고속도로의 경우 구간통행시간에는 휴게소 이용, 졸음쉼터 이용, 갓길정차 등의 비운전시간을 포함하며, 도시부의 경우 정차시간, 주차시간 등을 포함한다. 이러한 정상 주행상태에서 벗어나는 개별 차량의 증가된 통행시간은 Fig. 1에서와 같이 과분산이 발생하는 극명한 좌측편포의 특성을 보인다. 따라서 정규분포 기반의 필터링 기법에 적용되는 중위값(또는 평균값)과 표준편차를 이용한 식(1)과 같은 Filtering 기법을 적용할 수 없는 한계를 가진다. 예로서, Fig. 1의 경우 중위값( $t_{md}$ )은 444초, 표준편차( $\sigma$ )는 310초이며, 이상치의 범위는  $-486(= 444 - 3 \times 310)$ 초 보다 작은 경우와  $1,374(= 444 + 3 \times 310)$ 초 보다 큰 경우이다. 따라서 900~1,374의 통행시간은 정상치에 포함되는 바람지하지 않은 결과를 초래하게 되며, 이는 구간통행시간 값의 경우 과분산이 발생하기 때문이다. 이러한 과분산의 문제는 교통 신호등이 설치된 도로구간에서 적색 교통신호를 경험한 차량과 경험하지 않은 차량의 속도자료를 이용한 경우도 동일하게 발생한다. 또한, 구간통행시간을 구간속도로 변환( $t_i^{-1}$ )하여 적용하더라도, 증가된 통행시간의 속도는  $t_i^{-1} \rightarrow +0.0$ 으로 수렴하기 때문에 과분산의 문제는 감소할 수 있으나, 정상치와 이상치의 경계인 정규분포의  $t_{md} - 3.0 \times \sigma$ 는 0.0에 근접하거나 작은 경우가 발생한다.

$$\text{If } \frac{|t_{md} - t_i|}{\sigma} > 3.0 \text{ then } t_i = \text{outlier} \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $t_i$ 는 차량 통행시간의 개별 표본,  $t_{md}$ 는 통행시간 표본의 중위값,  $\sigma$ 는 통행시간 표본의 표준편차이다.

이상의 문제점을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 DSRC 구간통행시간의 검지정확도와 좌측편포 특성을 이용한 이상치 제거 방법론을 제시하도록 한다. 제안되는 방법론은 2단계로 구성된다. 1단계는 휴게소 이용 등으로 인한 증가된 통행시간을 제거하는 단계로서, Fig. 1과 같은 구간통행시간의 좌편향 특성을 활용한다. 다시 말해, 휴게소 등의 이용한 증가된 통행시간은 이산적이며 비동질적이라는 특성을 이용하였다. 참고로, 휴게소 이용시간의 경우 짧게 5분 길게는 3~4시간에 달하다. 반면, 휴게소 등을 이용하지 않은 통행시간은 증가된 통행시간에 비하여 동질적인 특성을 보인다. 따라서 (휴게소 이용 등으로) 증가된 구간통행시간과 (과속으로 인한) 감소된 구간통행시간의 대부분은 식(2)을 이용하면 제거되며, 과분산의 문제를 해결하게 된다.

$$\begin{aligned} \text{If } (t_{md} + t_g) \leq t_i \text{ then } t_i = \text{outlier} \\ \text{If } t_i \leq t_{\min}^r \text{ then } t_i = \text{outlier} \end{aligned} \quad \text{식(2)}$$

여기서,  $t_g = t_{md} - t_{\min}$ ,  $t_{\min} = \min\{t_i\}$ 이며,  $t_{\min}$ 은 IF  $t_{\min} \leq t_{\min}^r$  then  $t_{\min} = t_{\min}^r$ 으로 제약된다. 실제 고속도로 구간평균속도의 측면에서 유효한 최대 구간속도 이상의 속도는 대푯값 그룹으로서 역할을 상실한다. 따라서  $t_{\min}^r = 3,600 \times d / x_{\max}^r$ 로 제약될 수 있으며,  $d$ 는 RSE간 거리(km),  $x_{\max}^r$ 는 유효한 최대 구간속도(130.0 kph)이다. 추가로, 교통상태가 혼잡한 경우, 휴게소 등을 이용하지 않은 차량의 통행시간은 비 혼잡상태에서 보다 매우 동질적이다. 혼잡상태에서  $x_{\max}^r$ 을 이용하는 것은 문제가 되지 않는다.

2단계에서 이용되는 자료는 1단계에서 이상치가 제거된 통행시간 자료로 정의한다. 1단계에서 과분산의 문제가 어느 정도 해결되었기 때문에, 정규분포를 만족하는 상태로 이상치의 제거가 가능하다. 따라서 이상치는 식(3)과 같이 정의될 수 있다. 식(3)에서 이상치는 약 5%에 해당됨으로 95%의 정상치를 담보한다. 자유교통류 상태에서 속도의 중위속도는 100kph (95~105kph)를 보이고 저속차량은 80kph 이상을 보임으로, 대표 속도그룹으로서 대표성을 담보한다. 예로서, 중위속도 100kph 표준편차 15kph일 경우, 70.0~130.0kph의 속도분포를 보이게 된다. 따라서 정규분포의  $\pm\sigma$ 를 적용하는 것은 바람직하지 않다. 또한, 혼잡상태의 경우 차량의 속도는 비 혼잡상태에 비하여 매우 동질적임으로 대표성의 문제는 발생하지 않는다.

$$\text{If } \frac{|t_{md} - t_i|}{\sigma} > 2.0 \text{ then } t_i = \text{outlier} \quad \text{식(3)}$$

Fig. 2는 본 연구에서 제시된 이상치 제거 방법론은 적용한 결과를 시간대(5분 간격)에 따른 통행시간의 변화에 따라 보여 주고 있다. 개별차량의 통행시간은 소통상태에 226~950초까지 변화하고 있으며, 휴게소 등을 이용한 차량의 통행시간은 평균 통행시간에 300초 이상으로 증가된 행태를 보이고 있다. 일반적인 최소 휴게소 이용시간은 약 300초 이상임을 고려하면,



제안된 방법론의 이상치 제거 방법론은 합리적 결과를 도출한다고 판단된다. 추가로, 휴게소 이용률이 높은 도로구간(예, 안성휴게소 등)은 대표 통행시간으로 중위값을 적용할 경우, 통행시간이 낮게 평가된다. 따라서 본 연구에서 제시된 방법론과 같이 휴게소 이용 등으로 증가된 통행시간(이상치)을 제거한 후, 제거되지 않은 통행시간의 중위값을 재산정하여 대표 구간 통행시간으로 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

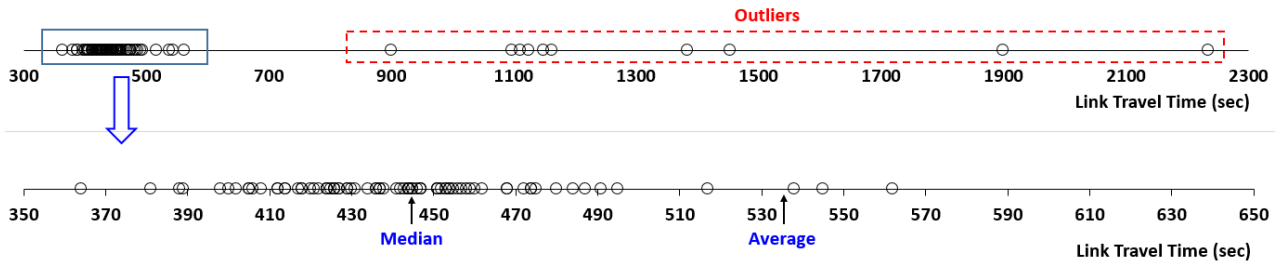


Fig. 1. Characteristics of link travel time

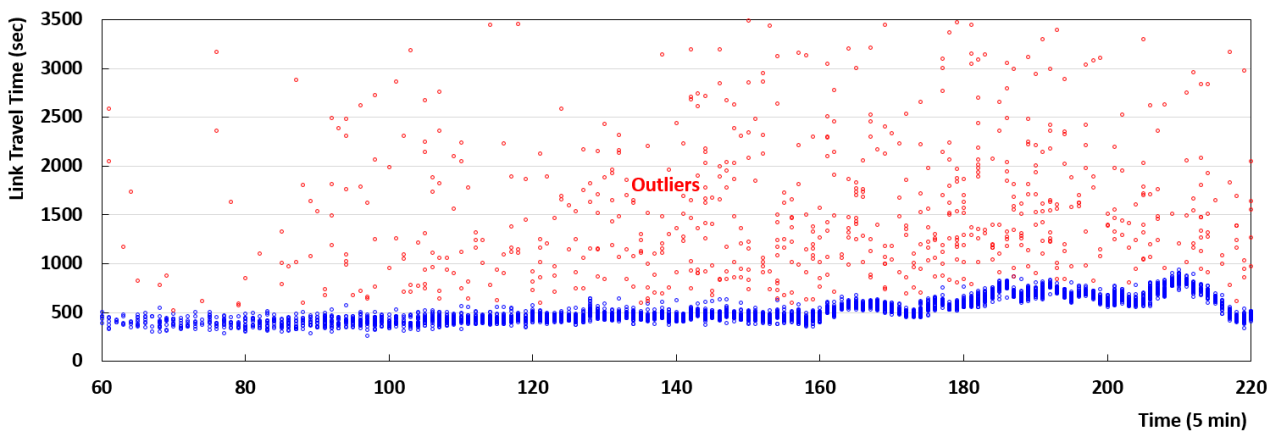


Fig. 2. Capability of the proposed filtering method

### 소통상태의 단계 설정

도로구간의 소통상태를 구분하기 위해서는 소통상태의 단계가 설정되어야 한다. 그리고 소통상태의 단계는 교통류의 상태를 기준으로 설정되는 것이 바람직하다. 교통류의 상태는 비혼잡 상태(US, Uncongested State), 혼잡상태(CS, Congested State), 그리고 US→CS 또는 CS→US의 전환과정에서 발생하는 혼재상태 또는 불안정 상태(MS, Mixed state or Meta-stable State)로 구분된다(Fig. 3(a)). Fig. 4는 시간에 따른 3단계 교통상태의 변화를 보여주고 있다. 그러나 MS의 경우 동시 교통류 상태(예, 서행)와 혼재 교통류 상태(예, 지체)로 구분될 필요가 있다. 또한 CS의 경우 가다서다(Stop and Go) 현상이 발생하는 상태(예, 정체)와 정체에 가까운 매우 느린 상태(예, 극심한 정체)로 구분할 필요가 있다. 특히, 교통류의 관점에서 정체와 극심한 정체는 큰 차이를 보인다. (혼잡에 의해 고밀도 충격파가 후방으로 전파되는) 1차 충격파는 정체가 후방으로 전파되는 경우이며, (속도가 매우 낮은 고밀도의 정체상태에서 후방으로 전파되는) 2차 충격파는 극심한 정체가 후방으로 전파되는 경우이

다. 특히, 통행시간은 속도의 역수( $x^{-1}$ )에 비례하기 때문에, 운전자의 체감 통행시간은 정체와 극심한 정체상태에서 크게 나타난다. 예를 들어, 10km의 도로구간을 30kph와 10kph로 주행할 경우 통행시간은 각각 20분과 60분이다.

이상의 교통류 상태 그리고 운전자의 체감 통행시간의 관점에서, 본 연구에서는 교통상태를 5단계로 구분하도록 하며, Fig. 3(b)는 개별 차량의 통행속도를 이용한 5개 소통상태의 의사결정과정을 보여주고 있으며, 비혼잡 상태인 UC와 4개 혼잡 수준(CL, Congestion Level)으로 구분된다. CL1과 CL2는 MS를 양분화한 것이며, CL3와 CL4는 CS를 양분화한 형태이다. US를 결정하기 위해서 경계 속도는 Fig. 4에서와 같이 자유교통류 속도에서 저속 차량의 속도를 고려하여 결정할 수 있다. 따라서 개별 차량들의 통행속도가 80kph일 확률이 의사결정 확률( $p_b$ ) 이상인 경우 UC로 결정되며, 본 연구에서  $p_b = 0.95$ 이며, 정규분포의  $\mu - 2 \times \sigma \sim \mu + 2 \times \sigma$ 의 구간에 해당된다. 4개 CL을 결정하기 위한 3개 경계속도는 LCS(I) (Light Congestion Speed Indicator), MCS(I) (Midium Congestion Speed Indicator), 그리고 HCS(I) (Heavy Congestion Speed Indicator)로 정의하며, MCS(I)는 MS와 CS의 경계로서 현행 혼잡속도의 기준에 해당한다.

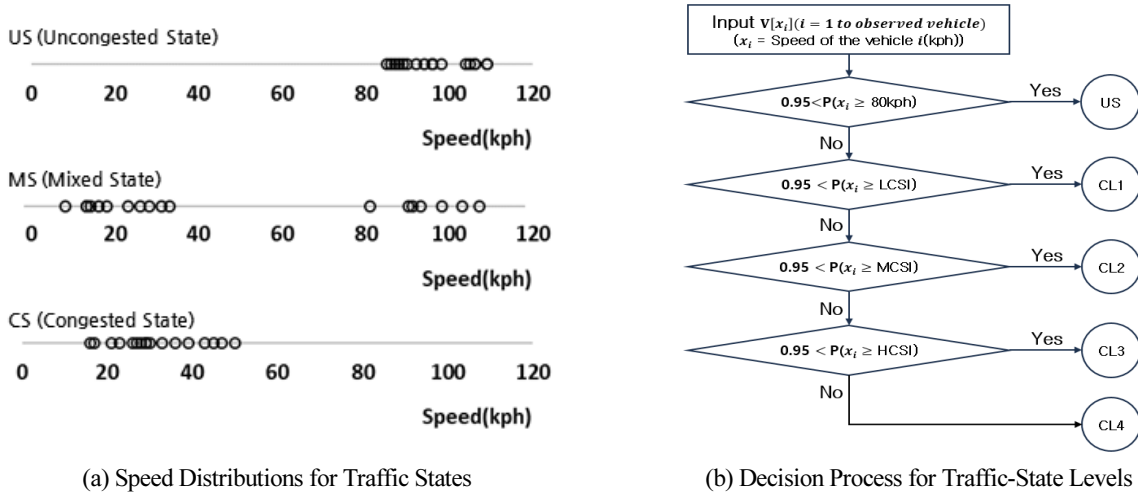


Fig. 3. Concepts of traffic states and traffic-state levels

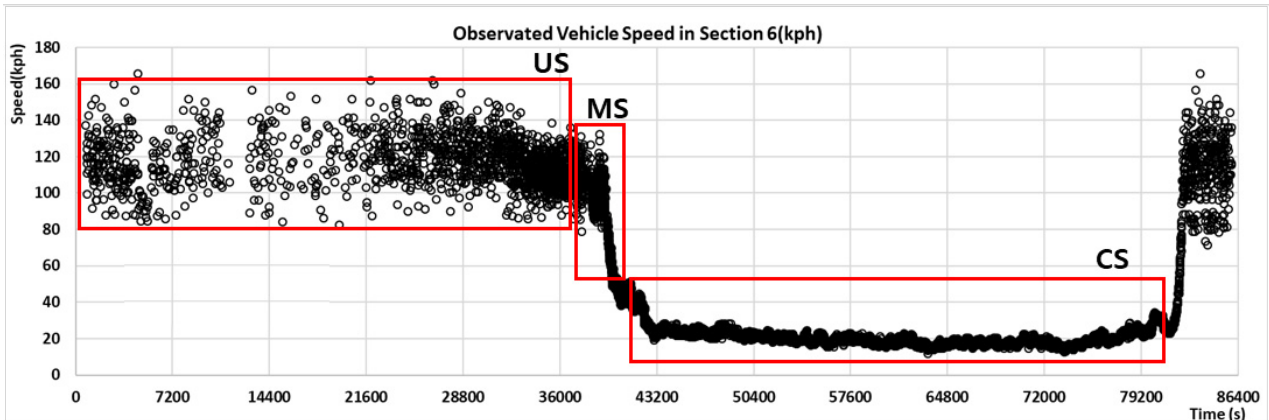


Fig. 4. Definition of three traffic-flow states

### 혼잡상태 분리 및 경계속도 결정

혼잡상태 분리 및 경계속도를 결정하기 위하여 US와 MS의 경계속도는 앞에서 설명한 바와 같이 80.0kph로 정의하며, 80.0kph이하는 혼잡으로 간주한다. 실제 적용에 있어 경계속도는 10kph 단위로 적용되며, 이는 정보의 단순화 및 운전자의 정보인지 능력과 관련된다. 따라서 속도구간(SS, Speed Section)은 10kph 간격의 8개로 설정하도록 한다. 이러한 집계방식은 대용량 개별 차량 구간속도를 처리함과 더불어 CL별 경계속도를 결정하는데 효과적인 방법이다.

Fig. 5는 MS와 CS에 대한 SS로 균등 분할된 속도분포를 보여주고 있다. MS와 CS에 대한 주 상태(PS, Primarily State)는 7 (60.0~70.0kph)과 2(10.0~20.0kph)로 나타나고 있다. 이는 MS와 CS가 명확히 구분되며, 그 경계 속도는 PS를 이용하여 효과적으로 결정될 수 있음을 의미한다. 또는 이는 교통와해(Traffic Break Down)가 지점 교통류 뿐만 아니라 구간 교통류 상태에서도 존재함을 의미한다.

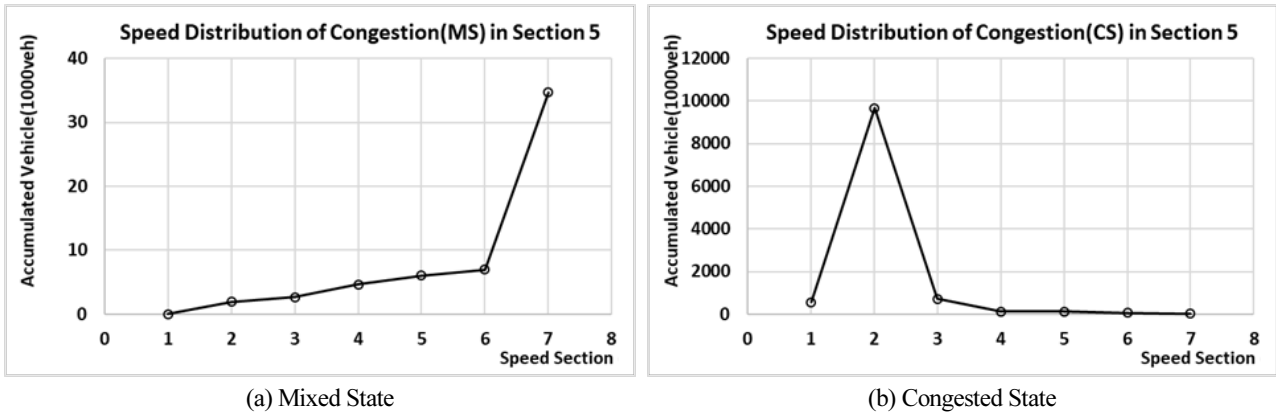


Fig. 5. Speed distributions for MS and CS

MS와 CS의 PS를 각각 결정하기 위하여, SS1(0~9kph)이 최소, SS7(60kph~)이 최대 상태가 되도록 속도구간에 대한 누적 함수를 식(4)와 같이 정의한다. Fig. 6(a)는 누적 함수의 형태를 보여주고 있으며, 상태의 전환점(Turning Point)에서 PM을 인식할 수 있음을 의미한다.

$$s_s = CS(x_i), \quad s = [1, 2, \dots, 7] \tag{4}$$

MS와 CS의 PS는 Fig. 6과 같이 식(5)을 이용하여 각각 결정된다.  $S_1$ 과  $S_2$ 을 잇는 직선식  $S(x_i)$ 을 산정한 후, Fig. 6(b)와 같이 각 SS와  $S(x_i)$ 의 절대 차이(Difference)가 최대인 지점으로 검지할 수 있다. Fig. 6의 경우, 검지된 SS는 Fig. 5(b)의 SS 2(즉, 10~19kph)이며, SS2는 PS로 결정된다.

$$PS = \arg \max |(S(x_i) - CS(x_i)) \times 10 (kph)| \tag{5}$$



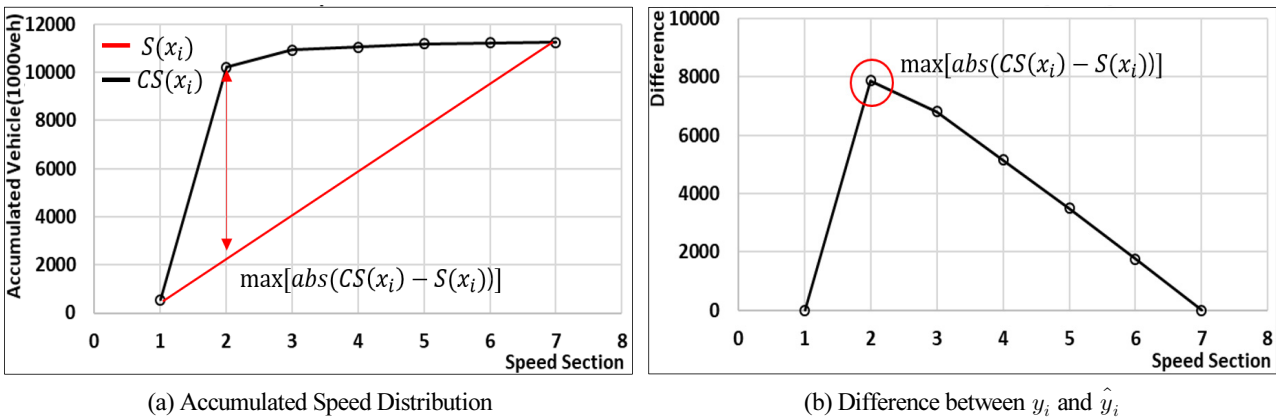


Fig. 6. Detection of primarily state for CS

이상과 같이 MS와 CS에 대한 PS가 각각 결정되면, LCSi, MCSi, HCSi는 MS와 CS의 PS를 이용하여, 다음과 같이 결정된다. LCSi의 SS는 MS에 대한 PS-1, HCSi의 SS는 CS에 대한 PS+1, 그리고 MCSi의 LCSi의 SS와 HCSi의 SS 간에 존재하는 SS 중 두 차이가 최소화되는 SS로 결정된다.

### 적용 결과

본 연구에서는 한국도로공사의 DSRC 시스템에서 수집되는 RSE간 개별 구간통행시간 데이터를 활용해 분석을 수행하였다. 공간적 범위는 Fig. 7과 같이 서해안고속도로 해미IC → 송악IC 방향에 설치된 8개의 RSE이다. 따라서 통행속도가 수집되는 RSE 구간은 7개이다. DSRC 통행속도 자료의 시간적 범위는 2019년 10월 1일 ~ 2020년 3월 31일이다.



Fig. 7. Test bed

주 상태(PS, Primarily State) 분석결과는 Table 4와 같다. 혼재 교통류 상태(Mixed state)의 PS는 속도구간 7(60.0~70.0 kph)로, 혼잡 교통류 상태의 PS는 속도구간 2(10.0~20.0kph)로 나타났으며, 모든 구간에서 동일하였다. 7개 도로구간에 대한 LCSi, MCSi, HCSi의 개별차량의 평균 속도는 Table 5와 같다. 전 구간에 대한 LCSi, MCSi, HCSi의 평균 속도(kph)는

55.15, 44.61, 34.33으로 각각 분석되었다. 실제 정보제공 및 혼잡상태 모니터링에 있어 LCSI, MCSI, HCSI는 60.0, 45.0, 30.0으로 각각 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 Table 1의 자유교통류 속도가 104.6인 미 FHWA의 경우와 유사한 결과를 도출하였다. LCSI는 FHWA의 Light Congestion의 경계인 66.6과 유사하였으며, HCSI는 FHWA의 Heavy Congestion의 경계인 29.0과 일치하였다. 반면, FHWA의 Medium Congestion은 본 연구의 MCSI 값인 45.0을 이용하여 2개로 분리되는 것이 소통상태 정보제공에 있어 보다 효과적이라 판단된다.

**Table 4.** Analysis results: primarily states for mixed and congested traffic states

Traffic States	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5	Section 6	Section 7
Mixed	7	7	7	7	7	7	7
Congested	2	2	2	2	2	2	2

**Table 5.** Analysis results: speed indicators

(unit: kph)

	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5	Section 6	Section 7
LCSI	57.2	53.4	57.5	55.7	54.0	56.2	52.1
MCSI	43.3	42.7	45.5	42.4	47.0	46.4	45.0
HCSI	34.7	32.5	35.7	37.7	32.1	32.2	35.4

## 결론

국내의 도로구간 소통상태 정보는 미국과 유럽의 4단계와 달리 3단계(원할, 지체, 정체)로 제공되고 있다. 그러나 우리나라는 선진국에 진입하였으며, 시민의 삶의 질에 대한 기대치는 향상되었다. 따라서 운전가가 체감하는 소통상태와 교통류 측면에서 소통상태를 고려한 도로구간 소통정보를 제공할 필요가 있다. 이러한 필요성에도 불구하고, 도로구간 소통상태를 결정하기 위한 방법론 및 소통상태 정의에 대한 연구는 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 교통류의 상태 특성과 운전자가 체감하는 소통상태를 고려한 소통상태의 단계를 설정하고, 소통상태 단계를 결정하기 위한 경계속도를 혼잡지수로 제시하였다.

제안된 방법론을 고속도로 구간에 적용한 결과, 미국과 유럽의 소통상태 기준과 유사한 결과를 도출하였으며, 분석결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 비혼잡 교통상태와 혼잡 교통상태의 경계속도는 80.0kph가 적합할 것으로 판단된다. 혼잡상태는 4개 상태로 분할할 수 있을 것으로 판단되며, 3개 경계속도(60.0, 45.0, 30.0kph)로 구분하는 것이 교통류 이론과 운전자의 체감 소통상태 측면에서 효율적이라 판단된다. 둘째, 현행 정체의 기준인 40.0kph는 실제 차량의 정체속도보다 높게 설정되었으며, 미 FHWA의 고속도로 기준과 유사하게 30kph로 조정하는 것이 실제 차량의 소통상태와 운전자의 체감 소통상태를 측면에서 보다 합리적이라 판단된다. 셋째, 국내의 지체기준(40.0~80.0kph)은 미 FHWA의 기준에 비하여 다소 넓게 설정되어, 운전자의 체감 소통상태를 반영하지 못 할 뿐만 아니라, 교통류의 혼재된 상태를 반영하기 어렵다고 판단된다. 따라서 극심한 혼잡 상태 이상의 혼잡상태는 60.0~80.0kph, 45.5~60.0kph, 30.0~45.5kph로 구분할 필요가 있다고 판단된다. 추가로 현행 3단계 소통상태는 60.0kph이상, 30.0~60.0kph, 30.0kph 이하로 조정하는 것이 효과적이라 판단된다.

본 연구는 고속도로 일부구간에 대하여 수행되었다. 따라서 전국 고속도로구간에 대한 분석을 통하여 노선별 속도특성을 반영한 소통상태 분석이 필요하다. 예를 들어, 영동선 원주JC~강릉JC와 같은 산간지역 고속도로의 경우 소통상태는 타 노선과 구분될 필요가 있다. 최근의 고속도로 혼잡은 연결로에서 발생하는 빈도가 높아지고 있다. 따라서 고속도로 연결로의 소통상태를 해석하지 위한 추가연구가 필요하다. 마지막으로, 본 연구에서 제시된 방법론은 국도, 지방도 및 도시부 도로구간에도 적용할 수 있도록 개발되었다. 따라서 고속도로 이외의 도로구간에 대한 적용 및 방법론의 고도화가 필요하다고 판단된다. 특히, 교통신호들이 설치된 도로구간의 경우 대기를 경험하는 차량과 대기를 경험하지 않는 차량으로 소통상태가 양분화되며, 본 연구에서 제시된 방법론은 집계자료가 아닌 비집계기반 분석방법론을 적용함으로써 보다 정확하게 소통상태를 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업의 연구비지원(21TLRP-B148966-04)에 의해 수행되었습니다.

## References

- [1] Christidis, P., Rivas, J.N.I. (2012). Measuring road congestion. Institute for Prospective Technological Studies (IPTS), European Commission Joint Research Centre.
- [2] GyeongGi-Traffic-Information-Center, <https://gits.gg.go.kr/web/trafficInfo/webMapInfo.do>, 2021.05.01.
- [3] Korea Transport Institute (2017). Estimation for Road Traffic Congestion Costs in 2017, pp. 60-80.
- [4] Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI) (2019). Establishment of Mid- to Long-term Highway Traffic Operation Improvement Plan and Analysis of Related Indicators, Korea Expressway Corporation.
- [5] Lee, S., Ko, E., Jang, K., Park, S., Park, J., Yun, I. (2020). "Study on the adequacy and improvement of the threshold speed of expressway congestion." The Korea Institute of Intelligent Transport Systems, Vol. 19, No. 5, pp. 40-51.
- [6] MOLIT (2020). Transport and Logistics
- [7] Neudorff, L.G., Randall, J., Reiss, R.A., Gordon, R.L. (2003). Freeway management and operations handbook (No. FHWA-OP-04-003). United States. Federal Highway Administration. Office of Transportation Management, U.S.
- [8] Qu, T. (2010). Investigating the effect of freeway congestion thresholds on decision-making inputs (No. UTCM 09-12-11). Texas Transportation Institute, U.S.
- [9] ROADPLUS, <http://www.roadplus.co.kr/main/main.do>, 2021.05.01.